

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905826

非共振轻敲模式原子力显微镜的研究*

闫孝恒¹, 孔繁会¹, 邵永健², 李 鹏³

(1. 辽宁工程技术大学电气与控制工程学院 葫芦岛 125105; 2. 沈阳建筑大学信息与控制工程学院 沈阳 110168;
3. 国家纳米科学中心 中国科学院纳米科学卓越创新中心 中国科学院纳米标准与检测重点实验室 北京 100190)

摘要:原子力显微镜(AFM)是在微纳尺度观测以及操纵样品的重要工具。与传统的接触模式和轻敲模式 AFM 相比,非共振轻敲模式 AFM 因为其控制力精度高并可同步获取多种机械特性等优势得到了广泛的应用。采用基于背景相减和同步算法相结合的方法搭建了一套自制的非共振轻敲模式 AFM,并对位置检测电路建立了通用噪声仿真模型,优化了位置检测电路噪声,从而优化了最小可控力的精度,使其最小可控力小于 50 pN。接着通过对标准硅材料栅格进行形貌表征验证了系统的成像性能,以及对复合材料的形貌、粘附力、形变等多种力学性质表征,验证了系统及成像方法的有效性。

关键词:原子力显微镜;非共振轻敲;纳米表征;背景相减算法

中图分类号: TP23 TH742 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on non-resonant tapping mode atomic force microscope

Yan Xiaoheng¹, Kong Fanhui¹, Shao Yongjian², Li Peng³

(1. Faculty of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China; 2. School of Information and Control Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 3. CAS Key Laboratory of Standardization and Measurement for Nanotechnology, Center for Excellence in Nanoscience of Chinese Academy of Science, National Center for Nanoscience and Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Atomic force microscopy (AFM) is an important tool for observing and manipulating samples at micro-nanometer scale. Compared with traditional contacting mode and tapping mode AFMs, the non-resonant tapping mode AFM has got wide applications due to its high accuracy control force and the ability to acquire multiple mechanical characteristics simultaneously. In this paper, adopting the method based on combining the background subtraction and synchronization algorithm, a home-built non-resonant tapping mode AFM is built. A general noise simulation model is established for the position detection circuit, the position detection circuit noise is optimized, so that the precision of the minimum controllable force is improved, which makes the minimum controllable force smaller than 50 pN. The morphology characterization of the standard silicon lattice was performed to verify the imaging performance of the system. And the characterization of various mechanical properties of composite materials, such as morphology, adhesion force and deformation was carried out to verify the effectiveness of the system and the imaging method.

Keywords: atomic force microscopy; non-resonant tapping; nanometer-characterization; background subtraction algorithm

0 引言

自第一台原子力显微镜的研制以来,原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)在生命科学、材料科学、化学科学、信息科学等领域^[1-4]中已经成为纳米尺度观测以

及操控的重要工具。AFM 常用的两种模式为接触模式^[5-6]和轻敲模式^[7-8]。接触模式由于在扫描过程中针尖始终保持着与样品接触,产生较大的侧向力,容易导致针尖的损坏或者样品的损害,目前较少用于成像,仅用于研究摩擦、样品导电性等性质^[9-10]。轻敲模式有效地解决了这一问题,轻敲模式下悬臂梁在接近其一阶共振频率

