

可调谐探针起振系统设计^{*}温 阳^{1,2} 陈纵横^{1,2} 冯 婕^{1,2} 舒鹏丽^{1,2} 马宗敏^{1,2}

(1. 中北大学省部共建动态测试技术国家重点实验室 太原 030051;

2. 中北大学仪器与电子学院 太原 030051)

摘 要:为了兼顾非接触式原子力显微镜(noncontact atomic force microscope, NC-AFM)更高谐振频率探针的使用需求,并通过提高控制器精度进而提高 NC-AFM 分辨率,提出了一种基于探针-样品间原子作用力变化的全数字可调谐 NC-AFM 高分辨率探针起振系统。在 Simulink 环境下对探针起振系统的控制部分进行了设计,通过现场可编程门阵列(FPGA)实现了鉴相、滤波、锁频等功能;采用压电陶瓷片驱动探针振动,设计了操作便捷的探针座。将不同频率正弦信号提供给设计的起振系统进行功能性验证,实验结果表明,系统可以在 20 kHz~50 MHz 频率范围内跟踪探针谐振频率;最后使用起振系统成功使商用探针在谐振频率处振动,准确测出了探针的谐振频率及振动幅值,系统频率分辨率达到了 0.1 Hz。

关键词:非接触式原子力显微镜(NC-AFM);起振;谐振频率;数字锁相环;压电陶瓷

中图分类号: TH742 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

Design of vibration starting system of tunable probe

Wen Yang^{1,2} Chen Zongheng^{1,2} Feng Jie^{1,2} Shu Pengli^{1,2} Ma Zongmin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to meet the needs of higher resonant frequency probes for noncontact atomic force microscope (NC-AFM) and improve the accuracy of the controller to improve the resolution of NC-AFM, a high-resolution probe oscillation system based on the change of atomic force between probe and sample is proposed. The control part is designed in the Simulink environment, mainly through FPGA to realize the functions of phase discrimination, filtering and frequency locking; the driving part is driven by piezoelectric ceramics, and the probe base with convenient operation is designed. Sinusoidal signals of different frequencies are provided to the designed oscillation system for functional verification. The experimental results show that the probe resonance frequency can be tracked by the system within the frequency range of 20 kHz~50 MHz. Finally, the commercial probe is successfully vibrated at the resonant frequency using the vibration initiation system, and the resonant frequency and vibration amplitude of the probe are accurately measured. The system frequency resolution reaches 0.1 Hz.

Keywords: noncontact atomic force microscopy (NC-AFM); starting vibration; resonant frequency; digital phase locked loop; piezoelectric ceramics

0 引 言

表面科学的研究需要对物质表层进行高灵敏度的分析,非接触式原子力显微镜(noncontact atomic force microscope, NC-AFM)是如今可用分辨率最高的成像

仪器^[1]。

NC-AFM 中的探针谐振器带有与样品表面相互作用的尖端,通常是悬臂梁、音叉或者针传感器。主要成像信号是探针谐振器的频移 Δf ,随着探针和样品原子间作用力的变化而变化,NC-AFM 一般采用高分辨率反馈控制

收稿日期:2023-02-14

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61874100)、山西“1331 工程”重点学科建设(1331KSC)项目资助

系统^[2]提供探针起振的谐振频率信号、跟踪扫描探针的谐振频率并检测 Δf 变化。这种控制系统在一定的频率范围内实现锁频,在数字电路^[3]和模拟电路^[4]中都有应用。为了提高 AFM 控制器精度,降低噪声,进而提高 AFM 分辨率,对 AFM 控制器的研究成为国内外学者研究的热点。Schlecker 等^[5]提出了一种新的控制系统架构,消除了锁相环(phase-locked loop, PLL)固有带宽限制,实现了真正的单周期 FM 检测,检测频率达到 5 MHz。Davis 等^[6]提出了一种新型恒频反馈回路,利用自激技术实现悬臂梁的共振,只需改变环路增益即可修改闭环带宽,并且该方法在现场可编程门阵列(FPGA)器件上进行了实验验证,极大地简化了物理设备。文献^[7]设计了一种基于增量式反馈的新型数字反馈式 AFM 系统。高倩等^[8]设计了基于双 ARM 的 FM-AFM 控制系统,实现 AFM 小型化。

