



ASYLUM RESEARCH

## 应用文档

# Vero干涉式原子力显微镜 -对压电力显微镜(PFM)准确性的 研究进展

## 引言

Vero原子力显微镜(AFM)的名字取自拉丁语词根ver，意思是“真相”。Vero AFM采用了基于干涉仪的专利设计<sup>1</sup>，直接测量针尖位移，将AFM带入了前所未有的精度极限。

有趣的是，目前几乎所有的原子力显微镜都不能直接测量针尖位移，而必须依靠光杠杆间接测量来代替。具体来说，大多数AFM只能通过校准后测量悬臂梁偏折或角度变化来推断针尖位移。不幸的是，这是主要的误差来源，因为该模型的前提假设是悬臂梁的弯曲或任何角度变化都只源于针尖位移的变化。而事实上，即使在无针尖位移的情况下，许多响应也会影响悬臂的偏折或角度，例如静电、面内样品力以及扫描过程中针尖与样品之间的力，因此会产生误差，而这类误差可能被误认为真实信号。压电力显微镜(PFM)就是深受这些伪像困扰的一项表征技术<sup>2,3</sup>。本文详细地讨论了这些伪像的成因和解决方法，从而展示了Vero AFM在PFM测量中的优势。

## PFM背景

PFM能够表征样品的纳米级机电响应。在这种模式下，压电材料会在外加电场的作用下表现出机械应变，这种现象被称为逆压电效应。通常，导电探针与样品接触并将电场施加在样品上，通过检测悬臂梁偏折来推断针尖的位移，从而测量产生的应变。

然而，具有讽刺意味的是，给样品局部加电场，也就是PFM测量本身的原理，都可能会导致误差。通过悬臂加电压，本意在诱导样品的压电响应，也会导致悬臂因静电产生弯曲，然而大多数原子力显微镜会将这个信号误解为针尖位移。这导致在测量已知的压电样品时，有效压电耦合系数值并不一致。此外，也有许多关于在各种材料中观察到“奇怪的”铁电性的报道，尽管这些材料甚至没有铁电性的物理基础<sup>4</sup>。

由于大多数AFM只能通过悬臂梁的角度来反映针尖位移，无法将样品的压电响应与其他导致悬臂梁弯曲的因素区分开来，使得PFM测量存在不确定性。幸运的是，Vero AFM因直接测量针尖位移，而不会受这些伪像的影响，大大提高了PFM的可信度与准确性。

## Vero防止PFM伪像的特殊设计

任何AFM的核心都是测量针尖位移的能力。到目前为止,几乎所有的原子力显微镜都是通过一种被称为“光杠杆”或“光束偏转”(optical beam deflection, OBD)的检测系统实现的<sup>5,6</sup>。在这种系统中,悬臂是光学杠杆,将其偏折的角度变化转换为针尖位移来实现间接测量。简单地说,当针尖位移发生变化时,悬臂偏折也会发生相应的变化。然而,反过来并不一定是成立的—即当悬臂的角度变化并不完全对应针尖的位移变化时,基于OBD光杠杆的AFM就会产生伪像。

通过光杠杆探测器测量悬臂角的替代方法是通过干涉法直接测量悬臂位移。干涉式探测器在AFM的设计早期就被提出<sup>7</sup>,但相较于基于OBD的探测器,因成本和复杂性基本被放弃了。直到2015年, Cypher IDS成为第一个与外部干涉仪耦合的商用AFM<sup>8</sup>,此后,它在各领域提供了精确无串扰的纳米级功能测量,包括存储器<sup>9</sup>、光子计算<sup>10,11</sup>、能量存储和生产、体声谐振器等MEMs器件和2D材料<sup>12,13</sup>。

Vero AFM标志着干涉式AFM的发展又向前迈进了一步,它首次采用内置的正交相位差分干涉仪(Quadrature

phase differential interferometer, QPDI)<sup>14</sup>,直接测量精确的针尖位移,而不必从悬臂角的变化来间接推断。虽然源于各种因素的悬臂弯曲仍然可能发生,但Vero AFM通过特殊的设计完全不受这些因素影响,如图1所示。

具体来说,当Vero AFM的干涉点放置于针尖正上方时,对悬臂弯曲的测量就会变得不敏感,针尖就像悬臂得以弯曲的支点。

## PFM中的静电伪像

悬臂梁和样品之间的静电作用可能是PFM测量中误差的一个重要来源<sup>15</sup>,其中一个特别突出的后果是在极化翻转谱PFM<sup>16</sup> (SS-PFM)中,即使是非铁电样品,也能得到所谓的铁电翻转<sup>4</sup>。

