



基于小波变换的多频静电显微镜动态过程测量方法

王建海 钱建强 窦志鹏 林锐 许泽宇 程鹏 王丞 李磊 李英姿

Wavelet transform based method of measuring multi-frequency electrostatic force microscopy dynamic process

Wang Jian-Hai Qian Jian-Qiang Dou Zhi-Peng Lin Rui Xu Ze-Yu Cheng Peng Wang Cheng Li Lei Li Ying-Zi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 096801 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212095

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212095>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于小波变换的激光水下测距

Laser underwater ranging based on wavelet transform

物理学报. 2021, 70(18): 184205 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210569>

基于混合飞秒/皮秒相干反斯托克斯拉曼散射的动态高温燃烧场温度测量

Thermometry in dynamic and high-temperature combustion field based on hybrid femtosecond/picosecond coherent anti-Stokes Raman scattering

物理学报. 2021, 70(21): 214203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20211144>

多气隙电阻板室飞行时间谱仪技术

Time of flight technology based on multi-gap resistive plate chamber

物理学报. 2019, 68(10): 102901 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182192>

混杂复合材料等效热传导性能预测的小波-机器学习混合方法

Hybrid wavelet-based learning method of predicting effective thermal conductivities of hybrid composite materials

物理学报. 2021, 70(3): 030701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201085>

超声速湍流边界层密度脉动小波分析

Wavelet analysis of density fluctuation in supersonic turbulent boundary layer

物理学报. 2020, 69(21): 214702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200748>

基于Hadamard矩阵优化排序的快速单像素成像

Fast single-pixel imaging based on optimized reordering Hadamard basis

物理学报. 2019, 68(6): 064202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181886>

基于小波变换的多频静电力显微镜 动态过程测量方法*

王建海 钱建强[†] 窦志鹏 林锐 许泽宇
程鹏 王丞 李磊 李英姿

(北京航空航天大学物理学院, 北京 100191)

(2021年11月12日收到; 2021年12月14日收到修改稿)

静电力显微镜 (electrostatic force microscopy, EFM) 具有较高的灵敏度和空间分辨率, 在新能源材料静电性质的测量中被广泛应用. 时间分辨静电力显微镜技术主要用于材料的动态电学性质测量, 该技术中常用的泵浦探测方法存在设备装置复杂、成本昂贵、测量存在不确定性等问题. 本文采用直接时域测量方法, 减小了测量的实现复杂度, 通过应用多频激励或者激励悬臂高阶模态的方法实现了 EFM 多种参数同时测量和时间分辨率的提高, 达到了微秒级的时间分辨率, 并应用小波变换对测量得到的探针信号进行分析, 实现了对材料动态电学性质的提取. 通过应用该技术进行仿真实验, 实现了对模拟样品电势衰减过程中的动态电势变化和模拟电池放电过程中的离子运动特征时间等性质的测量.

关键词: 多频静电力显微镜, 时间分辨, 动态测量, 小波变换

PACS: 68.37.Ps, 43.60.Hj

DOI: 10.7498/aps.71.20212095

1 引言

原子力显微镜 (atomic force microscopy, AFM) 最初被用来探测材料形貌^[1], 经过了多年的衍生和发展, 出现了许多类各种功能的 AFM^[2-6], 其中, 静电力显微镜 (electrostatic force microscopy, EFM) 就是一种常用的样品表面电学性质表征技术^[7]. EFM 能够探测局域电荷^[8,9], 也能够用来探测材料中的动态电荷行为, 已广泛应用于半导体、催化剂、新能源电池、有机场效应管等材料^[10-16].

