

基于扫描探针激光外差干涉的位移测量系统研究

吕 飘

(右江民族医学院, 广西 百色 533000)

摘要: 对探针振动信号进行分析, 得到的基频可以用来表征探针的位移变化, 二倍频的产生可以作为探针样品接触的依据。论文建立了探针-样品振动的非线性方程, 系统仿真了基频及二倍频的振幅随探针-样品间距的变化规律, 以及探究了针尖半径、杨氏模量、驱动力对振幅的影响, 仿真结果表明, 在斥力区, 振幅的变化随探针样品间距的减小是呈线性变化的。

关键词: 扫描探针; 外差干涉; 振动信号; 原子

电子产业高集成度的发展, 对样品表面轮廓有了更加严格的要求, 对纳米尺度表面轮廓的检测, 引起越来越多的关注。芯片等电子产品的表面质量, 直接影响产品的性能。理想的检测方法应该是对微探针的作用力足够小, 产生的影响可以忽略不计。扫描探针测量系统通过控制探针-样品间的相互运动, 达到测量表面形貌特征的要求, 并且提高了整个纳米系统测量的精度。

电子产业高集成度和高性能发展, 要求部件表面具有纳米级精度, 因此对超精表面检测技术以及装置的研究, 在保证超精表面的加工质量方面具有重要意义。本文提出了基于扫描探针激光外差干涉的超精表面检测系统, 它采用了微探针扫描与双频激光外差干涉相位检测相结合的技术, 来实现检测系统的横向和纵向分辨率。

一、扫描探针激光外差干涉振动位移检测系统的设计

(一) 探针检测系统的设计

为了使表面检测系统达到亚纳米到纳米量级的分辨率, 设计了微探针与光探针相结合的检测系统。总体系统的设计简图如图 1 所示, 分别包括信号探测系统、信号处理系统、反馈控制系统以及扫描系统。从系统设计简图可以很清楚地了解各子系统的相互关系。

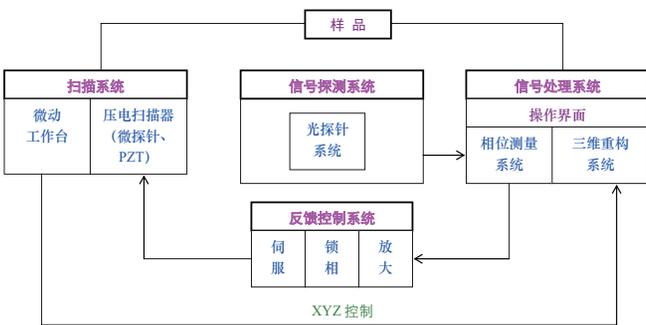


图 1 总体系统设计

(二) 微探针信号探测的系统设计

1. 光探针检测原理。

双频激光干涉模块, 包括偏振分光, 得到参考信号以及测量信号, 通过比相计算微探针的位移变化。

微探针模块, 通过微悬臂的振动, 来调整微探针在物体表面的位置, 从而获得样品的表面形貌特征。

三维扫描模块, 用于依据系统控制模块的控制, 使样品做三维移动扫描。

系统控制模块, 对接收到的信号进行处理, 用于样品的边缘检测, 轮廓提取, 从而进行特征尺寸的计算, 得到样品的表面形貌。

2. 光路计算。

假设横向塞曼激光器输出激光的偏振矢量为:

$$\vec{E}_0 = \vec{i}E_{01} \sin(2\pi f_1 t + \phi_{01}) + \vec{j}E_{02} \sin(2\pi f_2 t + \phi_{02}) \quad (2.2)$$

式(2.2)中, 各变量的含义为: \vec{i} 、 \vec{j} 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。

其中 E_{01} 为平行光波 p 的振幅, E_{02} 为垂直光波 s 的振幅, 经过 PBS 分光后, 反射光 s 分量形成参考光, 透射光 P 分量形成测量光。它们分别二次经过 1/4 波片, 相当于经过一次 1/2 波片, 又因为 1/4 波片的快轴与偏振方向成 45°, 及其偏振方向各自旋转 90°, 参考光则由原来的 s 分量变成 P 偏振分量, 同理测量光则由 P 分量变成 s 分量, 当两束光再次经过偏振分光棱镜合光后, 测量光和参考光的偏振矢量 \vec{E}_1 和 \vec{E}_2 写作:

$$\vec{E}_1 = \vec{j}k_1 E_{01} \sin(2\pi(f_1 + 2f_D)t + \phi_{01} + \phi_{12}) \quad (2.3)$$

$$\vec{E}_2 = \vec{i}k_2 E_{02} \sin(2\pi f_2 t + \phi_{02} + \phi_{22}) \quad (2.4)$$

