



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110068707 A

(43)申请公布日 2019.07.30

(21)申请号 201810067144.7

(22)申请日 2018.01.24

(71)申请人 中国科学院沈阳自动化研究所

地址 110016 辽宁省沈阳市东陵区南塔街
114号

(72)发明人 刘连庆 于鹏 刘柱 吴森 杨洋
马骏驰

(74)专利代理机构 沈阳科苑专利商标代理有限
公司 21002

代理人 王倩

(51)Int.Cl.

G01Q 60/24(2010.01)

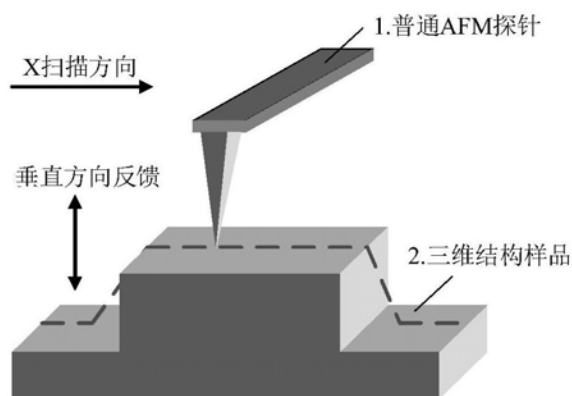
权利要求书2页 说明书7页 附图6页

(54)发明名称

一种基于二维反馈控制的AFM三维测量方法

(57)摘要

本发明涉及一种基于二维反馈控制的AFM三维测量方法。包括以下实现方法：通过二维反馈控制方法让探针的反馈运动方向与水平成一角度，使得探针针尖能够沿着侧壁方向进行逐点触碰扫描，从而实现侧壁形貌点的信息采集；通过探针爬壁轨迹控制方法实现探针向上爬壁和向下爬壁两种运动轨迹；通过基于先验知识的反馈角度预测方法判断侧壁位置，从而可以预测反馈控制方向角度。本发明改变了传统AFM仅在垂直于样品水平面方向进行反馈控制的成像模式，能够对类沟槽形状的纳米结构进行精确三维形貌测量，为半导体芯片、MEMS等微纳结构三维参数测量提供了有效的技术手段。



1. 一种基于二维反馈控制的AFM三维测量方法,其特征在于,包括以下步骤:

通过二维反馈控制方法让探针的反馈运动方向与水平成一角度,使得探针针尖沿侧壁方向进行逐点触碰扫描;通过探针爬壁轨迹控制方法实现探针向上爬壁和向下爬壁两种运动轨迹,从而实现侧壁形貌点的信息采集。

2. 按权利要求1所述的一种基于二维反馈控制的AFM三维测量方法,其特征在于所述二维反馈控制方法具体为:

探针在X或Y方向、以及Z方向同时做位移运动反馈,反馈运动方向与水平X方向有夹角,使CD探针针尖的突起边缘与三维结构样品侧壁接触,用于获得侧壁形貌;

三维测量在轻敲模式下进行;当探针针尖底部或边缘接触到样品后,探针振幅减小,与设定值产生偏差,经过PID控制器后得到控制量,控制量经过正交分解,分别得到控制二维纳米平台X方向运动的控制量、控制Z轴纳米定位平台运动的控制量,使探针与样品产生设定倾斜角度的相对运动。

3. 按权利要求1所述的一种基于二维反馈控制的AFM三维测量方法,其特征在于所述探针爬壁轨迹控制方法包括向上爬壁和向下爬壁两种轨迹,由反馈角度调节实现两种爬壁方式,向上爬壁时具体步骤包括:

1) 当探针针尖位于侧壁某一点时,并且探针经过反馈调节达到振幅设定值,此时关闭反馈;

2) 然后样品向X扫描轨迹反方向前进一步 X_{step} ,此时探针针尖收到侧壁挤压,探针振幅减小,并小于振幅设定值;

3) 接着反馈开启,由于反馈方向倾斜角度的存在,样品在与X扫描轨迹相同的方向做反馈运动,同时会在Z方向有向上位移调节,当控制系统稳定即振幅达到设定值时,此时探针在原来的位置处沿侧壁向上移动了一段距离,从而实现向上爬壁运动。

4. 按权利要求1或3所述的一种基于二维反馈控制的AFM三维测量方法,其特征在于所述探针爬壁轨迹控制方法包括向上爬壁和向下爬壁两种轨迹,由反馈角度调节实现两种爬壁方式,向下爬壁时具体步骤包括:

1) 当探针针尖位于侧壁某一点时,并且探针经过反馈调节达到振幅设定值,此时关闭反馈;

2) 然后样品向X扫描轨迹反方向前进一步 X_{step} ,此时探针针尖远离侧壁,探针振幅增大,并大于振幅设定值;

3) 接着反馈开启,由于反馈方向倾斜角度的存在,样品在与X扫描轨迹相反的方向做反馈运动,同时会在Z方向有向下位移调节,当控制系统稳定即振幅达到设定值时,此时探针在原来的位置处沿侧壁向下移动了一段距离,从而实现向下爬壁运动。

5. 按权利要求1所述的一种基于二维反馈控制的AFM三维测量方法,其特征在于,探针的反馈运动方向与水平所成角度通过基于先验知识的反馈角度预测方法判断侧壁位置,进而得到反馈控制方向和角度,包括以下步骤:

1) 对参考轮廓数据进行预处理,消除样本表面倾斜失真;

2) 进行三次B样条插值,获得插值后的曲线数据 $S(x)$;

