面向 AFM 的纳米目标快速重定位方法

周培林^①, 于海波^{①*}, 赵增旭^{①②}, 焦念东^①, 刘连庆^{①*}

① 中国科学院沈阳自动化研究所, 机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016;

② 中国科学院大学, 北京 100049

* E-mail: yuhaibo@sia.cn; lqliu@sia.cn

收稿日期: 2014-07-04; 接受日期: 2014-09-25

国家自然科学基金(批准号: 61302003, 61304251)和中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划资助项目

摘要 原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)具有极高的观测分辨率和作业精度, 在纳米材料表征与纳米器件组装方面发挥了不可替代的作用. AFM 工作区域的选取依赖于光学显微镜, 受可见光波波长的限制, 光学显微镜的分辨率一般不超过 200 nm, 这导致光学显微镜无法有效辨识 AFM 观测目标样本所在的区域. 当样本被移动或者更换 AFM 扫描探针引起样本与探针针尖的相对位置发生变化时, 如何重新将 AFM 探针精确定位到原观测/操作区域具有非常大的挑战性. 本文研究提出了一种新的免标记探针重定位方法, 综合考虑了样本角度旋转与位置偏移两个因素, 首先利用光学显微镜选取样本基底上易于识别的自然特征作为参照点, 基于坐标变换原理实现微米级精度的探针盲定位, 进而通过 AFM 扫描图像的匹配获得 X-Y 水平方向的位置偏差, 通过修改 AFM 的扫描参数实现纳米目标的原位快速精确重定位. 该方法的优点在于不需要在纳米目标样本操作区域上制作特殊的标记, 操作过程简单、定位快速、定位范围较广且具有极高的重定位精度. 对纳米小球、单壁碳纳米管(single-walled carbon nanotubes, SWCNTs)、纳米划痕等样本的重定位实验验证了该方法的实用性和高效性.

关键词
AFM
重定位
免标记
纳米目标

1 引言

自从 1986 年 Binning 发明原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)以来^[1], 由于其极高的成像分辨率和操作精度, AFM 已经被广泛地应用于纳米研究的诸多领域, 是目前进行纳米观测与纳米操作最主要的工具之一. 在对碳纳米管^[2-6], 石墨烯^[7-9], 病毒^[10]等纳米材料和生物分子的形态、结构进行精细表征以及操作加工时^[11-13], 为了获取连续的、高分辨率的 AFM 图像, 需要频繁更换新的探针以保持针尖的

尖锐. 在利用 AFM 进行切割与刻画等操作时^[14,15], 也会因为针尖的磨损而经常地更换新探针. 由于 AFM 探针的尺寸参数存在差异, 以及在探针夹上的装针位置的偏差, 更换探针时会引起纳米目标和探针针尖相对位置发生变化. 此外, 在 AFM 观察/操作过程中, 需要在不同的设备间进行样品传递, 如利用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)进行大范围的观测, 当样品重新放回到样品台上, AFM 探针与待观察样本区域的相对位置就会发生变化, 很难将 AFM 探针重置到样本移走之前的位置,

引用格式: 周培林, 于海波, 赵增旭, 等. 面向 AFM 的纳米目标快速重定位方法. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 1145–1153
Zhou P L, Yu H B, Zhao Z X, et al. Study on the rapid relocation method of nano target for AFM (in Chinese). Sci Sin Tech, 2014, 44: 1145–1153, doi: 10.1360/N092014-00224

