

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508469

一种高精度便携式扫描隧道显微镜的设计与实现*

谢国康¹ 郭颖¹ 吴哲²

(1. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044;

2. 安徽大学信息材料与智能感知安徽省实验室 合肥 230000)

摘要:扫描隧道显微镜(scanning tunneling microscope, STM)因其卓越的原子级分辨率成像能力,自问世以来在表面科学与纳米技术领域发挥了重要作用。近年来,尽管高端STM在极端条件下取得了诸多科研突破,但高昂的成本与复杂的操作流程限制了其在教学与常规检测中的广泛应用。为解决这一问题,提出一种自主研发的高精度便携式STM系统,具备结构紧凑、成像性能优异、成本低廉等特点。系统由压电扫描头、粗调步进马达、低噪声信号检测电路、STM32H7主控控制系统及基于Qt的上位机软件平台组成。镜体采用模块化设计,内置被动隔振结构,扫描头与马达结构解耦,有效提升了成像稳定性。实验结果表明,控制器输出信号精度高,电压分辨率优于0.6 mV;步进马达运行稳定,空载启动电压为17 V(向下)至24 V(向上),步距范围为0.33 μm (17 V)至2.01 μm (80 V);驱动自研独立扫描头的启动电压为20 V(向下)至29 V(向上),步距为0.21 μm (17 V)至1.26 μm (80 V)。独立扫描头结构紧凑、刚性良好,在1楼地面环境测得室温漂移速率为31.5 pm/min(X - Y 方向)和42.3 pm/min(Z 方向),在3楼桌面环境分别为34.8和46.2 pm/min,具有良好的结构与电路稳定性。系统在室温大气环境下实现了原子级分辨率成像,具备优异的成像一致性与控制精度,适用于科研实验、教学演示及工业表面检测等多种应用场景。

关键词:扫描隧道显微镜;压电马达;原子分辨率;低噪声检测;STM32控制

中图分类号: TH7;TN7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4025

High-precision portable scanning tunneling microscope: Design and implementation

Xie Guokang¹ Guo Ying¹ Wu Zhe²

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Information Materials and Intelligent Sensing Laboratory of Anhui Province, Hefei 230000, China)

Abstract: Since its invention, the scanning tunneling microscope (STM) has played a pivotal role in surface science and nanotechnology due to its exceptional atomic-resolution imaging capability. In recent years, although high-end STMs have enabled breakthroughs under extreme conditions, their high cost and operational complexity hinder widespread adoption in education and routine inspection. This paper presents a compact, cost-effective, and high-performance portable STM system developed entirely in-house. The system comprises a piezoelectric scanner, coarse approach stepper motor, low-noise signal detection circuit, STM32H7-based control unit, and a Qt-based user interface, all built from the ground up. A modular microscope body integrates a passive vibration isolation system, and the mechanical decoupling of the scanner and motor enhances imaging stability. Experimental results demonstrate high signal precision, with controller voltage resolution better than 0.6 mV. The stepper motor operates reliably, with a no-load starting voltage of 17 V (down) to 24 V (up) and step sizes ranging from 0.33 μm (17 V) to 2.01 μm (80 V). The custom-developed scanner initiates movement at 20 V (down) to 29 V (up), with step sizes from 0.21 μm (17 V) to 1.26 μm (80 V). The scanner structure is compact and rigid, with measured thermal drift rates of 31.5 pm/min (X - Y) and 42.3 pm/min (Z) on a ground-floor lab, and 44.8 pm/min (X - Y) and 56.2 pm/min (Z) on a third-floor desktop, reflecting excellent structural and electronic stability. Ultimately, the system achieves

收稿日期: 2025-06-17 Received Date: 2025-06-17

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(6197122)、信息材料与智能感知安徽省实验室(安徽大学)开放课题(IMIS202402)资助

atomic-resolution imaging under ambient conditions, with high imaging consistency and control precision, making it suitable for scientific research, teaching, and industrial surface characterization.

Keywords: scanning tunneling microscope (STM); piezoelectric motor; atomic resolution; low-noise detection; STM32 control

0 引言

扫描隧道显微镜 (scanning tunneling microscope, STM) 自 1982 年由 Binnig 和 Rohrer 发明以来, 凭借其基于量子隧穿效应实现原子级分辨率成像的独特优势, 彻底改变了表面科学和纳米技术的研究模式^[1-2]。随着技术的不断迭代, STM 系统逐步发展为 2 个主要分支: 一类是适用于极端条件 (如超高真空、低温和高磁场) 研究的高端设备; 另一类是体积小、操作简便且成本低廉的便携式设备。

高端 STM 系统通常集成超高真空环境 (约 10^{-10} mbar^[3-8])、极低温 (mK 级) 以及大于 10 T 的强磁场^[9-10], 可以实现对原子尺度的精密操控。这些系统在表面原子重构、高温超导机理和单分子量子态调控等前沿领域取得了显著成果^[11], 并不断向多功能测试平台方向发展, 例如与分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE) 系统联用实现原位表征^[12], 或结合超快激光技术研究纳米尺度载流子动力学^[13-18]。此外, 低温环境对提升扫描探针显微镜 (scanning probe microscope, SPM) 系统性能具有显著作用, 能够提高能量分辨率、降低热漂移与噪声、削弱压电滞后效应^[19], 低温 SPM 被认为在某些领域可能优于冷冻电镜, 是一种新的研究方向^[20]。将冷冻样品制备装置与 SPM 系统集成, 也为生物分子与弱束缚体系的原位观测提供了可行路径。然而, 复杂的系统架构及高昂的采购与维护成本限制了其在更广泛领域的应用。

近年来, 便携式 STM 逐步兴起, 加拿大 ICSPi、英国 Nanomagnetix 及瑞士 Nanosurf 等公司推出了可手持、体积如笔记本的 STM 以及原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM)^[21], 显著提升了现场检测的效率, 实现了设备体积的显著缩小, 同时仍保持亚纳米级分辨率^[22]。其低成本和易操作性使其在量子隧穿效应教学、半导体缺陷检测等常规表征任务中具有明显优势。国内一些学者也相继推出了桌面级、便携式 STM^[23-24], 对 STM 在教学、便携性应用等方面做出了贡献。但由于桌面设备缺乏高真空和优异的隔音减振系统, 其成像效果远不及高静态环境。这就对显微镜镜体结构设计、控制电路设计乃至运行程序的代码编写都提出了更高要求。另外, 目前国内大多数商用 STM 依赖进口, 自主研发虽有成效但仍不完备。