收稿日期:2019-11-18 Received Date:2019-11-18

* 基金项目:国家自然科学基金(61604048,61327813)项目资助

处振动,以振幅或者频率偏移作为反馈信号,针尖与样品间歇地接触,这一方式减少了针尖-样品间的侧向力,从而拓展了AFM的应用范围。但轻敲模式并不是直接对针尖-样品间的相互作用力进行控制,而是对数个周期内的平均相互作用力进行操控,因而无法将其作用力控制得更小,且轻敲模式的相位成像表征的是样品的综合力学性质,无法将粘附力、弹性模量、能量耗散等力学性质单独定量的表征出来^[11]。而另一大类可统称为非共振轻敲模式,在此模式中悬臂梁在远低于其共振频率的频率处上下运动,针尖在每个像素点处均可看成准静态的过程,因此在每个像素点处探针受到的力均是可测量并可控制的。另外由于在测量形貌的同时还可获得力与距离的曲线,因而可从中解析得到样品的粘附力、弹性模量、形变、能量耗散等多种力学信息。最早的非轻敲共振模式为力阵列模式^[12],其使用三角波作为驱动信号,驱动扫描头进行上下振动,其控制也较为简单,即当针尖-样品之间的相互作用力达到设定值时探针就开始远离样品。Medalsy等^[13]采用力阵列模式对天然膜蛋白进行了成像,并对其物理性质和化学性质进行了成像研究;Reynaud等^[14]采用力阵列模式AFM测量了聚合物表面的杨氏模量。虽然它可以进行力学性质测量,但是由于是以三角波作为扫描头的驱动信号,在三角波的拐点处可能引起压电陶瓷管谐振,所以扫描速率、成像质量并不高。脉冲力模式AFM改用正弦波作为驱动信号,有效地改善了这一问题,并将其应用至区分癌细胞(HeLa, Panc)类型^[15]。但由于该方法必须要求针尖接触样品时受力的最大值大于其针尖脱离样品后的阻尼振荡信号(振铃信号)的最大值,导致其峰值受控力较大。后续的峰值力轻敲模式采用背景相减及同步平均算法改善了这一问题^[16-17]。首先其引入了背景相减算法以消除寄生偏转信号的干扰,由于探针在上下振动的过程中会受空气阻尼等因素的干扰,它们也会导致悬臂梁发生偏转,这个偏转就称为寄生偏转。在扫描过程中实际测得悬臂梁偏转是寄生偏转和针尖-样品相互作用力导致偏转的综合,因此只有将测得的数据减去寄生偏转,得到的才是针尖-样品相互作用力产生的偏转。接着它采用同步算法以辨别峰值受控力区域与探针脱离样品后的阻尼振荡区域。由于扫描头受固定的正弦信号激励进行上下运动,所以当扫描头运动到最低位置附近时,针尖-样品间的相互作用力达到最大值,因此其最大受控峰值力出现的时间应该在驱动信号的半个周期处附近。因而可在驱动信号半个周期前后设置一个有效窗口,在其中寻找最大受力点,即为法向峰值力点,以此作为成像的反馈量输入。该有效窗口将后续振动信号排除在外,因而最小峰值受控力与振铃信号无关,仅决定于系统的检测噪声。后续峰值力轻敲模式也得到了不断的改进和应用,Dokukin等^[18]

利用峰值力轻敲模式对扫描过程中由于粘附力瞬间消失而产生的振铃信号进行了研究,更精准地得到了样品的粘弹性;文献[19]在悬臂背面的针尖处粘贴一个磁珠,并在样品台下方施加一个交变磁场,通过调节磁场的强度控制磁珠受到的磁力大小,使得即使采用较软的悬臂也可以对较硬的样品进行弹性模量的测量;另外文献[20]又在峰值力轻敲模式的基础上,给悬臂梁额外施加一个二阶共振频率的振动信号,利用该二阶共振信号来额外获得样品的表面电势信息。但目前峰值力轻敲模式大部分在商业的仪器上实现,对其噪声优化及算法改进困难很大。因此本文首先在自制AFM平台上实现了非共振轻敲模式,且采用同步算法,使得最小受控力不受振铃信号影响,并且优化了系统噪声,实现了最小受控力控制精度可达PN级别,并在每个像素点得到准确的力曲线,从中获得了样品中黏附力、形变、弹性模量等一系列力学性质。

1 非共振轻敲模式AFM

1.1 AFM微小位移检测原理

AFM的原理是采用微小针尖与样品表面接触,其针尖尖端原子与样品表面原子间存在较为微弱的相互作用力,这一微弱的相互作用力会引起与针尖相连的悬臂梁发生偏转。对于偏转变化的探测目前比较常用的方法是采用光学杠杆放大检测^[21]。其检测原理如图1所示,激光入射至悬臂梁后,再经悬臂梁背面反射到位置敏感探测器(position sensitive detector, PSD)上。当其针尖受力 F 后,与之相连的悬臂梁随之产生法向偏移 ΔZ ,其导致反射至PSD上的光斑发生偏移 ΔA 。其光学放大关系可如式(1~3)所示。

$$\Delta A \approx 2\theta D \quad (1)$$

$$\theta \approx \frac{3\Delta Z}{2L} \quad (2)$$

$$\Delta A = \frac{3D}{L}\Delta Z \quad (3)$$

式中: θ 为探针偏转角度; L 为悬臂梁的长度; D 为经反射后光路的长度。被放大的悬臂偏转信号经过PSD转换为电流信号,再经过信号处理电路,最后转换为代表位置信号的电压信号。

1.2 非共振轻敲模式成像方法

非共振轻敲模式AFM核心是采用远低于悬臂共振频率的正弦信号直接激励 Z 向压电陶瓷使其带动探针整体做上下运动,同时根据同步信号得到峰值力的计算窗口,将得到的实时偏转信号与背景信号相减后的信号作为反馈输入来进行成像。具体步骤为:使探针逼近样品表面,确定样品位置后再将探针抬高样品,采集一定周期