会有位置的偏移和角度的旋转, 这就导致很难进行 AFM 连续高分辨率观察与纳米操作。

为此, 一些研究组对 AFM 探针的重定位方法展开了研究。重定位方法主要应用在纳米样本被移动或者更换探针的场合。当实验样本需要移走进行重操作, 或者更换不同探针对样本进行观测表征时, 将 AFM 探针重新定位到原来的样本区域是进行二次观测/操作的前提。目前主要采用的方法是人为地制作一些标记, 包括在基底的正面^[16~18]或背面^[19,20]做标记, 或直接在样本表面做标记^[21], 通过系统自身的光学显微镜成像, 将 AFM 探针针尖对准标记实现重定位。但是这些标记的方法在实际操作中对基底材质及基底标记的技术要求较高^[22~25], 不仅对样本表面会造成一定的破坏, 而且其探针重定位效率较低, 准确性较差^[26], 限制了基于标记的 AFM 探针重定位技术的应用范围。2012 年, Zeng 等人^[27]通过 UV Lithography 工艺制作了一个具有三级尺寸精度的四极坐标基底, 进行样本重定位, 这种方法较之前的定位方法效率有所提高, 然而这种方法只适用于基底的水平和垂直移动, 当样本基底重置在样本台上, 角度相对于初始位置发生偏转后, 同一个位置很难被再次快速精确地找到, 在重定位的应用中具有很大的局限性。因此, 探索一种面向高分辨率连续观测与操作的快速且免标记 AFM 探针重定位方法, 对于提升 AFM 的作业效率, 实现连续大范围的精确观测与操作具有重要意义。

本文提出了一种面向 AFM 的纳米目标快速重定位方法, 综合考虑了样本角度旋转与位置偏移两种因素, 首先利用 AFM 系统的光学显微镜对特定不可视纳米目标进行微米级精度的盲定位, 然后通过调整 AFM 扫描头内部的压电陶瓷控制的探针扫描角度参数(scan angle)及位置偏移参数(X-offset, Y-offset)分别进行角度旋转修正和位置误差补偿, 进行纳米级精度的精确定位, 最终实现对纳米目标的快速精确重定位。光学显微镜的分辨极限大约是光波的半个波长, 受可见光波波长的限制, 光学显微镜的分辨率一般不超过 200 nm^[28], 实验中实现了对光学显微镜下不可视的纳米目标: 100 和 200 nm 的聚苯乙烯小球, 具有广阔应用潜力的 SWCNTs^[29~34], 纳米划痕, 纳米图案等样本的快速重定位, 验证了本方法的实用性和高效性。

2 实验仪器及样本处理

实验所使用的 AFM 系统为 Bruker 公司的 Dimension 3100, 如图 1(a)所示, AFM 探针在光学显微镜下的图像如图 1(b)所示, 其中 AFM 探针, 在扫描头内部压电陶瓷的驱动下可在 X, Y, Z 三个方向进行纳米级精度的运动, X, Y 平面最大移动范围为 100 μm ×100 μm , Z 向伸缩范围为 7 μm ; 扫描头正下方的样本台, 在高精度步进电机控制下可在 X, Y, Z 三个方向上进行微米级精度的运动, 在三个方向的最大运动范围分别为 120, 100, 10 mm。

实验所使用的聚苯乙烯纳米小球从 PolyScience 公司购买, 平均直径分别为 100 和 200 nm。实验过程, 首先将聚苯乙烯纳米小球原液与去离子水(DI Water)按 1:100 的比例稀释, 将制备好的样品放入超声波振荡器中在 40 kHz 的频率下超声处理 20 min, 即可得到浓度均匀的聚苯乙烯纳米小球溶液。

实验所使用的 SWCNTs 样品是由中国科学院金属研究所通过 CVD 方法制备的, 直径为 0.5~2.5 nm, 长度为 1~10 μm , 纯度约为 90%, 比表面积~380 m^2/g 。对 SWCNTs 的分散处理, 采用十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)阴离子表面活性剂做为辅助分散剂^[35]。

实验所使用的 AFM 探针来自 Bruker 公司生产的 TESP 型探针, 主要用于 Tapping 模式扫描, 能够进行稳定精确、高分辨率的成像, 该探针尖端曲率半径约为 8 nm, 针尖高度 10~15 μm , 悬臂梁长度为 125 μm ; SCM-PIT 型探针, Tapping 模式的导电探针, 针尖镀有一层铂, 适用于扫描电容模式(SCM)和电学表征。该探针尖端曲率半径约为 20 nm, 针尖高度 10~15 μm , 悬臂梁长度为 225 μm ; DDESP-10 型探针, 针尖

图 1 实验仪器

(a) Dimension 3100 AFM 系统; (b) 在系统光学显微镜下的 AFM 探针

有一层可导电的金刚石镀层, 可在较硬基底表面进行机械力的刻画加工, 该探针尖端曲率半径约为 35 nm, 针尖高度 10~15 μm , 悬臂梁长度为 125 μm .