本文针对上述问题, 提出一款制作便捷、体积小巧、性能优异的便携式 STM 系统。该系统的所有组件均为

自主设计开发, 包括控制器电路、显微镜镜体以及上下位控制程序, 实现了原子级分辨率成像, 不仅适用于科研和教学, 还可作为工业检测的高性价比工具。

1 STM 的检测原理

STM 的工作原理基于量子隧穿效应^[25]: 当探针尖端与样品表面之间的距离缩减至纳米尺度 (通常 < 1 nm) 时, 形成准一维的隧穿结。在施加偏压后, 电子通过势垒的隧穿概率显著增加, 从而产生与探针-样品距离呈指数关系变化的隧道电流。STM 系统利用实时反馈调节探针在 Z 方向的位置以维持恒定的隧道电流, 并将扫描时的 X-Y 位移转换为样品表面形貌的拓扑信息。

为实现上述功能, 一个完整的 STM 系统通常包括如下核心模块。

1) 扫描镜体结构, 要求具有高刚性和对称性, 以提高共振频率并有效隔离环境振动, 同时紧凑化设计有助于降低热波动对隧穿结稳定性的影响。

2) 分层控制系统, 由上位机界面和下位机硬件控制单元构成。上位机负责扫描参数设置、数据实时显示及存储, 下位机则利用高精度数模转换生成扫描电压信号并同步采集隧道电流数据, 通过低延迟通信协议实现实时反馈控制。

3) 低噪声检测电路^[26-27], 通常采用跨阻型前级放大器将 pA 级别的隧道电流转换为可读电压信号, 通过分级放大和主动屏蔽技术将背景噪声降低至 $0.1 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下, 该噪声经过 $100 \text{ M}\Omega$ 放大后, 形成的电压信号噪声应低于 2 mV 。

本 STM 系统采用模块化设计, 其核心组件包括: 压电扫描头 (利用压电陶瓷的逆压电效应实现亚纳米级调控); 惯性压电步进马达作为粗调机构 (具备厘米级行程和亚微米级步进精度); 被动式隔振系统 (弹簧悬架使固有频率低于 5 Hz); 低噪声前置放大器; 基于 STM32H7 的数模混合主控板, 内置 16 位高精度模数转换器 (analog-to-digital converter, ADC)/数模转换器 (digital-to-analog converter, DAC); 高压驱动模块 (实现 $\pm 85 \text{ V}$ 输出及 $50 \text{ V}/\mu\text{s}$ 以上压摆率); 基于 Qt 开发的上位机系统 (集成扫描参数调节、三维形貌实时重构和多模式数据采集等功能)。

2 系统设计

2.1 整体设计方案

本 STM 系统的控制模块采用主控板与高压板分离

的结构(图 1)。主控板基于 STM32H7 微控制器(ARM Cortex-M7,主频 480 MHz)实现核心控制功能,并通过双通道输出信号:对粗逼近马达及扫描头内电极的信号经过高压板放大输出($\pm 85\text{ V}$,16 位分辨率);扫描头外电极直接由主控板输出($\pm 10\text{ V}$,16 位分辨率)。系统采用自主研制的低噪声直流电源(输出噪声不超过 1 mVpp),确保精密测量电路工作稳定。

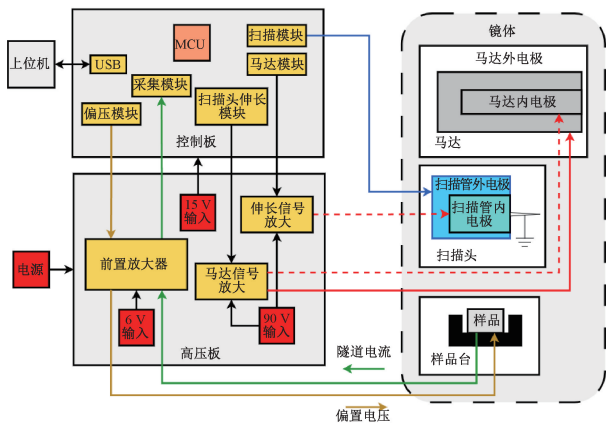


图 1 整体设计方案示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the overall design

2.2 镜体结构设计

本 STM 采用粗逼近马达与扫描头分离设计(图 2)。此设计具有以下优势:有效隔离粗逼近马达引起的热力学扰动,降低因摩擦阻力、热漂移和机械振动引起的干扰;提升热机械稳定性,避免大质量运动组件(粗逼近马达)引起的惯性干扰。

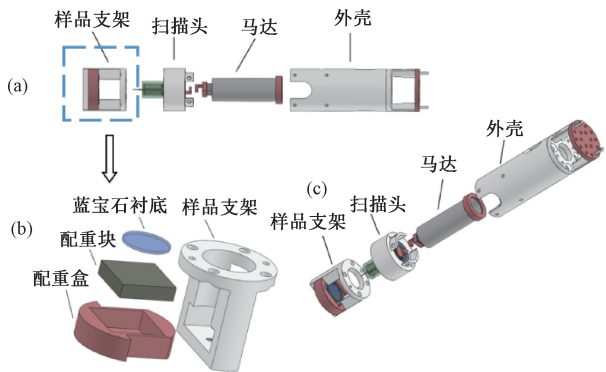


图 2 镜体结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the STM structure

本系统拟采用一级悬吊被动减振方式,将传递到隧道电流的振动降低到 5 Hz 以内。对于一级弹簧悬吊系统,重物运动幅值 x_0 相对于顶板运动幅值 X_0 的响应函数为:

$$K(\omega) = \frac{x_0}{X_0} = \frac{\omega_0^4 + 4\gamma^2\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma^2\omega^2} \quad (1)$$

式中: ω 为顶板振动角频率; ω_0 为系统固有频率; γ 为弹簧阻尼常数。对于室温大气环境的 STM 系统,外界振动($\sim\text{kHz}$)相对于系统为高频振动,且空气阻尼可以忽略,此时:

$$K(\omega) \approx \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2 = \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 \quad (2)$$

