一种全面的半自动化石英音叉原子力显微镜探针制造系统，具备实时共振频率监测与品质因数控制功能

Hankyul Koh，[1] Joon-Hyuk Ko，[2] 和 Wonho Jhe[3]1)首尔国立大学自然科学学院物理与天文学系，物理学，韩国2)韩国高等研究院人工智能与自然科学中心3)*Multiscale Instruments*，韩国首尔

（*电子邮箱：physics113@snu.ac.kr。）

（日期：2026年1月26日）

基于石英音叉的原子力显微镜（石英音叉原子力显微镜）已成为一种强大的工具，可对导电和绝缘样品进行高分辨率成像，包括半导体结构、金属镀层表面以及环境条件下的软物质；它还可用于要求更苛刻的环境，包括超高真空和低温条件，而传统的基于悬臂梁的原子力显微镜在这些环境下往往受到限制。然而，石英音叉原子力显微镜的广泛应用受到制约，原因是难以将悬臂梁尖端以实现可重复探针制造所需的位置和角度精度安装到石英音叉上。为确保稳定运行，尖端必须精确放置在单根音叉臂的中线上，与叉齿轴线平行对准，并牢固固定。即使轻微的横向偏移或角度偏差，也会扰乱其固有的反对称弯曲模态，引发扭转耦合，最终导致系统性图像失真并降低测量完整性。本文介绍了一种全面的半自动化石英音叉尖端制造系统，在单一工作流程中集成了精密对准、实时扫频监测和可控的品质因数调节。实验表征表明，该系统在多次试验中均能稳定制备探针，在阻尼可有意调节的同时保持尖锐且清晰的共振响应，并在实际扫描测试中实现高保真度、高分辨率成像。这种集成方法为基于石英音叉的探针制造提供了可重复的框架，降低了石英音叉原子力显微镜的应用门槛，并拓展了其在多种样品类型和工作环境中的适用范围。

arXiv:2601.16221v1 [cond-mat.mes-hall] 8 Jan 2026

I. 引言

原子力显微镜（AFM）[1] 已成为物理学、材料科学和半导体产业中进行纳米尺度表面表征的重要工具。传统的基于微悬臂梁的原子力显微镜虽可在环境条件下实现高分辨率成像，但在需要机械稳定性、低热漂移，或需要在超高真空（UHV）和低温下运行的环境中，其性能会下降[2–9]。在这类条件下，石英音叉（QTF）凭借高刚度、自感测能力、极小的热漂移以及与多功能测量的兼容性，相较于悬臂梁探针具有明显优势[10–12]。因此，石英音叉原子力显微镜（QTF-AFM）[13–16] 不仅能在超高真空、低温及其他严苛环境中实现高分辨率成像，还能在环境条件下可靠地扫描柔软或脆弱材料[14,15]。

尽管具有这些优势，石英音叉原子力显微镜的广泛应用仍受到一个核心且长期存在的瓶颈限制：如何恰当地制备音叉-探针组件[16]。要以稳定运行所需的位置和角度公差，将微米级尖端连接到QTF叉指上，在技术上极具挑战性；而微小的误差很容易引发扭转耦合[17]，导致共振特性降低并损害成像保真度。这一困难使许多研究人员望而却步，不愿采用基于石英音叉的方法。利用微加工商用原子力显微镜探针，可为改善并标准化探针尖锐度提供一条切实可行的途径（标称半径低至约2 纳米 – 10 纳米），与通过电化学蚀刻、聚焦离子束（FIB）微焊接或拉制纤维杆法在实验室内制备的探针相比，这类商用探针还具有表征充分的几何结构以及现成可用的功能化处理；后述自制探针的尖端形状和半径在不同探针之间可能存在显著差异[14,18–22]。