3 实验原理及具体操作流程

3.1 实验原理

面向 AFM 的纳米目标快速重定位方法, 可分为 4 个步骤, 如图 2 所示, 具体如下.

第一步, 初次扫描时, 在光学显微镜下通过探针在非操作目标区域定位两个可视目标参照点 a 和 b , 及 AFM 的目标样本扫描区域中心点 c , 如图 3 所示. 记录 3 个点的相对坐标, 确定一个原坐标系 P , 如图 4 所示. 在原坐标系中, 以参照点 a 为原点, ab 为 Y 轴, 顺时针旋转 90° 为 X 轴, 建立原坐标系 $[P_x, P_y, P_z]^T$, 三点构成三角形 abc . 其中, 通过控制样本台在 X, Y 方向的运动实现探针对可视目标参照点与目标样本扫描区域中心点的定位, 实验所用样本台的运动分辨率 $X, Y=1 \mu\text{m}$, 重复移动定位精度为 $X, Y=\pm 3 \mu\text{m}$; 可以满足在较大范围($X=120 \text{ mm}, Y=100 \text{ mm}$)进行微米级精度定位的要求, 因此, 参照点的选取以易于识别作为根本原则.

第二步, 当更换 AFM 探针或样本移动后重新放置在显微镜的样本台上, 进行重定位时, 用探针进行

坐标定位, 样本相对于原来的位置, 以及放置角度会发生一定偏移. 重定位时, 找到两个可视目标参照点 a' 和 b' , 如图 3 所示. 记录相对坐标, 其中 a, b 与 a', b' 分别对应为同一位置点. 确定一个重定位坐标系 R , 如图 4 所示. 在重定位坐标系中, 以参照点 a' 为原点, $a'b'$ 为 Y 轴, 顺时针旋转 90° 为 X 轴, 建立重定位坐标系 $[R_x, R_y, R_z]^T$;

第三步, 进行探针盲定位. 根据 a, b, c 三点在原坐标系 P 中的位置关系, 通过对坐标系 R 和坐标系 P 进行平移和旋转变换, 其中坐标系 R 相对于坐标系 P 绕 Z 轴的旋转角度为 θ , 在重定位坐标系 R 可以找到特定纳米目标样本所在区域的中心点 c' , 其中 c 与 c' 为同一位置点, 三点构成一个三角形 $a'b'c'$; a, b, c 与 a', b', c' 分别对应为同一位置点, 即三角形 $a'b'c'$ 与三角形 abc 全等, 只是位置坐标发生了整体偏移和旋转角度 θ . 重定位坐标系 $[R_x, R_y, R_z]^T$ 和原坐标系 $[P_x, P_y, P_z]^T$ 之间的关系为

$$\begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}.$$

第四步, 进行探针精确定位. 通过 AFM 在 c' 点区域的扫描成像, 根据图像匹配, 对比 c' 点区域图像相对于 c 点区域图像的偏移, 通过调整 AFM 的扫描角度参数进行角度旋转修正, 通过调整位置偏移参数进行位置误差补偿, 从而实现对纳米目标的原位快速精确重定位.

3.2 具体操作过程

以 200 nm 聚苯乙烯小球样本进行重定位为例来说明具体操作过程. 将 200 nm 聚苯乙烯小球溶液滴在玻璃基底上, 静置 1 h, 待样本稳定后, 将样本基底放置在 AFM 系统的样本台上. 初次扫描成像过程如图 5 所示, 在非操作目标区域定位两个可视目标参照点 a ,

图 2 重定位流程图

图 3 三点位置示意图

图4 原坐标系与重定位坐标系示意图

b, 目标样本扫描区域中心点 c , 分别记录 3 个点的相对坐标. c 点区域的 AFM 扫描图像如图 6(a)所示.