SS-PFM可以用来表征样品的滞回极化翻转,或据情况判断是否缺乏这种翻转特性。在这项技术中,直流偏压会以方波的形式施加到样品上,该方波的幅度随时间而增加,同时测量样品的PFM响应。如果样品是铁电的,变化的直流偏

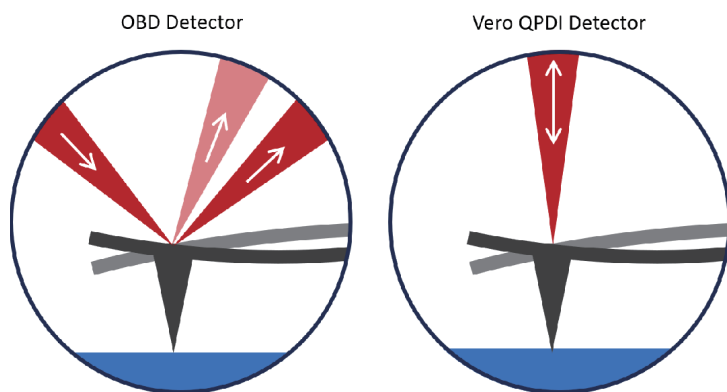


图1: 在没有压电响应的样品上进行PFM测量时,施加偏压的悬臂梁会因静电而弯曲。

基于OBD的AFM会由于悬臂角度的变化而错误假设为针尖的位移变化,而基于QPDI的Vero AFM因干涉点直接位于针尖所在而对静电引起的弯曲不敏感。

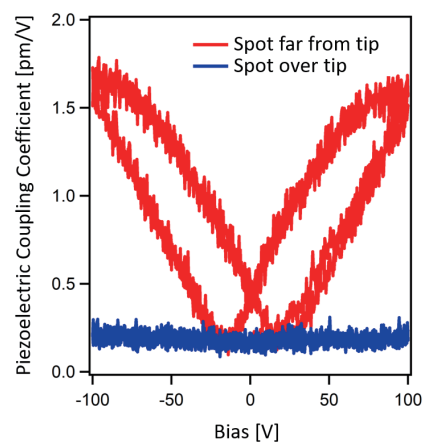


图2: 当Vero干涉点位于远离悬臂针尖的位置时,钠钙玻璃上的SS-PFM会因记录的位移信号中含有探针偏折而得出假的“蝴蝶”曲线。

然而,正如预期的那样,当Vero干涉点正定位于悬臂针尖上方时,SS-PFM信号是平的,是无响应的。

压应该引起极化翻转,从而产生一个标志性的“蝴蝶”滞回曲线。然而,探针和样品之间的非局域静电作用会使这种解释复杂化。

当SS-PFM应用于钠钙玻璃这种非铁电样品时,也能观察到明显的滞回翻转响应。甚至当针尖没有与钠钙玻璃表面接触时,都可以观察到类似的SS-PFM响应,这表明这种滞回效应是由于悬臂梁和样品之间的非局域静电相互作用造成的,而并不是真正作为铁电材料标志的极化翻转<sup>17</sup>。

图2对比了使用Vero AFM进行的两次SS-PFM测量,唯一的区别是干涉光斑的放置位置。当光斑位于远离悬臂针尖的位置时,测量对悬臂的静电弯曲十分敏感。尽管Vero的QPDI探测器对悬臂角不敏感,但如果干涉点位于远离悬臂针尖支点的地方,它就可以测量该位置由静电弯曲引起的悬臂位移。由静电引起的悬臂角度变化被误解为实际的压电响应,这导致了一个错误的翻转谱响应。这种错误响应类似于上一代基于光杠杆检测的原子力显微镜所观察到的情况。然而,当Vero干涉点直接位于悬臂针尖时,测量就不受这种静电弯曲的影响了,这时观察到响应是平的,正如钠钙玻璃(非铁电样品)所期望的那样。通过这种方式,Vero AFM