应用于动态电荷行为测量的时间分辨 EFM 方法主要可分为泵浦探测方法和直接时域测量方法. 其中泵浦探测方法依赖双脉冲激励悬臂得到的非线性响应来获取动态电荷行为信息^[17]. 这种方

法时间分辨率较高, 达到了皮秒级, 但是其在测量过程中存在额外的探针运动, 使针尖-样品距离总是在脉冲时刻发生波动, 给测量带来了不确定性^[18]. 此外, 泵浦探测方法需要在 EFM 的基础上附加较多装置, 实现困难且成本昂贵. 直接时域测量通过采集并分析整个动态过程中的探针信号来获得动态电学信息^[19,20]. 该方法实现较为简单, 但是受制于探针运动频率, 更适用于亚微秒至几秒的动态性质分析. 对电池充放电过程中导电离子传输和重组过程的观测, 微秒级的时间分辨率是足够的^[21]. EFM 测量时需要两次扫描来去除样品形貌的影响, 而这也带来两次扫描之间的轨迹误差. 近些年发展起来的多频 EFM 技术, 可以通过一次扫描, 同时测量样品形貌和静电性质, 减少了操作步骤, 提高了成像速度, 降低了轨迹误差, 提高了

* 国家自然科学基金 (批准号: 62171012) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: qianjq@buaa.edu.cn

成像空间分辨率. 并且因为采用激励悬臂的高阶模态, 提高了静电测量的灵敏度和时间分辨率^[22]. 本工作采用多频 EFM 直接时域测量方法, 避免了泵浦探测的不确定性, 大幅减小了动态过程测量的操作和设备复杂度, 且能够达到微秒级的时间分辨率.

应用小波变换来分析动态过程中获得的探针信号, 相比于应用信号分析中常用的傅里叶变换, 小波变换具有时间分辨功能. 目前, 小波变换已经成功应用于 AFM 的测量, 主要应用在图像或信号降噪、特征提取和力谱分析等方面^[23–25]. 因为其时频分辨率可变, 所以可以分析不同频率组成的混合信号, 能够满足多频 EFM 测量所得的动态多频信号的时频分析要求.

2 模型构建与分析方法

2.1 模型构建

本文构建的仿真模型为多频 EFM 模型, 其装置如图 1 所示. 其中, 悬臂的第一模态采用机械力 F_m 激励, 高阶模态 (一般为第二阶) 采用一个调制的交流电压 $U_{AC}\sin(\omega t)$ 激励. 针尖-样品间的静电力为

$$F_e(t) = \frac{1}{2} \frac{dC}{dD} [U_S - U_{AC}\sin(\omega t)]^2, \quad (1)$$

式中, dC/dD 为针尖和样品间的电容梯度, U_S 为样品的表面电势. 悬臂在静电力和机械激励的作用下的运动方程为

$$\ddot{z}_i + \frac{\dot{z}_i}{\omega_i Q_i} + z_i = \frac{F_{ei}(t)}{k_i} + \frac{F_{mi}}{k_i}, \quad (2)$$

式中, i 为悬臂的模态阶数; F_{ei} 为 i 阶模态的静电力

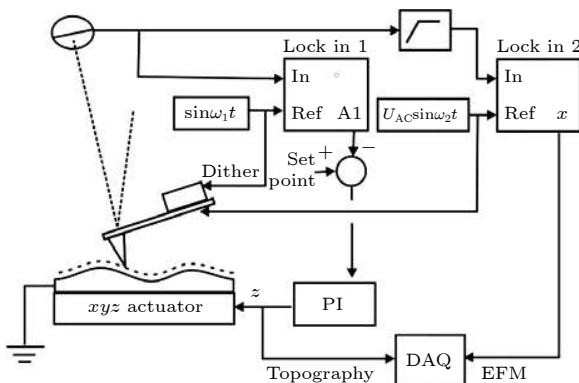


图 1 多频 EFM 测量装置^[26]

Fig. 1. Multifrequency EFM devices^[26].

分量; F_{mi} 为 i 阶模态的机械力分量; z_i , ω_i , Q_i , k_i 分别为悬臂的 i 阶模态的振幅、频率、品质因数和刚度.

推导 (2) 式可得探针稳定振动时的第二模态振幅大小为

$$A(\omega_2) = \frac{2\pi\epsilon_0 Q_2}{k_2} \cdot \frac{1}{(z_a/R)^2 + z_a/R} U_S U_{AC}, \quad (3)$$

式中, R 为探针半径, z_a 为初始探针抬升高度.