1) 盲定位过程

当样本基底移动后, 重置在 AFM 系统的样本台上, 进行重定位时, 找到两个可视目标参照点 a' , b' , 记录相对坐标; 根据上述重定位实验原理, 分别建立原坐标系 $[P_x, P_y, P_z]^T$ 和重定位坐标系 $[R_x, R_y, R_z]^T$, 通过坐标计算, 可知直线 $a'b'$ 相对于直线 ab 逆时针偏转 6° , 从而可得三角形 $a'b'c'$ 相对于三角形 abc 的旋转角度 $\theta=6^\circ$, 根据上述重定位坐标系 $[R_x, R_y, R_z]^T$ 和原坐标系 $[P_x, P_y, P_z]^T$ 之间的关系, 可计算出特定 200 nm 聚苯乙烯小球样本重定位区域中心点 c' 的相对位置坐标, 通过坐标计算, 换算出 c' 点在 AFM 系统样本台的坐标值, 通过 AFM 系统的操作软件将 AFM 探针定位在 c' 点, 实现了盲定位, 扫描成像结果如图 6(b)所示.

2) 精确定位过程

首先, 将 AFM 的扫描角度参数调整为 -6° , 进行顺时针 6° 的旋转修正, 扫描图像如图 6(c)所示; 然后, 将图 6(c)与(a)对比, 取同一位置的点(图中黑框所示), 用 AFM 系统软件通过坐标计算, 得到定位误差为 X

图5 重定位操作过程示意图

图6 重定位具体操作过程

(a) 初始位置的 AFM 扫描图像; (b) 重定位初步盲定位的 AFM 扫描图像; (c) Scan Angle 校正后的 AFM 扫描图像; (d) 位置补偿修正后的 AFM 扫描图像

方向偏右 $1.619 \mu\text{m}$, Y 方向偏下 $2.09 \mu\text{m}$, 最后, 将 AFM 的位置偏移参数调整为 $-1.619, 2.09 \mu\text{m}$, 进行位置误差补偿, 扫描图像, 如图 6(d)所示. 将图 6(d)与(a)对比, 通过测量计算, 误差在 10 nm 以内. 综合考虑 AFM 扫描头内部压电陶瓷的非线性和系统温漂等客观因素对探针定位的影响^[36~38], 结果表明使用所述方法实现了纳米级精度的原位重定位.

4 实验结果及误差分析

在纳米器件加工过程中, 有时需要多次加工处理. 因此, AFM 探针重定位需要考虑三种情况: 1) 更换探针; 2) 样本移动; 3) 更换探针的同时移动样本. 下面对上述三种情况分别进行讨论.

4.1 更换探针后对样本进行重定位

SWCNTs 作为经典的纳米材料, 研究其电学性质需要使用 Tapping 扫描模式的 SCM-PIT 型导电探针, 该探针针尖镀有一层铂镀层, 由于该探针尖端曲率半径约为 20 nm , 无法精确表征 SWCNTs 的形貌结构, 卷积效应^[39,40]较为明显, 需要用探针尖端曲率半径约为 8 nm 的 TESP 型探针, 对 SWCNTs 的形貌结构

进行精确表征. 图 7(a)是用 SCM-PIT 型探针对 SWCNTs 电学特性表征时的扫描图像,可以看出卷绕效应较为明显;图 7(b)是用 TESP 型探针替换 SCM-PIT 型探针,对同一 SWCNTs 重定位后的扫描图像,成像较为精细准确;对比图 7(a)和(b),实现了样本的重定位和原位观测.

4.2 移动样本后对样本进行重定位

在实验过程中,会出现样本成像观测或操作在一次实验中无法完成或者需要二次处理的情形,这就需要移动样本,重新放置样本后找到原来的样本位置.当样本被移动后,如果样本上没有可用于观察

定位的明显标记,在厘米级区域的基底上重新扫描到原来的纳米目标样本几乎无法实现.本文提出的面向 AFM 的纳米目标原位快速可重复精确定位的方法,可快速高效地重定位到样本原区域.

