

文章编号 1004-924X(2003)03-0245-05

# 激光干涉微轮廓测量仪

宋 康, 赵玉龙, 蒋庄德

(西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 基于 Michelson 干涉仪测量原理研制的微轮廓测量仪, 载物平台采用步进电机和压电陶瓷 (PZT) 两级闭环驱动与定位, 步进电机用于快速粗定位和扩大测量范围, 压电陶瓷用于精密定位, 重复定位精度为 10 nm; 测量光路采用共干涉系统, 对机械振动, 温度漂移不敏感; 测量范围 20 mm × 20 mm × 0.4 mm, 纵向分辨率为 0.32 μm, 横向分辨率为 0.5 μm。

**关键词:** 微轮廓测量仪; 压电陶瓷; 激光干涉

**中图分类号:** TH744.3 **文献标识码:** A

## Laser profilometer

SONG Kang, ZHAO Yu-long, JIANG Zhuang-de

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The laser profilometer based on the Michelson interferometry principle, has its platform driven by a stepper motor for fast rough position and expansion of measuring range, and by piezoelectric ceramic for precision positioning with a repetitive positioning accuracy of 10 nm. A common path interference system, which is not sensitive to mechanical vibration and temperature drift, is used in the measuring optical path. The laser profilometer has a measuring range of 20 mm × 20 mm × 0.4 mm, a longitudinal resolution of 0.32 μm, and a lateral resolution of 0.5 μm.

**Key words:** profilometer; piezoelectric ceramic; laser interferometry

## 1 引言

随着微机电系统 (MEMS), 微电子, 生物医学, 材料及信息科学等前沿领域的发展, 出现了超光滑或有超精细结构的表面, 特别是超大规模集成电路硅片表面、大功率激光器谐振腔表面、各类软质金属材料表面结构, 而这些超精表面粗糙度均方根值已达到亚微米及纳米量级, 高分辨率光学轮廓仪以其非接触无损检测表面, 且利用相移

技术, 提高测量精度, 已在高科技领域得到广泛应用<sup>[1]</sup>。

激光干涉微轮廓测量仪采用共光路干涉, 共光路使两束相干光经过相同的光路, 故外界环境干扰如机械振动, 空气扰动等对它们的影响相同, 不会引起附加光程差, 因此外界环境的变化对测量结果无影响, 而且不需要标准参考反射镜, 这对于在线 (位) 检测仪器非常重要, 能对超精表面微观轮廓进行绝对测量。

收稿日期: 2003-02-24; 修订日期: 2003-03-25.

基金项目: 2000 年教育部科学技术研究重点资助项目 (No. 00117)

## 2 测量工作原理

基于 Michelson 激光干涉测量原理,其测量光路图如图 1 所示。

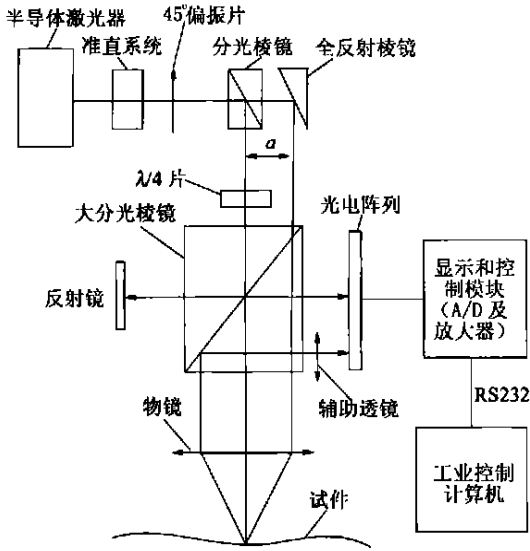


图 1 集成测量光路

Fig. 1 Integrated measurement optical path

He-Ne 激光器(1 mW, 632.8 nm)发出的双频激光束经准直系统后,通过偏振片成为单频偏振光,再由半透半反分光棱镜分为两束光,反射光束通过  $\lambda/4$  片后再透过半透半反大分光棱镜,经由物镜的光轴垂直会聚到被测试件的表面,称此光束为主光束<sup>[2]</sup>。

对于光洁度较高的表面,主光束在半透半反大分光棱镜处产生的反射光束射到反射镜上,反射镜相当于迈克尔逊干涉仪中的参考镜,经反射后又透过大分光棱镜,此光束是参考光束;主光束中的透射光束仍然穿过物镜聚焦于试件表面,经反射后重新回到大分光棱镜的分光面,在分光面处反射并与参考光束发生干涉,从而在光电阵列接收板上形成干涉条纹光斑,通过条纹的变化即可反映微观轮廓高度的变化,最后通过相应的光电信号处理以及 RS232 串口通讯,把采样得到的微观轮廓高度值送入工控机,由编制的程序进行 3D 图形显示和处理,绘制出表面微观轮廓图。

