

## 仪器与测量

## 用于扫描隧道显微镜的低噪声前置电流放大器\*

唐海涛<sup>1)2)</sup> 米壮<sup>1)2)</sup> 王文字<sup>1)2)</sup> 唐向前<sup>1)2)</sup>叶霞<sup>1)2)</sup> 单欣岩<sup>1)2)†</sup> 陆兴华<sup>1)2)‡</sup>

1) (中国科学院物理研究所, 应用物理中心, 北京 100190)

2) (中国科学院大学物理学院, 北京 100190)

(2024 年 4 月 23 日收到; 2024 年 5 月 12 日收到修改稿)

前置电流放大器是扫描隧道显微镜的重要部件之一, 其性能对于扫描隧道显微镜系统的基本操作及新功能开发至关重要. 本文详细分析了影响前置电流放大器性能的因素, 通过筛选噪声极低的运放芯片和电路结构优化, 设计了一款针对扫描隧道显微镜系统的前置电流放大器. 该放大器最灵敏档位 (1 G $\Omega$ ) 的噪声低至 4 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ , 带宽为 2.3 kHz, 具有 10 M $\Omega$ , 100 M $\Omega$  和 1 G $\Omega$  三个测量量程并且可以通过控制信号实现自动切换, 测量范围覆盖 pA— $\mu$ A 量级的隧穿电流. 利用该前置电流放大器展示了扫描隧道显微镜系统的主要功能, 包括表面形貌表征、扫描隧道谱测量以及原子搬运, 并探索了隧穿电流中散粒噪声的测量. 通过散粒噪声随隧穿电流的变化关系, 得到隧穿结中散粒噪声的法诺因子约等于 1, 验证了简单金属隧穿结中电子隧穿满足泊松过程, 为表面电子关联体系的高精度表征提供了基础.

**关键词:** 扫描隧道显微镜, 前置电流放大器, 散粒噪声**PACS:** 07.79.Cz, 07.79.-v, 73.23.-b**DOI:** 10.7498/aps.73.20240560

## 1 引言

在凝聚态物理和表面物理研究领域, 扫描隧道显微镜 (scanning tunneling microscopy, STM) 因为其具有原子尺度的空间分辨率而扮演着重要角色. STM 能够对样品表面进行形貌表征<sup>[1]</sup>, 获得表面电子态密度<sup>[2]</sup> 等信息. 在 STM 系统中, 隧穿电流的测量是一个非常重要的环节. 一般而言, 隧穿电流极其微弱, 通常在皮安 (pA) 至纳安 (nA) 量级<sup>[3]</sup>, 需要经过前置电流放大器进行放大才能被准确测量. 这种前置电流放大器的噪声水平要足够低, 能够分辨 pA 量级的隧穿电流变化<sup>[4]</sup>, 同时还应该具有较大的动态范围. 近年来基于 STM 探针

的原子搬运<sup>[5,6]</sup> 及自动化操纵<sup>[7]</sup> 发展迅速且引人注目. 在对单个原子进行搬运时, 隧穿结电阻约为 50—500 k $\Omega$ <sup>[6]</sup>, 对应隧穿电流可达 10—100 nA 量级. 自动化原子搬运等实验操作, 要求前置电流放大器能够通过计算机程序远程控制进行增益切换. 前置电流放大器的带宽也是影响 STM 性能的重要因素, 由于反馈电阻寄生电容的存在, G $\Omega$  量级增益的前置电流放大器的带宽通常被限制在几百 Hz 范围. 考虑到压电陶瓷的响应在 10 kHz 量级<sup>[8]</sup>, 将电流放大器的带宽优化至对应范围, 将有助于提高 STM 系统扫描成像等核心功能的运行速度.

隧穿电流中散粒噪声的测量能够揭示电子输运过程中的相互作用信息, 为凝聚态物理关联电子体系的研究提供重要数据和物理基础, 比如量子霍

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11727902, 21961142021) 和北京市自然科学基金 (批准号: 4181003) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: Shanxinyan@iphy.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: xhlu@iphy.ac.cn

尔系统中的分数电荷<sup>[9,10]</sup>, 超导体中的库伯对<sup>[11,12]</sup>以及量子点接触中的输运特性<sup>[13,14]</sup>等. 利用工作在室温的前置电流放大器直接测量隧穿电流中的散粒噪声无需进行互相关测量<sup>[13,15,16]</sup>和 高频测量<sup>[17,18]</sup>, 具有一定的优势. 但是, 这对前置电流放大器的本底噪声水平和带宽都提出了较高的要求.

本文详细分析了影响前置电流放大器性能的因素, 设计了一款针对 STM 系统的前置电流放大器. 该放大器具备低噪声、高带宽以及电控多量程的特点, 可满足 STM 系统基本功能的需求, 并利用其探索了对隧穿电流中散粒噪声谱密度的测量.