如图 8(a)所示,首先用 TESP 型探针对硅片上有线宽 80 nm 划痕的特定区域扫描成像.扫描成像后,将硅片从 AFM 系统的样本台上取下,再滴加直径为 100 nm 的聚苯乙烯小球,待样本稳定后,重新放置在 AFM 系统的样本台上,对二次处理后的样本的特定区域进行扫描成像.

图 8(b)给出了在样本上滴定纳米小球后对样本特定区域进行重定位的扫描成像结果.从纳米划痕的位置可见成功定位到了原来的位置,在处理后的

图 7 换针重定位实验

(a) SCM-PIT 型探针对 SWCNTs 的扫描图像; (b) TESP 型探针对 SWCNTs 的重定位扫描图像

图 8 移动样本重定位实验

(a) 特定位置初次扫描图像; (b) 在样本上滴定纳米小球后对特定位置的重定位扫描图像

样本上有纳米小球分布在划痕周围. 实验结果表明所提出的方法对移动和重置样品的探针重定位是有效的, 这使得进行连续的 AFM 纳米加工成为可能.

4.3 复合情况下对样本的重定位

下面以纳米刻画, 对刻画结果进行精确表征及二次处理与操作为例, 展示同时更换探针与样本移动情况下的重定位实验结果, 在这些过程中通过本文所提方法可以始终快速精确重定位到目标区域的位置, 保证了纳米精确表征及二次操作实验的开展. 具体实验过程如下.

1) 在纳米刻画实验中采用 DDESP-10 型探针, 该探针针尖镀有一层可导电的金刚石镀层, 可在较硬基底如硅片等表面进行机械力的刻画加工, 实验中在 AFM 操作系统的 NanoMan 操作界面中, 采用恒力模式, 以刻画速度 $XY\ Velocity=100\ nm/s$, 针尖负载 $F_N=88.42\ \mu N$ 作为加工参数, 在硅片上 $5\ \mu m \times 5\ \mu m$ 的区域内, 加工了一个 SIA 图案, 扫描的图像如图 9(a)所示, 取局部几个位置进行测量, 平均线宽 $49.3\ nm$, 平均深度 $4.6\ nm$.

2) 由于 DDESP-10 型探针针尖的曲率半径约为 $35\ nm$, 卷积效应较为明显, 无法精确反应加工图案的形貌结构, 因此更换 TESP 型探针对其重新扫描成像. TESP 型尖端曲率半径约为 $8\ nm$, 主要用作 tapping 模式扫描探针, 能够进行稳定精确、高分辨率的成像. 更换新的 TESP 型探针后, 通过对加工完 SIA 图案的目标区域进行快速精确重定位, 扫描的图像如图 9(b)所示, 成像较为清晰精确, 取对应局部几个相同位置进行测量, 平均线宽 $61.3\ nm$, 平均深度 $7.3\ nm$.

3) 对样本进行二次处理, 将加工有 SIA 图案的硅片从 AFM 系统样本台上取下, 滴加 $100\ nm$ 聚苯乙烯小球后, 重置在样本台上. 利用本文的方法重新定位到原来的位置, 扫描图像结果如图 9(c)所示, 可见准确定位到原扫描区域, 在该区域有 2 个滴定上的纳米小球.

4) 利用 TESP 型探针对纳米小球进行操作, 推走一个 $100\ nm$ 聚苯乙烯小球, 其扫描图像如图 9(d)所示. 对比图 9(a)~(d), 虽然经历了更换探针、移动样本等一系列操作, 但仍可以精确定位到原目标区域, 实现了对纳米目标原位快速可重复精确定位与操作, 充分证明了这种面向 AFM 的纳米目标原位快速可重复精确定位的方法是方便快捷, 高效实用的.