因此,系统固有频率越低,振动隔绝效果越好。体系的固有频率受到弹簧长度的限制,其计算式如下:

$$f_0 = 2\pi\sqrt{\frac{k}{m}} = 2\pi\sqrt{\frac{g}{\Delta L}} \approx \frac{5}{\sqrt{\Delta L}} \quad (3)$$

可以看到,为保证系统固有频率低于 1 Hz ,重物需要将弹簧拉伸 25 cm 。因此设计系统固有频率为 5 Hz 左右。

另一方面,对于 STM 系统,顶板为固定有样品的底座,而重物为探针和扫描系统,根据式(2)可知,当显微镜是高刚性时,低频振动不会影响其内部隧道结的长度。假设显微镜的固有频率为 f_s ,对于频率处于这两者之间的振动频率 f ,隧道电流总的响应函数为:

$$K(f) = \left(\frac{f}{f_s}\right)^2 \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 = \left(\frac{f_0}{f_s}\right)^2 \quad (4)$$

由式(4)可知,显微镜的固有频率 f_s 需要远大于振动系统固有频率 f_0 (本系统设计为 5 Hz),才能起到有效隔振效果。也就是说,扫描隧道显微镜的刚性是减振系统性能的重要影响因素。

本系统显微镜结构如图 2 和 3 所示,镜体整体采用全对称模块化结构。

1) 样品承载模块,集成蓝宝石衬底和配重块,优化重心位置,使悬挂状态下共振频率降至 5 Hz 以下(图 2(b))。

2) 扫描头模块,采用压电陶瓷管(外径 8 mm ,壁厚 0.5 mm ,长度 15 mm)实现 X - Y - Z 三轴纳米级定位。

3) 粗逼近马达模块,采用压电陶瓷管(外径 11 mm ,壁厚 1 mm ,长度 31.8 mm)实现亚微米级单步步幅。

同时,系统全部使用铝制屏蔽外壳,壁厚超过 3 mm ,兼具电磁屏蔽和热隔离功能。

这种设计结构紧凑,刚性足(图 3,直径 20 mm ,高度 90 mm),不仅确保了原子级成像性能,同时降低了机械制造难度。

为进一步验证扫描头结构在环境振动及热扰动条件下的动态稳定性,对扫描头进行有限元力学分析。基于 SolidWorks Simulation 建立扫描头三维模型,在压电陶瓷驱动元件与支撑框架的接触界面施加装配约束条件,对其一阶弯曲模态、扭转模态及径向振动模态进行了系统的模态分析。仿真结果表明:扫描头的一阶弯曲固有频率为 2.31 kHz ,二阶扭转模态频率为 3.84 kHz ,径向呼吸模态频率为 6.57 kHz ,这些高阶固有频率均远高于系统

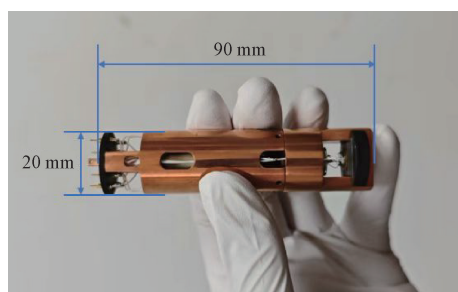


图3 镜体结构实物图

Fig. 3 Photo of the STM structure

典型环境低频扰动(约5 Hz),满足常见减振设计准则,有助于抑制外界振动对针尖-样品隧穿结的耦合干扰,从理论上保障扫描过程中的成像稳定性。

由于实验条件与设备限制,本文未对扫描头本体进行独立的实验频响测试。结合仿真分析结果及扫描成像实验中未观察到明显共振伪影或条纹畸变的事实,可认为所设计的结构具有足够的刚性与动态稳定性,可支撑室温环境下的原子级成像。

2.3 粗逼近马达设计

粗逼近马达是实现探针-样品距离从毫米级向纳米级平滑过渡的关键,其设计需满足高定位精度和足够的运动行程要求。传统机械传动方式(如精密螺纹或杠杆放大装置)因回程误差和机械磨损问题,逐步被压电驱动技术取代。

本文选用惯性压电马达作为粗逼近机构(图4)。扫描管的一端外侧通过粘接3D打印顶绝缘环与金属镜体连接,另一端内侧通过粘接3D打印底连接环与蓝宝石内部套筒连接。在内部套筒内,通过特殊设计的弹簧片为滑杆提供稳定正压力,确保滑杆与套筒内壁的摩擦力可重复。滑杆底部粘接有滑杆拉钩,用于与扫描头机械解耦。

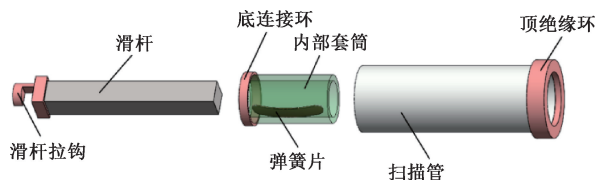


图4 马达结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the motor structure

2.4 探针制备与扫描头设计

探针的几何形貌和机械性能直接影响成像分辨率与稳定性。根据量子隧穿理论,探针需采用高弹性模量且抗氧化性能优良的材料(如钨或铂铱合金)。探针制备方法包括电化学腐蚀法和机械剪切法;实验采用机械剪切法,因其制备效率高且重复性较好。

扫描头模块采用多层套筒式结构(图5)。扫描管的一端通过绝缘顶盖固定粘接于蓝宝石内部套筒之内,并保证扫描管与内部套筒之间有足够间隙。扫描管的另一端粘接有绝缘底盖和探针针筒,用以方便更换探针。内部套筒通过特殊设计的弹簧片压紧于蓝宝石外部套筒内,形成内外嵌套结构,同时保证内部套筒可以在外部套筒内顺利滑动。外部套筒固定粘接到外壳之内,组装为扫描头。

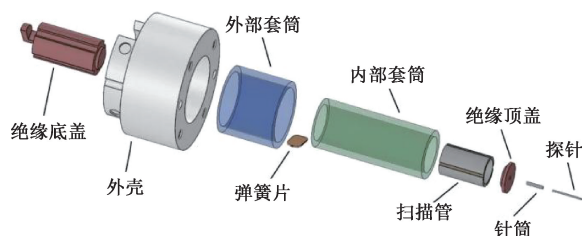


图5 扫描头结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the scanner structure