3) 利用过零检测算法判断侧壁位置和方向。

6. 按权利要求5所述的一种基于二维反馈控制的AFM三维测量方法,其特征在于,所述

利用过零检测算法判断侧壁位置和方向包括以下步骤:

(1) 根据曲线数据 $S(x)$ 得出任意一个侧壁与中值线的交点,通过计算扫描行曲线数据的最大值 Z_{\max} 以及最小值 Z_{\min} 得到中值线 $d(x) = (Z_{\max} + Z_{\min}) / 2$;

(2) 根据插值后的曲线数据 $S(x)$,求得的差值 $E = S(x_i) - d(x_i)$ 在交点前后发生正负变化,记录变化点的位置得到这些交点的位置的横坐标 T_m ,其中 m 为 $0, 1, 2, \dots, w$; w 值为侧壁个数; $S(x_i)$ 、 $d(x_i)$ 分别表示第 i 个点的曲线数据和扫描行曲线中值线数据;具体根据式(1)、(2),满足其一即可得到交点位置,即 $T_m = x_{i+j}$:

$$(S(x_i) - d(x_i) < 0) \ \&\& \ (S(x_{i+2j}) - d(x_{i+2j}) > 0) \quad (1)$$

$$(S(x_i) - d(x_i) > 0) \ \&\& \ (S(x_{i+2j}) - d(x_{i+2j}) < 0) \quad (2)$$

式中, j 为正整数;

(3) 通过曲线数据 $S(x)$ 在交点处变化量的正负判断侧壁方向:

满足式(1),侧壁外方向向左,此时设定倾斜角度为正角度;

满足式(2),侧壁外方向向右,此时设定倾斜角度为负角度;

(4) 最后通过计算相邻交点的平均值 $F_m = (T_m + T_{m+1}) / 2$,即得到扫描角度变换点的横坐标。

7. 按权利要求6所述的一种基于二维反馈控制的AFM三维测量方法,其特征在于,所述正角度为45度,负角度为-45度。

一种基于二维反馈控制的AFM三维测量方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种面向半导体芯片、MEMS、超精密加工等领域微纳米结构新型三维形貌测量方法,具体地说是一种基于原子力显微镜(AFM)的新型扫描成像方法-二维反馈控制的三维成像方法。

背景技术

[0002] 目前半导体芯片的集成度越来越高,集成电路刻线的图形线宽尺寸已进入纳米尺度,加工形成的关键尺寸(Critical Dimensions,CDs)参数如线宽(LineWidth,LW)、线宽粗糙度(Line Width Roughness,LWR)、线边缘粗糙度(LER)、侧壁粗糙度(Sidewall Roughness,SWR)对IC芯片电气性能的影响越来越大,精确测量IC的3D结构尺寸已成为提升IC芯片性能和质量的关键。目前刻线尺寸参数的获取主要依赖于扫描电子显微镜(Scanning electron microscope,SEM)和原子力显微镜(Atomic Force Microscope,AFM)。SEM只能进行二维图形成像,不能得到深度信息,因此在测量侧壁粗糙度方面具有一定局限性,并且样品材料特性也会影响测量结果。AFM由于精度高,而且可以在不破坏样品条件下实现纳米结构三维测量,因此在纳米三维结构测量方面更具有优势,基于AFM的三维测量方法成为微纳计量领域的研究热点。

[0003] 理论上AFM可以实现纳米尺度的三维测量,由于受到探针形貌效应和扫描方式限制,常规的探针扫描成像方法只能保证Z方向的高分辨力检测,难以实现对沟槽等纳米结构的侧壁几何参数真三维测量。利用AFM扫描探针技术进行三维形貌检测的方法主要有四种:样本倾斜方式、探针针尖倾斜方式、双探针方式和基于CD探针方式。

[0004] (1) 样本倾斜方式。采用样本保持器使针尖与样本侧壁表面成一定角度进行扫描,这样就能够获得较丰富的沟槽侧壁信息。但这种测量方式无法同时得到沟槽纳米结构的双面侧壁形貌信息。

[0005] (2) 探针针尖倾斜方式。采用旋转机构带动探针旋转,实现探针与侧壁夹角的变化,这种方式对系统的定位精度要求极高,实现起来难度大。目前,韩国Park公司生产的XE-3DM原子力显微镜就是采用的这种方式。

[0006] (3) 双探针测量方式。哈尔滨工业大学学者采用两根光纤探针(Optical fiber probe)代替普通悬臂梁AFM探针来进行微纳尺度结构的三维测量,为三维结构测量提供了一种新的思路,不过双探针系统结构也过于复杂,并且对于方向相反的侧壁,需要两个探针配合分别获取不同方向侧壁形貌数据,经过图像重构处理才能获得三维图像。

[0007] (4) 基于喇叭口形CD探针方式。这种CD探针针尖形状类似喇叭口形向水平方向外延,因此可以利用外延边缘触碰侧壁实现侧壁形貌测量。目前测量方式主要通过控制探针运动轨迹,采用逐点触碰的方式检测刻线样品侧壁形貌信息,实现三维形貌测量,这种方法一个普遍缺点是测量时间比较长。

发明内容

[0008] 为了实现高质量快速的三维扫描成像,本发明提出一种基于二维反馈控制的三维结构测量方法,具体来说就是让探针的反馈运动方向与水平成一角度,使得探针能够沿着侧壁方向进行逐点触碰扫描,从而实现侧壁形貌点的信息采集,实验表明这种方法能够实现晶圆刻线沟槽结构的三维形貌信息获取,为三维形貌参数的测量提供了一种有效的技术手段。