图 9 综合重定位实验

(a) DDESP-10 型探针对 SIA 图案的实时扫描成像; (b) TESP 型探针对 SIA 图案的换针重定位扫描成像; (c) TESP 型探针对 SIA 图案的样本移动后重定位扫描成像; (d) TESP 型探针对 SIA 图案的重定位操作扫描成像

4.4 定位误差分析

AFM 重定位过程中, 主要有 3 个误差源: 参照点坐标定位误差, 步进电机控制 AFM 系统样本台移动的误差, 针尖定位误差. 其中参照点坐标定位误差和步进电机移动误差较小, 是随机误差不可控; 针尖定位是通过 AFM 系统的操作软件 Locate Tip 对探针进行对焦将光学显微镜的十字线对准到探针针尖上, 然后再通过 Focus Surface 对基底聚焦, 将十字线对准到基底的参照点上, 从而实现用 AFM 探针对基底参照点的坐标定位. 针尖定位误差是指 AFM 对针过程中十字线与针尖真实位置的偏差, 是主要误差, 也是可控误差. 当十字线对准针尖中线时可保证误差最小, 当十字线偏离针尖中线位置时, 会导致针尖定位误差增加. 因此实际操作时需要尽可能保证十字线与针尖实际位置重合.

5 结论

本文提出了一种面向 AFM 的纳米目标原位, 快速, 可重复, 精确重定位方法, 综合考虑了样本角度旋转与位置偏移 2 个因素, 在重定位过程中, 首先用

光学显微镜对特定不可视纳米目标进行微米级精度的盲定位, 然后利用 AFM 扫描头内部的压电陶瓷进行校正补偿, 通过调整扫描角度参数及位置偏移参数分别进行角度旋转修正和位置误差补偿, 进行纳米级精度的精确定位, 从而实现对纳米目标的原位快速精确重定位. 当更换 AFM 探针或样本被移动后, 重新放置在 AFM 系统的样本台上, 这个特定的纳米目标可以被快速精确地重新找到. 采用这种原位观

察和重定位的方法, 分别选用 100, 200 nm 聚苯乙烯小球, SWCNTs 作为样本以及刻画 SIA 图案等进行换针重定位和样本移动重定位实验, 实现了光学显微镜下不可视的纳米目标原位快速可重复精确重定位与操作, 充分证明了这种方法的有效性. 本文所提出的 AFM 探针重定位方法在纳米材料高分辨率连续观测与操作, 纳米器件多次加工作业等方面具有极大的应用潜力.