制造合适的音叉原子力显微镜探针的另一项挑战，与石英音叉传感器本身较高的品质因数有关；其品质因数通常在真空中为 $10^4 - 10^5$，在环境条件下为$10^3 - 10^4$ [23]。如此高的品质因数不适用于空气中的调幅原子力显微镜，其有效响应时间 $\tau = 2Q/\omega_0$ 会将可用带宽限制在仅几赫兹[24,25]。因此，实际的原子力显微成像需要将品质因数降至数百的范围。一种常见策略是通过给音叉的一根叉齿增加质量来引入机械不对称，从而降低品质因数[26,27]。这一概念的极端实现形式是qPlus构型[12]，：其中一根音叉臂被刚性固定，另一根则如单叉齿悬臂梁般工作。尽管qPlus传感器应用广泛，但其探针更换灵活性有限，几乎无法有意调节品质因数。其他方法，例如机械缩短一根音叉臂或附加珠状配重[28]，原则上也能改变品质因数。然而，这些方法存在重复性差、样品间质量差异大、附着几何形状不可控，以及会引入不理想共振特性等问题。

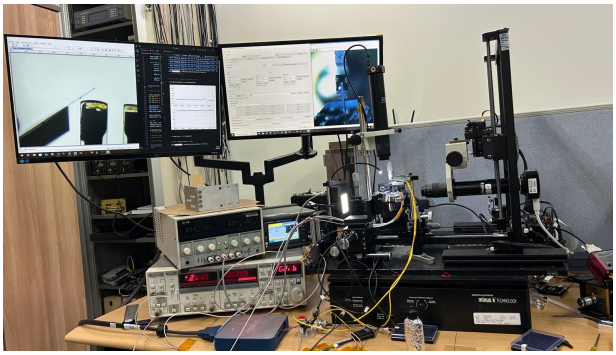

图1。用于石英音叉原子力显微镜探针制造与表征的实验装置总体视图，包括任意波形发生器、锁相放大器、跨阻放大器、基于FPGA的数据采集系统，以及用于精确定位的辅助照明光学系统和三轴直线致动器。

在此，我们采用一种基于液态黏合剂的品质因数调节方法，在这方面具有显著优势。根据最小作用量原理，液体会自然地使给定体积下的表面积最小化，因此会自发形成几何对称的形状。因此，只要将悬臂梁尖端精确安装在一根叉齿厚度方向的中心位置，黏合剂层便能保持对称而不发生失真。因此，本文提出的黏合剂方法能够持续获得尖锐、对称且模态失真最小的共振曲线。此外，本文提出的方法兼容多种市售悬臂梁尖端，包括硅、氮化硅和电子束沉积探针尖端，使研究人员能够根据实验需求自由选择或更换尖端，同时完全掌控石英音叉的动力学特性。

在本研究中，我们提出了一种快速、可靠且稳健的方法，用于将悬臂梁尖端连接到标准双叉齿石英音叉上。该流程具有很高的位置精度，能够确保出色的重复性，并可通过精确调节粘合剂体积来实现品质因数的受控调节。通过在组装过程中持续监测石英音叉的共振特性，该方法能够保持预期的弯曲动力学，并防止机械不对称性的累积。这种方法显著降低了使用石英音叉原子力显微镜的技术门槛，为制备适用于各种实验环境的可定制石英音叉探针提供了一条实用且可重复的途径。