固体导体中, 离子输运对外部电场的影响会有延迟和拉伸的响应, 表现在样品表面电势上为增长延迟和衰减延迟过程, 其中, 衰减延迟过程中的样品表面电势变化大多满足下述关系式:

$$V = V_m \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (4)$$

式中, V_m 为样品表面电势初始极大值, τ 为离子运动特征时间. 本文在仿真中将以电池放电过程为例来研究测量电学动态过程中的离子运动特征时间等参数.

在仿真模型中, 仪器参数设置参考了实验室中仪器 (Park XE-100 E) 的实际实验参数设置, 主要参数为 $k_1 = 0.2$, $k_2 = 7.86$, $Q_1 = 40$, $Q_2 = 250.8$, $f_1 = 75$ kHz, $f_2 = 470.25$ kHz 和 $R = 20$ nm.

2.2 分析方法

对于任意一个信号 $f(t) \in L^2(R)$, 其连续小波变换为^[27]

$$W_f(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (5)$$

式中, a 为伸缩参数, b 为平移参数, $\psi_{a,b}$ 为连续小波函数. 小波变换具有可变的时频分辨率, 能够对多种频率混合的信号进行时频分析, 适用于分析多频激励产生的探针信号. 在构建理论仿真模型之后, 可以通过输入电势变化曲线来模拟动态过程发生时的样品表面电势变化. 经由仿真模型获得整个动态过程的探针信号后, 可以使用小波变换对探针信号进行分析.

小波变换分析探针信号的整个过程如图 2 所示. 图 2(a) 为多频激励得到的探针信号, 经由小波变换后得到时频分析结果如图 2(b) 所示, 锥形图外灰色区域为因小波变换的边缘测不准效应舍去的部分, 锥形图内亮暗表示信号振幅的大小, 两条较为明亮的信号带即为探针前两阶模态振动信号.

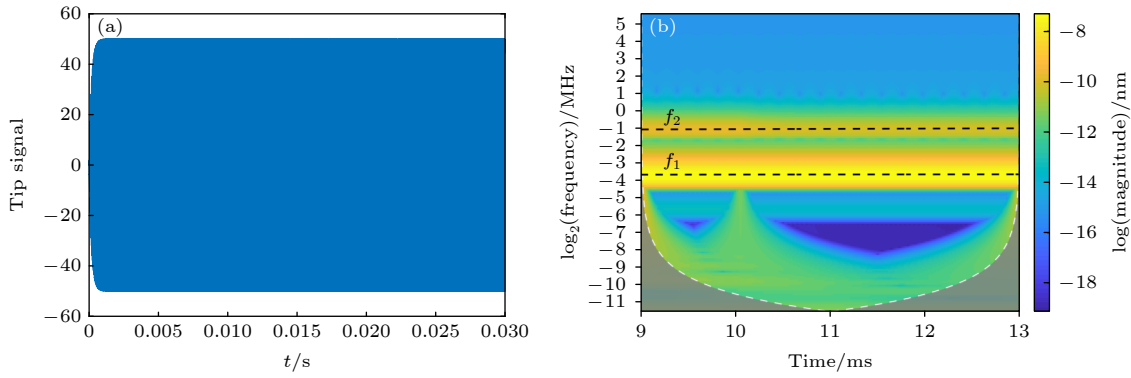


图 2 多频探针信号的小波变换分析过程 (a) 探针信号; (b) 小波时频分析结果

Fig. 2. Wavelet transform analysis process for multifrequency tip signal: (a) Tip signal; (b) the result of wavelet time-frequency analysis.

通过小波变换分析多频混合的信号, 提取第一模态 f_1 和第二模态 f_2 的信号在时频图上的模的大小, 即能得到两个模态在时间尺度上的幅值变化.

3 结果分析与讨论

3.1 动态电势测量

本工作对一个表面电势从 0.01 s 开始由 2 V 变化到 1 V, 发生时间为 50 μ s 的样品表面电势衰减过程进行仿真模拟, 探针激励采用双模态激励模式, 第一模态的设定振幅为 50 nm, 第二模态交流电激励大小为 1 V, 得到的结果如图 3 所示. 其中图 3(a) 为探针第一模态振幅, 忽略小波变换方法的边缘效应, 悬臂的第一模态振幅从 0.01 s 开始发生变化, 与样品表面电势变化同步, 第一模态振幅整体呈先减后增的趋势. 产生这种趋势的原因为静电相互作用存在第一模态的分量, 在 0.01 s 处样品表面电势突变使静电力骤减, 第一模态振幅相应减小. 而在 50 μ s 后, 电势衰减停止, 此时静电力由突变状态过渡至稳定的状态, 第一模态振幅同样会逐