该设计具有体积小、动态响应速度快(与步进马达的非接触设计降低机械耦合),热稳定性好等优点,且所有零件加工难度小,适合批量生产。此外,本文使用的扫描管为四象限扫描管(图6),其外设4个分别作用于X+、X-、Y+和Y-的电极,通过施加不同电压实现探针在X-Y平面的运动;内电极则用于控制Z轴方向,通以高压后实现细逼近。

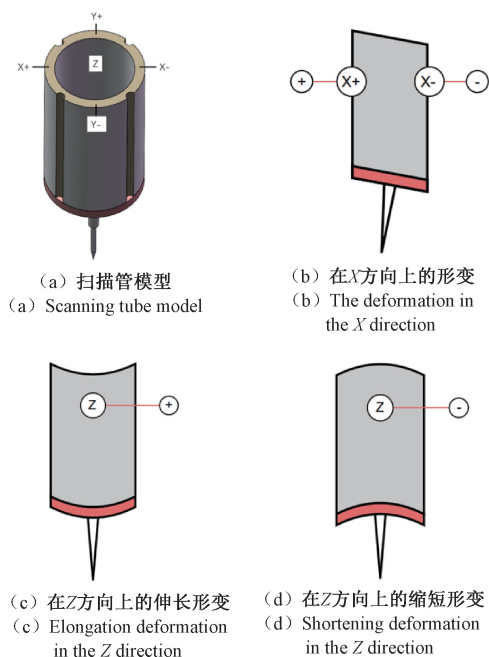


图6 四象限扫描管示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the four-quadrant scanning tube

2.5 控制系统硬件

控制系统由控制板和高压板组成,采用上下组装设计(图 7)。控制板包括主控芯片以及 DAC 芯片、5 和 3.3 V 稳压芯片以及一些参考电压芯片;高压板包括高压放大芯片以及前级放大电路。这样的设计既可以将高低电压分开,也可以将数、模电分开,保证隧道电流放大电路的稳定。

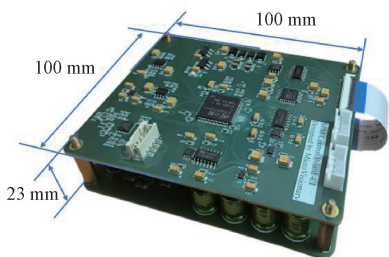


图 7 控制板(上层)和高压板(下层)实物

Fig. 7 Photos of the control board (upper layer) and the high-voltage board (lower layer)

主控芯片采用 STM32H743 (主频 480 MHz), 支持 USB 2.0 高速模式, 理论最高通信速率 480 Mbps, 为整个系统提供高分辨率、实时传输和稳定控制。上层控制板主要负责如下工作。

1) 扫描头内电极控制, 主控芯片经 SPI 通信控制外挂 16 位 DAC (DAC8831, 单路), 输出 ± 2.5 V 电压, 再经比例放大后输出 ± 10 V。

2) 偏压控制, 同样采用外挂 DAC (DAC8831) 输出偏置电压, 范围 ± 2.5 V 以内。

3) 扫描头外电极控制, 主控芯片经 SPI 通信控制外挂 16 位 DAC (AD5764, 四路) 实现 X+、X-、Y+ 和 Y- 输出信号, 并结合电压跟随器输出 ± 10 V 控制信号。

4) 马达控制, 采用主控芯片自带 12 位 DAC 输出马达控制信号, 并通过 GS2262 放大器将输出信号放大至 ± 10 V。

5) 采集控制, 采用主控芯片内置 16 位差分 ADC 对经过放大后的隧道电流信号进行采集。

6) 通信模块, 采用 USB3300 芯片实现与上位机之间的 USB2.0 通信, 保证高速数据传输。

下层高压板主要包含如下工作。

1) 前置放大电路, 使用 2 个 OPA627 组成二级联配跨阻放大电路, 对隧道电流进行跨阻放大, 输出可供 ADC 采集的电压信号。

2) 扫描头内电极放大电路, 由控制板输出的 ± 10 V 扫描头内电极控制信号, 经过 ADHV4702 进行 2 次放大, 输出 ± 85 V 控制信号。

3) 马达信号放大电路, 采用 2 颗 ADHV4702 芯片, 将

控制板输出的 ± 10 V 以内的马达控制信号进行正反向放大, 输出两路极性相反的 ± 85 V 马达控制信号。

直流电源采用线性稳压电源设计, 输出 ± 6 、 ± 15 和 ± 90 V 共 6 路直流源。电源均采用了高达 15 000 μ F 的滤波电容, 并结合 CLC 低通滤波电路, 使其输出电压噪声均低于 1 mV。图 8 为电源实物, 其输出的 6 路信号通过同轴电缆输送给控制器, 其中 ± 90 V 为高压放大芯片供电, ± 6 V 为前置放大芯片供电, ± 15 V 一方面为低压放大芯片供电, 另一方面通过线性电源变换为 5 和 3.3 V 为 DAC 芯片以及主控芯片供电。

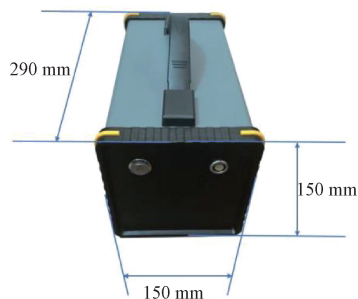


图 8 自制直流电源

Fig. 8 Self-made DC power

2.6 程序设计

程序包括下位机程序与上位机程序 2 部分。下位机程序烧录在主控芯片中, 主要负责接收上位机发送的控制数据、控制马达进行粗逼近、控制扫描头实现细逼近及二维扫描、产生偏压信号并采集隧道电流、将数据实时传输至上位机。其中主控芯片内置 DAC 控制马达粗逼近, 其波形如图 9 所示, 数学表达如式 (9) 所示, 其中 t 表示时间 (μ s), $f(t)$ 是 12 位 DAC 输出的数值。

$$f(t) =$$

$$\begin{cases} 1\,024\sin\left(\frac{\pi}{1\,000}t + \frac{\pi}{2}\right) + 1\,024, & 0 < t \leq 1\,000 \\ 0, & 1\,000 < t \leq 1\,100 \\ 4\,095 - 4\,095\sqrt{1 - \left(\frac{1}{400}(t - 1\,100)\right)^2}, & 1\,100 < t \leq 1\,500 \\ 4\,095 - 4\,095\sqrt{1 - \left(\frac{1}{400}(t - 1\,900)\right)^2}, & 1\,500 < t \leq 1\,900 \\ 0, & 1\,900 < t \leq 2\,000 \\ 1\,024\sin\left(\frac{\pi}{1\,000}t - \frac{\pi}{2}\right) + 1\,024, & 2\,000 < t \leq 3\,000 \end{cases}$$