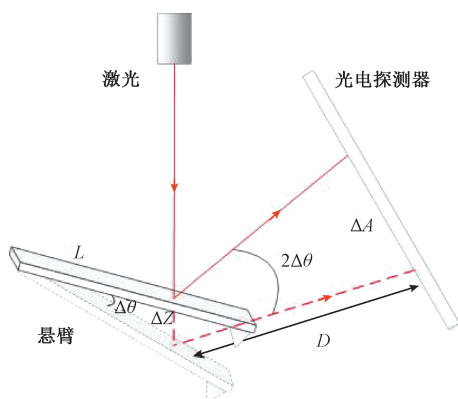


图1 AFM工作原理

Fig.1 Schematic diagram of the working principle of atomic force microscope

数的背景信号,并对背景信号进行求和取平均的数据处理,将探针再次压至样品表面,根据由下位机所产生的同步信号找到峰值力计算窗口范围并减掉对应的背景信号,再进行求和并取平均值后得到针尖与样品间真正的相互作用力引起的信号,并将其作为反馈信号作为PI (proportional integral) 控制器的输入,再将PI控制器的控制输出送入高压放大器,经高压放大器放大后的电压信号控制Z向压电陶瓷的运动,进而完成闭环控制,如图2所示。

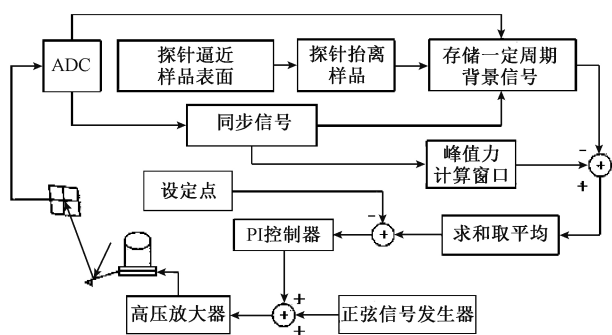


图2 系统控制流程

Fig.2 Control flow chart of the system

1.3 机械特性提取

非共振轻敲模式AFM非常重要的优势在于其在形貌之外还可同步获得力-距离的曲线,并可从中获得样品的粘附力、弹性模量、能量损耗和最大形变量等一系列性质。其针尖与样品的作用力随距离变化的曲线如图3所示。当针尖靠近样品时,刚开始其作用力可忽略不计(A点),当渐渐靠近时,体现出吸引力,小于某一阈值时(B点),针尖与样品瞬间接触。之后针尖继续压向样品,此时合外力表现为排斥力,当探针达到最低点时排斥力最大,此点作为力的峰值检测点,再通过采用PID

(proportion integration differentiation) 控制调节压电陶瓷的位置保持该点处作用力与设定值相等,进而进行形貌成像,在达到最低点后针尖抬起过程中将会受到样品对探针粘附力的作用,探针抬离过程中粘附力对针尖将会产生阻碍作用直到针尖脱离样品时,由于粘附力的忽然消失使悬臂产生衰减振动(D点)。

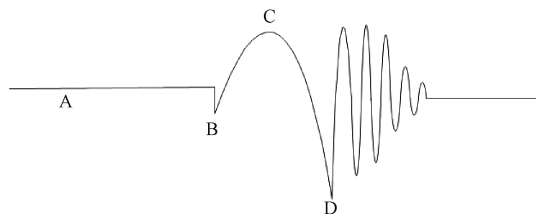


图3 针尖与样品间相互作用力-距离曲线

Fig.3 The curve of interaction force between needle tip and sample vs. distance

粘附力主要表现在针尖脱离样品时的瞬间的吸引力,包括范德华力、静电力等,通过力曲线的D点便可以进行粘附力成像。

形变表征的是当作用力达到峰值时针尖对样品所造成的形变,可以通过作用力达到峰值时和针尖刚接触样品表面时的差值便可得到形变成像图。

弹性模量可以通过较为常用的DMT (Derjaguin-Muller-Toporov) 模型来获得,如式(4)、(5)所示^[22]。

$$F - F_{adh} = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R d_{def}^3} \quad (4)$$

$$E^* = \left[\frac{1 - V_s^2}{E_s} + \frac{1 - V_t^2}{E_t} \right]^{-1} \quad (5)$$

式中: F_{adh} 为粘附力; R 为针尖的半径; d_{def} 为样品形变; E^* 为折合模态,通过换算可以得出样品的弹性模量 E_s , 其中 E_s 、 E_t 分别为样品和针尖的弹性模量; V_s 为样品的泊松比、 V_t 为针尖的泊松比。