遵循基本的干涉理论,干涉光强由参考光路与测量光路二者的光强进行合成<sup>[3]</sup>:

$$I_{\text{int}} = I_{\text{ref}} + I_{\text{mea}} + 2 \sqrt{I_{\text{ref}} I_{\text{mea}}} \cos(\phi_{\text{ref}} + \phi_{\text{mea}})$$

$$s_{\text{mea}} = 2 / \phi_0 \times l \times n = 2 \lambda / \phi_0 \times i \times s, \quad (1)$$

其中:  $i$  为干涉系数( $i = 2$ );  $s$  为测量镜位移,为光程差;  $n$  为折射率(一般认为在空气中,  $n = 1$ ),由此可得位移与光程差的关系,由式(2)表示:

$$s = (\phi_0 / i \times n) \times \Delta\phi, \quad (2)$$

设电子细分的系数为  $e$ ,则位移  $s$  的测量分辨率可由式(3)表示为:

$$ds = (1/e \times i) \times (\phi_0/n), \quad (3)$$

采用 He-Ne 激光( $\phi_0 = 632.8 \text{ nm}$ ),取  $n = 1, i = 2, e = 1$ ,则垂直分辨率表示为式(4):

$$ds = 316.4 \text{ nm} / 2 = 158.2 \text{ nm} = 0.1582 \mu\text{m}, \quad (4)$$

即光学微轮廓仪的垂直分辨率为  $0.1582 \mu\text{m}$ 。

## 3 光学微轮廓测量仪测量控制系统软件和硬件设计

### 3.1 光学微轮廓测量仪硬件系统

(1) 微轮廓仪机架平台;

(2) 二维( $XY$ )宏动工作平台,包括步进电机及其驱动器;

(3) 二维( $XY$ )精密定位工作台及配套控制驱动模块;

(4) 高精度激光位移传感器及配套控制器;

(5) 工业控制计算机。

如图 2 所示为研制的激光干涉微轮廓测量仪实物照片。

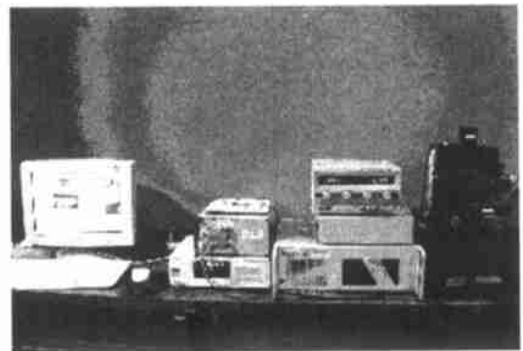


图 2 激光干涉微轮廓测量仪

Fig. 2 Optical profilometer

所有的机加工零件都经过发黑防腐蚀处理,在测量过程中,高精度位移传感器不动,在  $XY$  平面内移动被测对象,用激光点阵扫描的方式测量

被测对象。

步进电机闭环控制系统采用带 DSP (美国 AD 公司的 AD2181 芯片, 33 MHz) 的运动控制器, 系统采用主从式控制结构, 主机 (工控机) 负责人机交互的管理, 数据采集, 数据 (图像) 处理和控制系统实时监控, 下位机 (运动控制器) 用来完成控制的所有细节, 包括对步进电机的实时控制, 对各种过程信号, 如原点, 限位和终端等信号的检测并自动做出反应等, 这样, 工控机与运动控制器上的 DSP 共同构成了双 CPU 的硬件结构, (下位机脱离上位机工作, 解放了上位机。) 这种系统具有集成度高, 可靠性高, 系统柔性大且易于实现网络功能等, 是非常好的控制结构。步进电机采用直线光栅尺做位置反馈元件, 这样可以消除机械传动装置上存在的一切间歇, 并且该控制系统还可以对机械传动链出现的误差进行补偿, 达到真正全闭环功能, 实现高精度位置控制。压电陶瓷 (PZT) 采用直流模拟电压输入, 闭环控制, 利用运动控制器上的 D/A 通道, 其转换精度为 16 位, 最小可达到 10 nm 的步进分辨率, 从而实现精密定位。

### 3.2 程序设计思想

微轮廓测量仪控制系统软件的开发采用微软的小型快速可重用组件技术 COM (Component object model), 也就是 ActiveX 控件技术; 它充分利用已有的代码资源, 就是我们常说的代码重用, 这样提高了开发效率, 其模块化的设计使系统更加易于维护和升级。ActiveX 是一种基于 Microsoft Windows 操作系统的组件集成协议, 通过 ActiveX, 开发者和终端用户可以选择由不同的开发商发布的面向应用程序的 ActiveX 组件, 并将它们无缝地集成到自己的应用程序中, 完成特定的目的, 例如, 基于 ActiveX 组件, 开发者可以通过不同的开发商选择数据库访问组件, 数值分析组件, 以及图形组件等, 并最终将它们集成在一起, 实现需要的功能, 这不但提高了开发效率, 而且肯定更加易于使用和维护。VB 作为自动化控制器可以很方便地使用, 生成和消除 ActiveX 组件<sup>[4]</sup>。