(5)

上位机程序基于 QT6.6 开发, 其界面如图 10 所示, 主要实现图形化参数设置、向下位机发送控制指令、实时接收和处理下位机回传数据、数据实时显示与保存等功能。

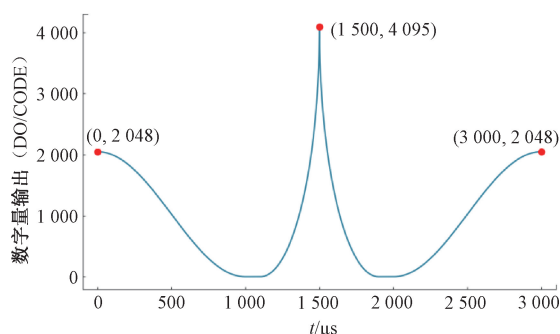


图9 马达波形(纵坐标为12位DAC输出数值)

Fig. 9 Motor waveform diagram(the vertical axis representing the output value of a 12-bit DAC)

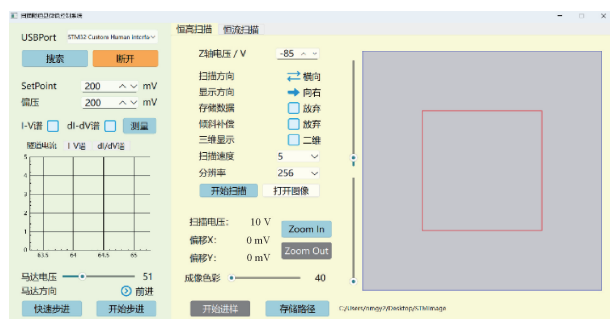


图10 人机交互界面

Fig. 10 Human-machine interface

3 性能测试

如图11所示,控制电路全部封装在一个厚度为3 mm的铝制电路盒中,向外仅预留2个接口:一个是直流电源输入接口;另一个是USB接口用以连接上位机。控制电路盒上方固定有悬吊系统,并通过2根定制弹簧将镜体进行悬吊,保证其共振频率低于5 Hz。此外,整个镜体通过厚度为3 mm铝制屏蔽罩进行电磁屏蔽。

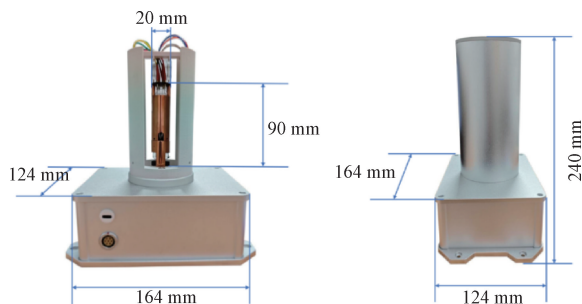


图11 显微镜实物图

Fig. 11 Photo of the STM

系统扫描电压有 ± 10 、 ± 5 、 ± 2.5 、 ± 1.25 V、 ± 625 和 ± 312.5 mV可选,并配合X/Y方向偏移量,实现全扫描

范围内任意位置的定点扫描。图像分辨率有 256×256 、 512×512 和 1024×1024 pixels 3种可选。控制系统的主要任务是实现高精度控制,为了测试其DAC输出精度,将输出范围设定为最小的 ± 312.5 mV,分辨率设置为最大的1024,单步输出梯度0.6 mV。如图12所示,控制电路对于0.6 mV的阶梯信号依旧可以清晰分辨,稳定输出波形噪声峰峰值低于1 mV。由于测试所用示波器本底噪声为1 mV左右,因此测试结果可能并未达到控制电路的极限性能,这对于STM高质量成像提供了有效保障。

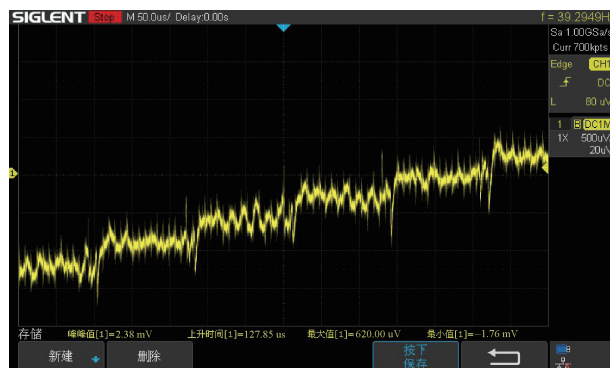


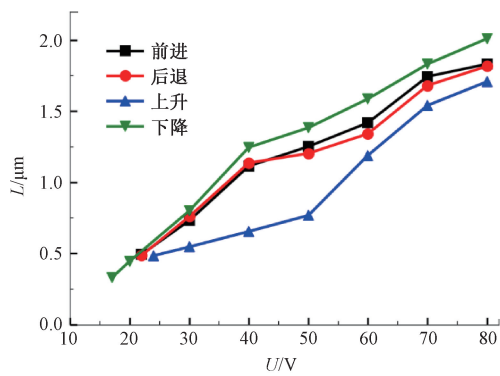
图12 控制系统的DAC输出信号

Fig. 12 The DAC output signals in the control system

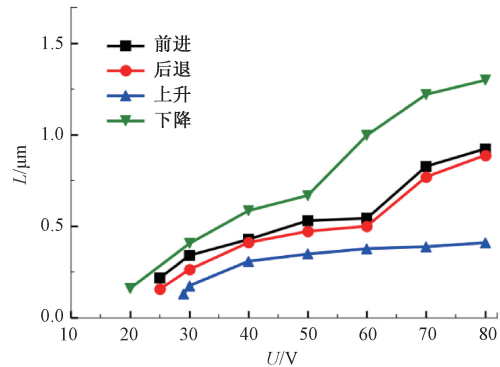
由于采了步进马达与扫描头分离的结构设计,虽然可以最大程度降低马达噪声传入隧道结从而提高成像质量,但也提高了对马达推力的要求。马达不仅需要克服自身与滑杆之间的摩擦力实现步进,同时还需要推动独立扫描头前进或后退。因此,马达和弹簧片都需要进行精细调整。