2 实验系统

2.1 系统结构

自制非共振轻敲模式AFM系统主要包括PSD、激光器、Z向压电陶瓷、悬臂梁、样品扫描机构、控制器以及上位机。其中PSD采用First Sensor公司的QP50-6-TO8,其具有较低暗电流,降低了对后端信号处理电路的干扰,并且具有较小的寄生电容和较短的上升时间,尽可能地减少了对后端电路的带宽造成影响。PSD的后端采用自制的低噪声I-V转换电路以及运算电路对得到的悬臂偏转信号进行放大及运算处理;激光器采用SK公司的20C-A4,其配合驱动电路可使其功率在0~25 MW内可调,可更好地配合PSD的响应;Z向压电陶瓷采用高压放

大器输出响应反馈回路,使探针与样品之间的峰值相互作用力保持不变,并且还将它上下调整的距离值作为样品的形貌信息显示在上位机(电脑)的屏幕上。考虑 Z 向位移的行程与分辨率等因素,系统采用NS-Z09-01(三英公司) Z 向纳米位移台,其行程可达到 $8\text{ }\mu\text{m}$,分辨率为 0.1 nm ;在成像过程中减小样品受到的力可以有效减轻探针和样品的损伤,进而可以对粘附力较大或较软的样品进行成像,由于在非共振轻敲模式中,是直接对针尖与样品间的相互作用力进行控制,并且不需要悬臂自身的弹性势能来克服样品的粘附力,所以可以通过选择 k 值小的探针,将样品受到的力控制在一个很小的程度,因此实验中本采用弹性常数为 0.4 N/m 的SCANASYST-AIR(BRUKER公司)型号的探针;为避免探针在扫描过程中由于检测激光光斑的移动而引入误差,本系统采用样品扫描的扫描方式,样品扫描机构采用纳米位移台(PI公司,E-727),使样品可在 X 、 Y 方向上进行纳米级别的精确扫描运动,可实现为 $100\text{ }\mu\text{m}\times 100\text{ }\mu\text{m}$ 的最大扫描范围;控制器采用FPGA控制器(NI公司,USB-7856R),用来实现对光电探测器输出的悬臂偏转信号的采集、PI闭环控制算法以及 Z 向压电陶瓷的输出控制;电脑作为上位机,主要负责控制探针 X 、 Y 、 Z 3个方向的粗调运动、样品扫描结构的 XY 方向扫描运动、样品台 XY 方向和倾斜角度的粗调运动,以及作为实时显示操作结果和发送各种命令的人机交互界面,如图4所示。

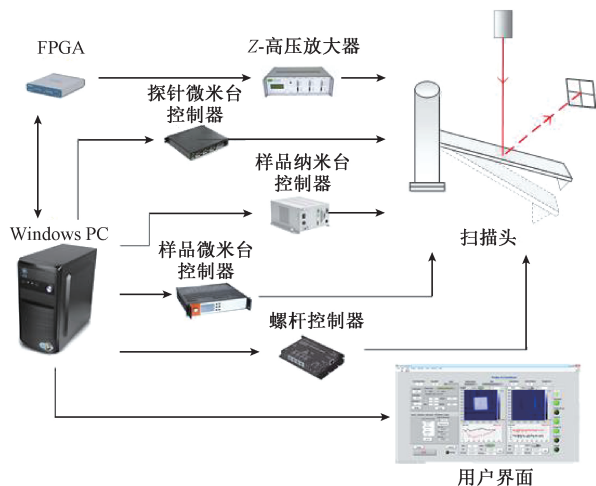


图4 系统结构

Fig.4 System structure

2.2 位置检测电路带宽与噪声的优化

光学杠杆放大检测方法,其核心部件是激光、PSD及相应的处理电路。其中PSD位置检测电路的输出噪声水平直接影响成像水平,所以其带宽及噪声的优化尤为重要。整个电路分为两部分,前半部分为 I - V 转换,后半部分是信号运算,运算部分又分为 X 轴方向、 Y 轴方向及

SUM值。

检测电路带宽主要由 I - V 转换电路带宽所决定, I - V 转换电路自身又存在着潜在的不稳定性,当满足 $|AF|=1$,环路相移为 180° 的条件时电路将会发生自激振荡,因此加入反馈电容通过牺牲带宽对电路进行补偿^[23]。转换电路带宽需满足式(6)。

$$f_{-3\text{db}} = \frac{1}{2\pi R_F C_F} \leq \sqrt{\frac{GBP}{2\pi R_F (C_i + C_F)}} \quad (6)$$