渐增大至稳定值. 不过整个过程的第一模态幅值改变量只有其振幅大小的 0.02% 左右, 不会影响样品形貌的测量, 可以忽略不计. 图 3(b) 为第二模态振幅, 同样是从 0.01 s 开始变化且幅度较大, 这是因为第二模态由静电力激励, 样品电势变化会直接影响振幅变化. 图 3(a) 和图 3(b) 的局部放大图都显示出了两个模态的幅值在电势稳定的时间也不稳定, 存在周期性的波动, 这说明, 在整个探针振动过程中, 无论是否存在样品电势动态变化, 两个模态的振动都会发生相互干扰.

设样品表面电势由 U_1 变为 U_2 , 探针第二模态稳定时振幅由 A_1 变为 A_2 , 由 (3) 式有

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (6)$$

图 3(b) 中的第二模态的振幅变化前后比例关系为 $\frac{0.168 \text{ nm}}{0.084 \text{ nm}} = \frac{2 \text{ V}}{1 \text{ V}}$, 与理论推导出的 (6) 式结论一致. 为了验证这种理论关系以及减小第一模态振动对第二模态振动的影响, 仿真了多组不同双模态激励参数设置的情况, 得到的结果如图 4 所示.

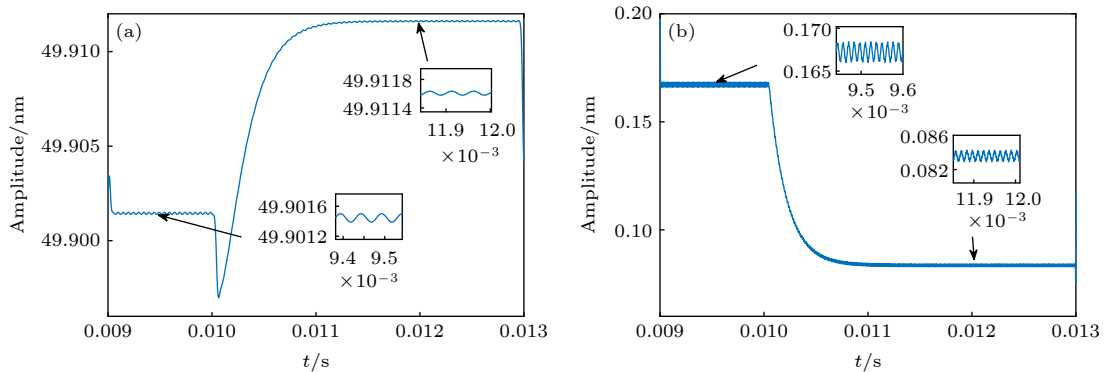


图 3 整个动态过程中的探针振幅 (a) 第一模态振幅; (b) 第二模态振幅

Fig. 3. Tip amplitude during the whole dynamic process: (a) The first eigenmode amplitude; (b) the second eigenmode amplitude.