为了测试马达行走性能,施加不同电压的控制信号,测试上、下、前、后4个方向的运动情况。图13(a)所示为步进马达空载时在4个方向行走的单步步幅与控制电压的关系,图13(b)所示为马达推动独立扫描头在4个方向行走的单步步幅与控制电压的关系。可以看到,在高压信号下,马达推动扫描头行走十分流畅。空载启动电压为17 V(向下)至24 V(向上),步距范围为 $0.33 \mu\text{m}$ (17 V)至 $2.01 \mu\text{m}$ (80 V);驱动独立扫描头的启动电压为20 V(向下)至29 V(向上),步距为 $0.21 \mu\text{m}$ (17 V)至 $1.26 \mu\text{m}$ (80 V)。

为了进一步测试马达推力性能,进行了最大推力测试,通过调整扫描头压紧弹簧片的弹性力,从而调整推动其运动所需要的最大推力。测试马达控制电压为85 V,控制信号如图9所示。独立扫描头悬挂不同重量的砝码,测试使其发生相对滑动的最大静摩擦力,该值即为推动独立扫描头运动的最大动力。通过不断调整该值,逐步测试出马达在4个方向的最大推力。



(a) 空载时步进马达单步步幅与控制电压的关系
(a) The relationship between the single step amplitude of the motor and the control voltage when unloaded



(b) 推动扫描头行走时马达单步步幅与控制电压的关系
(b) The relationship between the single step amplitude of the motor and the control voltage when driving the scanning head to move

图 13 步进马达在 4 个方向单步步幅与控制电压的关系
Fig. 13 The relationship between the single step amplitude and control voltage of a stepper motor in four directions

实验数据如表 1 所示。可以看出,在 85 V 左右的控制电压下,马达向下的最大推力为 17 N,向上的最大推力为 12 N,向前和向后均为 14 N。通过这组数据,可以最大程度设计扫描头的夹紧力,增强其刚性和稳定性。

表 1 步进马达在 4 个方向的最大推力
Table 1 Maximum thrust of stepper motor in four directions

方向	向上	向下	向前	向后
最大推力/N	12	17	14	14

为了测试显微镜性能,将控制电路盒以及电源放到 3 楼地面进行扫图及 $i-v$ 谱线测试,没有额外的隔音减振系统。探针使用直径 0.15 mm 的手剪铂铱合金丝,样品表面经过胶带剥离处理,扫描范围为 $6\text{ nm}\times 6\text{ nm}$ 左右,反馈电阻使用 $10\text{ M}\Omega$,扫描过程的平均隧道电流为 100 nA ,扫描速度约为 5 行/s,偏置电压设置为 180 mV ,扫描模式为恒高扫描。图 14 为室温环境扫描高定向热解石墨 (highly oriented pyrolytic graphite, HOPG) 得到的原始

图像。测量得到的原子图像十分清晰,原子排布呈正六边形,符合 HOPG 原子排布特点。

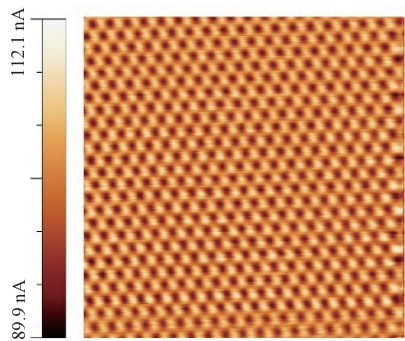


图 14 扫描得到的 HOPG 原子图像
Fig. 14 Atomic image of HOPG obtained by the STM

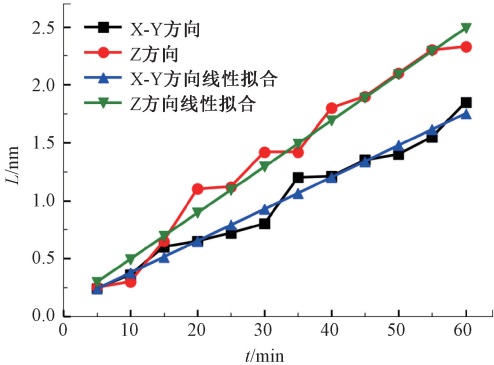
为系统评估仪器的空间分辨力与长期运行稳定性,在 HOPG 样品上开展了重复成像与统计对比实验。在相同扫描参数条件(扫描范围 $6\text{ nm}\times 6\text{ nm}$ 、隧穿电流约 100 nA 、偏压 180 mV)下,连续获取 10 组原子级图像,并在相同环境条件下持续进行 5 d 的重复测试(每天更换全新探针以规避针尖磨损因素)。在实验过程中,对样品表面洁净度与探针形貌进行严格筛选,以排除外界因素对成像质量的影响。

实验结果表明,在上述测试条件下,不同时间获取的原子级形貌图具有一致的晶格周期、对比度与原子分辨清晰度,未观察到明显成像劣化或结构畸变,其成像质量与首日测试结果保持一致。测试结果表明,所设计的 STM 系统在室温、大气环境下具备良好的运行稳定性与成像重复性,能够在长期使用条件下持续保持原子分辨能力,系统分辨率与可靠性满足教学演示及常规表征的使用需求。同时,不同扫描范围条件下的成像性能测试结果表明,系统在各扫描尺度下均保持良好的稳定性。