## 2 前置电流放大器分析

图 1(a) 展示了前置电流放大器的基本结构. 运算放大器的正相端接地, 电流通过反馈电阻  $R_f$  放大成电压, 其增益  $G(\omega)$  通常表示为

$$G(\omega) = \frac{V_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} = \frac{-Z_f}{1 + A^{-1}(\omega)(1 + Z_f/Z_{\text{in}})}, \quad (1)$$

其中,  $Z_f$  为反馈阻抗,  $Z_{\text{in}}$  为输入阻抗,  $A(\omega)$  为运算放大器开环增益. 考虑  $1 \text{ G}\Omega$  反馈电阻, 其寄生电容约  $0.2 \text{ pF}$ , 则增益带宽为  $f = 1/2\pi R_f C_f \approx 800 \text{ Hz}$ . 对于给定的反馈电阻, 寄生电容越大, 放大器带宽越小. 因此, 在设计电路时应尽可能选取寄生电容小的反馈电阻来获得尽量大的带宽. 通常来讲, 金属膜电阻的寄生电容比较小, 可达  $0.1 \text{ pF}$  及以下水平. 实际电路设计时, 还需要注意减小反馈电阻

与其他导体 (如地线) 间的电容.

前置电流放大器的噪声主要来源于运算放大器的噪声和反馈电阻的热噪声  $4kTR_f$ . 对于运算放大器而言, 其内部噪声可以等效为输入端的电流噪声  $i_n$  和电压噪声  $e_n$ , 两者互不相关<sup>[19]</sup>. 根据叠加原理, 可得到总的等效输入电流噪声:

$$S_{\text{TIA}} = \left| \frac{V_{\text{out}}}{Z_f} \right|^2 = i_n^2 + e_n^2 \left| \frac{1}{Z_f} + \frac{1}{Z_{\text{in}}} \right|^2 + \frac{4kT}{R_f}, \quad (2)$$

其中第 2 项的贡献随频率呈平方增大, 在高频区域可作如下近似,

$$e_n^2 \left| \frac{1}{Z_f} + \frac{1}{Z_{\text{in}}} \right|^2 = e_n^2 \left| \frac{1}{R_f} + j\omega(C_{\text{in}} + C_f) \right|^2 \approx (e_n \omega C_{\text{total}})^2, \quad (3)$$

式中,  $C_{\text{total}} = C_{\text{in}} + C_f$ . 该项通常称为  $e_n C$  噪声<sup>[20]</sup>, 在高频区占主导. 在低频区, 等效输入噪声由其他两项主导, 不随频率变化, 噪声谱密度如图 1(b) 所示. 考虑到  $1 \text{ G}\Omega$  反馈电阻对应的噪声水平 ( $4 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ), 运算放大器的等效输入电流噪声在  $\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$  量级即可, 应选择电压噪声  $e_n$  尽量低并尽量降低系统的输入端电容. 需要注意的是, 前置电流放大器的最大可能带宽为  $\sqrt{f_T/(2\pi R_f C_{\text{in}})}$ , 与运算放大器增益带宽积  $f_T$  及输入电容  $C_{\text{in}}$  有关. 例如, 若反馈电阻为  $1 \text{ G}\Omega$ , 输入端电容为  $10 \text{ pF}$ , 增益带宽积为  $1 \text{ GHz}$ , 则前置电流放大器的最大可能带宽约为  $130 \text{ kHz}$ . 目前, 运算放大器芯片的输入端电压噪声可低至  $1 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  水平, 输入端电容可在  $10 \text{ pF}$  以下.

## 3 前置电流放大器的研制

基于以上对前置电流放大电路的噪声模型, 图 2(a) 比较了多款典型的低噪声运算放大器芯片在  $1 \text{ G}\Omega$  增益条件下的等效输入电流噪声谱密度. 由此选取了一款  $e_n$  和  $i_n$  分别为  $2.2 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  和  $2 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$  的运算放大器芯片 (OPA1), 其偏置电流低至  $4 \text{ pA}$ , 增益带宽积达  $2.7 \text{ GHz}$ , 可以较好地满足 STM 实验需求.

为增加整个电路的开环增益, 采用如图 2(b) 所示的复合放大电路, 其中 A1 和 A2 两个运算放大器构成一个复合放大电路, 具有更高的稳定性和直流性能<sup>[21]</sup>. 考虑到 STM 实验中隧穿电流可能有跨越多个数量级的变化, 我们设计了三个增益档位, 反馈电阻选择  $1 \text{ G}\Omega$ ,  $100 \text{ M}\Omega$  和  $10 \text{ M}\Omega$ , 对应

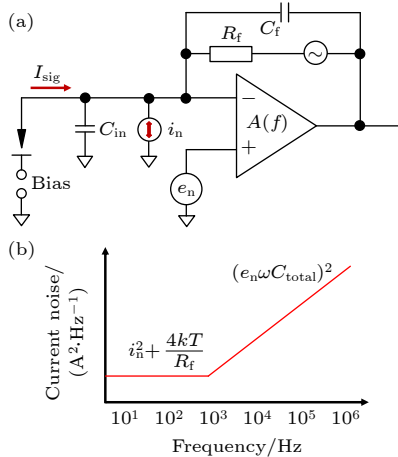


图 1 (a) 前置电流放大器的电路噪声模型; (b) 等效输入电流噪声谱密度示意图

Fig. 1. (a) Noise model of current preamplifier; (b) schematic diagram of equivalent input current noise power spectral density.