国内对原子力显微镜控制系统的相关研究^[9-11]还在追赶国际水平。现在为了提高成像速度和精度,已经研制出了几十兆赫兹谐振频率的新型探针。对于这些高频探

头,必须开发新的控制系统,同时也为了满足千赫兹谐振频率探针的使用,提出了一个全数字可调谐的 NC-AFM 探针起振系统,具有全数字锁相环和压电驱动模块,为 20 kHz~50 MHz 扫描探针谐振频率提供了 0.1 Hz 的频率分辨率。采用数字锁相环设计是因为它对噪声、电压和温度变化不太敏感,保证了频率的稳定。

1 探针起振控制原理

提出的 NC-AFM 全数字控制系统的原理如图 1 所示。由 PLL、移相器(phase shifter, PS)、RMS-DC 转换器、自动增益控制器(automatic gain controller, AGC)和乘法器组成。NC-AFM 控制系统核心通过转换接口与 NC-AFM 模块通信,该转换接口由 ADC/DAC 子卡组成,它们每个都连接到低通滤波器。FM-AFM 模块接收由 PLL 创建的频率控制字 $F_w(t)$ 信号^[12],用于控制探针尖端到样品的采样距离, $U_{exc}(t)$ 控制谐振频率激励悬臂。 $U_{cant}(t)$ 返回到 PLL 及 RMS-DC 模块。

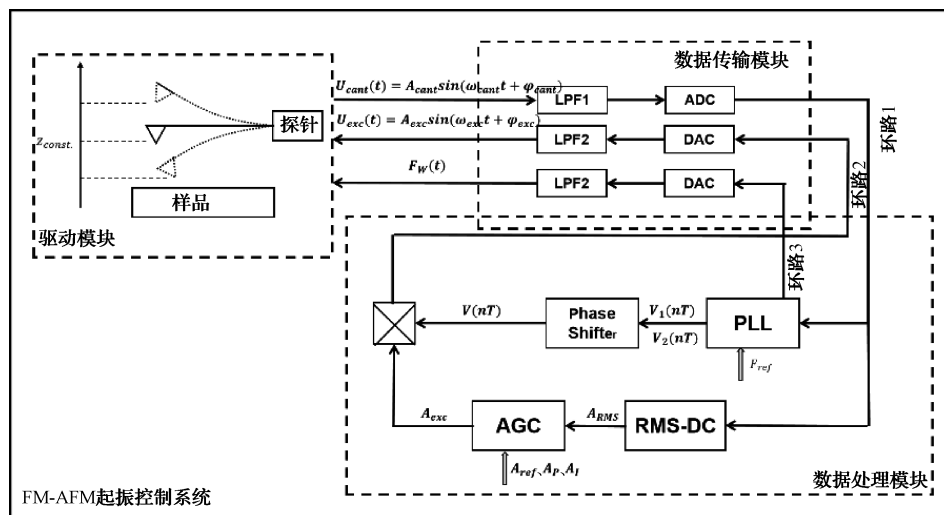


图1 FM-AFM 探针起振控制系统

调频控制原理如图 2 所示,表面样本扫描过程中, $U_{exc}(t)$ 激发悬臂并控制振荡幅度常数, $f_{exc} = f_0$ (通过 F_{ref} 设置)。 f_0 随样品表面形貌变化而变化^[13-14],当探针和样品的距离的减小时意味着尖端样品吸引力的增加,这又降低了 f_0 ,从而导致新的谐振频率 f'_0 。同理,尖端采样距离的增加会导致尖端采样力的减小,从而使 f_0 增大,从而导致新的谐振频率 f''_0 ,如图 2 所示。然后,将 $U_{cant}(t)$ 发送到 PLL,该 PLL 连续跟踪悬臂频率变化(或频率偏移),并将 $F_w(t)$ 提供给 NC-AFM 模块。后者调整尖端采样距离,以使悬臂谐振频率返回到 f_0 , (即 $F_w(t) = 0$)。同时,保持悬臂振荡幅度 A_{exc} 至 A_{ref} 。