$K_1 = 1 - \alpha_1$ 、 $K_2 = 1 - \alpha_2$, α_1 、 α_2 分别为 p、s 分量在干涉仪中的光强损耗因子; ϕ_{12} 、 ϕ_{22} 分别为测量光路、参考光路的位相增量。fD 为样品扫描过程中引起的多普勒频移。

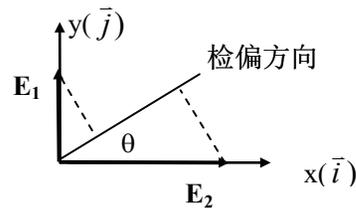


图 2 探测器检偏示意图

\vec{E}_1 、 \vec{E}_2 检偏后形成测量信号 I_m , 如果设检偏器与 x 方向夹角为 θ , 如图所示, 则 \vec{E}_1 、 \vec{E}_2 在检偏方向上的振幅投影分别为

$$E_{1\theta} = K_1 E_{01} \sin \theta \sin(2\pi(f_1 + 2f_D)t + \phi_{01} + \phi_{12}) \quad (2.5)$$

$$E_{2\theta} = K_2 E_{02} \cos \theta \sin(2\pi f_2 t + \phi_{02} + \phi_2) \quad (2.6)$$

所以最终由光电探测器接收形成的测量信号 I_m 可描述为:

$$I_m = I_{m0} \cos(2\pi(f_1 - f_2 + 2f_D)t + \phi_{01} + \phi_{12} - (\phi_{02} + \phi_{22})) \quad (2.7)$$

式中 I_{m0} 的值则由下式来决定:

$$I_{m0} = K_1 K_2 E_{01} E_{02} \sin 2\theta \quad (2.8)$$

通过旋转检偏器使得上式中满足

$$K_1 E_{01} \sin \theta = K_2 E_{02} \cos \theta \quad \text{或} \quad \theta = \tan^{-1} \left(\frac{K_2 E_{02}}{K_1 E_{01}} \right) \quad (2.9)$$

如果激光输出的两正交线偏振光的幅值相等, 即 $E_{01} = E_{02}$, 并且忽略其他损耗, 则有 $K_1 = K_2 = 1$, 此时由式 (2.9) 可得 $\theta = 45^\circ$ 。事实上由于测量光路上由样品反射返回时有一定的光能损耗, 所以实际使用时设置的 θ 值应该比 45° 大。

3. 相位测量原理。外差信号处理包括干涉条纹计数方法以及相位细分两个方面。事实上, 常用的条纹整数计数也可以看成是相位测量的范围扩大, 即 360° 的整数倍, 其分辨率即一个计数当量为 360° 。反过来, 相位检测也可以看作测量整数差值的小数部分。

二、微探针振动位移的数值模拟

(一) 探针-样品模型的建立

用 Derjaguin-Muller-Toporov (DMT) 接触模型来描述针尖-样品之间的相互作用力, 或者, 也可以用其他模型来解释吸引力的相互作用, 但是动力学分析是相似的。当探针逐渐逼近样品时, 探针-样品表面之间会发生周期性的碰撞, 运用欧拉-伯努利梁理论, 探针-样品振动模型的方程可以写为

$$m \frac{dz^2}{dt^2} + \frac{m\omega_0}{Q} \frac{dz}{dt} + kz = F_0 \sin(\omega_d t) + F_s(d) \quad (3.1)$$

式中:

z ——尖端在时间 t 时的位移;

ω_0 ——微探针的驱动角频率

F_0 ——驱动微探针振动的力的大小;

ω_d ——微探针受迫振动时的角频率

m ——微探针的等效质量

Q ——微探针等效品质因子

k ——系统的等效弹性系数

(二) 探针振动的有限元分析方法

在运用有限元方法进行数学模型的计算时, 一般的步骤可以分为三个阶段: 前处理、计算求解以及后处理。

这种方法的基本思想就是时间离散化。一般结构中的非线性动力分析在空间离散化之后会得到一个常微分方程

$$[M] \frac{d^2}{dt^2} \{u\} + [C] \frac{d}{dt} \{u\} + p(\{u\}) = \{F(t)\} \quad (3.3)$$

