

文章编号: 0258-7025(2003)11-1015-04

双频干涉共焦台阶高度测量系统

林德教¹, 柳忠尧¹, 张蕊¹, 殷纯永¹, 徐毅²

(¹ 清华大学精密仪器与机械学系精密测量技术与仪器国家重点实验室, 北京 100084)
² 中国计量科学研究院, 北京 100013)

摘要 提出了一种以低频差横向塞曼双频激光器作光源的外差干涉共焦显微测量系统,该系统通过共焦显微的光强测量进行粗定位,其轴向台阶高度测量范围在 5 μm 以上。同时采用相位测量技术,实现了对半波长的 3600 细分,从而使测量分辨率达到 0.1 nm。由此同时满足了高测量精度和较大测量范围的要求。实验结果表明系统在没有恒温的普通实验室条件下 1 h 内的漂移不超过 15 nm,与差动纳米双频干涉仪的比对结果线性系数在 0.9999 以上,非线性误差约 10 nm。

关键词 测绘仪器;相位测量;外差干涉;共焦显微术

中图分类号 TH 744.3 **文献标识码** A

System to Measure Step Height by Combining Dual-frequency Interferometry and Confocal Microscopy

LIN De-jiao¹, LIU Zhong-yao¹, ZHANG Rui¹, YIN Chun-yong¹, XU Yi²

(¹ State Key Laboratory of Precision Measurement Technology & Instruments,
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)
² National Institute of Metrology of China, Beijing 100013, China)

Abstract A novel measuring system is proposed in this paper, which is based on transverse Zeeman laser with low beat frequency and combined heterodyne interferometry and confocal microscopy. The range of height measurement reaches over 5 μm in term of intensity derived from the confocal system. Meanwhile the phase measurement technology is adopted to divide half wavelength by a factor of 3600, hence a resolution of 0.1 nm can be attained. Accordingly the requirements of both high measurement resolution and relatively large measurement range are met simultaneously. The experimental results show that in ordinary laboratory condition, without constant temperature, the shift of phase measurement is about 15 nm. Calibration with differential dual-frequency interferometer gives the lineally correlation coefficient of 0.9999 and nonlinearity of about 10 nm.

Key words measurement instruments; phase measurement; heterodyne interferometry; confocal microscopy

1 引 言

共焦扫描显微系统不仅可以抑制成像中弱杂散光,而且在相同成像条件下,其轴向分辨率为普通显微系统的 1.4 倍,具有三维层析成像功能,已经广泛应用于生物、医学、工业探测以及计量学领域^[1~3]。但普通的共焦显微镜其轴向分辨率仍然只停留在亚

微米量级,且光源的噪声和漂移直接影响测量结果。为此提出了差动共焦式纳米级光聚焦探测系统^[4],使测量分辨率达到 2 nm,由于仍采用光强测量方法使得测量精度受光强曲线非线性的影响。

外差干涉技术也被广泛应用于表面形貌测量领域,如采用 Linnik 显微术作集成电路表面结构成像^[5]、双光束声光调制外差形貌仪等^[6]。本文提出

收稿日期:2002-07-16;收到修改稿日期:2002-08-28

基金项目:国家自然科学基金专项基金(No. 50027002)和清华大学博士生创新基金联合资助项目。

作者简介:林德教(1976—),男,清华大学精密仪器与机械学系博士研究生,主要从事激光外差干涉计量及其相关技术的研究。E-mail: lindj99@mails.tsinghua.edu.cn

了一种融合双频激光干涉和扫描共焦显微技术的方法,提供一种双频共焦显微台阶高度测量装置,可对微电子掩模板等台阶高度进行定量测量,兼有高分辨和较大量程测量的特点。

2 工作原理

双频共焦干涉测量系统如图 1 所示:低频差横向塞曼 He-Ne 激光器 1 输出正交线偏振的双频激光,由 BS 2 将输出光分为两束,反射光检偏后由探测器 3 接收形成参考信号,透射光通过法拉第盒 4 和快轴沿 22.5° 方向放置的 $\lambda/2$ 波片 5 使光的偏振方向旋转 90° ,可以避免光回射对激光器的影响。再经过小透镜 6 会聚于针孔 7 上,经过针孔 7 滤除杂散光后由胶合透镜 8 将光束扩成平行光束。平行光束通过 PBS 9 进行偏振分光,其中反射光作为参考光,透射光作为测量光。参考光先经过快轴沿 45° 放置的 $\lambda/4$ 波片 10 后被四面体 11 反射,反射光又经过 10 使得参考光的偏振方向旋转 90° ,再次经过 9 时变为透射光;测量光经过快轴沿 45° 放置的 $\lambda/4$ 波片 12 和无限筒长的显微物镜 13 投射在待测样品表面 14,测量光经样品反射后再经过 12 后偏振方向也旋转 90° ,再次经过 9 后被反射,并与参考光合光。合成光经过光阑 19 和会聚透镜 20 后由探测器 21 检偏接收形成相位测量信号,与参考信号进行比较,从而使双频共焦显微镜的分辨率提高到