本控制系统主要利用了 VB6 工具箱里的几个控件: (1) Timer control, 主要用于控制 X, Y, Z 三个方向步进电机的正向进给, 停止, 反向进给,

正反向点动进给 (最小进给量为 1  $\mu\text{m}$ ) 等等; (2) 微软的 MSComm 控件可实现工控机和高精度激光位移传感器之间的 RS-232 串口通讯, 从而采集微观轮廓的 Z 向高度值; (3) National instruments 的 CWGraph3D 控件生成微小器件的微观轮廓的 3 维图形。另外, 程序里需要的延时程序利用 Windows 的 API 函数 GetTickCount () 很容易实现, 时间控制精度能达到 1 ms。

## 4 实验数据及分析

### 4.1 测试对象和测量参数的设定

检测对象是本所 MEMS 工艺超净室的刻蚀硅片和某一刻录光盘表面, 扫描点数为 100  $\times$  100, 共计一万个点, X, Y 方向的步距是 50 nm, RS232 串口通讯协议设为: "19 200, n, 8, 1", 其中图 3 为刻蚀硅片表面的扫描 3D 图, 图 4 为某一光盘扫描 3D 图。

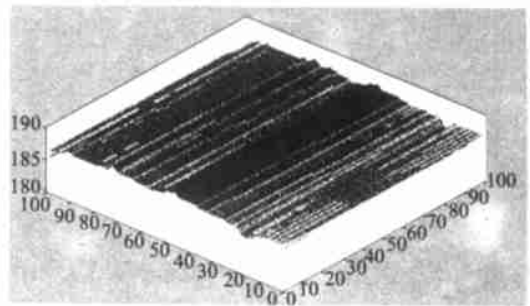


图 3 已刻蚀的硅片表面的 3D 图

Fig. 3 3D surface of the etched silicon

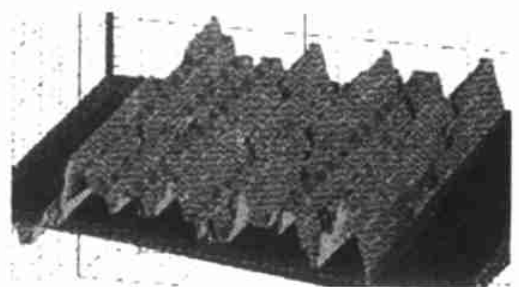


图 4 某一光盘扫描 3D 图

Fig. 4 3D Topography of a disk

### 4.2 误差分析

仪器存在的误差包括:机械振动、机械装置误差和光学电气误差以及环境因素带来的误差。具体有:光学微轮廓测量仪底座平台的水平度误差,步进电机 XY 轴在整个行程上的平直度误差,激光测头安装的垂直度误差等;激光噪声,光学系统成像引入的误差,环境温度折射率的误差,光斑形状,PSD 传感器和处理电路等引入的误差;RS-232 串口通讯误码率引入的误差,数据处理,测量对象和测量方案引入的误差;环境温度漂移,湿度变化等导致的误差。将激光光源和后续信号处理单元远离干涉现场,使干涉仪模块化、无源化,令热、电、磁对干涉光束的扰动降到最低。采取对比标定和多次计算平均,以及采用电子共模抑制技术可以消除系统误差并抑制大部分随机噪声。对几乎所有高分辨力仪器来说,除了其工作原理外,最后限制分辨力提高的是仪器本身的噪声,一般认为此类仪器的分辨力应为它在实际工作条件下噪声的 1.5~2 倍<sup>[5]</sup>。

### 4.3 系统的纵向分辨率及横向分辨力

对于超光滑表面测试,系统的纵向分辨力是系统能分辨表面轮廓纵向高度变化的最小值,横向分辨力是表面轮廓两相邻最小单峰间距在中线上的投影<sup>[6]</sup>。由图 5 和图 6 所示,可见该系统的纵向分辨率为 0.32 μm,水平分辨率为 0.5 μm。