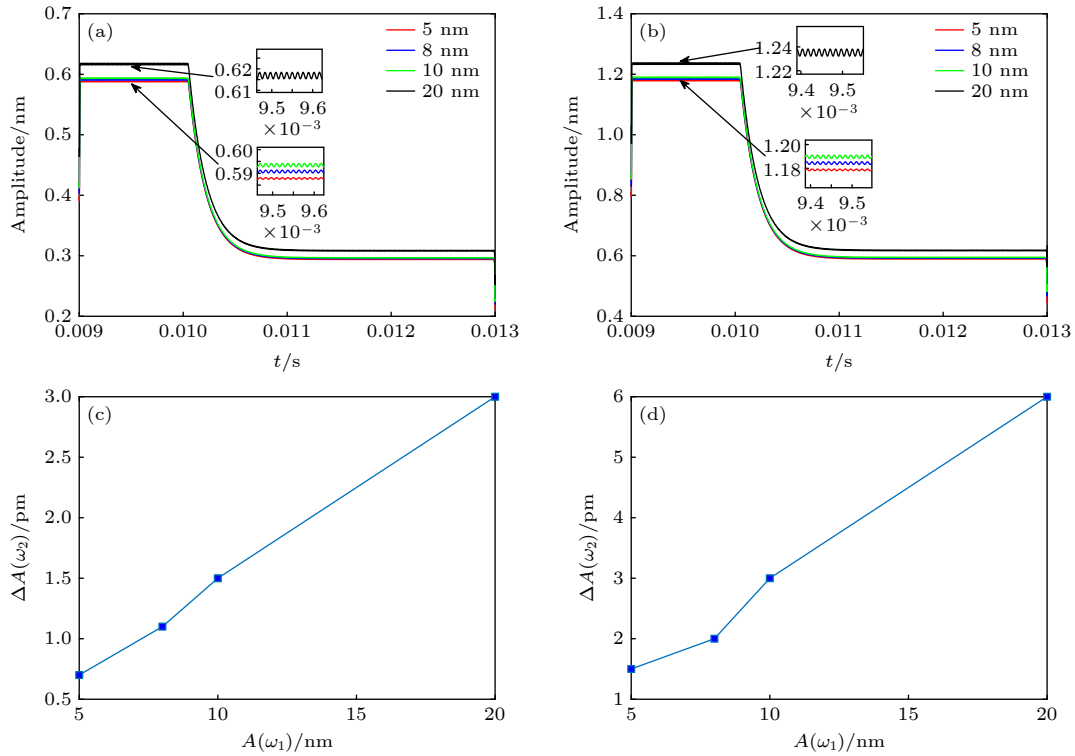


图 4 第二模态激励电压为 (a) 5 V, (b) 10 V 时, 分别测量第一模态振幅为 5, 8, 10, 20 nm 时的第二模态振幅变化; (c), (d) 为 (a) 和 (b) 对应的第二模态幅值波动与第一模态振幅设定值之间的关系

Fig. 4. Changes of second eigenmode amplitude when the first mode amplitude is 5, 8, 10, 20 nm with the second eigenmode excitation of (a) 5 V, (b) 10 V; (c), (d) are the relationships between the amplitude fluctuation of the second mode and the value of the first eigenmode amplitude corresponding to (a) and (b).

由图 4 可知, 当第二模态激励电压确定时, 改变第一模态激励大小对第二模态的振幅影响不大. 当激励电压为 5 和 10 V 时, 第二模态振幅在动态过程发生前后的振幅比均为 2:1 左右, 与设定的样品表面电势变化一致. 而第二模态在稳定激励的前提下, 振幅波动大小与第一模态的激励大小相关, 取稳态波动时振幅极大值减去极小值为波动幅度. 激励电压为 5 和 10 V 两种情况下的波动幅度与第一模态振幅的相关性如图 4(c) 和图 4(d) 所示. 第二模态振幅波动幅度大小与第一模态振幅正相关, 所以在测量时, 要保证更准确的静电测量结果, 在不影响 EFM 正常工作的情况下, 可适当降低第一模态的机械激励, 以降低第二模态振幅波动的影响.

采用双模态激励的方法能够同时实现样品形貌测量和电学性质测量, 其中, 悬臂的第一模态被用于扫描样品的形貌, 通过分析第二模态振幅在动态过程前后的变化, 能够得到样品表面电势的变化. 在测量过程中, 适当减小第一模态的机械激励, 能够降低第二模态电学性质测量的误差, 保证测量的准确性.

3.2 特征时间测量

固体导体中的离子运动的特征时间测量对理解其整个动态电学过程极为重要, 电池放电过程是一种典型的固体电学动态过程, 当电池放电过程持续发生时, 电池内离子运动的时间一般在微秒级, 其表面电势变化满足 (4) 式. 测量其离子运动的特征时间需要微秒级的时间分辨率, 这需要悬臂振动得更快来实现更高的时间分辨率. 又因为样品电势一直处于动态变化中, 导致悬臂振幅也会随之变化, 不再满足稳定振幅与表面电势之间的关系式 (6), 需要探索新的振幅与样品表面电势关系. 由于时间分辨率的要求更高, 需要去除不同模态振动之间的干扰, 所以把第一模态激励设为零, 只激励更高阶的悬臂模态的方案来测量电池放电过程的离子运动特征时间.