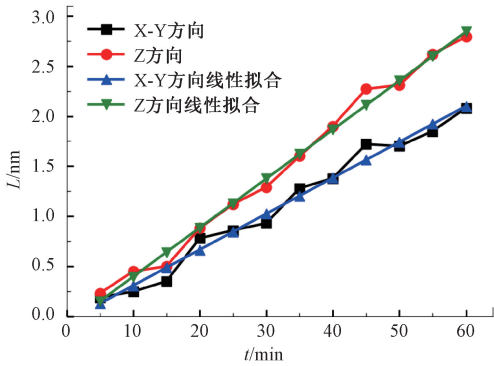
为了进一步测量扫描头的刚性和稳定性,对其进行了漂移测定,测定地点分别为 1 楼实验室地面和 3 楼办公室桌面。测定方法如下: X - Y 方向的漂移速率通过对 HOPG 样品的固定区域进行连续扫描测量获得。实验中设定扫描速度为 5 行/s,每隔 5 min 进行一次图像扫描。由于单幅图像在成像时间内几乎无畸变,可在相邻图像中识别出同一原子并测量其相对位移。经过近 1 h 的扫描,提取多个原子在 X - Y 平面内的位移数据,绘制位移-时间曲线,并进行线性拟合。

Z 方向的漂移通过监测压电扫描管中内电极电压的变化来获得。由于该电压与探针在 Z 方向的位移呈线性关系,在反馈开启且隧道电流恒定的条件下,探针与样品间距保持不变,压电管电压的变化可直接反映 Z 向位移变化。实验每 5 min 记录一次电压值,持续测量超过 1 h,绘制位移-时间图并线性拟合。

实验结果如图 15 所示,在 1 楼地面环境测得室温漂移速率为 31.5 pm/min(X - Y 方向)与 42.3 pm/min(Z 方向),在 3 楼桌面环境分别为 34.8 与 46.2 pm/min。与传统商业 STM 相比(漂移速率约为几百 pm/min),体现出良好的结构与电路稳定性。



(a) 在1楼地面测得的漂移速率
(a) Drift rate measured on the ground floor of the first floor



(b) 在3楼桌面测得的漂移速率
(b) Drift rate measured on the third floor desktop

图 15 在不同场景的室温大气环境下 STM 的成像漂移速率
Fig. 15 Imaging drift rate of STM in different ambient temperature environments

漂移速率与系统结构稳定性及外部环境条件密切相关。通常情况下,低温环境能够有效抑制材料热涨落,从而显著降低热漂移;真空环境则可隔绝空气扰动并削弱环境振动传递,同样有助于改善系统稳定性。本文对多款商业化桌面级 STM 产品进行了调研,但公开技术文档中普遍未给出定量的漂移速率指标。为客观评价本文系统在常温、大气环境下的稳定性水平,选取若干已报道的实验室自研 STM 系统进行对比,并对其漂移测试结果进行归纳整理,结果如表 2 所示。

由表 2 可见,在未采用二级主动减振或复杂隔振平台的条件下,本文所研制的 STM 仍然实现了较低的 X - Y 平面及 Z 向漂移速率,其稳定性表现与同类自制系统相比具有一定优势,验证了所提结构与控制电路的有效性。

表 2 漂移速率对比

Table 2 Drift rate comparison (pm/min)			
来源	应用环境	X - Y 漂移速率	Z 漂移速率
文献[28]	真空,1.8 K	2.6	3.3
文献[29]	大气,室温	30.2	41.4
文献[30]	大气,室温	23.4	34.6
文献[31]	大气,室温	84	76
本文	大气,室温	31.5	42.3

4 结 论

本文研制的便携式 STM 系统具备高度集成化、小型化与模块化的特点,实现了低成本条件下的原子级分辨率扫描功能。系统在控制精度、成像稳定性和使用便捷性方面表现优异,验证了惯性压电马达与扫描头分离结构在提升图像质量方面的有效性。自研控制电路与低噪声电源的结合确保了高精度信号输出与采集,为 STM 稳定运行提供了坚实保障。实验结果表明,该系统在常压、常温环境下亦能获取高质量隧道图像,在科研教学及工业检测中具有广泛应用潜力。未来研究可进一步结合自动化控制及深度学习实现更高效、智能的桌面 STM 系统。

参考文献

[1] QIAO R, KE P C. Lipid-carbon nanotube self-assembly in aqueous solution [J]. Journal of the American Chemical Society, 2006, 128(42) : 13656.

[2] LONG Y, ZHANG L, MA Y, et al. Electrical conductivity of an individual polyaniline nanotube synthesized by a self-assembly method [J]. Macromolecular Rapid Communications, 2003, 24(16) : 938-942.

[3] EBER M, PRATZER M, FRÖMMING M, et al. An ultra-high vacuum scanning tunneling microscope with pulse tube and joule-thomson cooling operating at sub-pm z-noise [J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(12) : 123703.

[4] CHEN Z, DING Z, WANG M, et al. A convenient and robust design for diamond-based scanning probe microscopes [J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(11) : 113703.

[5] YANG Z, GURA L, Kalaß F, et al. A high-speed variable-temperature ultrahigh vacuum scanning tunneling microscope with spiral scan capabilities [J]. Review of Scientific Instruments, 2022, 93(5) : 053704.

[6] ESAT T, BORGES P, YANG X, et al. A millikelvin scanning tunneling microscope in ultra-high vacuum with adiabatic demagnetization refrigeration [J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(6) : 063701.