采用主时钟 $F_{clk} = 125$ MHz,系统可检测 20 kHz~50 MHz 悬臂频率范围内的频率变化。为了提高噪声性能,放置射频变压器在 ADC/DAC 的模拟部分,将最小频

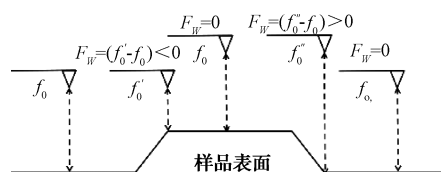


图2 调频控制原理

率范围限制在 20 kHz。

50 MHz 的上限归因于 125 MHz ADC 采样频率。如图 1 所示,系统由 3 个环路组成,即环路 1、环路 2 和环路 3。前两个环路驱动悬臂作为谐波振荡器。 $U_{exc}(t)$ 的交流部分 $V(t)$ 由环路 1 生成,同时通过环路 2 适当地设置 A_{exc} ,将悬臂振动幅度保持在恒定值($A_{RMS} = A_{ref}$)。前两个回路具有一些共同点,环路 1 使用一个 PLL 和 PS 来跟

踪谐振频率,环路2由一个AGC和一个RMS-DC转换器组成。为了控制振荡幅度。 A_{exc} 和 $V(nT)$ 的乘积给出悬臂激励信号 $U_{exc}(nt)$; n 是整数, T 是主时钟周期。最后,环路3通过向NC-AFM模块提供频移 F_w 来调节尖端采样距离。

2 系统设计

2.1 全数字锁相环控制系统

基于上文原理,首先使用Simulink对这3个环路的功能进行仿真,后者为PLL环路滤波器提供了IP库,并为Simulink环境提供了数控振荡器(numerically controlled oscillator, NCO)。其次,用硬件描述语言Verilog描述了系统功能,使用Xilinx公司的Vivado,在基于XC7K325T-2FFG900I型号的KINTEX-7 FPGA开发板实现设计方案。

PLL(图3)是NC-AFM控制的关键部分。由4个子模块组成,分别鉴相器、有限冲激响应(finite impulse response, FIR)低通滤波器、增益和NCO。

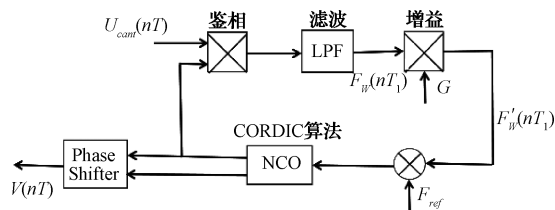


图3 全数字锁相环

鉴相器向低通滤波器提供与 $E_{cant}(nt)$ 和 $V_1(nT)$ 之间的相位误差成比例的信号 $E(nT)$ 。 $E(nT)$ 表示如下：

$$E(nT) \propto \varphi_{cant}(nt) - \varphi_{exc}(nt) \quad (1)$$

由于输入信号的正弦性质,使用一种类型的相位检测器可以便捷的更新每个时钟周期 T 内的相位差。乘法器具有两个14 bit输入和一个28 bit输出。28 bit的总线宽度是根据14 bit ADC输入和14 bit NCO输入确定,为了保证全精度输出,乘法器的输出没有被截断。

低通滤波器将 $E(nT)$ 转换为频率控制字,该频率控

制字可解释为形貌变化引起的频移 $F_w(nT_1)$; T_1 是低通滤波器时钟周期。 $F_w(nT_1)$ 用于提供NCO频率设定点 $F'_w(nT_1)$,以使PLL保持锁定在探针悬臂的谐振频率上,即 $\omega_{exc} = \omega_{cant}$ 。之后, $F_w(nT_1)$ 被传送到NC-AFM模块,以控制悬臂采样距离。通过选择滤波器,用户可以在截止频率 f_c 为1、10和100 kHz的3个滤波器中选择一个,以使PLL适应不同的悬臂频率和扫描速度。每个环路滤波器由一个FIR低通滤波器组成,其后是一个基于FIR的抽取级。选择FIR滤波器是因为它们具有比较好的稳定性。由于较高的时钟频率,使用抽取技术来避免非常庞大的滤波器的效率更高。在MATLAB环境中,使用Parks-McClellan算法设计了FIR滤波器。通过计算仿真确定所需的最小系数数目,以适合滤波器形状和时钟频率。所有滤波器的输入和输出在28 bit有符号位。为了避免输出信号饱和并确保在整个频率范围(20 kHz~50 MHz)内具有0.1 Hz $F_w(nT_1)$ 的所需精度,仅保留输出的最高有效位(most significant bit, MSB)。通过外部输入 G 来更改增益值,以适应PLL时间响应以及锁定范围。乘法器用作可配置的增益级,其中输出 $F'_w(nT_1)$ 仅保留28 MSB,其表达式如下:

$$F'_w(nT_1) = G \times F_w(nT_1) \quad (2)$$

如图4所示,NCO提供了正弦波信号 $V_1(nT)$ 和 $V_2(nT)$ 。在模拟振荡器中,振荡频率由电压或电流设置,而在NCO中,输出频率由频率控制字 F_w 给出。在此设计中, F_w 重命名为 $F_{WCO}(nT)$,这是由 $F'_w(nT_1)$ 和 F_{ref} 的和得出的。因此,输出频率 f_{exc} 可以写为:

$$f_{exc} = \frac{F_{clk} \cdot F_{WCO}(nT)}{2^N} \quad (3)$$

式中: N 是 $F_{WCO}(nT)$ 的位宽; F_{clk} 是数字PLL频率时钟。频率分辨率 f_{step} 表示为:

$$f_{step} = \frac{F_{clk}}{2^N} \quad (4)$$

确定PLL的频率分辨率。NCO连接14 bit DAC,因此其输出 $V_1(nT)$ 和 $V_2(nT)$ 为14 bit编码,从而提供-84 dBc的无杂散动态范围(spurious-free dynamic

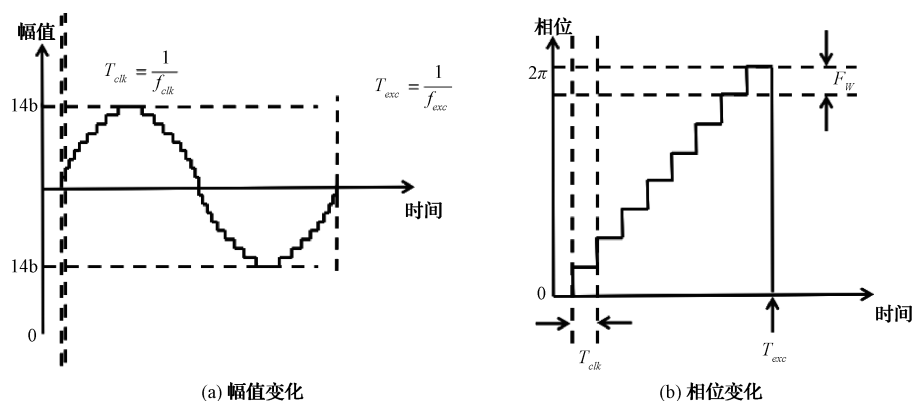


图4 数控振荡器工作原理

range, SFDR)。只有 K 个 MSB 寻址相位至正弦波转换器(pure sine wave converter, PSC)输入,以降低其复杂度,同时保证所需的频率分辨率。基于如下关系:

$$SFDR \approx 6 \times (J - N) \quad (5)$$

式中: J 表示被截断的比位, $K=16$ 保证了 -84 dBc 的 SFDR。PSC 基于坐标旋转数字算法^[15],它仅使用加法器和移位器,从而避免了使用大量查找表。使用 32 bit 累加器($N=32$),PLL 分辨率为 0.1 Hz。