II. 系统概述

采用石英音叉原子力显微镜进行精确成像，需要稳定多个相互耦合的机械和电子参数。最关键的要求是，共振响应在

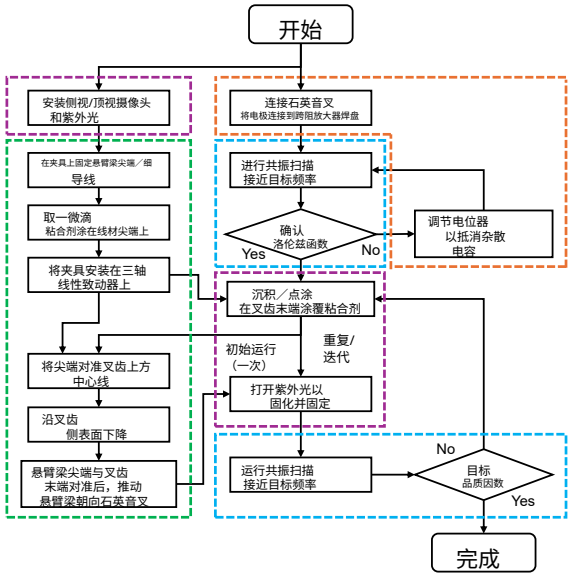

图 2. 石英音叉-尖端的制造、频率监测及品质因数控制系统流程图。

工作模式附近应能以定义明确且对称的洛伦兹曲线进行可重复描述，这表明频率-振幅频谱中的非线性畸变极小且信噪比较高。在机械方面，石英音叉-尖端的制造必须避免形态不对称性：将质量块附着在一个叉齿上时，新增的尖端应保持在叉齿厚度轴（侧视图）中心，以防止横向不平衡和不必要的扭转耦合。在电子方面，可靠的共振特性测量需要抑制杂散电容馈通，并在相关频率范围内保持跨阻增益平坦。在本研究中，沉积的黏合剂体积用作实用的控制参数，可将品质因数从空气中的裸音叉品质因数（$Q \approx 2000$）调节至适用于具体应用的范围（高速成像通常为$Q \approx 100-700$，高分辨率成像通常为$Q \approx 700-1200$），同时通过补偿型低噪声跨阻前端保持洛伦兹曲线的可重复性。

III. 实验装置

该实验系统旨在将悬臂梁精确粘接到石英音叉上，同时实时表征其共振特性并对品质因数进行受控调节。该装置由四个子系统组成：(i) 石英音叉-尖端组件，(ii) 电子设备，(iii) 运动控制与对准子系统，以及 (iv) 数据采集与处理子系统。下面将详细介绍各个组成部分。

A. 石英音叉-尖端组件

石英音叉安装在一个配备互补金属氧化物半导体摄像机的支架上，可同时提供俯视图和侧视图

以实现精确的视觉对准。对于俯视成像，相机相对于水平面特意倾斜了约 $30^\circ - 45^\circ$，从而能够同时观察悬臂梁尖端与石英音叉叉齿侧面的横向对准情况。音叉石英晶体谐振器安装座置于俯仰-偏航调节板上，可精确控制石英音叉叉齿与悬臂梁尖端之间的水平和垂直对准。

B. 电子设备

该电子子系统由一台任意波形发生器（33500B，是德科技）、一台锁相放大器（SR844，斯坦福研究系统公司）、一块数据采集板（NI USB-7855R，美国国家仪器公司）以及一台定制跨阻放大器（TIA）组成，该放大器针对低输入偏置和宽带宽运行进行了优化。

石英音叉的两个电极中，驱动电极连接至任意波形发生器，由其提供驱动电压信号以驱动石英音叉。另一个传感电极连接至跨阻放大器，后者将石英音叉的自感测电流响应放大并转换为电压信号，然后将该信号传送至锁相放大器 信号输入。为实现相位参考检测，波形发生器的同步输出（同步）连接至锁相放大器 *RefIn*。随后，锁相放大器的同相和正交输出（X 和 Y）被传送至数据采集板的模拟输入通道，以便实时记录。

所有电气连接均使用屏蔽式 50 ΩBNC同轴电缆，以最大限度地减少干扰拾取，并确保布线电容具有可重复性。由于石英音叉产生的信号电流通常处于pA级别[14]，且共振监测和反馈可在更高阶的弯曲振型下进行，通常为基频的 $5 - 6$ 倍[29],，因此跨阻放大器必须配备低噪声前端和足够宽的闭环带宽，以确保跨阻增益不会出现明显滚降。通过最大限度地缩短石英音叉与跨阻放大器输入端之间的物理距离，并在反馈电阻两端并联适当选取的反馈电容进行相位补偿，同时加入能够模拟传感器并联电容的模拟负载，确保了这种稳定运行。这种平衡方法抑制了由杂散电容引起的类共振伪影和馈通，从而提高了洛伦兹共振谱的稳健性和可重复性[30]。