选择现有探针模态最大值 5 MHz 为激励模态, 仿真参数为 $Q = 200$, $k = 80$, 样品初始表面电压设为 5 V, 探针抬升高度设为 50 nm. 为了找到特征时间和激励模态振幅之间的关系, 本工作设定了不同特征时间参数来模拟不同的电荷运动过程,

保持激励电压为 5 V 不变, 进行了多组仿真测试, 其结果如图 5 所示.

由图 5(a) 可以看出, 探针振幅在整个动态过程变化迅速. 不同特征时间对应的动态差别很小, 都是由一个定值迅速下降到 0 附近, 但是从局部放大图可以看出, 不同 τ 值对应的探针振幅存在细微差别, τ 值越小, 振幅减小得越快. 为了探讨 τ 的大小和探针振幅变化之间的量化关系, 截取不同 τ 值对应的探针振幅开始变化后的 5 μs 处的振幅, 与初始值的改变量比较, 得到振幅变化量与样品表面电势变化的关系, 如图 5(b) 所示. 在图 5(b) 中, $\Delta U = V_m \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$ 为样品电势的变化大小, 从图中趋势可见, ΔA 与 ΔU 近似成正比, 说明对于 τ 值的动态过程, 探针振幅的减小量与样品电势变化在极短时间内成正比, 通过这种比例关系, 可以在测得探针振幅在动态过程发生时的变化大小后, 得到样品电势的变化值, 由 (4) 式即可求得对应的特征

时间 τ .

除上述仿真之外, 改变激励电压的大小和探针的抬升高度, 保持其他参数不变, 同样取值点设为 $t = 5 \mu\text{s}$ 处, 可以得到几组探针振幅变化和样品表面电势大小的关系 (图 6).

对图 6 中的 3 条曲线和图 5(b) 分别做线性拟合, 得到在抬升高度为 50 nm, 激励电压分别为 1, 5, 10 V 时的探针振幅变化与样品表面电势变化的关系. 曲线斜率的大小分别为 0.0032, 0.016, 0.033. 当激励电压为 1 V 时, 为增大探针振幅以便于观测, 把探针抬升高度减小为 20 nm, 结果如图 6(c) 所示, 作线性拟合, 曲线斜率大小为 0.017. 综上, 可以得出斜率大小与激励电压正相关, 与抬升高度负相关. 这种关系表明, 在实际测量中, 为了保证其准确性, 必须保持不同测量之间的其他参数一致, 才能使用关系曲线推导出样品的电学动态性质参数.

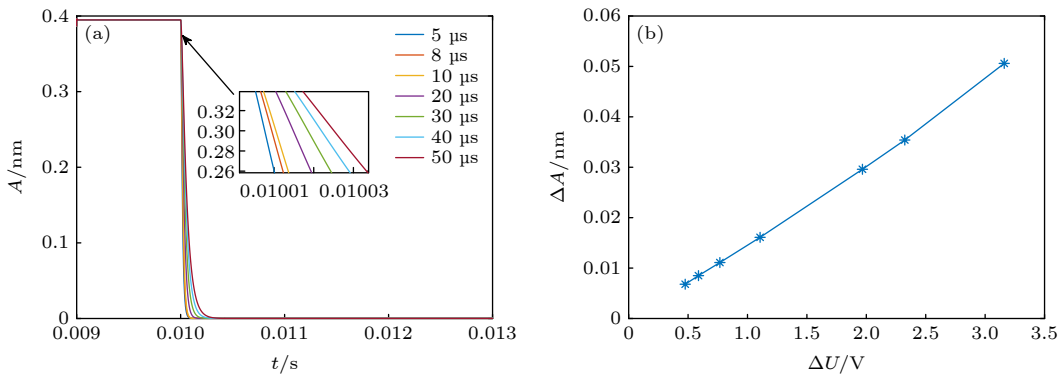


图 5 (a) 参数设置恒定, 特征时间 τ 为 2, 5, 10, 20, 30, 50 μs 时的整个电势衰减过程对应的探针振幅; (b) 在 $t = 5 \mu\text{s}$ 处, 不同 τ 值对应的探针振幅改变大小与样品表面电势改变大小之间的关系

Fig. 5. (a) Tip amplitude of the entire potential decay processes when the other parameters are constant and the characteristic time τ is 2, 5, 10, 20, 30, 50 μs ; (b) the relationship between the change of the tip amplitude and the change of the sample surface potential corresponding to different τ at $t = 5 \mu\text{s}$.