可以明确界定样品是否存在铁电响应。

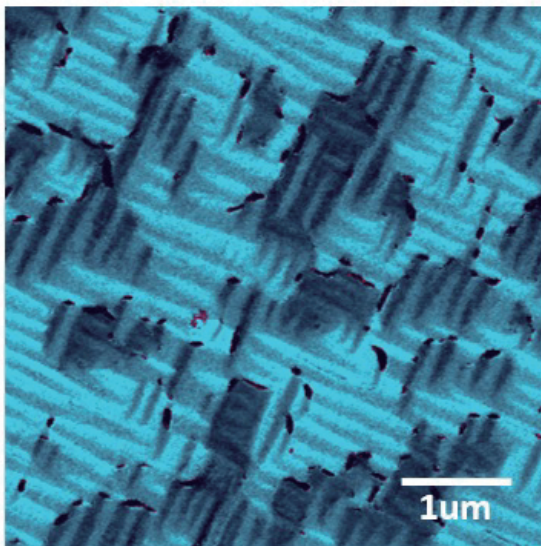
## 面内压电响应的串扰伪像

当针尖受到面内作用力的影响,悬臂可能会发生屈曲或纵向弯折,导致偏折角发生变化。这对于信号通常很小的PFM测量尤其重要,因为样品可能具有一些面内压电响应。这种面内响应沿着悬臂梁长轴方向的分量可以导致悬臂梁弯曲,这会增加或减少实际测量的垂直压电响应,干扰到面外的信号。

这种信号交叉耦合可以在基于OBD的AFM和基于QPDI的Vero AFM对铁酸铋(BFO)的PFM测量中观察到,BFO是一种具有面内和面外压电响应分量的多铁性样品。两种AFM使用相同的探针和扫描设置,并且对相同位置进行成像,如图3所示。基于OBD的测量采用接触共振来放大PFM信号,而基于QPDI的Vero测量采用30kHz的固定驱动频率。

BFO(001)样品预计不会有太多的面外信号衬度,但是

a) OBD – PFM Phase



b) QPDI – PFM Phase

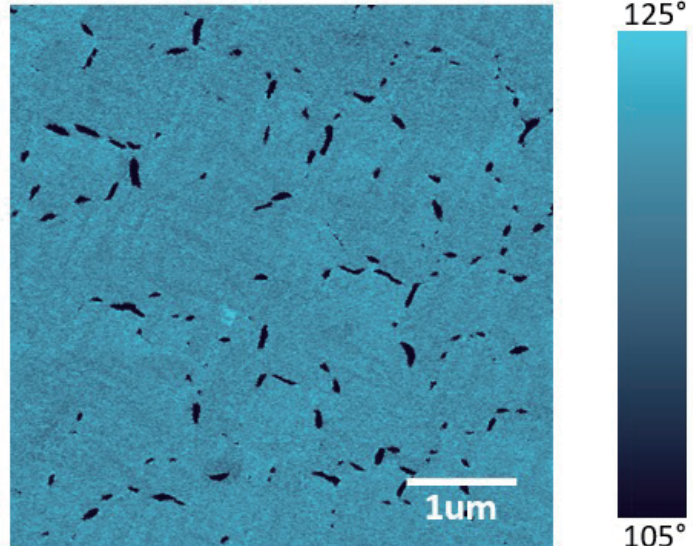


图3: 在PFM测量过程中,BFO的面内压电响应会导致悬臂梁弯曲,基于OBD的AFM会错误地将其解释为面外压电响应。这种串扰不会出现在基于QPDI的Vero AFM中,因为Vero是直接测量针尖位移,与悬臂角度变化无关。

基于OBD的AFM所获得的相位通道中却能看到显著的信号对比度,如图3a所示。然而,使用基于QPDI的Vero AFM,当干涉点直接位于针尖上方时,这种衬度不再存在,如图3b所示。这表明图3a中所示的所谓面外纵向压电响应信号是一个伪信号,是BFO面内压电响应交叉耦合的结果,因为样品面内压电响应沿着悬臂梁长度方向的分量会导致悬臂梁弯曲。相比之下,由于Vero AFM检测测量针尖位移,它对BFO的面内响应不敏感,只会显示真实的纵向面外响应。

## 扫描过程中针尖与样品作用力的伪像

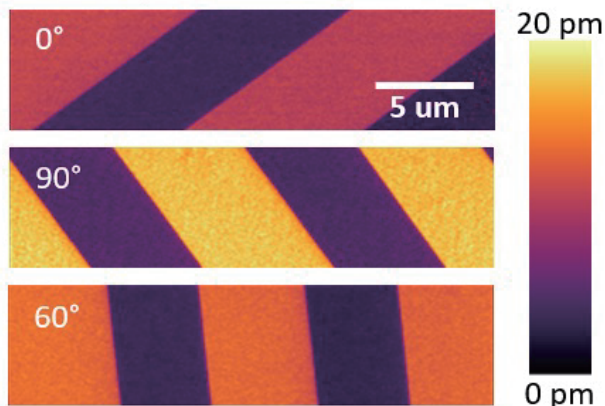
在PFM扫描过程中,悬臂梁也可能由于针尖和样品间的侧向力和纵向力而弯曲。由此在以OBD为基础的AFM中,会因悬臂形状带来PFM测量误差。此外,该误差会随扫描角度的变化而变化,因为扫描角度会影响针尖与样品间力矢量的方向,从而影响悬臂梁的形状。