C. 运动控制与对准子系统

运动控制子系统由三个菊花链连接的直线执行器（T-LA28A，Zaber）及其配套位移台组成，用于悬臂梁定位和粘合剂操作。所有三个平移轴（x、y和z）均利用内置编码器进行闭环控制。我们开发了一套基于 Python 的运动控制程序，通过 RS232 与电机控制器通信，并以高精度执行确定性的定位命令，最小步长为，用于对准和粘接程序。

定制夹具安装在一个中间旋转台上，可绕悬臂梁的纵轴旋转，从而能够在连接前精确调整悬臂梁与QTF叉指之间的角度。夹具包含两个独立的夹持器。其中一个夹持器装有一根细丝，用于通过接触式微量沉积（也称点涂）将粘合剂涂到音叉石英晶体谐振器表面；另一个夹持器则支撑悬臂梁尖端，以便随后进行放置。即使使用微流控点胶器，黏度和表面张力也可能妨碍出口处的精确计量，因此控制纳升级粘合剂体积并非易事；点涂转移则为小体积沉积提供了一种可靠且可重复的方法。另一种选择是使用压电驱动微量注射装置，其可分配约 $3 - 5$ 纳升 。该系统在音叉石英晶体谐振器安装座处提供两个旋转自由度，即俯仰和偏航；在悬臂梁台处提供四个自由度，即三个平移自由度和一个轴向旋转自由度，从而实现对相对位置的完整六自由度控制。

使用 CMOS 摄像机提供顶部和侧面视图的实时视觉反馈，并可选提供正面视图；使用 365 nm、3 W 的紫外 LED 光源进行粘合剂固化。所有运动台和测量仪器均由基于 Python 的软件控制，从而实现自动化谐振频率扫描，并在尖端粘接过程中实现同步驱动。

D. 数据采集与处理子系统

石英音叉由任意波形发生器（33500B，是德科技）产生的正弦电压驱动，压电响应电流经定制的跨阻放大器转换为电压，再由锁相放大器（SR844，斯坦福研究系统公司）解调。驱动幅度通常设为 $0.2 - 2.0\,\mathrm{V_{PP}}$。仪器控制和测量自动化通过 GPIB 接口使用 PyVISA 实现。使用 NI USB-7855R（美国国家仪器公司）的模拟输入通道采集锁相放大器的同相和正交输出（X 和 Y），并将其作为模拟电压。该设备运行预编译的 LabVIEW FPGA 位文件，采样后的X 和 Y 信号通过 nifpga Python 接口传输至主机。选择锁相放大器灵敏度、时间常数和滚降，以确保等效噪声带宽足够窄。在每个频率下，记录稳态X 和 Y 电压，并将其转换为响应幅度和相位；使用独立确定的比例系数进行校准后，表示为等效输入电流。所得幅度谱和展开相位谱采用 Lee等人[31], 的解析模型进行拟合，该模型将电驱动音叉描述为与杂散电容C_0并联的并联LRC 支路。通过这些拟合，可直接从频域电流响应中提取共振频率和品质因数。