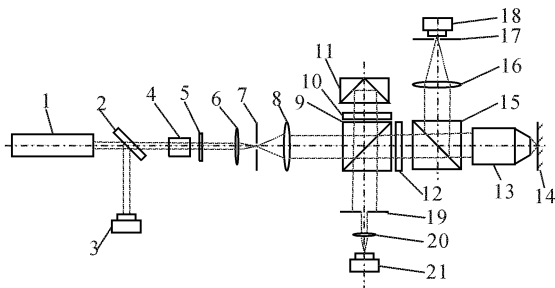


图 1 双频共焦干涉测量系统原理图

1: 横向塞曼激光器; 2: 分束器; 3, 18, 21: 光电探测器; 4: 法拉第盒; 5: $\lambda/2$ 波片; 6: 小透镜; 7, 17: 针孔; 8, 16: 胶合透镜; 9: 偏振分光镜; 10, 12: $\lambda/4$ 波片; 11: 四面体; 13: 显微物镜; 14: 待测样品; 15: 分光镜; 19: 小孔光阑; 20: 会聚透镜

Fig. 1 Scheme of measuring system combining dual-frequency interferometry with confocal technology

1: transverse Zeeman laser; 2: beam splitter; 3, 18, 21: photoelectronic detector; 4: Faraday box; 5: half wave plate; 6: lens; 7, 17: pinhole; 8, 16: achromatic lens; 9: PBS; 10, 12: quarter wave plate; 11: cube corner; 13: microscopic object; 14: sample; 15: BS; 19: diaphragm; 20: lens

亚纳米量级。

由样品表面返回的部分光被 BS 15 反射并由胶合透镜 16 会聚经针孔 17 后,入射到探测器 18 接收,形成光强测量信号,通过锁相放大器得到光强值,由光强变化得到轴向位移偏离焦点量的信息,从而克服纯相位测量单值性问题,使纵向测量量程达到 $5 \mu\text{m}$ 以上,同时还有效地减少杂散光干扰。

本系统的相位测量原理如下:

假设横向塞曼激光器输出激光的偏振矢量为

$$E_0 = \bar{i} E_{01} \sin(2\pi f_1 t + \phi_{01}) + \bar{j} E_{02} \sin(2\pi f_2 t + \phi_{02}) \quad (1)$$

式中,各变量的含义为: \bar{i}, \bar{j} 分别为出射平行分量 p , 垂直分量 s 的偏振方向矢量; E_{01}, E_{02} 分别为 p, s 分量的振幅; f_1, f_2 分别为 p, s 分量的频率,频差 $\Delta f = f_1 - f_2$; ϕ_{01}, ϕ_{02} 分别为 p, s 分量的初始相位。

E_0 经过 PBS 分光后,反射光为 s 分量,形成参考光,透射光为 p 分量,形成测量光,分别经过参考和测量光路后再由 PBS 合光。由于参考光往返经过 $\lambda/4$ 波片两次,且 $\lambda/4$ 波片的快轴与偏振方向成 45° ,所以参考光的偏振分量分别旋转了 90° ,即由 s 偏振变成 p 偏振;同理测量光则由 p 偏振变成 s 偏振。所以,当参考光由四面体返回时透过 PBS,测量光由待测样品表面反射返回时由 PBS 反射,二者重新合成一束光。可将经过 PBS 合光之后参考光和测量光的偏振矢量 E_1 和 E_2 写为

$$E_1 = \bar{i} K_1 E_{02} \sin(2\pi f_2 t + \phi_{02} + \phi_{12}) \quad (2)$$

$$E_2 = \bar{j} K_2 E_{01} \sin[2\pi(f_1 + 2f_D)t + \phi_{01} + \phi_{22}] \quad (3)$$

其中, $K_1 = 1 - \alpha_1, K_2 = 1 - \alpha_2, \alpha_1, \alpha_2$ 分别为 s, p 分量在干涉仪中的光强损耗因子; ϕ_{12} 为参考光路位相增量, ϕ_{22} 为测量光路在样品不同时的位相增量。 f_D 为样品扫描过程中引起的多普勒频移。

E_1, E_2 检偏后由探测器接收形成测量信号 E_m, I_m , 可描述为

$$I_m = I_0 K_1 K_2 \sin[2\pi(f_1 - f_2 + 2f_D)t + \phi_{01} + \phi_{22} - (\phi_{02} + \phi_{12})] \quad (4)$$