式中: GBP 为运算放大器的增益带宽积; C_i 为总输入电容; C_F 为反馈电容;运算电路带宽 $f_{-3\text{db}} = F \times GBP$, F 为反馈系数。

在考虑电路稳定性的同时还需要对电路的带宽与噪声之间进行平衡,电路的噪声主要由运算放大器的噪声电压密度、噪声电流密度以及电阻的热噪声构成,总输出噪声电压有效值受电路噪声增益以及带宽的影响,根据实际需要先选型了3款运算放大器芯片:LM6172、TLE2074、OPA659,接着运用仿真软件对这3款电路的带宽及噪声进行仿真跟实验验证。仿真采用Tina-TI软件建立通用噪声以及带宽仿真模型,确定好补偿电容后只需对通用放大器按照所选择的芯片手册进行基本参数设置以及对噪声模块进行设置即可得到输出噪声水平,这便为今后对仪器进行升级改造时对该部分芯片选型提供指导。电路噪声仿真结果如图5所示,通过输出噪声曲线可得到电路有效的带宽及输出总噪声,对比曲线可看出这3款运算放大器设计的电路均可超过 1 MHz ,满足仪器的需求,因此更关心其噪声水平。

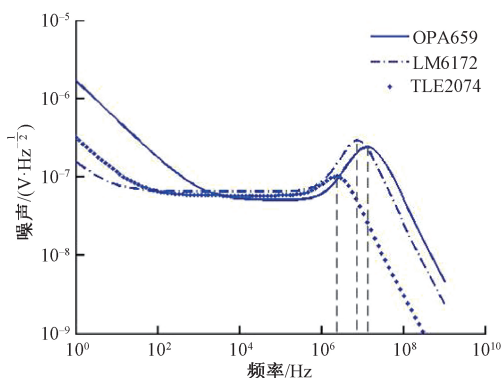


图5 位置检测电路的噪声仿真曲线

Fig.5 Noise simulation curve of the position detection circuit

为了验证位置检测电路的噪声水平,对电路进行了实际的噪声测试。测试过程中对PSD进行了遮光处理,以满足零输入电流的要求,并且为了防止外界噪声的干扰,需要对测试电路加上屏蔽罩进行屏蔽。噪声的测试方案是采用低噪声放大器(SR560, SRS公司)做后置放大器使用,将测试电路的输出噪声信号放大100倍后在通过示波器(MDO3024, 泰克公司)对噪声信号进行观察

测量。在测试之前首先对低噪声电压放大器和示波器进行了噪声测量,输出噪声有效值为 0.5 mV,等效到输入端为 5 μ V,根据噪声理论计算以及仿真可知处理电路输出噪声有效值为 200 μ V 左右,要远大于此值,确保了测试条件的合理性。测量电路如图 6 所示,测试结果与仿真基本相符,如表 1 所示,可看出 TLE2074 这款芯片在保证 1 MHz 带宽的同时,还可拥有最低的电路输出噪声,因此选用 TLE2074 作为本系统位移检测电路的运算放大器芯片。

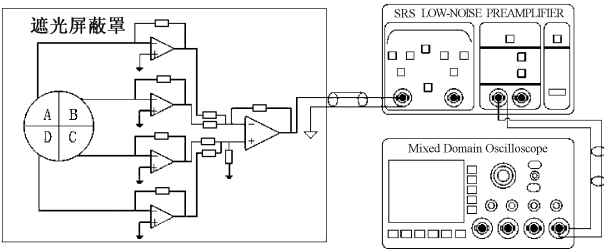


图 6 位置检测电路的噪声测量

Fig.6 Noise measurement of the position detection circuit.

表 1 采用不同芯片的带宽与噪声

Table 1 The bandwidth and noise of different chips

项目	TLE2074	LM6172	OPA659
理论可达最大带宽/MHz	2	7.4	14.86
理论输出噪声(限制 1 MHz 带宽)/ μ V	94.32	165.1	121.9
实际测量噪声(限制 1 MHz 带宽)/ μ V	171	281	195

3 实验与分析

在自制系统上,为了检测系统的最小可控力,本文首先在聚苯乙烯 (polystyrene, PS) 样品上对应的一个像素点获得了经过背景相减后的针尖受力曲线。这里取其中一个周期的信号如图 7 所示,从曲线前端可以得到系统的最小可控力小于 50 pN,这个最小力决定了成像控制的精度及质量。曲线的后端为由于针尖与样品之间粘附力忽然消失引起的逐渐衰减的振铃信号。