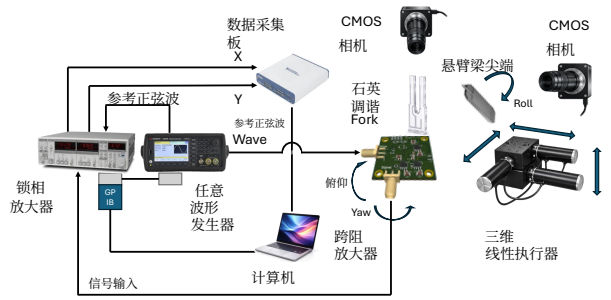

图3. 整体制造系统示意图。

IV. 方法

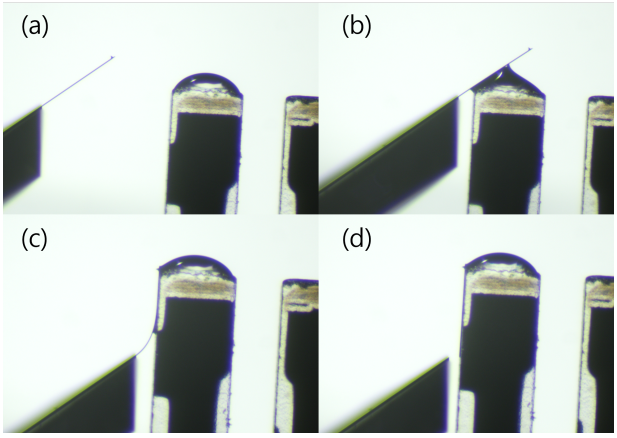

图4. 基于QTF的AFM探针的逐步制造过程。(a) 将尖锐的AFM悬臂探针精确对准QTF叉齿的端面。(b) 以确定的接近角度，使尖端与叉指顶端受控地发生机械接触。(c) 少量粘合剂在尖端与QTF叉齿之间形成连接，并由粘合剂弯月面产生的毛细力稳定。(d) 将尖端与QTF叉齿平行对准，并使用直线执行器以 5 μm 步进方式推进；断裂发生后立即对粘合剂进行紫外固化，将尖端固定到位。

安装石英音叉并将悬臂梁尖端置于定位夹具上后，首先进行频率扫描，以确认洛伦兹响应对称，并确定基准共振频率和品质因数。随后在选定叉齿末端滴加少量紫外固化粘合剂，沉积粘合剂体积通常约为 $2.5 – 25$ nL。为确保可靠连接，粘合剂及连接过程需满足两项要求。首先，粘合剂的密度和黏度应足够低，使表面力在与其他作用的竞争中占主导地位，包括偏转悬臂梁的弹性回复力，从而能够稳固地吸附到机械柔顺的硅悬臂上。其次，粘合剂应能快速紫外固化，并具有足够的刚度，以便固定后保持对准。石英音叉叉齿末端裸露的横截面本身具有亲水性，有利于吸附和 удерж留粘合剂。尽管硅本质上具有疏水性，但在环境条件下，其表面会覆盖一层吸附水层[18,32–34]。这与范德华力共同作用，可在间距较小时产生强烈的吸引相互作用，使悬臂梁底面与粘合剂接触并保持稳固锚定。由于硅仍几乎不润湿，粘合剂会局限于液滴表面，即使悬臂梁底面已牢固附着也不例外，因此，直线执行器带动悬臂梁横向平移时，不会使粘合剂沿悬臂梁侧壁发生毛细铺展，并有助于避免尖端意外润湿和污染。在对准过程中，执行器带动悬臂梁横向平移

以 $0.5 – 5.0$ μm 为离散步长，使悬臂梁下侧能够沿液滴表面朝接触线区域可控地滑动。这种引导平移可沿叉齿侧壁对准，同时使粘合剂弯月面相对于音叉臂厚度保持对称，从而抑制横向不平衡并最大限度地减小扭转耦合。在悬臂梁下侧与叉齿侧壁之间形成稳定的弯月面后，施加 365 nm 紫外光照射，使粘合剂固化并保持最终对准状态。通过光学检查确认连接后的悬臂梁位置和方向，随后进行频率扫描，以量化连接后的共振频移及所得品质因数。

如果测得的品质因数与目标值不符，则以受控增量额外沉积粘合剂，随后进行紫外固化，并在每一步后重新测量共振谱。重复这一沉积—固化—扫描循环，直至达到所需的工作范围。接近目标值时，采用更小的最终增量，以尽量减小超调并实现可重复的品质因数调节。