隧穿电流测量范围分别为  $\pm 10$  nA,  $\pm 100$  nA 和  $\pm 1$   $\mu$ A, 不同的增益通过开关进行切换.

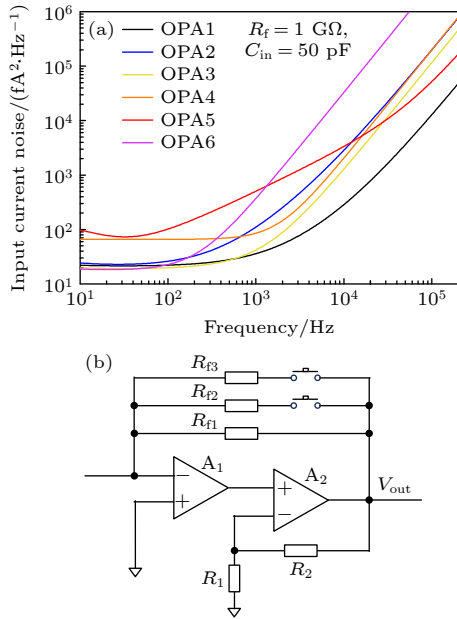


图 2 (a) 典型低噪声运算放大器芯片的噪声谱密度模拟; (b) 多量程复合电路设计  
 Fig. 2. (a) Simulated input current noise spectrum density of typical low noise operational amplifiers; (b) basic circuit of a composite transimpedance amplifier with multiple gains.

有些商业化前置电流放大器采用手动机械式开关来进行量程的切换, 虽然具有串扰电容小的优势, 但在实验过程中手动切换增益易引起振动干扰, 且效率低下. 由于其无法通过程序自动化控制, 无法满足自动化原子搬运等先进功能的研发需求. 通过比较, 我们选择舌簧式继电器作为增益切换元件, 其响应速度快于电磁继电器, 具有较好的电磁屏蔽能力, 断开状态下其电阻达  $10^{10}$ — $10^{12}$   $\Omega$ , 电容小于 1 pF<sup>[20]</sup>. 为优化前置电流放大器性能, 我们尝试了多种量程切换方式.

测试表明, 在反馈电阻之前和之后各放置一个继电器是最为理想的量程切换方式, 如图 3(a) 所示. 图 3(b) 显示了继电器的结构原理及其阻抗模型. 其②, ③引脚间的电磁线圈决定①, ④引脚的断开和闭合, ①, ④引脚和地之间存在一个约 2 pF 的电容, 两引脚之间还有约 0.1 pF 的电容. 图 3(c), (d) 展示了不同继电器状态下 1 G $\Omega$  增益档的增益曲线和噪声谱密度. 当仅有一个继电器断开时, 电路的增益曲线会明显偏离单极点形式, 如图 3(c) 中的黑色和红色曲线所示. 当仅有继电器 2 断开时, 电路的噪声水平还会明显增高, 如图 3(d) 所示. 这是由于 100 M $\Omega$  电阻通过 2 pF 电容与地相

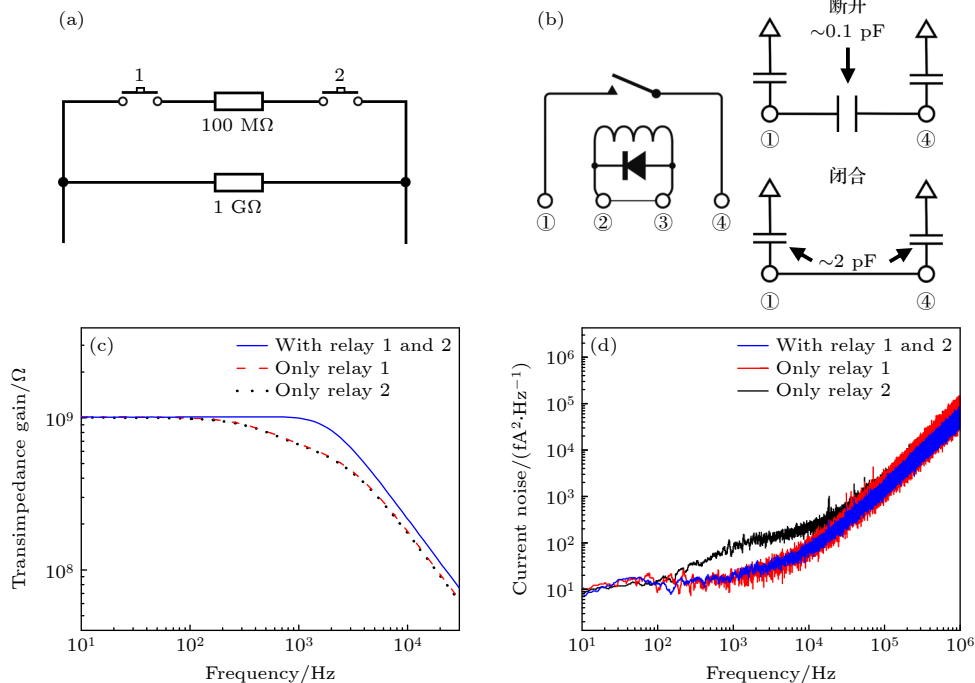


图 3 (a) 多量程开关控制设计; (b) 继电器结构示意图及其电容特征; (c), (d) 3 种不同开关状态下 1 G $\Omega$  增益档的增益和等效电流噪声谱密度  
 Fig. 3. (a) Switching circuit for multiple gain control; (b) schematic diagram of electromagnetic relay and related typical capacitances; (c), (d) the gain and input current noise spectrum density with 1 G $\Omega$  transimpedance gain under three different switch conditions.