接着,为了验证本文提出的成像方法有效性与系统的性能,采用自制非共振轻敲模式 AFM 系统对标准栅格进行了成像。 Z 向压电陶瓷采用 400 Hz 的正弦信号作为激励进行扫描,行扫描频率为 0.5 Hz,扫描结果如图所示,图 8(a) 所示为扫描图像,图 8(b) 所示为轮廓曲线,可以看出正方形栅格的宽度以及高度与栅格的标称值基本一致,边长约为 5 μ m,高度约为 30 nm。

最后,采用本系统和商业 AFM 较为常用的轻敲模式分别对由两种不同材料低密度聚乙烯 (low density polyethylene, LDPE) 和聚苯乙烯 (polystyrene, PS) 组成

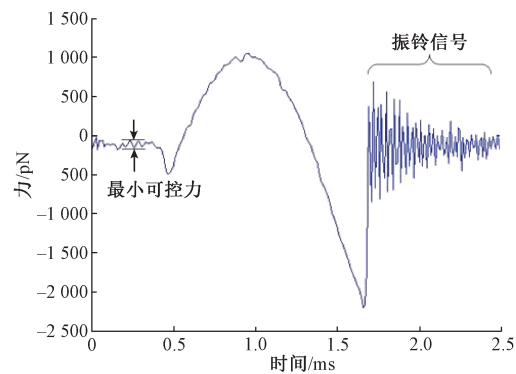


图 7 悬臂偏转力曲线

Fig.7 Cantilever deflection force curve

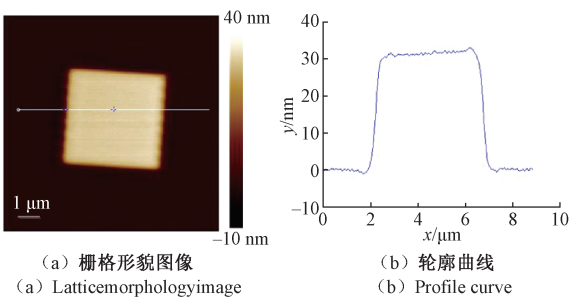


图 8 样品成像结果

Fig.8 The imaging results of the sample

的复合样品进行成像。图 9 所示为轻敲模式下对复合材料样品的成像结果,扫描范围为 3 μ m $\times$ 3 μ m,行扫描速率为 1 Hz。

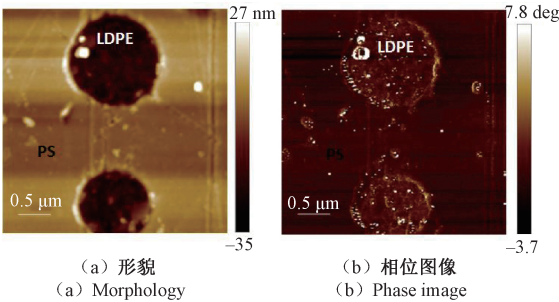


图 9 轻敲模式的样品扫描结果,扫描范围为 3 μ m $\times$ 3 μ m,行扫描速率为 1 Hz

Fig.9 The scanning results of the sample in tapping mode, scanning range is 3 μ m $\times$ 3 μ m, line scanning rate is 1 Hz

图 9(a) 所示为样品的形貌,描述了样品表面各位置的高度;图 9(b) 所示为样品的相位图,描述了悬臂在样品不同位置时振动信号与激励信号的相位差,可说明样品的性质存在差别,但它并不能区分是样品的何种性质不同。图 10 所示为对同一样品的非共振轻敲模式得到的结果,扫描范围为 3 μ m $\times$ 3 μ m,行扫描速

率为 0.5 Hz,峰值力的控制点为 1 nN。图 10(a)所示为该样品形貌图,可以看出该系统可以较为清晰地对复合材料样品形貌进行成像;在对形貌成像的同时也可以得到其误差图,如图 10(b)所示,较为准确地描述了系统对峰值力的设定值和实际测量值产生的误差;图 10(c)所示为样品形变成像,可以得到相互作用力在峰值力处针尖对样品作用产生最大形变图;图 10(d)所示为样品在该范围的粘附力成像,并可通过计算处理精确得到各点粘附力大小。图 10(c)与(d)能较好地将样品形变、粘附力信息提取,从而较为清晰地区分两种材料是何种信息的差别。