通过对周期性极化铌酸锂(PPLN)进行不同角度的PFM扫描,可以观察到OBD的不足。PPLN是一种具有上下交

替极化方向条纹畴的铁电样品。这些畴的振幅响应预计是相同的,唯一的区别是在畴极化方向。当使用基于OBD的AFM扫描时,不仅相邻畴之间的振幅响应存在差异,而且该响应也随着扫描角度的变化而变化,如图4中左列图像所示。

相比之下,图4右列所示的对应图像是使用基于QPDI的Vero AFM扫描的,无论畴方向和扫描角度如何,振幅响应都显示出准确性和一致性。这些图像使用了相同的悬臂,并且是在相同的样品位置获得的。由于干涉点直接位于针尖上方,Vero AFM显示了真正的面外PFM响应,不受导致悬臂弯曲的其他因素影响。

OBD Amplitude



Vero QPDI Amplitude

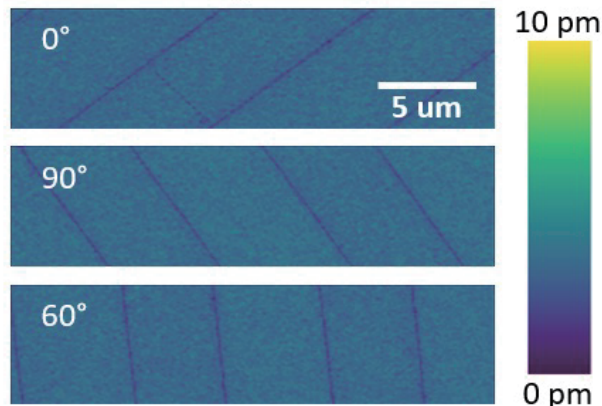


图4: 改变扫描角度会改变作用在针尖上的纵向和横面向内力的大小, 从而影响悬臂梁的弯曲。这导致使用传统的AFM进行PFM测量时会产生伪像, 即观察到压电响应振幅范围和偏移量随扫描角度而变化。相比之下, 使用基于QPDI的Vero测量时, 压电响应振幅是恒定的, 并且与扫描角度无关。

## 更高的测量灵敏度

前面提到每个伪像都最终和样品的实际纵向压电响应叠加在了一起,因为它们都影响悬臂的偏转角度。基于OBD光杠杆的原子力显微镜无法区分实际针尖位移和这些伪像,导致测量的不确定性。因此,传统光杠杆PFM测得的已知压电材料的有效压电耦合系数范围广泛,千差万别。

为了说明这一点,我们在钽掺杂氮化铝上进行了五次PFM扫描,每次扫描使用不同的探针,在不同的驱动振幅和扫描角度下,使用基于OBD的AFM,并在相同的条件下使用

基于QPDI的干涉式Vero AFM重复实验。图5显示了传统AFM和Vero AFM测量的有效压电耦合系数的直方图,分别用红色和蓝色表示。可以看到,尽管在不同的扫描条件下进行,Vero AFM测量的所有五个直方图都是紧密聚集在一个狭窄的窗口。相比之下,基于光杠杆AFM测量的直方图是宽而分散的。