PS 用于分别优化悬臂和激励信号或 $U_{cant}(t)$ 和 $U_{exc}(t)$ 之间的相位。它基于两个乘法器和一个加法器。

均方根转直流和 AGC 中 A_{RMS} 是 RMS-DC 转换器计算的 $U_{cant}(t)$ 的均方根值,关系如下:

$$A_{RMS} = \sqrt{(U_{cant}(nT_2))^2} \quad (6)$$

式中: T_2 是时钟周期。这些子系统运行速度要低于 PLL 系统,以确保正确的悬臂振幅控制。低通滤波器由抽取级组成。它的设计方法与 PLL 环路滤波器相同。截止频率为 1 kHz。AGC 系统控制 A_{exc} 保持 $A_{rms} = A_{exc}$ 。从参考信号 A_{ref} 中减去 A_{rms} 信号,然后将差发送到可配置的比例 P 和积分 I 增益模块中:

$$A_{exc}(nT_2) = A_P[A_{ref} - A_{RMS}(nT_2)] + A_I \sum_0^n [A_{ref} -$$

$$A_{RMS}(nT_2)] \quad (7)$$

2.2 探针驱动设计

基于系统整体尺寸及商业 AFM 所用 Tip-holder 取放便捷的优点,本文设计了探针驱动系统中的 Tip-holder 模块,如图 5 所示,压电陶瓷作为探针振动的驱动材料,将电信号转化为机械振动^[16];压簧片和夹持垫片在保持探针位置稳定的同时提供一定的角度配合光电系统的焦距需求;可更换的探针座可以方便地更换,避免多次取放对探针造成磨损;预留螺纹孔可以使用传递杆对整个探针座进行稳定的平移更换;探针基座一方面起固定作用,固定在测量单元上主要作用为限定探针更换后的安装位置,另一方面安装电极片,为压电陶瓷提供电压。固定基座与可更换探针座采用不锈钢加工并增加限位槽,利用不锈钢的重量及限位槽的关系提高探针的稳定性,减小漂移。如图 5 所示,起振压电陶瓷位于矩形腔内,用环氧树脂胶掩埋一片分区极化的压电陶瓷,其上表面粘接探针装夹垫片,装夹垫片上预留了用于夹放探针的槽口^[17]。采用漆包线焊接到压电陶瓷片上,从导出孔导出至电极上,在电极上施加交流电压信号通过压电陶瓷伸缩运动而间接驱动悬臂振动。

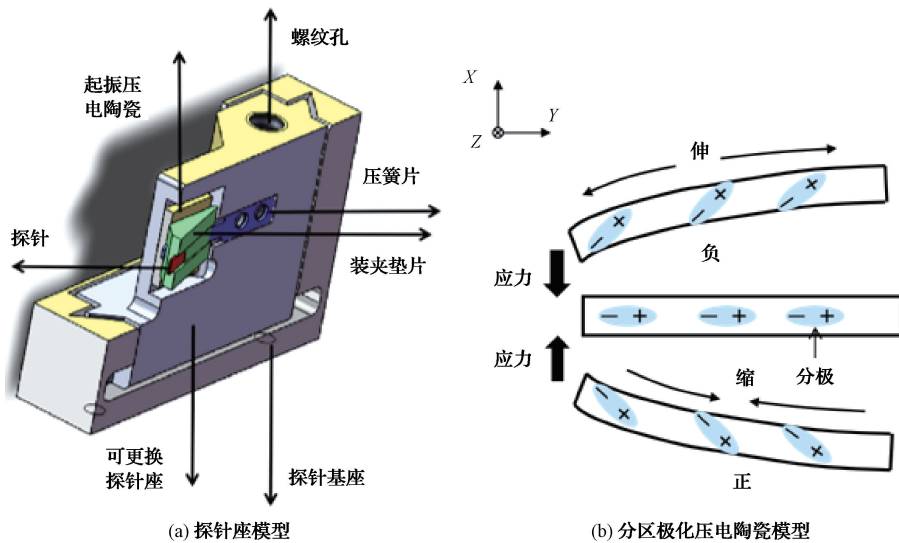


图5 压电驱动系统

3 实验与结果

为了验证所设计系统功能,将不同频率 20 kHz、 1 和 50 MHz 的 1 V 振幅正弦波信号提供给起振控制系统,测试结果如图 6 所示,系统可以在 20 kHz~ 50 MHz 的范围内跟踪设定频率。