[0009] 一种基于二维反馈控制的AFM三维测量方法,包括以下步骤:

[0010] 通过二维反馈控制方法让探针的反馈运动方向与水平成一角度,使得探针针尖沿侧壁方向进行逐点触碰扫描;通过探针爬壁轨迹控制方法实现探针向上爬壁和向下爬壁两种运动轨迹,从而实现侧壁形貌点的信息采集。

[0011] 所述二维反馈控制方法具体为:

[0012] 探针在X或Y方向、以及Z方向同时做位移运动反馈,反馈运动方向与水平X方向有夹角,使CD探针针尖的突起边缘与三维结构样品侧壁接触,用于获得侧壁形貌;

[0013] 三维测量在轻敲模式下进行;当探针针尖底部或边缘接触到样品后,探针振幅减小,与设定值产生偏差,经过PID控制器后得到控制量,控制量经过正交分解,分别得到控制二维纳米平台X方向运动的控制量、控制Z轴纳米定位平台运动的控制量,使探针与样品产生设定倾斜角度的相对运动。

[0014] 所述探针爬壁轨迹控制方法包括向上爬壁和向下爬壁两种轨迹,由反馈角度调节实现两种爬壁方式,向上爬壁时具体步骤包括:

[0015] 1) 当探针针尖位于侧壁某一点时,并且探针经过反馈调节达到振幅设定值,此时关闭反馈;

[0016] 2) 然后样品向X扫描轨迹反方向前进一步 X_{step} ,此时探针针尖收到侧壁挤压,探针振幅减小,并小于振幅设定值;

[0017] 3) 接着反馈开启,由于反馈方向倾斜角度的存在,样品在与X扫描轨迹相同的方向做反馈运动,同时会在Z方向有向上位移调节,当控制系统稳定即振幅达到设定值时,此时探针在原来的位置处沿侧壁向上移动了一段距离,从而实现向上爬壁运动。

[0018] 所述探针爬壁轨迹控制方法包括向上爬壁和向下爬壁两种轨迹,由反馈角度调节实现两种爬壁方式,向下爬壁时具体步骤包括:

[0019] 1) 当探针针尖位于侧壁某一点时,并且探针经过反馈调节达到振幅设定值,此时关闭反馈;

[0020] 2) 然后样品向X扫描轨迹反方向前进一步 X_{step} ,此时探针针尖远离侧壁,探针振幅增大,并大于振幅设定值;

[0021] 3) 接着反馈开启,由于反馈方向倾斜角度的存在,样品在与X扫描轨迹相反的方向做反馈运动,同时会在Z方向有向下位移调节,当控制系统稳定即振幅达到设定值时,此时探针在原来的位置处沿侧壁向下移动了一段距离,从而实现向下爬壁运动。

[0022] 探针的反馈运动方向与水平所成角度通过基于先验知识的反馈角度预测方法判断侧壁位置,进而得到反馈控制方向和角度,包括以下步骤:

[0023] 1) 对参考轮廓数据进行预处理,消除样本表面倾斜失真;

[0024] 2) 进行三次B样条插值,获得插值后的曲线数据 $S(x)$;

[0025] 3) 利用过零检测算法判断侧壁位置和方向。

[0026] 所述利用过零检测算法判断侧壁位置和方向包括以下步骤:

[0027] (1) 根据曲线数据 $S(x)$ 得出任意一个侧壁与中值线的交点, 通过计算扫描行曲线数据的最大值 Z_{\max} 以及最小值 Z_{\min} 得到中值线 $d(x) = (Z_{\max} + Z_{\min}) / 2$;

[0028] (2) 根据插值后的曲线数据 $S(x)$, 求得的差值 $E = S(x_i) - d(x_i)$ 在交点前后发生正负变化, 记录变化点的位置得到这些交点的位置的横坐标 T_m , 其中 m 为 $0, 1, 2, \dots, w$; w 值为侧壁个数; $S(x_i)$ 、 $d(x_i)$ 分别表示第 i 个点的曲线数据和扫描行曲线中值线数据; 具体根据式(1)、(2), 满足其一即可得到交点位置, 即 $T_m = x_{i+j}$:

$$[0029] \quad (S(x_i) - d(x_i) < 0) \ \&\& \ (S(x_{i+2j}) - d(x_{i+2j}) > 0) \quad (1)$$

$$[0030] \quad (S(x_i) - d(x_i) > 0) \ \&\& \ (S(x_{i+2j}) - d(x_{i+2j}) < 0) \quad (2)$$

[0031] 式中, j 为正整数;

[0032] (3) 通过曲线数据 $S(x)$ 在交点处变化量的正负判断侧壁方向:

[0033] 满足式(1), 侧壁外方向向左, 此时设定倾斜角度为正角度;

[0034] 满足式(2), 侧壁外方向向右, 此时设定倾斜角度为负角度;

[0035] (4) 最后通过计算相邻交点的平均值 $F_m = (T_m + T_{m+1}) / 2$, 即得到扫描角度变换点的横坐标坐标。

[0036] 所述正角度为45度, 负角度为-45度。

[0037] 本发明具有以下优点:

[0038] 1. 本发明可以实现纳米结构的连续扫描测量。半导体刻线结构具有方向相反的两个侧壁, 本发明能够根据已有的扫描数据推断侧壁的位置和朝向, 从而实时调整探针反馈运动角度, 以实现不同方向侧壁的连续扫描成像。