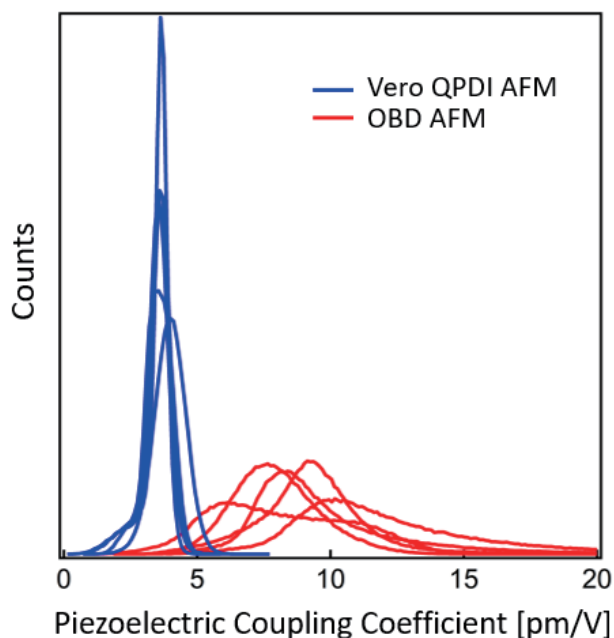


图5: 传统OBD的AFM和Vero AFM分别测量了AlScN在不同扫描条件下的压电耦合系数,并绘制了相应的直方图。从直方图分布中很明显看到,有了QPDI加持后,Vero AFM的测量可重复性要好很多。

## 总结

Vero AFM一定程度修正了迄今为止PFM领域所缺乏的结果准确性与一致性。这些看似简单的测量,例如判定给定材料是否有铁电性或定量测量有效压电耦合系数,对基于传统OBD光杠杆的AFM而言是个很大的挑战,并非不可能实现,而是即使测得了结果也很难有足够的信服力。而有了Vero AFM,这些测量将变得简单准确。

## 参考文献

- [1] A. Labuda, B. Pottier, L. Bellon “Atomic Force Microscope,” U.S. Patent No. 11519935 (2020).
- [2] P. Güthner and K. Dransfeld, Applied Physics Letters 61, 1137 (1992).
- [3] A. Gruverman, O. Auciello, R. Ramesh, and H. Tokumoto, Nanotechnology 8, A38 (1997).
- [4] R.K. Vasudevan, N. Balke, P. Maksymovych, S. Jesse, and S.V. Kalinin, Applied Physics Reviews 4, 021302 (2017).
- [5] G. Meyer and N.M. Amer, Applied Physics Letters 53, 1045 (1988).
- [6] S. Alexander, L. Hellems, O. Marti, J. Schneir, V. Elings, P.K. Hansma, M. Longmire, and J. Gurley, Journal of Applied Physics 65, 164 (1989).
- [7] Y. Martin, C.C. Williams, and H.K. Wickramasinghe, Journal of Applied Physics 61, 4723 (1987).
- [8] A. Labuda, and R. Proksch, Applied Physics Letters 106.25 (2015).
- [9] S. S. Cheema, D. Kwon, N. Shanker, R. dos Reis, S. L. Hsu, J. Xiao, H. G. Zhang, R. Wagner, A. Datar, M. R. McCarter, C. R. Serrao, A. K. Yadav, G. Karbasian, C. H. Hsu, A. J. an, L. C. Wang, V. Thakare, X. Zhang, A. Mehta, E. Karapetrova, R. V. Chopdekar, P. Shafer, E. Arenholz, C. M. Hu, R. Proksch, R. Ramesh, J. Ciston, and S. Salahuddin, Nature 580 (7804), 478 (2020).
- [10] B. J. Shastri, A. N. Tait, T. F. de Lima, W. H. P. Pernice, H. Bhaskaran, C. D. Wright, and P. R. Prucnal, Nature Photonics 15 (2), 102 (2021).
- [11] Y. F. Qi and Y. Li, Nanophotonics 9 (6), 1287 (2020).
- [12] A. Lipatov, P. Chaudhary, Z. Guan, H. Lu, G. Li, O. Crégut, K.D. Dorkenoo et al. npj 2D Materials and Applications 6, no.1 (2022).
- [13] L. Qi, S. C. Ruan, and Y. J. Zeng, Advanced Materials 33 (13) (2021).
- [14] B. Ferrero, and L. Bellon, Europhysics Letters 139.5 (2022).
- [15] J.W. Hong, S. Park, and Z.G. Khim, Review of Scientific Instruments 70, 1735 (1999).
- [16] S. Jesse, H.N. Lee, and S.V. Kalinin, Review of Scientific Instruments 77, 073702 (2006).
- [17] L. Collins, Y. Liu, O.S. Ovchinnikova, and R. Proksch, ACS Nano 13, 8055 (2019).

如果您想了解更多  
欢迎联系：

[info.china@oxinst.com](mailto:info.china@oxinst.com)



牛津仪器官方微信



在线服务商城小程序



牛津仪器官方网站

[afm.oxinst.cn](http://afm.oxinst.cn)

Hotline 400 678 0609

OXFORD  
INSTRUMENTS

ASYLUM RESEARCH