系统功能性验证后,为了提高品质因子,实验在真空度为 6.4×10^{-6} Torr 的高真空环境中展开,探针选用 PPP-NCLPt-SPL 型号,悬臂 $l=225$ μm 、 $w=38$ μm ,成功安装在探针座后使用起振系统中激励探针悬臂梁振动。

如图 7 所示,探针实际谐振频率为 161.046 kHz,半高宽为 22.5 Hz,品质因子 Q 为 $12\,245$,相位偏转为 $\pi/2$,测量结果显示探针悬臂梁成功在谐振频率处振动,并具有良好的灵敏度。

确定谐振频率后,对频移信号 Δf 实时检测,图 8 所示为 300 s 的时间内 $|\Delta f|$ 的变化,在此时间段内 $|\Delta f| < 0.4$ Hz,达到了 0.1 Hz 级别的频率分辨率。

实验表明,与引言中提到的目前 NC-AFM 控制系统检测频率范围较小、检测精度较低相比,本文设计的控制系统可以在 20 kHz~ 50 MHz 的范围内跟踪设定频率,并

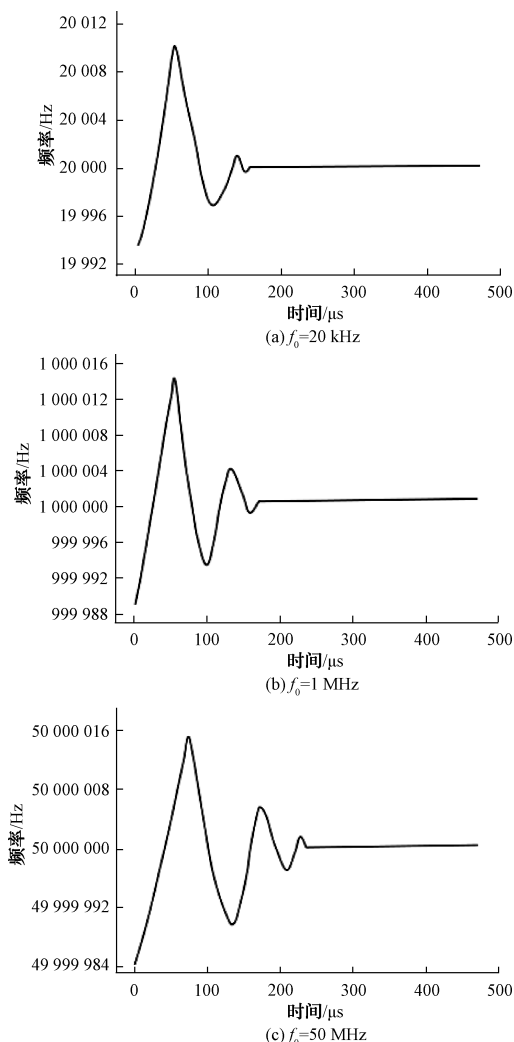


图 6 频率跟踪

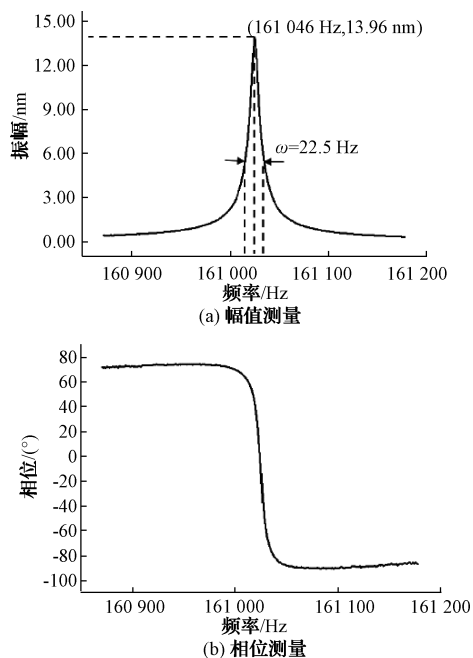


图 7 探针共振峰测量

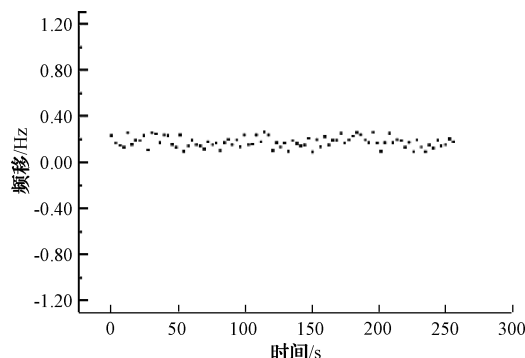


图 8 频移检测

且频率分辨率达到 0.1 Hz。

4 结论

针对 NC-AFM 精密测量研究中使用探针谐振频率范围的扩展,本文设计了一种具有全数字 PLL 和压电驱动的探针起振控制系统,该系统可检测 20 kHz~50 MHz 输入频率的 0.1 Hz 频率变化,基本可以满足目前已有的探针起振需求。为微观领域的深入研究奠定了基础。对于更高频率的探针,可以通过用大于 125 MHz 采样速率的 ADC 和 DAC 来突破 50 MHz 的频率限制。该系统可用于 NC-AFM 应用或需要高频分辨率的应用。

参 考 文 献

- [1] MA Z M, ZHAO M, QU Z, et al. Precise nanoscale measurements with scanning probe microscopy (SPM): A review [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2017, 17(4): 2213-2234.
- [2] GROSCURTH P, ZIEGLER U. Atomic force microscopy[M]. Oxford University Press, 2010.
- [3] KHAN Z, LEUNG C, TAHIR B A, et al. Digitally tunable, wide-band amplitude, phase, and frequency detection for atomic-resolution scanning force microscopy[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(7): 197.
- [4] SHIRASAWA M, YOSHIDA T, SHIMODA Y, et al. Differential immune-related micro environment determines PD-1/PD-L1 blockade efficacy in advanced non-small cell lung cancer patients[J]. Journal of Clinical Oncology, 2021, 39(15): 9044-9044.