[0039] 2. 本发明可以提升三维测量速度、精度和稳定性。由于探针是在反馈控制作用下进行三维形貌测量, 因此可以有很高的测量精度。另外, 在扫描速度方面与普通AFM扫描成像时间几乎一致, 由于侧壁高度通常在几百纳米以内, 在扫描侧壁时需要消耗的额外时间很少。

[0040] 3. 本发明改变了传统AFM仅在垂直于样品水平面方向进行反馈控制的成像模式, 能够对类沟槽形状的纳米结构进行精确三维形貌测量, 为半导体芯片、MEMS等微纳结构三维参数测量提供了有效的技术手段。

附图说明

[0041] 图1是普通AFM垂直方向反馈控制扫描方式示意图;

[0042] 图2是二维反馈控制扫描方式示意图;

[0043] 图3是系统控制框图;

[0044] 图4是PID控制量的正交分解示意图;

[0045] 图5是探针爬壁原理示意图;

[0046] 图6是反馈角度预测算法流程图;

[0047] 图7a是原始行扫描曲线和一阶拟合曲线;

[0048] 图7b是校正后的行扫描曲线;

[0049] 图8是行曲线及B样条插值曲线;

[0050] 图9是反馈角度变换点位置示意图;

- [0051] 图10是垂直方向(90度倾角)反馈扫描结果示意图;
- [0052] 图11是固定45度倾角反馈扫描结果示意图;
- [0053] 图12是变角度反馈扫描结果示意图;
- [0054] 图13是标准栅格三维图像重建图;
- [0055] 图14是标准栅格轮廓曲线。

具体实施方式

[0056] 下面结合实施例对本发明做进一步的详细说明。

[0057] 基于二维反馈控制的AFM三维测量方法主要通过二维反馈控制方法让探针的反馈运动方向与水平成一角度,使得探针针尖能够沿着侧壁方向进行逐点触碰扫描,从而实现侧壁形貌点的信息采集;通过探针爬壁轨迹控制方法实现探针向上爬壁和向下爬壁两种运动轨迹;通过基于先验知识的反馈角度预测方法判断侧壁位置,从而可以预测反馈控制方向角度。

[0058] 二维反馈控制方法具体为:探针在X(或Y)和Z方向同时做位移运动反馈,反馈运动方向与水平X方向有一定夹角,由于探针采用针尖为喇叭口形的CD探针(3),这样CD探针(3)针尖的突起边缘就能够与三维结构样品(2)侧壁接触,从而可以获得高分辨率的侧壁形貌。为避免探针针尖磨损,三维测量在轻敲模式下进行,此时探针处于振动状态。当探针针尖底部或边缘接触到样品后,探针振幅减小,与设定值产生偏差,经过PID控制器后得到控制量,控制量经过正交分解后得到两个方向的分量,并作为控制量控制二维纳米平台X方向运动,作为控制量控制Z轴纳米定位平台,从而能够使探针与样品产生一定倾斜角度的相对运动。

[0059] 探针爬壁轨迹控制方法包括向上爬壁和向下爬壁两种轨迹,由反馈角度调节实现两种爬壁方式,以向上爬壁为例(如图5所示),具体步骤包括:

[0060] 1) 假设此时探针针尖位于侧壁n1点,并且探针经过反馈调节达到设定值,此时关闭反馈;

[0061] 2) 然后样品向X扫描轨迹反方向前进一步Xstep(Xstep为预设轨迹步长),此时探针针尖收到侧壁挤压,探针振幅减小,并小于设定值;

[0062] 3) 接着反馈开启,由于反馈方向倾角的存在,样品会在与X扫描轨迹相同的方向做反馈运动,同时会在Z方向会有向上位移调节,达到反馈控制稳定时,探针达到n2点,从而可以实现向上爬壁运动。

[0063] 向下爬壁也是基于同样的原理,只是运动方向相反。

[0064] 基于先验知识的反馈角度预测方法,具体包括如下步骤:

[0065] 1) 对参考轮廓数据进行预处理,消除样本表面倾斜失真;

[0066] 2) 进行三次B样条插值,获得足够多的样本数据;

[0067] 3) 利用过零检测算法判断侧壁位置和方向。

[0068] 本发明为一种基于AFM的新型三维成像方法:

[0069] 二维反馈控制实现方法:

[0070] 由于常规AFM系统只在Z方向反馈控制,探针和样品间距无法获得侧壁形貌信息(图1),由此本文提出一种二维反馈控制方法,如图2所示,即探针在X(或Y)和Z方向同时做位移运动反馈,反馈运动方向与水平X方向有一定夹角 θ ,由于探针采用针尖为喇叭口形的

CD探针(3),这样CD探针(3)针尖的突起边缘就能够与三维结构样品(2)侧壁接触,从而可以获得高分辨率的侧壁形貌。控制系统方框图如图3所示。为避免探针针尖磨损,三维测量在轻敲模式下进行,此时探针在近谐振频率处振动。当探针针尖底部或边缘接触到样品后,探针振幅减小,与设定值产生偏差 $e(t)$,经过PID控制器后得到控制量 $u(t)$,控制量 $u(t)$ 经过正交分解后得到 $\Delta x = u(t) \times \cos\theta$,并作为控制量控制二维纳米平台X方向运动, $\Delta z = u(t) \times \sin\theta$ 作为控制量控制Z轴纳米定位平台,从而能够使探针与样品产生一定倾斜角度的相对运动,如图4所示。