其中 M 为质量矩阵、 C 为阻尼矩阵, $\{F(t)\}$ 为外力载荷, 它是关于时间的函数, $p(\{u\})$ 为内力载荷。

(三) 微探针振动位移的数值计算

微探针振动着逼近样品时, 当两者的间距小于探针的自由振动振幅时, 探针-样品表面会发生周期性的碰撞。微探针在共振频率附近以一定振幅振动, 在轻敲力作用下, 会产生能被作为监测工作状态的二次谐波分量。高次谐波的产生跟探针-样品之间的非线性力有关的。先对振动模型进行瞬态动力学分析, 得到振动信号后, 进行傅立叶变换, 以得到探针-样品振动的基频振幅大小, 此振幅可以用来表示探针样品接触时测量的 Z 向位移值, 基频就是探针的激振频率。而二次谐波的产生则可以用来表征探针-样品发生接触。通过计算可以更加直观地看到, 基频的频率为 20.718KHz, 我们仿真采用的频率是 20.8KHz, 基本一致。

(四) 微探针振动位移的规律研究

1. 针尖半径大小对谐波振幅影响的探究。选取半径分别为 10nm、20nm、30nm、50nm 的针尖, 将探针从 1.6nm 的距离逐渐逼近样品表面, 计算获得针尖-样品表面间距与力的关系曲线。从结果来看, 引力区最大点会随着针尖半径的增大而变大, 但是平衡位置是不变的, 都是在探针-样品间距为 0.15nm 处, 在引力区, 力的大小会随着针尖-样品之间的间距增大而有减小的趋势, 但是幅度不大, 而且最后会趋于恒定。在振动过程中, 随着间距的增大, 引力的作用也会逐渐减小; 而在斥力区, 间距极小的变化, 都会造成斥力大幅度的变化, 说明针尖半径的大小, 会很大程度的影响样品表面形貌的测量。针尖半径为 10nm 时, 斥力区的线性度是最高的, 线性度为 0.9825。而针尖半径大于 10nm 时, 线性度都为 0.9820。从斥力区的变化趋势来看, 在同一位置, 即针尖-样品间距在一固定值, 针尖半径越大, 所受空间力的大小也越大。

2. 杨氏模量对谐波振幅影响的探究。选取杨氏模量分别为 2GPa、5GPa、9GPa、11GPa 的探针针尖, 其他参数不变, 将探针从 1.6nm 的距离逐渐接近样品表面, 得到针尖-样品表面间距与力的关系图像。在引力区, 即探针-样品尚未接触时, 杨氏模量的大小并不会对针尖样品的作用力产生影响, 而在斥力区, 杨氏模量越大, 样品的刚度越大, 受到的非线性力也就越大, 杨氏模量与非线性力之间的关系是线性的, 线性度达到 0.9820。经进一步分析得出, 谐波幅度很明显会随着弹性模量的增加而增大。当杨氏模量为 9GPa 时, 线性度是最高的, 达到了 0.9996。

3. 驱动力对谐波振幅影响的探究。选取 d 为 $0.336 \times 10^{-10} \text{m}$, 其他参数不变, 改变驱动力为 $4 \times 10^{-10} \text{N}$, 改变驱动力为 $6 \times 10^{-10} \text{N}$, 经试验分析发现, 基频和二倍频的幅值都是线性变化的。

选取 $d=0.336 \times 10^{-10} \text{m}$, 其他参数不变, 改变驱动力的大小, 随着驱动力的增大, 振幅呈现不断增大的趋势, 但是二倍频的增大幅度越来越小, 也就说明, 二倍频幅度的大小与基频振幅相比, 越来越不明显。因此, 在施加驱动力的时候, 驱动力的大小不应该太大, 会严重影响谐波的提取, 一般来说, 实验中施加的驱动力大小大约在 $2.0 \times 10^{-10} \text{N}$ 左右, 这时会取得相对高的精度。

三、结语

本文对微探针的振动进行了实验分析, 通过改变驱动电压来控制探针-样品间距, 探究振幅的变化规律。实验结果良好, 表明本系统可以用来对纳米级的超光滑表面进行测量。通过对整个测量系统的探究, 实现了标准样品的自动测量, 为检测系统的下一步完善打下了基础。

参考文献:

- [1] 臧利杰. 二氧化硅胶体探针的制备及其在模拟颗粒物间相互作用力测定中的应用 [D]. 河北师范大学, 2009.
- [2] 李伯奎, 刘远伟. 表面粗糙度理论发展研究 [J]. 工具技术, 2004, 38 (1): 63-67.
- [3] 林浩山, 李玉和, 王东生. 用于超精表面损伤检测的微探针系统设计与测试 [J]. 新技术新工艺, 2007 (6): 33-34.
- [4] 彭翰生, 张小民, 范滇元, 等. 高功率固体激光装置的发展与工程科学问题 [J]. 中国工程科学, 2021, 3 (3): 1-8.

(本文系: 右江民族医学院 2020 年度校级科研课题: 扫描探针激光外差干涉的位移检测系统研究, yy2020ky031)