- [7] ZHOU L, HE Q, QUE X, et al. A spectroscopic-imaging scanning tunneling microscope in vector magnetic field [J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(3): 033704.
- [8] HAM U, KIM H, YOON J S, et al. An approach to breaking the 100-milli-Kelvin barrier in electron temperature with a dilution-refrigerator ultrahigh vacuum scanning tunneling microscope[J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(11): 113707.
- [9] GENG T, WANG J, MENG W, et al. A cryogen-free superconducting magnet based scanning tunneling microscope for liquid phase measurement[J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(3): 033705.
- [10] ZHANG M, WANG J, MENG W, et al. An ultracompact scanning tunneling microscope within a $\Phi 10$ piezo tube in a 20 T superconducting magnet[J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(3): 033704.
- [11] 袁嘉悦, 付鹏翔, 高松, 等. 高频高场电子顺磁共振技术在自旋量子态研究中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(3): 144-156.
- YUAN J Y, FU P X, GAO S, et al. The application of high-frequency/high-field electron paramagnetic resonance in the research on spin qubits [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45 (3): 144-156.
- [12] WU Z, GAO Z, CHEN X, et al. A low-temperature scanning probe microscopy system with molecular beam epitaxy and optical access [J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(11): 113705.
- [13] COCKER T L, JELIC V, GUPTA M, et al. An ultrafast terahertz scanning tunnelling microscope [J]. Nature Photonics, 2013, 7(8): 620-625.
- [14] COCKER T L, PELLER D, YU P, et al. Tracking the ultrafast motion of a single molecule by femtosecond orbital imaging [J]. Nature, 2016, 539 (7628): 263-267.
- [15] YOSHIDA S, AIZAWA Y, WANG Z, et al. Probing ultrafast spin dynamics with optical pump-probe scanning tunnelling microscopy [J], Nature Nanotechnology, 2014, 9(8): 588-593.
- [16] TERADA Y, YOSHIDA S, TAKEUCHI O, et al. Real-space imaging of transient carrier dynamics by nanoscale pump-probe microscopy [J]. Nature Photonics, 2010, 4(12): 869-874.
- [17] CHEN C, HAYAZAWA N, KAWATA S. A 1.7 nm resolution chemical analysis of carbon nanotubes by tip-enhanced Raman imaging in the ambient [J]. Nature Communications, 2014, 5(1): 3312.
- [18] ZHANG R, ZHANG Y, DONG Z C, et al. Chemical mapping of a single molecule by plasmon-enhanced Raman scattering [J]. Nature, 2013, 498 (7452): 82-86.
- [19] 黄远志, 杨传浩, 何颂平, 等. 基于干式制冷的低温扫描探针显微镜研究进展[J]. 物理学报, 2024, 73(22): 274-287.
- HUANG Y ZH, YANG CH H, HE S P, et al. Advances in dry low-temperature scanning probe microscopy system development[J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(22): 274-287.
- [20] LIU X, GUO J, HONG J, et al. An apparatus for preparing frozen solution samples in ultrahigh vacuum experiments[J]. Review of Scientific Instruments, 2025, 96(3): 003706.
- [21] 李伟, 郑阳, 曹良才, 等. 工业现场材料结构原位微纳成像的原子力显微镜研究[J]. 中国测试, 2025, 2: 82-88.
- LI W, ZHENG Y, CAO L C, et al. Atomic force microscopy study on in-situ micro nano imaging of material structures in industrial sites [J]. China Measurement & Test, 2025, 2: 82-88.
- [22] 雷艺彤, 陈宇航. 基于编码器-解码器卷积神经网络的原子力显微镜针尖估计[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(1): 105-113.
- LEI Y T, CHEN Y H. Tip estimation of atomic force microscopy based on encoder-decoder convolutional neural networks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46 (1): 105-113.
- [23] MA W. Open STM: A low-cost scanning tunneling microscope with a fast approach method[J]. HardwareX, 2024, 17: e00504.
- [24] 张靖伟, 龚梓鑫, 崔丹丹, 等. 一种具备谱学功能的扫描隧道显微镜实验装置设计与教学应用[J]. 实验技术与管理 2024, 41(6): 151-156.
- ZHANG J W, GONG Z X, CUI D D, et al. Design and application of a scanning tunneling microscope experimental apparatus with spectroscopic capabilities[J]. Experimental Technology and Management, 2024, 41 (6): 151-156.
- [25] BINNING G, ROHRER H. Scanning tunneling microscopy—from birth to adolescence [J]. Reviews of Modern Physics, 1987, 59(615).
- [26] 曹从军, 赖凯旋, 王旭升, 等. 基于柔性压电薄膜的可穿戴脉搏传感器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2024(10): 35-47.
- CAO C J, LAI K X, WANG X SH, et al. Design of wearable pulse sensor based on flexible piezoelectric thin film [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024 (10): 35-47.
- [27] 谢子成, 郑隆浩, 邹涌, 等. 非线性超声短脉冲信号检

测方法研究与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2025, 39(2):193-204.

XIE Z CH, ZHENG L H, ZOU Y, et al. Research and implementation of nonlinear ultrasonic short pulse signal detection method[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39 (2): 193-204.

[28] WANG J, LI W, ZHENG S, et al. Atomically resolved low-temperature scanning tunneling microscope operating in a 22 T water-cooled magnet [J]. Ultramicroscopy, 2023, 245: 113668.

[29] GENG T, WANG J, MENG W, et al. A novel atomically resolved scanning tunneling microscope capable of working in cryogen-free superconducting magnet [J]. Micromachines, 2023, 14(3) : 637.

[30] TOUQEER M, ESMAEILZADEH B, MENG W, et al. A novel STM for quality atomic resolution with piezoelectric motor of high compactness and simplicity [J]. Ultramicroscopy, 2024, 263:113983.

[31] LI W, WANG J, ZHANG J, et al. Atomic-resolution imaging of micron-sized samples realized by high magnetic field scanning tunneling microscopy [J]. Micromachines, 2023, 14(2) : 287.

作者简介



谢国康,2023 年于南京晓庄学院获得学士学位,现在南京信息工程大学硕士研究生,主要研究方向为精密电子测量及精密仪器研制。

E-mail:202312490047@nuist.edu.cn

Xie Guokang received his B. Sc.

degree from NanJing XiaoZhuang University in 2023 and is currently a M. Sc. candidate at Nanjing University of Information Science and Technology. His main research areas are precision electronic measurement and precision instrument development.



E-mail:yguo@nuist.edu.cn

Guo Ying (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Inner Mongolia University in 2008, M. Sc. degree from Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences in 2011, and Ph. D. degree from University of Science and Technology of China in 2014. He is currently a professor at Nanjing University of Information Science and Technology. His main research areas are precision electronic measurement and precision instrument development.



Wu Zhe received his B. Sc. degree from Huangshan University in 2023 and is currently a M. Sc. student at Anhui University. His main research areas are precision electronic measurement and precision instrument development.

吴哲,2023 年于黄山学院获得学士学位,现在安徽大学攻读硕士学位,主要研究方向为精密电子测量及精密仪器研制。

E-mail:Q24301383@stu.ahu.edu.cn

Wu Zhe received his B. Sc. degree from Huangshan University in 2023 and is currently