[0071] 探针爬壁轨迹控制方法:探针检测刻线侧壁形貌具有向上和向下两种爬壁轨迹。由于X方向既是探针扫描轨迹方向,同时也是反馈控制的分量方向,因此要协调好轨迹运动和反馈运动两者的时序关系,实际操作中两者是交替进行。具体实现机理如图5所示。假设此时探针针尖位于侧壁 n_1 点,并且探针经过反馈调节达到设定值(图5中(a)),此时关闭反馈,然后样品向X扫描轨迹反方向前进一步 X_{step} (X_{step} 为预设轨迹步长)(图5中(b)),此时探针针尖收到侧壁挤压,探针振幅减小,并小于设定值。接着反馈开启,由于反馈方向倾角的存在,样品会在与X扫描轨迹相同的方向做反馈运动,同时会在Z方向会有向下位移调节,达到反馈控制稳定时,探针达到 n_2 点,从而可以实现向上爬壁运动。向下爬壁也是基于同样的原理,只是运动方向相反。

[0072] 基于先验知识的反馈角度预测方法:

[0073] 由于刻线矩形结构存在两个方向相反的侧壁,探针对两个侧壁的触碰方向是不同的,因而反馈角度也是不同的。经过实验验证,探针在两个侧壁分别以正45度或负45度方向进行反馈,就能达到良好的检测效果,而在刻线基底和刻线上表面的平面部分采用正45度或负45度都可以,不影响形貌检测结果。但若想探针在不同方向侧壁实现不同反馈角度转换,需要事先知道侧壁位置和方向这些先验知识,但是这些数据事先并不存在。本论文基于对于表面形貌连续变化的样品,相邻两行轮廓数据具有高度相似性,因此可以利用上一行的轮廓数据作为先验知识判断刻线的侧壁位置和方向。由于第一行扫描成像时没有可参考数据,可以利用普通轻敲模式(即垂直方向反馈)获得参考轮廓数据来计算侧壁位置和方向。具体步骤包括:1)对参考轮廓数据进行预处理,消除样本表面倾斜失真;2)进行三次B样条插值,获得足够多的样本数据;3)利用过零检测算法判断侧壁位置和方向。由于基底和刻线上表面的平面部分可以适应45度和负45度两种反馈角度,因此可以简化为寻找两侧壁相对中间位置作为角度变换点即可(如图2所示),从而简化技术难度,具体流程如图6所示。

[0074] (1) 行扫描曲线的倾斜校正

[0075] 在三维测量过程中,扫描点数据以三维坐标形式 $p(x, y, z)$ 来存储,其中每一行扫描数据中 y 的值是固定的,高度 z 随着坐标 x 而变化,并且 x 的坐标非等间距。另外,由于样品表面倾斜或者人为放置的原因导致样品表面倾斜、扫描器Z向漂移等原因会造成高度数据 Z 出现整体偏移,导致扫描图像失真,此时通常可以利用最小二乘曲线拟合的方法去除Z向偏移,使图像数据得到校正。具体过程:(1)将坐标 x 看成是高度 Z 的函数变量,即 $Z(x)$,然后将行扫描数据进行1阶最小二乘曲线拟合,得到拟合曲线 $f(x)$,即图7a中的曲线2;(2)对每点原始数据 $Z(x_i)$ 及拟合曲线上的对应点进行差值运算,即 $P(x_i) = Z(x_i) - f(x_i)$,得到消除倾斜偏差后的行曲线数据 $P(x_i)$,其中 x_i 为行曲线第 i 个采样点的 x 坐标;(3)最后利用此曲线数据进行样品表面成像。未经过校正的原始曲线如图7a所示,对其进行最小二乘拟合校正后

绘制曲线如图7b所示,从图7a、图7b中可以看到,校正后的数据能够消除直流偏差和倾斜失真,能够真实的体现样品的表面形貌。

[0076] (2) 行扫描数据的三次B样条曲线插值

[0077] 由于原始轮廓数据在侧壁位置的采样点相对较少,本方法对倾斜校正后的行曲线进行三次B样条曲线插值以便得到连续的平滑曲线数据。

[0078] 如图8所示,可以看出三次B样条曲线插值后的曲线(设为 $S(x)$)与原轮廓曲线重合得非常好,并且可以得到更加多的数据点进行侧壁位置计算。

[0079] (3) 变角度位置点计算与侧壁方向判断

[0080] 由于刻线是矩形结构特点,可以得出任意一个侧壁都将与中值线有个交点,如图11所示。通过计算行曲线的最大值 Z_{\max} ,以及最小值 Z_{\min} ,就可以得到中值线 $d(x) = (Z_{\min} + Z_{\max}) / 2$ 。

[0081] 根据插值后的曲线数据 $S(x)$,求得的差值 $E = S(x_i) - d(x_i)$ 在交点前后会发生正负变化,记录变化点的位置可以得到这些交点的位置的横坐标 T_m ,其中 m 为 $(0, 1, 2, \dots, w)$, w 值为侧壁个数。具体判断方法如式(3)、(4)所示,满足此条件之一即可得到交点位置,即 $T_m = X_{i+j}$ 。

[0082] $(S(x_i) - d(x_i) < 0) \ \&\& \ (S(x_{i+2j}) - d(x_{i+2j}) > 0)$ (3)

[0083] $(S(x_i) - d(x_i) > 0) \ \&\& \ (S(x_{i+2j}) - d(x_{i+2j}) < 0)$ (4)