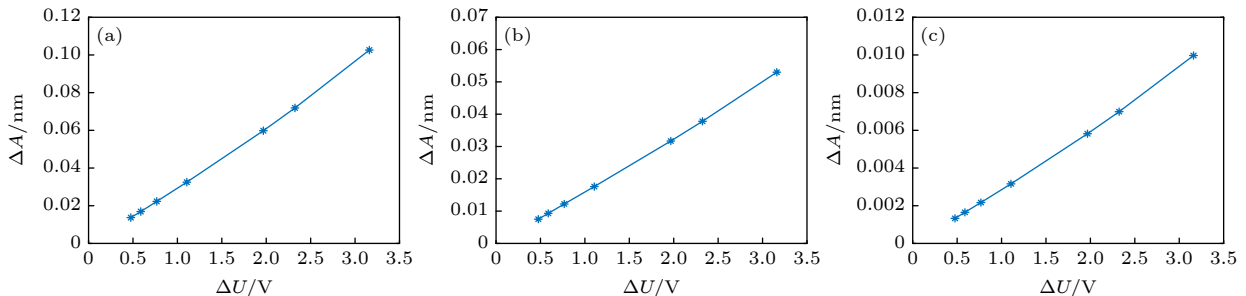


图 6 探针振幅变化与样品电势变化大小之间的关系 (a) 激励电压为 10 V, 抬升高度为 50 nm; (b) 激励电压为 1 V, 抬升高度为 20 nm; (c) 激励电压为 1 V, 抬升高度为 50 nm

Fig. 6. Relationship between the change of the tip amplitude and the change of the sample surface: (a) The excitation voltage is 10 V, and the lift height is 50 nm; (b) the excitation voltage is 1 V, and the lift height is 20 nm; (c) the excitation voltage is 1 V, and the lift height is 50 nm.

4 结 论

本文提出了一种基于小波变换的多频 EFM 动态测量方法. 这种方法是一种直接时域测量方法, 通过分析探针振幅获取材料的动态电学性质. 相比于泵浦探测方法, 规避了测量时的不确定性且易于实现, 通过激励悬臂的高阶模态提高了测量的时间分辨率. 对样品电势衰减过程中的初末态的表面电势变化和电池放电过程中的离子运动特征时间进行了仿真研究, 结果表明, 利用双频激励方法, 实现了样品形貌和表面动态电势的同时测量. 通过激励更高的悬臂模态, 发现样品电势变化与探针振幅变化在极短时间内成正比, 由这种比例关系能够测量微秒级的离子运动特征时间.