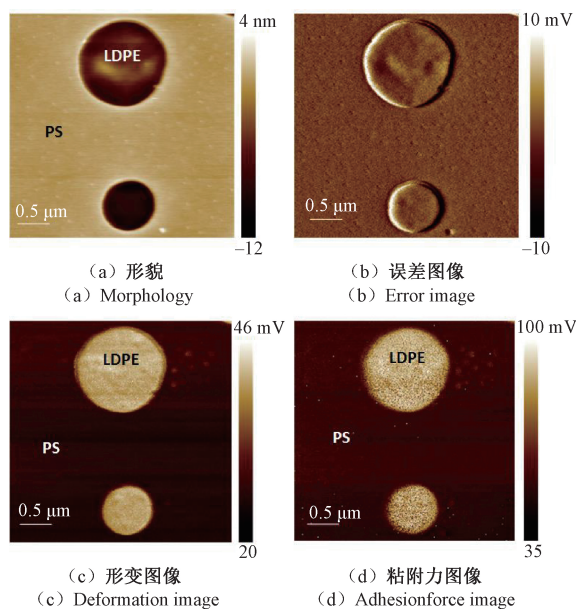


图 10 非共振轻敲模式的样品扫描结果,扫描范围为 $3\ \mu\text{m}\times 3\ \mu\text{m}$,行扫描速率为 0.5 Hz

Fig.10 The scanning results of the sample in non-resonant tapping mode, scanning range is $3\ \mu\text{m}\times 3\ \mu\text{m}$, line scanning rate is 0.5 Hz

4 结 论

本文搭建了一套非共振轻敲模式 AFM,背景相减及同步算法相结合实现了对峰值力更小的检测,而信号检测电路的噪声优化,进一步优化了这一最小可控力的检测精度,标准栅格的成像实验证实了非共振轻敲模式成像结果的可靠性。最后,对复合材料的成像实验证实了非共振轻敲模式在样品形貌信息获取的同时,还能获得多种机械特性,这也充分证实了非共振轻敲模式在成像控制力精度及多信息获得方面的优越性。下一步将对本系统的测量误差和分辨率进行研究,尤其是如何提高系

统的测量精度和分辨率,同时努力提高系统的扫描速度,为纳米科学提供更有利的科研工具。

参考文献

- [1] 高思田,李琪,施玉书,等.我国微纳几何量计量技术的研究进展[J].仪器仪表学报,2017,38(8):1822-1829.
- [2] 袁帅,尧晓,栾方军,等.基于随机方法的 AFM 探针位置最优估算研究[J].仪器仪表学报,2017,38(9):2120-2129.
- [3] 刘剑,马骏驰,于鹏,等.基于图像聚焦定位的 AFM 自动逼近方法研究[J].仪器仪表学报,2018,39(1):58-67.
- [4] SMIRNOV V A, TOMINOV R V, ALYAB'EVA N I, et al. Atomic force microscopy measurement of the resistivity of semiconductors [J]. Technical Physics, 2018, 63(8):1236-1241.
- [5] ANDRIUS D, VYTAUTAS B, DARIUS V, et al. Modification of the AFM sensor by a precisely regulated air stream to increase imaging speed and accuracy in the contact mode[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2018, 18(8).DOI: 10.20944/preprints201804.0112.v1.
- [6] MOORE S, BURROWS R, PICCO L, et al. A study of dynamic nanoscale corrosion initiation events by HS-AFM[J]. Faraday Discussions, 2018, 210:409-428.
- [7] 张胜,许红梅,尹耀庭,等.原子力显微镜系统 FAIT-PI 控制器设计[J].电子测量与仪器学报,2019,33(11):169-177.
- ZHANG SH, XU H M, YIN Y T, et al. Design of FAIT-PI controller for atomic force microscope system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation,