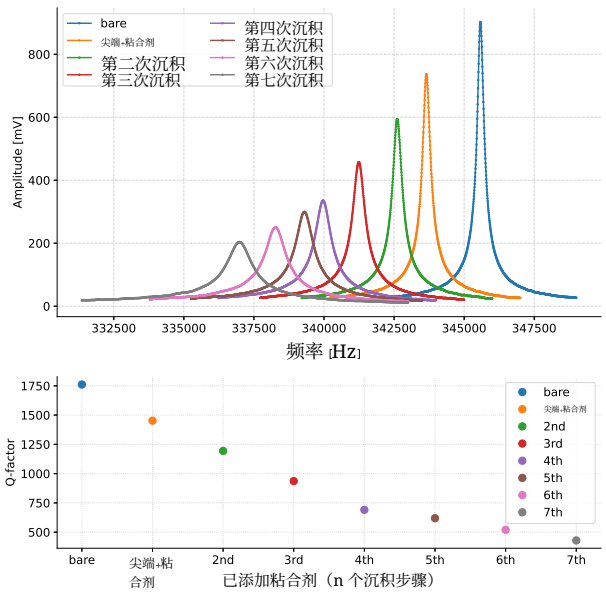

图 5. 每个粘合剂沉积步骤对应的第二弯曲模态共振谱，给出各步骤的共振频率 f_0 和振幅（**上图**），其中每步增加的粘合剂质量约为 2.5 μg。各沉积步骤对应的品质因数（**下图**）。

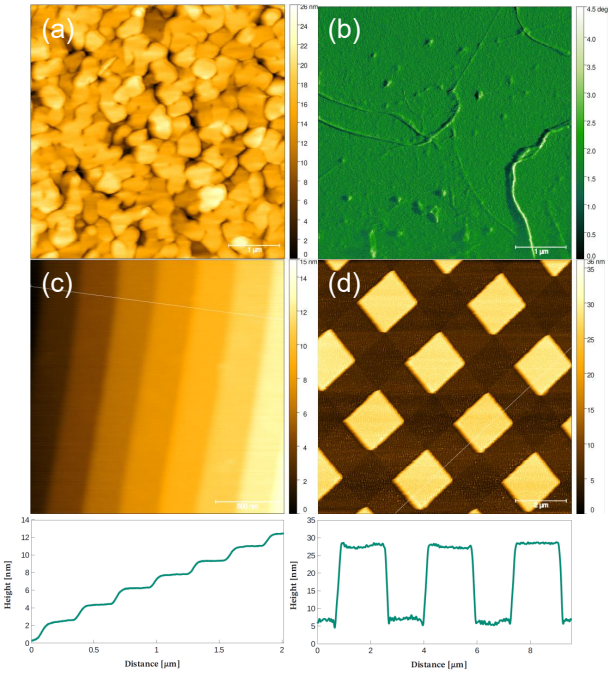

图 6. 使用自制石英音叉（QTF）原子力显微镜获得的 AFM 图像。(a) 生长在云母基底上的 Au (111) 薄膜的原子台阶。(b) 沉积在云母基底上的碳纳米管（CNT）。(c) 商用碳化硅校准样品（Tip-sNano），具有 1.5 *nm* 的单级台阶高度。(d) 另一种商用周期性测试结构校准样品 TGQ1（TipsNano），其标称台阶高度为 $20 \pm 3\,nm$。所有图像均使用本研究按照本文所述流程、以 SSS-FM（Nanosensors）和 PNP-DB（Nanoworld）悬臂梁尖端制备的石英音叉尖端传感器采集。测量使用完全自主搭建的石英音叉原子力显微镜控制电子设备和软件完成。