式中, $I_0 \propto E_{01} E_{02}$ 。

从横向塞曼激光器的输出直接取得的参考信号 I_r 为

$$I_r = I_0 K_0 \sin[2\pi(f_1 - f_2)t + \phi_0] \quad (5)$$

由于 $\phi_{01}, \phi_{22}, \phi_{02}, \phi_{12}, \phi_0$ 均为常数,所以 I_m 与 I_r 比相后可得相位差 $\Delta\phi$ 为

$$\Delta\phi = \int_0^t 2\pi f_D \cdot dt = \int_0^t 2 \frac{v}{\lambda} \cdot dt \times 360^\circ = \frac{720s}{\lambda} \quad (6)$$

式中, $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, 为 He-Ne 激光波长; s 为被测位移量; $\Delta\phi$ 的单位为度。由式(6) 可得: $s = \frac{\Delta\phi}{720} \cdot \lambda$, 所以当相位测量分辨率为 0.1° 时, 位移测量分辨率达到 0.1 nm 。

然而, 相位测量方法只能在半个波长量程范围内有效。为了提高测量量程, 利用共焦显微系统对光强进行了同步测量, 这样就在满足较大测量范围的同时实现了台阶高度测量的高分辨。

3 实验

在无恒温无隔振的普通实验室条件下, 系统的测量稳定性如图 2 所示, 在 1 h 内相位漂移约 15° , 对应 13.2 nm 。

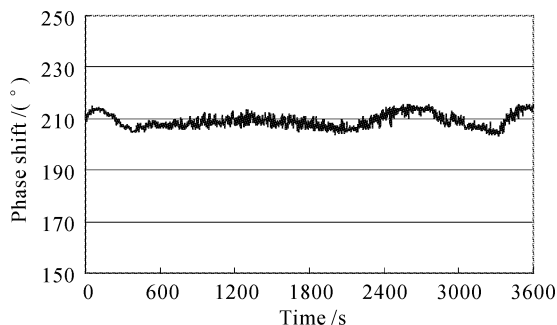


图 2 共焦外差干涉系统稳定性实验结果

Fig. 2 Stability of confocal heterodyne interferometric system

采用差动双频外差干涉仪 DDFI^[7] 标定本系统的测量准确性, 方法如图 3 所示。由压电陶瓷 PZT 驱动微位移工作台, 分别用共焦外差显微干涉系统和差动双频纳米干涉仪 DDFI(该干涉仪经计量院标定, 测量分辨率为亚纳米, 非线性误差 2.8 nm) 进行测量, 采用计算机进行测量同步控制, 结果也由计算机采集。图 4 给出了一组实验曲线, 横坐标为 PZT 驱动工作台时 DDFI 的测量结果, 纵坐标为共焦显微干涉系统的相位测量结果。实验结果表明在较短时间内相位测量的非线性误差不得超过 10 nm , 该误差主要来源于实验室未有恒温条件及偏振分光镜, $\lambda/4$ 波片等光学器件带来的误差等。

本文提出的共焦干涉系统可以应用于台阶高度等具有相位突变的形貌测量。这是因为在台阶位置得不到连续的干涉信号, 所以给不出大数信息, 因而本系统用光强信息来取代干涉测量的大数部分, 小数部分由干涉相位测量结果给出, 从而实现台阶高

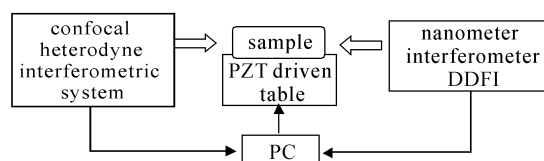


图 3 借助于纳米干涉仪标定方案框图

Fig. 3 Scheme of calibration with nanometer interferometer

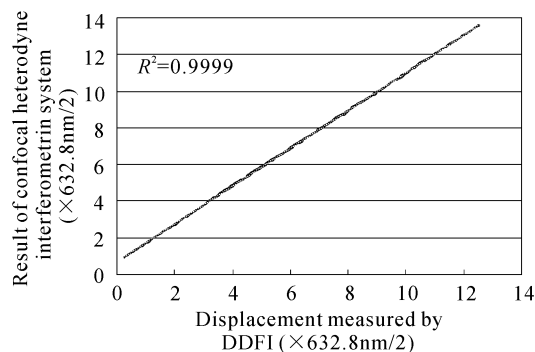


图 4 共焦外差干涉系统相位测量与纳米干涉仪 DDFI 比对结果

Fig. 4 Calibration result between confocal heterodyne interferometric system and DDFI