- 2019, 33(11):169-177.
- [8] 黄强先,张蕤,张连生,等.动态原子力显微镜悬臂高阶谐振相位特性研究[J].电子测量与仪器学报, 2016, 30(9):1411-1417.
- HUANG Q X, ZHANG R, ZHANG L SH, et al. Research on phase characteristic of higher-order resonance cantilever in dynamic AFM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(9):1411-1417.
- [9] HUMPHREY E, MORRIS N, LEIGHTON M, et al. Multiscale friction in lubricant-surface systems for high-performance transmissions under mild wear[J]. Tribology Letters, 2018, 66(3):77.
- [10] MOHIT K, BISWARUP S, TAPOBRATA S. Revealing multimode resistive switching in Cu-O nanostructures using conductive atomic force microscopy [J]. Applied Surface Science, 2018, 454:82-86.
- [11] KOCUN M, LABUDA A, MEINHOLD W, et al. Fast, high resolution and wide modulus range nanomechanical mapping with bimodal tapping mode [J]. ACS Nano, 2017, 11(10):10097-10105..
- [12] RADMACHER M, CLEVELAND J P, FRITZ M, et al. Mapping interaction forces with the atomic force microscope [J]. Biophysical Journal, 1994, 66(6):2159-2165.
- [13] MEDALSY I, HENSEN U, DANIEL J, et al. Imaging and quantifying chemical and physical properties of native proteins at molecular resolution by force-volume AFM [J]. Angew Chem Int Ed Engl, 2011, 50(50):12103-12108.
- [14] REYNAUD C, SOMMER F, QUET C, et al. Quantitative determination of Young's modulus on a biphasic polymer system using atomic force microscopy [J]. Surface & Interface Analysis, 2015, 30(1):185-189.
- [15] MARTI O, HOLZWARTH M, BEIL M. Measuring the nanomechanical properties of cancer cells by digital pulsed force mode imaging [J]. Nanotechnology, 2008, 19(38):384015.
- [16] 罗晓雷,施韬,顾元.基于原子力显微镜 PeakForce QNM 模式下的水泥基材料微区力学性能研究[J].科技通报, 2019, 35(5):159-166.
- LUO X L, SHI T, GU Y. Study on micro-mechanical properties of cement-based materials in atomic force microscope peakforce QNM mode [J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 35(5):159-166.
- [17] LI CH X, MEHDI O, GUO S L, et al. Application of PeakForce tapping mode of atomic force microscope to characterize nanomechanical properties of organic matter of the Bakken Shale[J]. Fuel, 2018, 233:894-910.
- [18] DOKUKIN M E, SOKOLOV I. Nanoscale compositional mapping of cells, tissues, and polymers with ringing mode of atomic force microscopy[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1):11828.
- [19] MENG X, ZHANG H, SONG J, et al. Broad modulus range nanomechanical mapping by magnetic-drive soft probes[J]. Nature Communications, 2017, 8(1):1944.
- [20] XIE H, ZHANG H, HUSSAIN D, et al. Multiparametric kelvin probe force microscopy for the simultaneous mapping of surface potential and nanomechanical properties[J]. Langmuir, 2017, 33(11):2725-2733.
- [21] LIU Y, GUO Q, NIE H Y, et al. Optimization and calibration of atomic force microscopy sensitivity in terms of tip-sample interactions in high-order dynamic atomic force microscopy[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(12):124507.
- [22] XU K, SUN W H, SHAO Y J, et al. Recent development of PeakForce Tapping mode atomic force microscopy and its applications on nanoscience [J]. Nanotechnology Reviews. 2018, 7(6):605-622
- [23] CHEN H, ZHONG Y Q, MENG ZH. A Practical pll-based drive circuit with ultra-low-noise tia for mems gyroscope[J]. Instrumentation, 2017, 4(3):7-13.

作者简介



闫孝姮, 2005 年、2008 年和 2016 年于辽宁工程技术大学分别获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为辽宁工程技术大学副教授, 主要研究方向为磁纳米粒子检测与成像。

E-mail: xiaohengyan@163.com

Yan Xiaoheng received her B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree in 2005, 2008 and 2016 all from Liaoning Technical University, respectively. Now, she is an associate professor in Liaoning Technical University. Her main research

interest include magnetic nanoparticle detection and imaging.



孔繁会,2017 年于黑龙江科技大学获得学士学位,现为辽宁工程技术大学硕士研究生,主要研究方向为微弱信号检测。

E-mail: fhuikong@163.com

Kong Fanhui received his B. Sc. degree from Heilongjiang University of Science and Technology in 2017. Now, he is a M. Sc. candidate in Liaoning Technical University. His main research interests include weak signal detection.



邵永健,2017 年于沈阳建筑大学获得学士学位,现为沈阳建筑大学硕士研究生,主要研究方向为四探针原子力显微镜的发展及应用。

E-mail: 996790676@qq.com

Shao Yongjian received his B. Sc. degree from Shenyang Jianzhu University in 2017. Now, he is a M. Sc. candidate in Shenyang Jianzhu University. His main research interests include

the development and application of four-probe atomic force microscope.



李鹏 (通信作者),2009 年于四川大学获得学士学位,2015 年于中国科学院沈阳自动化研究所获得博士学位。现为国家纳米科学中心助理研究员,主要研究方向为扫描探针刻蚀,多探针扫描探针显微镜及先进扫描探针技术。

E-mail: lipeng@nanoctr.cn

Li Peng (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2009 from Sichuan University and received his Ph. D. degree from Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences in 2015. Now, he is a research assistant at National Center for Nanoscience and Technology (NCNST). His main research interests include scanning probe lithography, multiple-tip scanning probe microscope and advanced scanning probe technique.