V. 实验

本文提出的制造流程通过三项互补测量进行了实验验证。首先，图 4 表明，连接可以确定性地完成，同时保持所需的几何对称性，以维持预期的反对称弯曲动力学，从而抑制可能激发扭转耦合的横向不平衡。其次，图 5 中的共振测量证实，纳升级粘合剂加载为石英音叉动力学响应提供了定量调节控制参数。f_0 的单调变化，以及从洛伦兹拟合中提取的Q 值系统性降低，证实了耗散得到了受控调节；对称曲线仍然保持，则表明调节并未引入显著的模态失真。

最后，图 6 中的扫描测试证实，所制造的石英音叉尖端传感器可在实际原子力显微镜测量中可靠运行。对原子级台阶样品和经校准的纳米级台阶高度的清晰再现，且未出现系统性伪影，表明对准、共振监测和品质因数调节相结合，为石英音叉尖端传感器的制造提供了一种稳健且可重复的途径。

VI. 结论

本研究针对石英音叉原子力显微镜广泛应用所受制约的一项核心实际限制，即如何将尖锐的悬臂梁尖端可重复地连接到标准双叉齿石英音叉上，并确保足够的位置和角度精度，从而保持预期的反对称弯曲动力学。主要结论是，基于编码器的亚微米级闭环定位能够实现石英音叉尖端的确定性制造，同时通过纳升级粘合剂加载对石英音叉动力学响应进行定量控制。组装过程中调整沉积粘合剂体积，可将品质因数作为有意设定的制造参数进行调节，而非尖端粘接时不可控的副产物。对本征模态进行实时扫频监测，可即时反馈共振频率、峰值振幅和提取出的品质因数，从而能够反复调整沉积和固化步骤，直至达到目标工作状态。由此，该工作流程可制造具有用户设定品质因数的石英音叉尖端传感器。品质因数是决定石英音叉原子力显微镜带宽、稳定性及成像性能（如响应速度和力灵敏度）的关键参数之一；与此同时，该流程还能在所需频率范围内保持可重复且对称的共振响应。除共振调节外，同一制造和控制流程还可通过一种最大限度降低叉齿厚度轴方向横向不平衡的对准方法，可靠地利用商用硅悬臂梁制备石英音叉尖端传感器。使用这些传感器和完全自制的石英音叉原子力显微镜，在多个测试样品上获得了具有代表性的原子力显微镜图像，包括云母上的 Au (111)、云母上的碳纳米管以及经校准的台阶高度标准样品。这些结果表明，机械对称连接、受控的品质因数调节和稳定的电学读出相结合，可为石英音叉原子力显微镜仪器提供一种紧凑且可重复的实现途径，既适用于高速运行（此时较低的 Q 可提高带宽），也适用于高分辨率成像（此时可保持较高的 Q，以最大限度提高力灵敏度）。未来的工作将着重定量研究沉积粘合剂体积、附加质量分布与模态参数变化之间的关系，包括共振频率、有效刚度和模态相关耗散。

致谢

本研究获得韩国国家研究基金会（编号：2016R1A3B1908660）的资助，以及韩国中小企业与初创企业部通过2024年创业领先大学支持计划（编号：20248082）、2025年创业领先大学支持计划（编号：20319065）和DeepTech TIPS计划（编号：RS-2025-25461650）提供的资助。J. H. Ko还获得了韩国高等研究院KIAS个人资助（AP102401）的支持。作者感谢Multiscale Instruments的J. H. Seo和J. W. Yun提供协助