- [5] SCHLECKER B, DUKIC M, ERICKSON B, et al. Single-cycle-PLL detection for real-time FM-AFM applications[J]. IEEE Transactions on Biomedical Circuits & Systems, 2014, 8(2): 206.
- [6] DAVIS S, OBSTBAUM T, ARI G B, et al. A constant-frequency feedback loop for non-contact frequency-modulated atomic force microscopy via root

- locus: Implemented on a single-board field-programmable gate array device [J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(11): 113702.
- [7] 陈礼诚. 新型数字反馈式原子力显微镜的研制与应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [8] 高倩, 王振宇, 李英姿, 等. 基于双 ARM 的频率调制原子力显微镜[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(11): 107-110.
- [9] 黄强先, 袁丹, 尤焕杰, 等. 动态 AFM 悬臂的高阶谐振特性研究及实验[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(12): 9-14.
- [10] 刘文俊, 李学明, 陈志文, 等. 基于频率自适应 PLL 的传动系统牵引电机转速实时估计[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 32(5): 157-164.
- [11] 邢震震, 苏淑靖, 梁文科, 等. 基于派克变换的改进型鉴相器设计与实现[J]. 电子测量技术, 2021, 44(12): 18-23.
- [12] 杨文, 沈大伟, 靳鸿, 等. 基于 FPGA 的多通道动态测试系统的设计与仿真[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(9): 81-86.
- [13] 袁秉凯, 陈鹏程, 仇君, 等. 原子分辨显微分析技术研究进展[J]. 物理化学学报, 2013, 29(7): 1370-1384.
- [14] 曲章. NC-AFM 探针振动微弱信号检测系统及技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [15] INGUVA M, SEVENTILINE J B. Implementation of FPGA design of FFT architecture based on CORDIC algorithm [J]. International Journal of Electronics, 2020, 108(11): 1914-1939.
- [16] 杨璐, 于恒彬, 周海波, 等. 基于压电陶瓷的弹性变形体频率检测系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2018(5): 58-61.
- [17] 许军, 金晨, 牛刘敏, 等. 低噪声原子力显微镜测量单元设计[J]. 电子显微学报, 2021, 40(2): 138-143.

作者简介

温阳, 硕士, 主要研究方向为精密仪器研发与测量、原子力显微镜技术等。

E-mail: wynuc1@163.com