[0084] 式中,条件其中 j 为正整数 $(1, 2, 3, \dots)$,通常 $j=2$ 即可,这是为了消除局部噪声带来的误判。

[0085] 另外,通过检测曲线 $S(x)$ 在交点处变化量的正负可以判断侧壁方向,满足式(3),侧壁外方向向左,此时可以设定反馈角度为45度;满足式(4),侧壁外方向向右,此时可以设定反馈角度为负45度。最后通过计算相邻交点 F_m 标的平均值 $F_m = (T_m + T_{m+1}) / 2$,即可得到扫描角度变换点的横坐标坐标 F_m 如图9所示。

[0086] 实验分析

[0087] 为验证本方法的有效性,利用自主研发的3D-AFM对标准栅格样品进行了扫描实验测试。本实验所用的样品为MikroMasch公司生产的TGXYZ02型标准栅格,该栅格标称高度为100nm,水平周期 $3\mu\text{m}$ 。实验所采用的探针型号为CD120,探针末梢细杆的有效长度为600nm,针尖末端宽度为120nm,喇叭口外沿突出10nm。实验中分别利用90度、45度反馈以及多角度反馈方法进行扫描成像实验验证。

[0088] 首先在普通轻敲模式下,反馈方向与水平方向正交成90度,针尖与样品侧壁接触后在反馈控制下迅速远离侧壁,使得针尖与样品侧壁的接触点有限,可以得到的侧壁形貌采样点少(如图10所示)。当采用45度角进行反馈时探针左侧上升沿的侧壁都能得到较多的采样点(如图11所示),采样点的密度取决于探针的X方向的位移步长,步长越小,采样点越多。同时可以看到图11中右侧下降沿侧壁没有采样点,主要由于在45度反馈控制下,探针针尖无法与右侧侧壁接触,从而没有采样点,这样的结果就直接验证了本方法的有效性。图12是利用反馈角度预测方法获得反馈角度变换点,在左侧上升沿为45度反馈,右侧下降沿为负45度反馈,这样在侧壁两侧实现不同的反馈方向,从而在样品侧壁的上升沿和下降沿都能获得较多的采样点,可以实现对刻线矩形结构的三维形貌测量。