实验。

[1]G. Binnig、C. F. Quate和C. Gerber，《物理评论快报》**56**，930（1986）。[2]G. Meyer和N. M. Amer，《应用物理快报》**53**，1045（1988）。[3]O. Marti、A. Ruf、M. Hipp、H. Bielefeldt、J. Colchero和J. Mlynek，《超显微学》**42–44**，345（1992）。[4]T. Thundat、R. J. Warmack、G. Y. Chen和D. P. Allison，《应用物理快报》**64**，2894（1994）。[5]M. Radmacher、J. P. Cleveland和P. K. Hansma，《扫描》**17**，117（1995）。[6]L. A. Wenzler、G. L. Moyes和T. P. Beebe, Jr.，《科学仪器评论》（1996）。[7]H. J. Hug、B. Stiefel、P. J. A. van Schendel、A. Moser、S. Martin、R. Moser等，*et al.*《科学仪器评论》**70**，3625（1999）。[8]K. Suehira、N. Iwatsuki、K. Morishige、H. Ohnishi和T. Hasegawa，《超显微学》**83**，93（2000）。[9]F. J. Giessibl和F. Pielmeier，《物理评论B》**84**，125409（2011），雷根斯堡大学实验与应用物理学研究所，德国。[10]J.-M. Friedt和É. Carry，《美国物理学杂志》**75**，415（2007）。[11]J.-O. Abrahamians、L. Pham Van和S. Régnier，《科学仪器评论》**87**，071502（2016）。[12]F. J. Giessibl，《科学仪器评论》**90**，011101（2019）。[13]P. Günther、U. C. Fischer和K. Dransfeld，《应用物理B》**48**，89（1989）。[14]K. Karrai和R. D. Grober，《应用物理快报》**66**，1842（1995）。[15]F. J. Giessibl，《现代物理评论》**75**，949（2003）。[16]A. Naber、H.-J. Maas、K. Razavi和U. C. Fischer，《科学仪器评论》**70**，3955（1999）。[17]R. C. Tung、T. Wutscher、D. Martinez-Martin、R. G. Reifenberger、F. J. Giessibl和A. Raman，《应用物理学杂志》**107**，104508（2010）。[18]M. Grundner 和 H. Jacob，《应用物理 A》**39**, 73 (1986). [19]J. Jersch、T. Maletzky 和 H. Fuchs，《科学仪器评论》**77**, 083701 2006( ). [20]F. J. Giessibl，《应用物理快报》**73**, 3956 (1998). [21]J. Salvi、P. Chevassus、A. Mouflard、S. Davy、M. Spajer、D. Courjon、K. Hjort 和 L. Rosengren，《科学仪器评论》**69**, 1744 (1998). [22]A. Naber，显微镜学杂志**194**, 307 (1999). [23]R. D. Grober、J. Aci movic、J. Schuck、D. Hessman、P. J. Kindlemann、J. Hespanha、A. S. Morse、K. Karrai、I. Tiemann 和 S. Manus，《科学仪器评论》**71**, 2776 (2000). [24]T. R. Albrecht、P. Grütter、D. Horne 和 D. Rugar，《应用物理学杂志》**69**, 668 (1991). [25]R. García 和 R. Pérez，表面科学报告**47**, 197 (2002). [26]J. P. Cleveland、S. Manne、D. Bocek 和 P. K. Hansma，《科学仪器评论》**64**, 403 (1993). [27]J. Kim、M. Lee 和 W. Jhe，《应用物理快报》**105**, 173102 (2014). [28]D. Hussain、J. Song、H. Zhang、X. Meng、W. Yongbing 和 H. Xie，IEEE 传感器杂志**17**, 2797 (2017). [29]B. Kim、J. Jahng、R. M. Khan、S. Park 和 E. O. Potma，《物理评论B》**95**, 075440 (2017). [30]S. An、K. Lee、B. Kim、J. Kim、S. Kwon、Q. Kim、M. Lee 和 W. Jhe，当代应用物理**13**, 1899 (2013). [31]M. Lee、J. Jahng、K. Kim 和 W. Jhe，《应用物理快报》**91**, 023117 (2007). [32]X. Xi、J. Shi、S. Maghsoudy-Louyeh 和 B. R. Tittmann，载于*AIP*会议论文集，第1211卷（美国物理联合会，2010）第1493–1498页。[33]J. N. Israelachvili，分子间力与表面力，第3版（学术出版社，伦敦，2011）。[34]L. Chen、X. He、H. Liu、L. Qian 和 S. H. Kim，朗缪尔（2014），已在线发表。