连, 在输入端增加了额外的热噪声导致的. 只有两个开关都断开时, 该反馈回路对其他回路的增益和噪声才不会产生干扰.

前置电流放大器的电路 PCB 设计图如图 4(a) 所示, 为了尽量减小反馈电阻的寄生电容, 采用两个阻值为  $500\text{ M}\Omega$  的电阻串联构成  $1\text{ G}\Omega$  反馈回路. PCB 设计中元件排布尽可能紧凑, 使反馈回路尽可能短, 每一个继电器的控制元件都放置在外围. 运算放大器芯片的供电电源需进行良好的滤波处理, 放置在 PCB 板的边缘位置, 远离芯片和反馈回路, 以减小对输入信号的干扰. 另外, 运算放大器芯片的地和周围铺铜充分接触以保证散热效率. 为消除外部电磁环境如  $50\text{ Hz}$  噪声的干扰, 我们设计制作了铝制屏蔽盒作为法拉第笼, 输出线、电源线和档位切换控制线都采用屏蔽效果很好的 Lemo 接口, 前置电流放大器外观如图 4(b) 所示. 两级运放芯片的电源电压分别为  $\pm 5\text{ V}$ ,  $\pm 12\text{ V}$ . 经过测试发现, 电源噪声对电路的噪声水平有较大的影响, 需经过较好的滤波处理后再给芯片供电. 电源采用 Lemo 接口和双绞线连接方式, 以最大程度地减小电磁噪声. 整个前置电流放大器的制作成本 (约 2000 元) 也远低于商用前置电流放大器的价格.

图 4(c) 展示了前置电流放大器 3 个量程的增益曲线, 对应的  $-3\text{ dB}$  带宽分别为  $2.3\text{ kHz}$  ( $1\text{ G}\Omega$  档),  $18\text{ kHz}$  ( $100\text{ M}\Omega$  档) 和  $100\text{ kHz}$  ( $10\text{ M}\Omega$  档). 3 个档位的等效输入端电流噪声谱密度如图 4(d) 所示, 图中低频区噪声为反馈电阻热噪声的贡献, 即  $4kT/R_f$ . 对于  $1\text{ G}\Omega$  增益档位, 反馈电阻在室温 ( $300\text{ K}$ ) 产生的等效输入电流噪声谱密度为  $16\text{ fA}^2/\text{Hz}$ , 显著大于所选运算放大器芯片的标称电流噪声谱密度 ( $4\text{ fA}^2/\text{Hz}$ ). 放大器在低频区的等效输入电流噪声谱密度主要为两者之和, 即  $20\text{ fA}^2/\text{Hz}$ , 在高频区则由  $e_n C$  噪声主导. 测量结果与模拟计算吻合.

本文还对比了自制的前置电流放大器与 3 款典型商业化产品的主要性能, 主要包括增益范围、噪声水平、带宽以及量程切换方式, 如表 1 所示. 3 款商业化设备都有着大致相同的增益范围, 能够放大  $\text{mA}$ — $\text{pA}$  量级的电流信号; 在增益控制方面, 有一款商用放大器只有手动切换功能, 另外两款商用放大器则同时支持手动和自动切换. 我们自制的前置电流放大器尽管只设计了 3 个可自动切换量程, 但是已经能够完全覆盖 STM 各种应用场景下的隧穿电流测量, 而且每个量程的噪声都很低. 在  $10^9\text{ V/A}$  增益条件下, 自制的前置电流放大器具有