[0089] 图13是利用本方法对BudgetSensors公司的HS-500MG标准栅格(高度500nm,水平

周期 $5\mu\text{m}$)进行三维扫描成像3D重建结果,图14为其中一段的行曲线,可以看到侧壁两侧有密集测量点,可以有效的表征侧壁形貌。

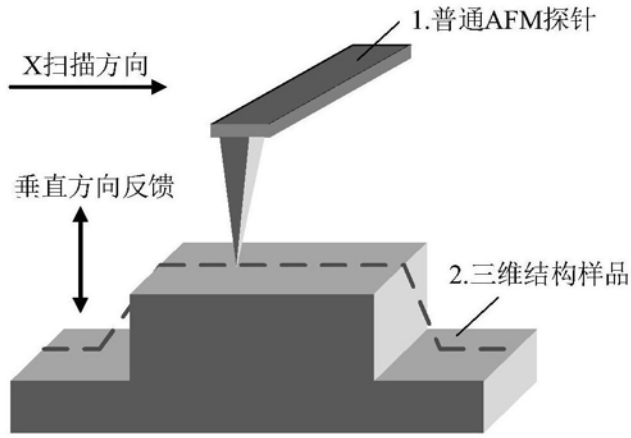


图1

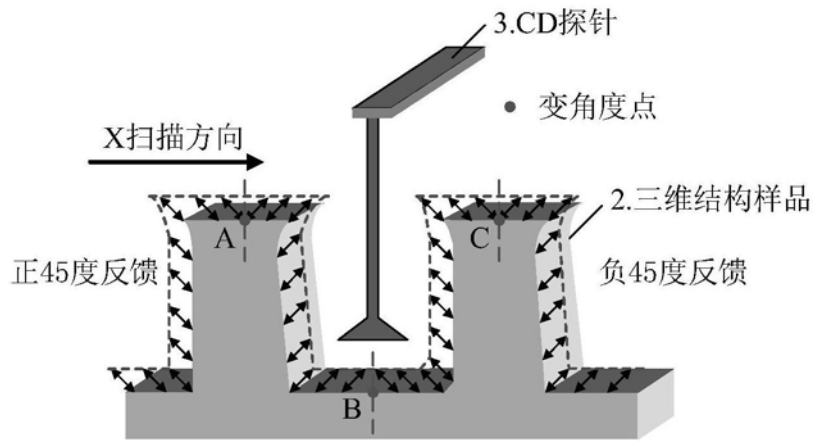


图2

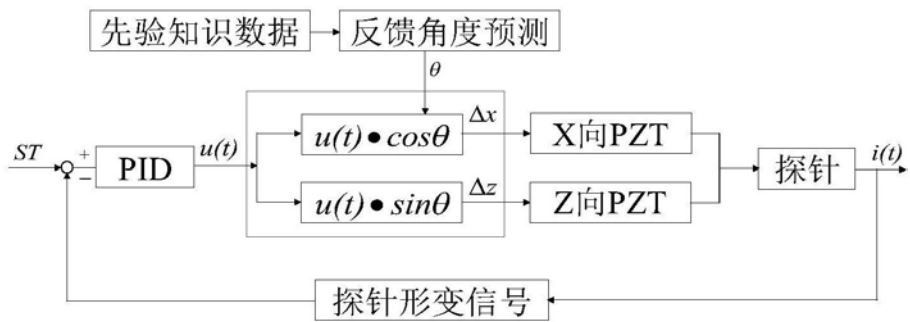


图3

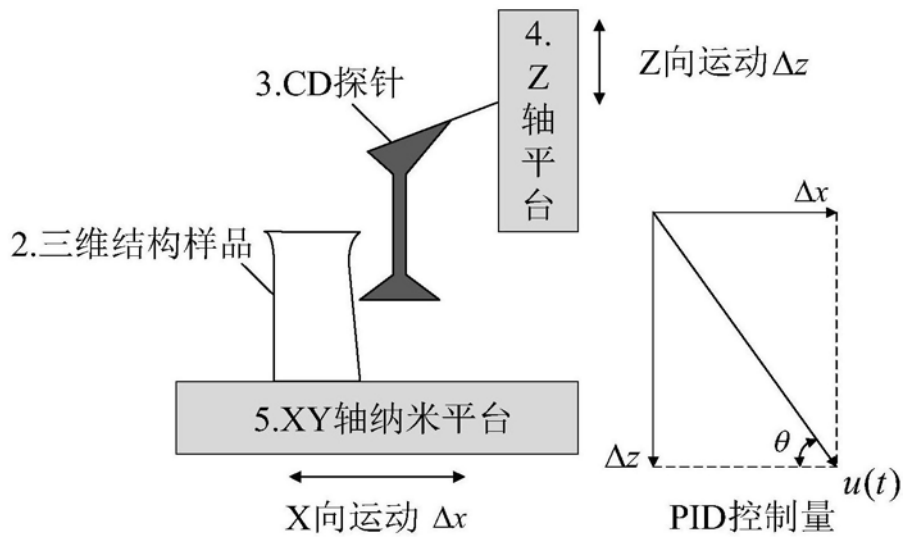


图4

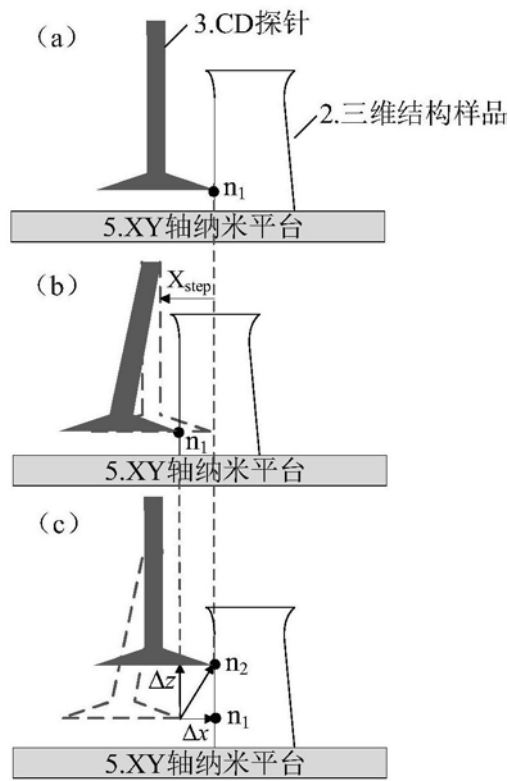


图5



图6

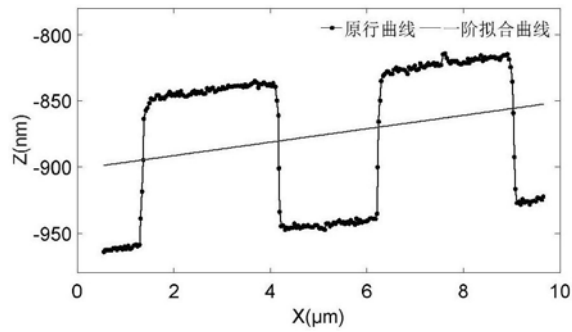