参考文献

- 1 Binnig G, Quate C F, Gerber C. Atomic force microscope. *Phys Rev Lett*, 1986, 56: 930
- 2 Postma H W C, Teepen T, Yao Z, et al. Carbon nanotube single-electron transistors at room temperature. *Science*, 2001, 293: 76–79
- 3 Kumar B, Feller J F, Castro M, et al. Conductive bio-Polymer nano-Composites (CPC): Chitosan-carbon nanotube transducers assembled via spray layer-by-layer for volatile organic compound sensing. *Talanta*, 2010, 81: 908–915
- 4 Dong Z, Wejinya U C, Chalamalasetty S N S. Development of CNT-ISFET based pH sensing system using atomic force microscopy. *Sensor Actuat A Phys*, 2012, 173: 293–301
- 5 Toader M, Fiedler H, Hermann S, et al. Conductive AFM for CNT characterization. *Nanoscale Res Lett*, 2013, 8: 1–6
- 6 Prabhu S, Vinayagam B K. AFM nano analysis of inconel 825 with single wall carbon nano tube in die sinking edm process using taguchi analysis. *Arab J Sci Eng*, 2013, 38: 1599–1613
- 7 Vasić B, Kratzer M, Matković A, et al. Atomic force microscopy based manipulation of graphene using dynamic plowing lithography. *Nanotechnology*, 2013, 24: 015303
- 8 Zhang Y, Wang Y C, Zhou L, et al. Cutting force anisotropy dependence on lattice structures of graphene based on nanorobot (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2013, 58(Suppl II): 181–186
- 9 Zhang Y, Liu L Q, Xi N, et al. Friction anisotropy dependence on lattice orientation of graphene. *Sci China Phys Mech*, 2014, 57: 663–667
- 10 Zhang C L, Liu L Q, Wang Y C, et al. Method of controllable 3D manipulation for single virus (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2013, 58: 1456–1462
- 11 Kwon G, Chu H, Yoo J, et al. Fabrication of uniform and high resolution copper nanowire using intermediate self-assembled monolayers through direct AFM lithography. *Nanotechnology*, 2012, 23: 185307
- 12 Tanyi E K, Srivastava P, Stumpf C, et al. Characterization of patterns produced by AFM Nano-Lithography on thin films of Lanthanum Barium Manganese Oxide, La_{0.7}Ba_{0.3}MnO₃. In: APS March Meeting Abstracts. College Park MD: APS Physics, 2013. 1090
- 13 Grant C A, Alfouzan A, Gough T, et al. Nano-scale temperature dependent visco-elastic properties of polyethylene terephthalate (PET) using atomic force microscope (AFM). *Micron*, 2013, 44: 174–178
- 14 Pyo S, Oh Y, Yi M. Organic thin-film transistors with submicrometer channel length fabricated by atomic force microscopy lithography. *Chem Phys Lett*, 2006, 419: 115–119
- 15 Wang Z Q, Jiao N D, Tung S, et al. Atomic force microscopy-based repeated machining theory for nanochannels on silicon oxide surfaces. *Appl Surf Sci*, 2011, 257: 3627–3631
- 16 Hahm J, Lopes W A, Jaeger H M, et al. Defect evolution in ultrathin films of polystyrene-block-polymethylmethacrylate diblock copolymers observed by atomic force microscopy. *J Chem Phys*, 1998, 109: 10111–10114
- 17 Hahm J, Sibener S J. Time-resolved atomic force microscopy imaging studies of asymmetric PS-b-PMMA ultrathin films: Dislocation and disclination transformations, defect mobility, and evolution of nanoscale morphology. *J Chem Phys*, 2001, 114: 4730–4740
- 18 Liu Z, Li Z, Zhou H, et al. Mechanically engraved mica surface using the atomic force microscope tip facilitates return to a specific sample location. *Microsc Res Techniq*, 2005, 66: 156–162
- 19 Markiewicz P, Goh M C. Identifying locations on a substrate for the repeated positioning of AFM samples. *Ultramicroscopy*, 1997, 68: 215–221
- 20 Cao Y, Liang Y, Dong S, et al. A multi-wall carbon nanotube (MWCNT) relocation technique for atomic force microscopy (AFM) samples. *Ultramicroscopy*, 2005, 103: 103–108
- 21 Wu Z, Zhang X, Zhang X, et al. Nanomanipulation aided AFM localization observation. *J Chinese Electr Microsc Soc*, 2006, 25: 356