参考文献

- [1] Binnig G, Gerber C, Stoll E, Albrecht T R, Quate C F 1987 *Surf. Sci.* **189-190** 1
- [2] Li Y, Qian J Q, Li Y Z 2010 *Chin. Phys. B* **19** 050701
- [3] Rugar D, Mamin H J, Guethner P, Lambert S E, Yogi T 1990 *J. Appl. Phys.* **68** 1169
- [4] Kalinin S V, Eliseev E A, Morozovska A N 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 232904
- [5] Nonnenmacher M, Oboyle M P, Wickramasinghe H K 1991 *Appl. Phys. Lett.* **58** 2921
- [6] Hansma P, Drake B, Marti O, Gould S A C, Prater C B 1989 *Science* **243** 641
- [7] Girard P 2001 *Nanotechnology* **12** 485
- [8] Martin Y, Abraham D W, Wickramasinghe H K 1988 *Appl. Phys. Lett.* **52** 1103
- [9] Stern J E, Terris B D, Mamin H J, Rugar D 1988 *Appl. Phys. Lett.* **53** 2717
- [10] Okamoto K, Yoshimoto K, Sugawara Y, Morita S 2003 *Appl. Surf. Sci.* **210** 128
- [11] Lochthofen A, Mertin W, Bacher G, Hoeppe L, Bader S, Off J, Hahn B 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 022107
- [12] Sasahara A, Pang C L, Onishi H 2006 *J. Phys. Chem. B* **110** 17584
- [13] Zhu J, Zeng K, Lu L 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 063723
- [14] Yamagishi Y, Kobayashi K, Kimura T, Noda K, Yamada H 2018 *Org. Electron.* **57** 118
- [15] Araki K, Ie Y, Aso Y, Matsumoto T 2016 *Jpn. J. Appl. Phys.* **55** 070305
- [16] Fukuzawa R, Takahashi T 2020 *Rev. Sci. Instrum.* **91** 023702
- [17] Schumacher Z, Spielhofer A, Miyahara Y, Grutter P 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 053111
- [18] Murawski J, Mönch T, Milde P, Hein M P, Nicht S, Zerweck-Trogisch U, Eng L M 2015 *J. Appl. Phys.* **118** 244502
- [19] Giridharagopal R, Rayermann G E, Shao G, Moore D T, Reid O G, Tillack A F, Masiello D J, Ginger D S 2012 *Nano Lett.* **12** 893
- [20] Karatay D U, Harrison J S, Glaz M S, Giridharagopal R, Ginger D S 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 053702
- [21] Jung W, Cho D, Kim M K, Choi H J, Lyo I W 2011 *P. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **108** 13973
- [22] Mascaro A, Miyahara Y, Enright T, Dagdeviren O E, Grutter P 2019 *Beilstein J. Nanotech.* **10** 617
- [23] Maksumov A, Vidu R, Palazoglu A, Stroeve P 2004 *J. Colloid Interf. Sci.* **272** 365
- [24] Carmichael M, Vidu R, Maksumov A, Palazoglu A, Stroeve P 2004 *Langmuir* **20** 11557
- [25] López-Guerra E A, Banfi F, Solares S D, Ferrini G 2018 *Sci. Rep-U.K.* **8** 7534
- [26] Stark R W, Naujoks N, Stemmer A 2007 *Nanotechnology* **18** 65502
- [27] Wang Z Y, Qian J Q, Li Y Z, Zhang Y X, Song Z H, Dou Z P, Lin R 2019 *Micron* **118** 58

Wavelet transform based method of measuring multi-frequency electrostatic force microscopy dynamic process^{*}

Wang Jian-Hai Qian Jian-Qiang[†] Dou Zhi-Peng Lin Rui Xu Ze-Yu
Cheng Peng Wang Cheng Li Lei Li Ying-Zi

(*School of Physics, Beihang University, Beijing 100191, China*)

(Received 12 November 2021; revised manuscript received 14 December 2021)

Abstract

Electrostatic force microscopy (EFM) has high sensitivity and lateral resolution, and it is widely used to measure the electrostatic properties of new energy materials. The time-resolved electrostatic force microscope technology is used to measure the dynamic electrical properties of materials, pump detection method commonly used in this technology has problems such as complex equipment, high cost, and uncertainty in the measurement. In this work the method of directly measuring the time domain is adopted. This method reduces the complexity of measurement. By using the multi-frequency or high-frequency excitation method, the simultaneous measurement of multiple EFM parameters and the improvement of time resolution can be achieved, reaching a time resolution of microseconds, and by applying wavelet transform to the tip signal obtained by the measurement the dynamic electrical properties of the materials can be extracted. Applying this technology to simulation experiments, it is possible to measure the dynamic potential changes and the characteristic time parameter of ion movement in the microsecond-level electrical dynamic process of the simulated battery materials.

Keywords: multi-frequency electrostatic force microscopy, time resolution, dynamic measurement, wavelet transform

PACS: 68.37.Ps, 43.60.Hj

DOI: [10.7498/aps.71.20212095](https://doi.org/10.7498/aps.71.20212095)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62171012).

[†] Corresponding author. E-mail: qianjq@buaa.edu.cn