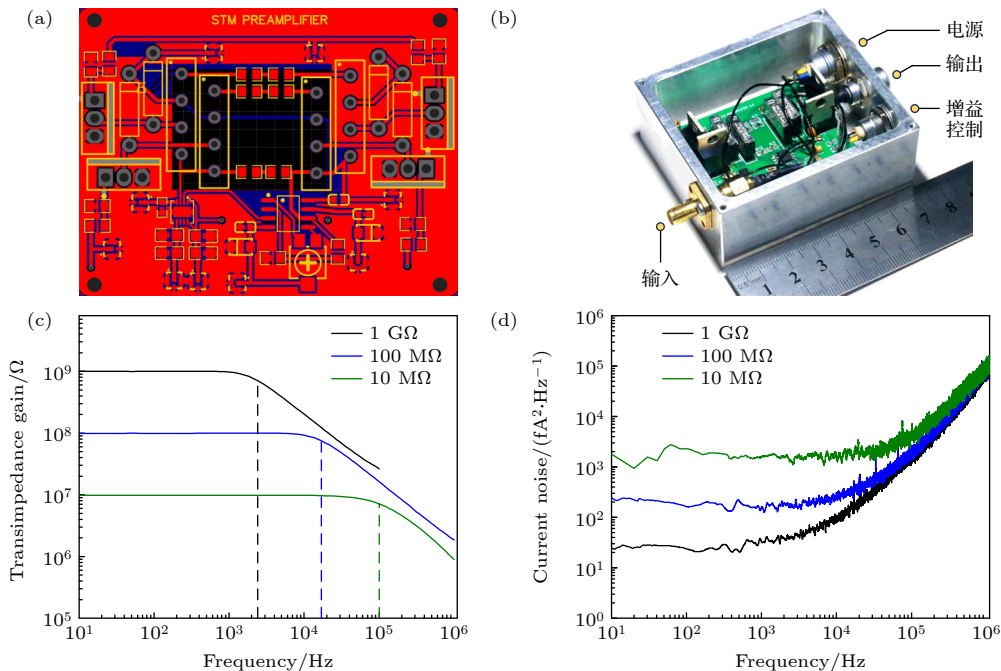


图 4 (a) 前置电流放大器 PCB 设计图; (b) 前置电流放大器实物图; (c) 不同反馈电阻对应的跨阻增益曲线; (d) 不同反馈电阻对应的等效输入电流噪声谱密度

Fig. 4. (a) PCB layout of the preamplifier circuit; (b) photo of the current preamplifier; (c) measured transimpedance gain with different feedback resistors; (d) equivalent input current spectrum density of three gains.

最低的噪声水平, 并且对应的-3 dB 带宽也最高. 需要指出的是, 利用我们的设计, 增加更多反馈回路不会产生额外的噪声, 亦不会影响测量带宽. 由于量程较少, 自制的前置电流放大器在仪器尺寸方面亦有明显优势, 可以方便地与 STM 超高真空腔体法兰直接连接.

#### 4 前置电流放大器的应用

我们测试了所研制的前置电流放大器在 STM 常见功能操作中的应用. 图 5(a) 为 Au(111) 表面的形貌成像, 可看到清晰的 herringbone 重构结构; 图 5(b) 为 Cu(111) 表面的隧穿电流微分电

导谱, 可观察到清晰的表面态, 在-0.5 V 偏压附近电子态密度的突变对应表面态的带边; 图 5(c) 为对 Cu(111) 表面单个 CO 分子搬运操作前后的表面形貌; 图 5(d) 展示了形貌表征和原子/分子搬运操作过程中典型的隧穿电流曲线特征. 原子/分子搬运时设定的电流往往在 10 nA 以上, 比形貌表征所需电流要高一个量级以上. 分子跟随针尖的运动还会在隧穿电流中形成显著增强的噪声, 对该噪声的快速分析可以帮助实时监测原子/分子搬运的状态. 前置电流放大器在进行这两种功能操作时的增益分别设定为 1 GΩ 和 100 MΩ, 两者之间的切换通过控制软件输出的电压信号来实现, 无需手动

表 1 自制前置电流放大器与三款商业化产品的主要参数对比  
Table 1. Main parameters of home-built preamplifier and three commercial products.

	Gain/(V·A <sup>-1</sup> )	Input noise @10 <sup>9</sup> V/A/(fA·Hz <sup>-1/2</sup> )	-3 dB bandwidth @10 <sup>9</sup> V/A	Gain control (manual, remote)
自研放大器	10 <sup>7</sup> —10 <sup>9</sup>	4.0	2.3 kHz	R
商用放大器A	10 <sup>3</sup> —10 <sup>11</sup>	4.3	1.1 kHz	M, R
商用放大器B	10 <sup>3</sup> —10 <sup>11</sup>	5.0	1.0 kHz	M
商用放大器C	10 <sup>3</sup> —10 <sup>12</sup>	10.0	15.0 Hz	M, R