图7a

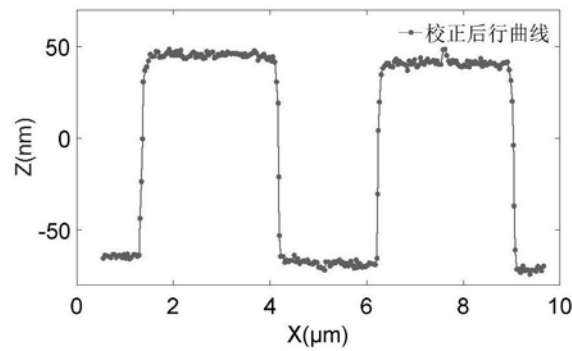


图7b

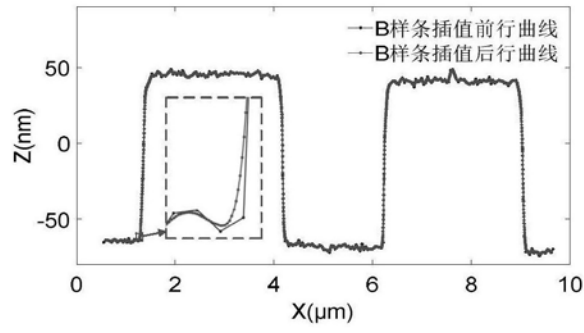


图8

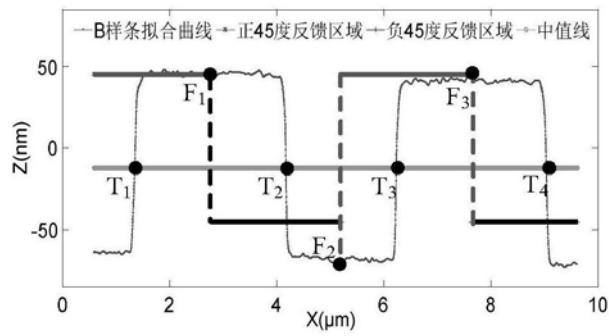


图9

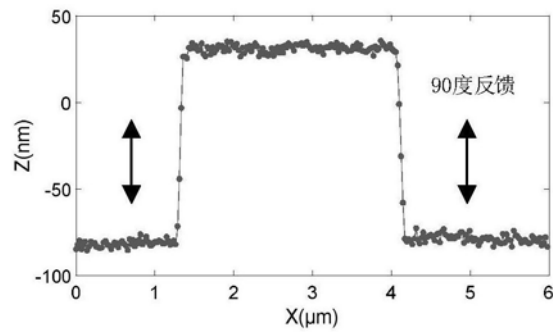


图10

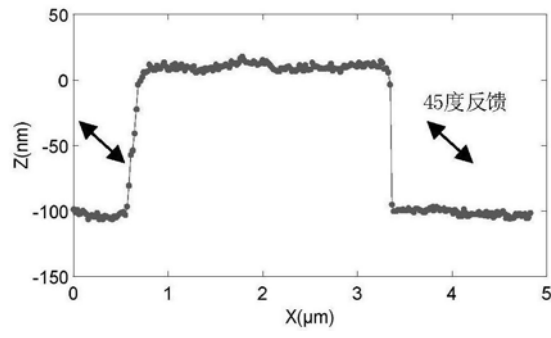


图11

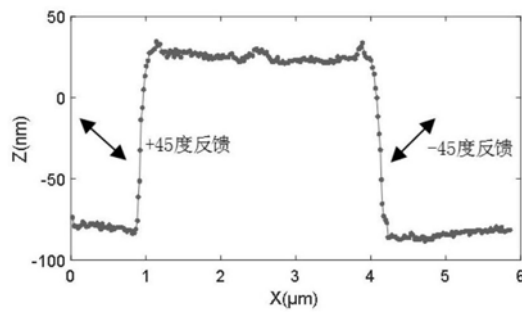


图12

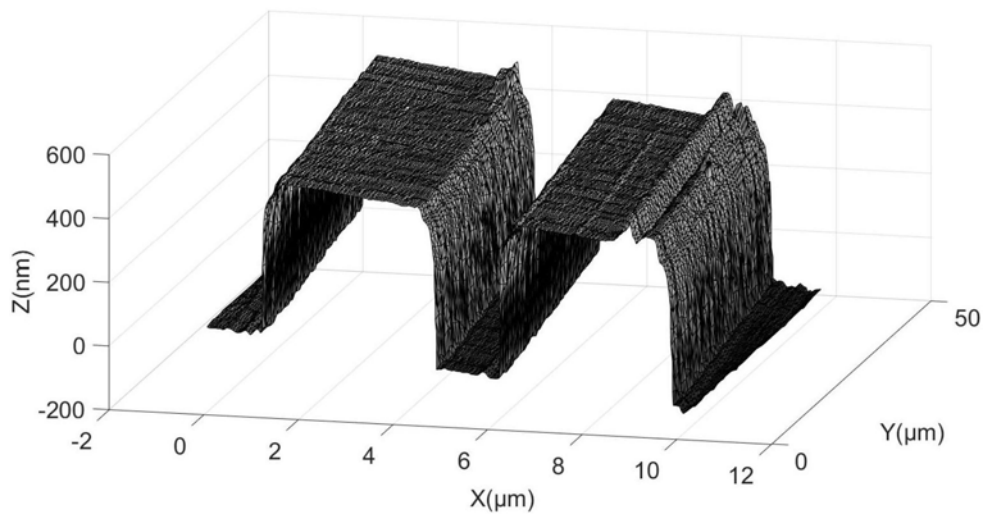


图13

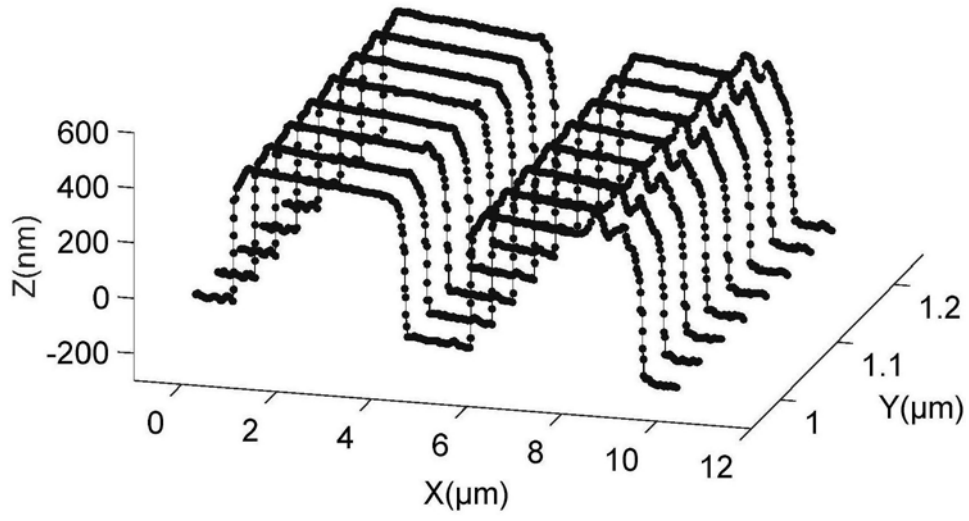


图14