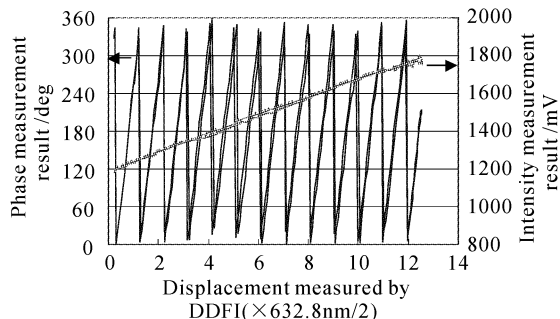


图 5 相位和光强融合测量结果

Fig. 5 Measuring result combining phase and optical intensity

度的精确测量。图 5 为融合共焦干涉显微测量系统的光强测量和相位测量的实验结果, 横坐标为 PZT 运动时纳米干涉仪的标定值, 纵坐标左边为本文提出的共焦干涉系统的相位测量结果, 右边为光强测量结果, 可以看出在光强单调递增过程中相位作周期性变化, 所以综合二者的信息可以准确地判定台阶的高度值。

4 结论

该外差干涉共焦显微测量系统在实现共焦测量保证 $5 \mu\text{m}$ 纵向测量范围的基础上, 采用相位细分

技术,实现了对半波长的 3600 细分,从而使测量分辨率达到 0.1 nm。由此同时实现了高测量精度和较大测量范围的要求,可用于微电子掩膜板台阶高度等具有突变形貌的测量。共焦系统光强测量采用锁相技术有效克服了外来杂散光的影响,使系统具有较强的抗干扰能力。实验结果表明系统在没有恒温的普通实验室条件下 1 h 内的漂移不超过 15 nm,与纳米干涉仪的比对结果线性相关系数在 0.9999 以上,短时间的测量非线性误差不超过 10 nm。该系统不仅可以满足微电子技术近期发展的需要,也可以进一步推广应用。

参 考 文 献

- 1 Min Gu. Principles of Three-dimensional Imaging in Confocal Microscopes [M]. Beijing: New Era Press, 2000 (in Chinese)
- 2 Yang Lisong, Wang Guiying, Wang Jiangang *et al.*. Research on confocal scanning imaging [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1999, **A26**(10): 931~934 (in Chinese)
- 3 Tang Zhilie, Liang Ruisheng, Zhu Xiaosong *et al.*. Image property of polarized confocal scanning microscopy [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(8):1118~1122 (in Chinese)
- 4 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):232~234 (in Chinese)
- 5 D. M. Gale, M. I. Pether, J. C. Dainty. Linnik microscope imaging of integrated circuit structures [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(1):131~148
- 6 C. C. Huang. Optical heterodyne profilometer [J]. *Opt. Eng.*, 1984, **23**(4):365~370
- 7 Chunyong Yin, Gaoliang Dai, Zhixia Chao *et al.*. Determining the residual nonlinearity of a high-precision heterodyne interferometer [J]. *Opt. Eng.*, 1999, **38**(8):1361~1365

第十六届全国激光学术会议在上海召开

由中国电子学会和中国光学学会联合主办、中国科学院上海光学精密机械研究所承办的第十六届全国激光学术会议于 2003 年 10 月 19~22 日在上海举行。有来自国内约 90 个从事激光技术研究的院校和公司的 300 多名代表参加了会议。相关部门的领导也参加了会议。会议参会人数众多,报告精彩,气氛热烈,取得了圆满成功。

全国激光学术会议是国内激光学术界的盛会,两年一次由中国电子学会和中国光学学会联合主办,轮流主持,本次会议由中国电子学会主持。本次会议自今年年初筹备以来,作者投稿踊跃,论文质量上乘,经严格审稿,共录用论文 267 篇,将由《中国激光》以增刊形式出版。

会议由大会主席、华北光电技术研究所周寿桓研究员主持,大会副主席、中国科学院上海光学精密机械研究所朱健强所长致欢迎辞,大会主席、中国科

学院上海光学精密机械研究所范滇元院士作大会筹备情况的报告。刘盛纲、王育竹等 5 位院士和郭光灿、彭翰生等 7 位专家作了大会特邀报告。会议设有 4 个分会场,在为期 2 天的报告中,会议代表分别就激光物理与激光器件;超短脉冲激光及非线性光学;激光应用;光束传输与控制,材料、薄膜及元器件等专题进行了讨论及交流,其中有很多精彩的报告使得会场座无虚席。会议期间国内 4 家从事相关产品研发和生产的公司和厂商还举办了产品展示会。会后,有将近 100 名代表参观了中国科学院上海光学精密机械研究所。

这次会议为我国激光与光电子领域的新老学者提供了一个探讨新思想、交流新技术的平台,在一定程度上促进了学术领域的科技创新和科技成果的转化。

(王体辉)