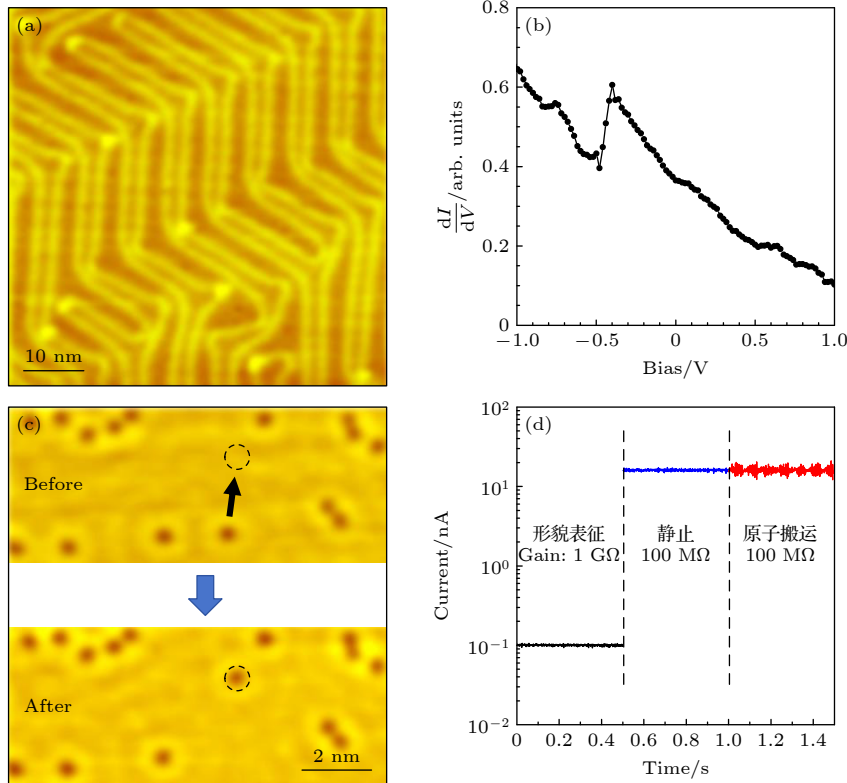


图 5 (a) 78 K 温度下 Au(111) 表面的 STM 形貌表征 ( $V = 0.5$  V,  $I = 0.3$  nA); (b) 隧穿电流微分电导谱; (c) 7 K 温度条件下原子搬运前后形貌图 ( $V = 0.2$  V,  $I = 1$  nA); (d) 不同操作功能下的隧穿电流曲线

Fig. 5. (a) STM topographic image ( $V = 0.5$  V,  $I = 0.3$  nA) of Au(111) surface at 78 K; (b) tunneling differential conductance spectrum measured on Cu(111) surface; (c) STM topographs ( $V = 0.2$  V,  $I = 1$  nA) before and after atomic manipulation at 7 K; (d) tunneling current under different STM operations.

改变. 这种具有电控增益切换的前置电流放大器为开发 STM 自动化原子操纵及原子制造功能提供了技术保障.

此外, 我们还探究了隧穿电流中散粒噪声的测量, 样品为铜单晶 Cu(111), 系统温度约 10 K. 散粒噪声源于电子在隧穿过程中的离散特性<sup>[22,23]</sup>, 其强度满足公式  $S_{\text{shot}} = 2qI \cdot F$ , 即正比于电荷量  $q$  和直流电流  $I$  以及法诺因子  $F$ . 当电子隧穿满足泊松过程时,  $F = 1$ . 图 6(a) 展示了平均电流强度为 0 nA (蓝色) 及 0.28 nA (红色) 情况下所测得的电流噪声谱密度, 前置电流放大器增益为 1 GΩ, STM 反馈关闭, 针尖高度一致. 可以看到, 由于 STM 系统引入了显著的输入电容, 高频区的  $e_n C$  噪声强度相比图 4(c) 有所增大. 拟合可得总电容约 60 pF, 显著大于前置电流放大器自身的输入端电容 11 pF. 在隧穿电流强度不为零的情况下, 在低频区可观察到显著的  $1/f^2$  噪声, 该噪声强度与电流大小的平方成正比<sup>[24]</sup>, 通常来源于隧穿结表面缺陷的运动或电子被缺陷随机捕获, 亦被称为调制噪声 (modulation noise). 利用低频区的噪声谱密度拟合可得  $1/f^2$  噪声的系数,  $\alpha \approx 10^{-3} \text{ Hz}^{-1}$ . 进一步, 利用以下公式拟合:

$$S_{\text{total}} = S_{\text{TIA}} + \alpha \frac{I^2}{f^2} + S_{\text{shot}}, \quad (4)$$

即可获得散粒噪声的强度. 图 6(b) 给出了散粒噪声强度随隧穿电流变化的结果, 隧穿电流从 0.1 nA 增大到 1 nA. 对于更小的电流, 其散粒噪声强度低于  $30 \text{ fA}^2/\text{Hz}$ , 容易被前置电流放大器的本底噪声 ( $25 \text{ fA}^2/\text{Hz}$ ) 所淹没而无法被准确测量到. 图中虚线为散粒噪声理论曲线  $S_{\text{poisson}} = 2qI$ , 若对实验测量结果进行线性拟合可得法诺因子  $F$  约为 1.09.

显然, 实验测得的法诺因子  $F$  相比理想泊松过程的法诺因子值有 10% 左右的偏差. 为减小这种误差, 可考虑尽量减小低频区的  $1/f^2$  噪声和 高频区的  $e_n C$  噪声, 使噪声谱密度在中间频段出现一个明显的平台, 从而显著提高拟合结果的准确度. 在更低温度下, 使用更稳定的 STM 扫描装置, 以及采用更好的振动隔离措施都有可能降低  $1/f^2$  噪声; 在前置电流放大器与隧穿结之间使用尽可能短的电容更小的导线, 或者采用低温超高真空兼容的前置电流放大器, 则有望显著降低放大器输入电容及  $e_n C$  噪声. 这些工作涉及整个 STM 系统的改进,

将在后续研究中完善.