- 22 Turner D C, Chang C, Brandow S L, et al. Use of a repositionable substrate to acquire and compare distinct atomic force microscope images of a field of microtubules. *Ultramicroscopy*, 1995, 58: 425–434
- 23 Gahlin R, Larker R, Jacobson S. Wear volume and wear distribution of hydraulic motor cam rollers studied by a novel atomic force microscope technique. *Wear*, 1998, 220: 1–8
- 24 Su M, Pan Z, Dravid V P. A convenient and rapid sample repositioning approach for atomic force microscopy. *J Microsc*, 2004, 216: 194–196
- 25 Wu A, Li Z, Yu L, et al. A relocated technique of atomic force microscopy (AFM) samples and its application in molecular biology. *Ultramicroscopy*, 2002, 92: 201–207
- 26 Maeda Y, Gao Y, Nagai M, et al. Study of the nanoscopic deformation of an annealed nafion film by using atomic force microscopy and a patterned substrate. *Ultramicroscopy*, 2008, 108: 529–535
- 27 Zeng L, Wu A, Wang Y, et al. In-situ observation and relocation method of nanomaterial samples based on microscope systems. *Microsc Res Techniq*, 2012, 75: 138–144
- 28 Abbe E. Beiträge zur theorie des mikroskops und der mikroskopischen wahrnehmung. *Archiv für mikroskopische Anatomie*, 1873, 9: 413–418
- 29 Iijima S, Ichihashi T. Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. *Nature*, 1993, 363: 603–605
- 30 Cao J, Wang Q, Dai H. Electromechanical properties of metallic, quasimetallic, and semiconducting carbon nanotubes under stretching. *Phys Rev Lett*, 2003, 90: 157601
- 31 Gui E L, Li L J, Lee P S, et al. Electrical detection of hybridization and threading intercalation of deoxyribonucleic acid using carbon nanotube network field-effect transistors. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 232104
- 32 Roy S, Chen X, Li M H, et al. Mass-produced nanogap sensor arrays for ultrasensitive detection of DNA. *J Am Chem Soc*, 2009, 131: 12211–12217
- 33 Yu G, Cao A, Lieber C M. Large-area blown bubble films of aligned nanowires and carbon nanotubes. *Nat Nanotechnol*, 2007, 2: 372–377
- 34 Sorgenfrei S, Chiu C, Gonzalez Jr R L, et al. Label-free single-molecule detection of DNA-hybridization kinetics with a carbon nanotube field-effect transistor. *Nat Nanotechnol*, 2011, 6: 126–132
- 35 Lay M D, Novak J P, Snow E S. Simple route to large-scale ordered arrays of liquid-deposited carbon nanotubes. *Nano Lett*, 2004, 4: 603–606
- 36 Li G, Xi N, Yu M, et al. Augmented reality system for real-time nanomanipulation. In: 2003 Third IEEE Conference on Nanotechnology. 2003 Aug 12–14, San Francisco. IEEE, 2003. 64–67
- 37 Zhan Z, Yang Y, Li W J, et al. AFM operating-drift detection and analyses based on automated sequential image processing. In: 7th IEEE Conference on Nanotechnology. 2007 Aug 2–5, Hong Kong. IEEE, 2007. 748–753
- 38 Liu L, Luo Y, Xi N, et al. Sensor referenced real-time videolization of atomic force microscopy for nanomanipulations. *IEEE-ASME T Mech*, 2008, 13: 76–85
- 39 Villarrubia J S. Scanned probe microscope tip characterization without calibrated tip characterizers. *J Vac Sci Technol B*, 1996, 14: 1518–1521
- 40 Villarrubia J S. Algorithm for scanned probe microscope image simulation, surface reconstruction, and tip estimation. *J Res NIST*, 1997, 102: 425–454

Study on the rapid relocation method of nano target for AFM

ZHOU PeiLin¹, YU HaiBo¹, ZHAO ZengXu^{1,2}, JIAO NianDong¹ & LIU LianQing¹

¹ State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

The atomic force microscope (AFM) has high observation resolution and operation precision, which plays an irreplaceable role in the characterization of nanomaterials and the assembly of nanodevices. The selection of AFM scan area depends on an optics microscope, whose resolution is generally no more than 200 nm due to the limitation of wavelength of visible light. Therefore, it is extreme challenge to relocate the AFM probe precisely to the initial scan area when the AFM probe is replaced or the sample is moved. In this paper, we study and present a new label-free method for the relocation of AFM probe. This method can cope with the variation of relative position between the AFM probe tip and target sample, which is caused by the angle rotation and position offset. Two easily-recognized features on the sample substrate are used as the reference points to realize the blind location of AFM probe with micron scale precision based on the principle of coordinate transformation. The high precision relocation of nano targets is obtained through matching AFM images and modifying the scanning parameters. The main advantage of this method is that the special man-made marks at the target sample area are not necessary. The relocation process of AFM probe is simple and rapid, with a wide location range and high accuracy. Experiments demonstrate that this method is very efficient to track the nanospheres, SWCNTs and nanoscratch.

atomic force microscope (AFM), relocation, label-free, nano targets

doi: 10.1360/N092014-00224