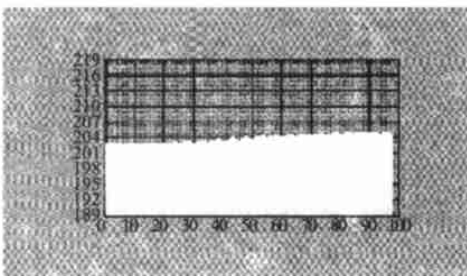


图 5 刻蚀硅片某一横截面图

Fig. 5 Transverse cross section of the etched silicon

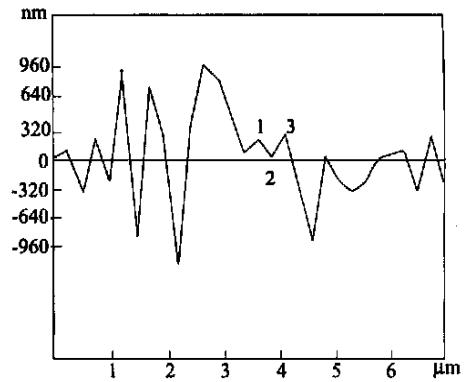


图 6 微观轮廓放大图

Fig. 6 Enlarged image of micro-profile

### 4.4 测量重复性验证

在精密测量中,重复性是一个非常重要的指标,对超高分辨力的仪器尤其重要,因为特别高的灵敏度要同时具有高可靠性才有实用价值,而且它也在一定程度上反映仪器的实用分辨力。对某一硅片的一微沟道,在 24 h 的时间间隔中进行了两次扫描测量,将其表面粗糙度的主要参数进行了计算比较,其相对误差小于 7%,可见系统的重复性很好,从而验证系统是稳定可靠的,重复性测量结果如表 1 所示。

表 1 测量的粗糙度值

Tab. 1 Measurement of roughness

测量时间	$R_a$	$R_z$	$R_v$
第一次	0.30 μm	0.70 μm	0.96 μm
24 h 后	0.32 μm	0.72 μm	0.98 μm
相对误差	6.67 %	2.86 %	2.08 %

## 5 结论

研制的激光干涉微轮廓测量仪的压电陶瓷驱动器(PZT),在 XY 平面内,其最大行程为 200 μm × 200 μm,即单个扫描图尺寸最大为 200 μm × 200 μm,而一般扫描测量对象在 mm 级,因而需要宏动工作台参与工作,宏动工作台有两个作用,一是快速粗定位,二是扩大测量范围,这样就会涉及到扫描图像的拼合及相关性分析,要达到无缝拼合图像,并采用分形几何的方法对微观表面轮廓进行了三维评估,获取微观表面形貌的本质性质,正在进行这方面的研究工作。

## 参考文献:

- [1] 王富生,谭久彬.表面微观轮廓的高分辨率光学测量方法[J].光学精密工程,2000,8(4):309-310.  
WANG F SH, TAN J B. Methods of high resolution optical measurement for surface profile[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000,8(4):309-310. (in Chinese)
- [2] 李文杰,张涛,黄伟.表面粗糙度、表面微观轮廓及微位移激光测量集成化方法的研究[J].四川大学学报,2000,32(6):79-81.  
LI W J, ZHANG T, HUANG W. Research on elector optical integration of measuring surface roughness, surface micro-profile and micro-displacement by laser[J]. *Journal of Sichuan University*, 2000,32(6):79-81. (in Chinese)
- [3] 陈津平,张宝峰,胡小东,等.微型激光干涉仪应用于纳米测量机[J].测量与设备,2002,4:6-8.  
CHEN J P, ZHANG B F, HU X D, et al. Micro-Optical interferometry instrument in nanometer measurement device [J]. *Measurement and Equipment*, 2002,4:6-8. (in Chinese)
- [4] 刘志俭,张志勇.MATLAB 应用程序接口用户指南[M].北京:科学出版社.2001:335.  
LIU ZH J, ZHANG ZH Y. *User guide of MA TLAB application program interface* [M]. BeiJing: Science Press. 2001: 335. (in Chinese)
- [5] 周肇飞,张涛,周卫东,等.在线检测精细表面微观形貌的激光轮廓仪[J].光电工程,2001,28(2):7-10.  
ZHOU ZH F, ZHANG T, ZHOU W D, et al. A laser profilometer for on-line measuring microprofile of super-Fine surface [J]. *Opto Electron Engineering*, 2001,28(2):7-10. (in Chinese)
- [6] 杨甬英,卓永模,杨明建.用于超光滑表面无损检测的光学轮廓仪[J].光电工程,1999,26(6):12-16.  
YANG Y Y, ZHUO Y M, YANG M J. An optical profiler used for nondestructive testing of ultra-smooth surface [J]. *Opto Electron Engineering*, 2001,26(6):12-16. (in Chinese)

作者简介:宋康(1973-),四川眉山人,1998年获四川大学机械制造专业工学硕士,现为西安交通大学机械工程学院在读博士研究生,主要从事精密仪器方向的硬件和软件设计与研究,以及 MEMS,智能传感器方面的研究。E-Mail: songkang@mailst.xjtu.edu.cn Tel:(029)2668616