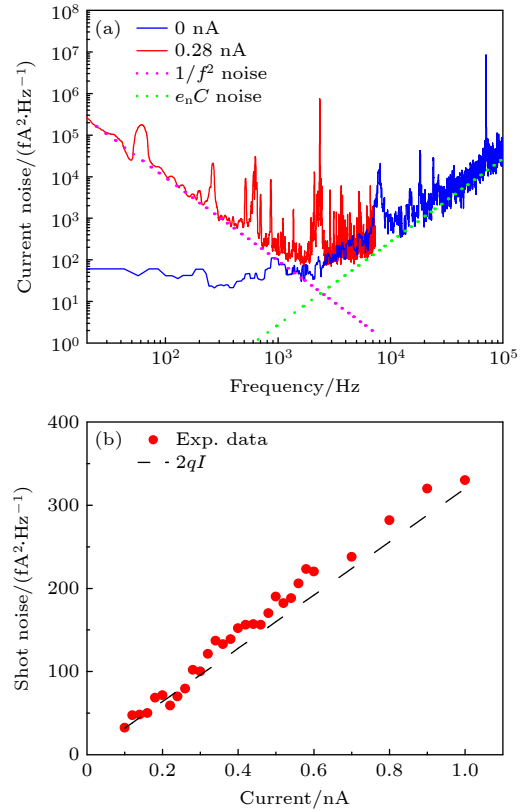


图 6 (a) 典型隧穿电流噪声谱密度分析; (b) 隧穿电流散粒噪声随电流强度的变化

Fig. 6. (a) Typical noise spectrum density of the tunneling current; (b) shot noise in tunneling current, as a function of the current amplitude.

## 5 结论

本文详细分析了前置电流放大电路的噪声模型, 以此为依据筛选出来噪声极低的运放芯片, 并结合 STM 系统的需求自主设计并制作了一款专用于 STM 的前置电流放大器. 该放大器具有低噪声、高带宽的特点以及远程控制的三档增益, 能够测量 pA—μA 之间 6 个数量级的电流. 通过巧妙的电路设计和细致的测试消除了增益切换电路对放大器增益和带宽的影响. 给出了前置电流放大器各档位的增益曲线和噪声谱密度曲线. 利用该前置电流放大器, 可实现 STM 的各项基本功能, 也为 STM 自动化原子制造提供了技术保障. 利用该放大器对隧穿电流散粒噪声的测量研究取得了初步合理的结果, 验证了简单隧穿结中的散粒噪声近似满足  $S_{\text{poisson}} = 2qI$ , 为表面更高精度的电子关联体系散粒噪声测量指出了努力方向.

参考文献

- [1] Binnig G, Rohrer H, Gerber C, Weibel E 1982 *Phys. Rev. Lett.* **49** 57
- [2] Strosio J A, Feenstra R M, Fein A P 1986 *Phys. Rev. Lett.* **57** 2579
- [3] Chen C J 2021 *Introduction to Scanning Tunneling Microscopy Third Edition* (Vol. 69) (USA: Oxford University Press)
- [4] Scheiber P, Riss A, Schmid M, Varga P, Diebold U 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 216101
- [5] Eigler D M, Schweizer E K 1990 *Nature* **344** 524
- [6] Bartels L, Meyer G, Rieder K H 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 697
- [7] Kalf F E, Rebergen M P, Fahrenfort E, Girovsky J, Toskovic R, Lado J L, Fernandez-Rossier J, Otte A F 2016 *Nat. Nanotechnol.* **11** 926
- [8] Štubian M, Bobek J, Setvin M, Diebold U, Schmid M 2020 *Rev. Sci. Instrum.* **91** 074701
- [9] de-Picciotto R, Reznikov M, Heiblum M, Umansky V, Bunin G, Mahalu D 1997 *Nature* **389** 162
- [10] Saminadayar L, Glattli D C, Jin Y, Etienne B 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 2526
- [11] Jehl X, Sanquer M, Calemczuk R, Mailly D 2000 *Nature* **405** 50
- [12] Bastiaans K M, Chatzopoulos D, Ge J F, Cho D, Tromp W O, van Ruitenbeek J M, Fischer M H, de Visser P J, Thoen D J, Driessen E F C, Klapwijk T M, Allan M P 2021 *Science* **374** 608
- [13] Kumar A, Saminadayar L, Glattli D C, Jin Y, Etienne B 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 2778
- [14] DiCarlo L, Zhang Y, McClure D T, Reilly D J, Marcus C M, Pfeiffer L N, West K W 2006 *Phys. Rev. Lett.* **97** 036810
- [15] Hashisaka M, Ota T, Yamagishi M, Fujisawa T, Muraki K 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 054704
- [16] Henny M, Oberholzer S, Strunk C, Schönberger C 1999 *Phys. Rev. B* **59** 2871
- [17] Chen R, Wheeler P J, Natelson D 2012 *Phys. Rev. B* **85** 235455
- [18] Bastiaans K M, Benschop T, Chatzopoulos D, Cho D, Dong Q, Jin Y, Allan M P 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 093709
- [19] Kay A 2012 *Operational Amplifier Noise: Techniques and Tips for Analyzing and Reducing Noise* (Elsevier) pp13–14
- [20] Horowitz P, Hill W, Robinson I 1989 *The art of electronics* (Vol. 2) (Cambridge: Cambridge university Press) pp171–184
- [21] Mikhael W B, Michael S 1987 *IEEE T. Circuits Syst.* **34** 449
- [22] Blanter Y M, Büttiker M 2000 *Physics Reports* **336** 1
- [23] Kobayashi K, Hashisaka M 2021 *J Phys Soc Jpn* **90** 102001
- [24] Birk H, De Jong M, Schönberger C 1995 *Phys. Rev. Lett.* **75** 1610

# Low-noise preamplifier for scanning tunneling microscope<sup>\*</sup>

Tang Hai-Tao<sup>1)2)</sup> Mi Zhuang<sup>1)2)</sup> Wang Wen-Yu<sup>1)2)</sup> Tang Xiang-Qian<sup>1)2)</sup>  
Ye Xia<sup>1)2)</sup> Shan Xin-Yan<sup>1)2)†</sup> Lu Xing-Hua<sup>1)2)‡</sup>

1) (*Center for Applied Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*School of Physical Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

( Received 23 April 2024; revised manuscript received 12 May 2024 )

## Abstract

The current preamplifier is one of the important components of the scanning tunneling microscope (STM), and its performance is crucial to the basic operations of the STM system, as well as for the development of demanding novel functionalities such as autonomous atomic fabrication. In this study, the factors that affect the performance of a current preamplifier, including its noise spectrum density and the bandwidth, are analyzed in depth, and a preamplifier is designed and fabricated specifically for the STM system. By using a carefully selected low-noise op amp chip, the optimized current preamplifier has a noise floor as low as  $4 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$  and a bandwidth of 2.3 kHz, at its most sensitive transimpedance gain of 1 G $\Omega$ . It has three transimpedance gains, 10 M $\Omega$ , 100 M $\Omega$ , and 1 G $\Omega$ , that can be switched through digital control signals. A two-switch configuration is adopted to minimize the noise floor while maintaining the optimal bandwidth. The current detectable by this three-level preamplifier ranges from pA to  $\mu\text{A}$ , satisfying the requirements of most STM operations. Using this preamplifier, the fundamental functions of the STM system are successfully demonstrated, including surface topographic characterization, scanning tunneling spectroscopy, and single atom/molecule manipulation. The measurement of shot noise in tunneling current is also explored, and a linear relationship between shot noise and tunneling current is obtained by carefully analyzing noise. It is illustrated that the Fano factor of the shot noise in a normal metallic tunneling junction is approximately equal to 1, revealing the expected Poisson process for electron tunneling in such a scenario. The results are valuable for the high-resolution characterization of correlation systems in the future.

**Keywords:** scanning tunneling microscope, preamplifier, shot noise

**PACS:** 07.79.Cz, 07.79.-v, 73.23.-b

**DOI:** [10.7498/aps.73.20240560](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240560)

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11727902, 21961142021) and the Natural Science Foundation of Beijing, China (Grant No. 4181003).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [Shanxinyan@iphy.ac.cn](mailto:Shanxinyan@iphy.ac.cn)

<sup>‡</sup> Corresponding author. E-mail: [xhlu@iphy.ac.cn](mailto:xhlu@iphy.ac.cn)



## 用于扫描隧道显微镜的低噪声前置电流放大器

唐海涛 米壮 王文宇 唐向前 叶霞 单欣岩 陆兴华

### Low-noise preamplifier for scanning tunneling microscope

Tang Hai-Tao Mi Zhuang Wang Wen-Yu Tang Xiang-Qian Ye Xia Shan Xin-Yan Lu Xing-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 130702 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240560

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240560>

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

#### 短沟道金属-氧化物半导体场效应晶体管的散粒噪声模型

Shot noise model of the short channel metal-oxide-semiconductor field-effect transistor

物理学报. 2020, 69(17): 177102 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200497>

#### 表面单分子量子态的探测和调控研究进展

Advances in detection and regulation of surface-supported molecular quantum states

物理学报. 2022, 71(6): 060701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212324>

#### 基于原子操纵技术的人工量子结构研究

Investigation of artificial quantum structures constructed by atom manipulation

物理学报. 2021, 70(2): 020701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201501>

#### 超高真空条件下分子束外延生长的单层二维原子晶体材料的研究进展

Research progress of monolayer two-dimensional atomic crystal materials grown by molecular beam epitaxy in ultra-high vacuum conditions

物理学报. 2020, 69(11): 118101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200174>

#### InGaAs(110)解理面的扫描隧道谱的理论诠释

Theoretical explanation of scanning tunneling spectrum of cleaved (110) surface of InGaAs

物理学报. 2021, 70(19): 196801 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210419>

#### 基于光前置放大器的量子密钥分发融合经典通信方案

Optical preamplifier based simultaneous quantum key distribution and classical communication scheme

物理学报. 2021, 70(2): 020301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200855>