

Keithley

Series 2600B | Model 2636B

双通道超低电流高压 SourceMeter® SMU

源表使用指南

仪器概述 · Triax 接口 · Guard 技术 · 超低电流测量 · 精度规格 · TSP 编程 · 典型应用 · 故障排查

适用型号: 2635B / 2636B | Series 2600B | Firmware Rev. 3.x 及以上
参考资料: 2600B Series System SourceMeter SMU Datasheet / User Manual / SPEC-2636B
文档生成日期: 2025 年 | 内部技术参考文档



第一章 仪器概述

1.1 产品定位与核心特点

Keithley Model 2636B 是 Series 2600B 系统级 SourceMeter® SMU 系列的旗舰型号，也是当前业界商用仪器中电流测量精度最高的 SMU 之一。在 2612B 双通道高压能力的基础上，2636B 进一步将最小电流量程推进至 0.1 fA (100 aA)，电流分辨率达 1 aA，是纳米材料、二维材料、有机半导体、光电器件、生物传感器等极低电导率器件的必选工具。

2636B 的三大核心差异化能力：

关键： 2636B 相比同系列其他型号有三项绝对领先特性：① 0.1 fA 最小电流量程（比 2612B 低 3 个数量级）；② 三同轴 (Triax) 物理接口；③ 主动 Guard 驱动输出。这三项能力共同决定了 2636B 是低电流测量的终极选择。

- **超低电流测量：** 最小量程 0.1 fA (100 aA)，分辨率 1 aA——相当于每秒约 6 个电子的电荷流
- **三同轴接口 (Triax)：** 物理三层同轴结构，Force (内) + Sense (中) + Guard (外)，与 2602B/2612B 的螺丝端子根本不同
- **主动 Guard 驱动：** 仪器主动将 Triax 外层驱动至与 Force 相同电位，消除测试线缆和夹具中的漏电流，使 fA 级测量成为可能
- **双通道完全独立：** 两通道 (smua/smub) 彼此浮置隔离 (± 250 V)，可同时独立偏置和测量
- **高压能力：** 最高 ± 200 V，10 A 脉冲，每通道 30.3 W，兼具高压与超低电流
- **TSP® 本地执行：** 内置 Lua 脚本处理器，本地高速执行，产测速率最高约 20,000 次/秒

1.2 与其他 2600B 型号的核心区别

2636B 在 2600B 系列中的独特之处，可用一句话概括：

同系列唯一同时具备 ± 200 V 高压和 0.1 fA 超低电流的双通道 SMU，且配备 Triax 接口和 Guard 输出。

- **接口类型：** 2636B 使用三同轴 (Triax) 接口，2602B/2612B 使用螺丝端子——这是物理接口上最根本的区别，决定了能否实现 Guard 主动屏蔽
- **最小电流量程：** 2636B = 0.1 fA；2612B = 100 fA；2602B = 100 pA。差距分别为 1000 \times 和 1,000,000 \times
- **分辨率：** 2636B = 1 aA (阿安培)；相当于 1×10^{-18} A，接近单电子电流水平
- **Guard 输出：** 仅 2636B 具备——这是实现 fA 级测量的工程核心，其他型号无此功能

1.3 Series 2600B 系列型号对比

参数	2602B	2612B	2636A(旧)	2636B ★
通道数	1	2	2	2

最大电压	±40 V	±40 V	±200 V	±200 V
最大电流(DC)	3 A	3 A	1.5 A	1.5 A
脉冲电流	10 A	10 A	10 A	10 A
最小电流量程	100 pA	100 pA	100 fA	0.1 fA ★
电流分辨率	100 fA	100 fA	100 aF	1 aA ★
最大功率/通道	30.3 W	30.3 W	30.3 W	30.3 W
接口类型	螺丝端子	螺丝端子	螺丝端子	三同轴 Triax ★
Guard 输出	X	X	X	✓ ★
200V 高压	X	X	✓	✓
TSP-Link	✓	✓	✓	✓

关键：★ 标注项为 2636B 独有或领先特性。「0.1 fA 最小量程」和「1 aA 分辨率」意味着 2636B 能够检测到理论上每秒约 600 个电子的极微弱电流——这一能力在纳米器件、光电探测器、生物传感器等领域有不可替代的价值。

前面板



后面板



1.4 前面板布局

2636B 前面板布局与 2602B/2612B 相同（2 行 VFD 显示屏），主要以程控操作为主：

1. VFD 显示屏（2 行 × 20 字符）：显示当前通道的输出值、测量值和状态标志
2. CHANNEL 键：切换显示/操作通道（A 或 B）
3. OUTPUT A / OUTPUT B 键（带 LED）：独立控制两通道输出开关
4. 方向键 + 数字键盘：手动设置源值、浏览系统菜单
5. MENU 键：进入系统配置、通信设置、校准等高级菜单
6. LOCAL 键：从远程控制状态返回本地面板操作

1.5 后面板布局

2636B 后面板的最大特征是三同轴（Triax）接口，取代了 2602B/2612B 的螺丝端子：

7. 三同轴 Triax 接口 (Channel A / Channel B) : 每通道 2 个 Triax 接口——Force HI 和 Force LO (各含 Force、Sense、Guard 三层)
8. GPIB (IEEE-488) : 传统自动化总线
9. USB 2.0 Device (Type-B) : PC 直连, USBTMC
10. Ethernet (RJ-45, LXI-C) : 远程控制与 Web 界面
11. RS-232 (DB9) : 串口通信
12. TSP-Link (RJ-45 × 2) : 多仪器级联扩展
13. Digital I/O (DB15) : 14 路触发/Handler 控制
14. Interlock 端子: 高压安全联锁

警告: 2636B 的 Triax 接口不能直接连接普通 BNC 线缆或香蕉插头。必须使用专用 Triax 连接线 (如 Keithley 7078-TRX 系列) 或 Triax 适配器。错误连接会导致 Guard 功能失效, 严重降低低电流测量精度。

第二章 三同轴接口与 Guard 技术

2.1 三同轴 (Triax) 接口结构

2636B 的 Triax 接口是其低电流性能的物理基础，共三层导体：

导体层	功能	说明
Force (内导体)	主电流路径	源/吸收电流的主力通道，对应 Force HI/LO
Sense (中层屏蔽)	电压感测层	高阻抗采样，用于 4 线制精确测压，屏蔽外层漏电
Guard (外层屏蔽)	Guard 驱动屏蔽	由仪器主动驱动至与 Force 相同电位，消除连接线及夹具的漏电流 (关键特性)

关键： 与普通同轴线 (BNC, Force + Shield) 相比，Triax 多出一层 Guard。Guard 由仪器主动驱动，使外层与内层保持相同电位，从而将连接线上的漏电流「旁路」掉，不让它流入测量回路。

2.2 Guard 驱动原理——消除漏电流

低电流测量 ($< 1 \text{ nA}$) 的最大挑战是：普通测试线缆本身的绝缘层存在漏电流，在高电压 (如 200 V) 下，线缆漏电流可达数百 pA ，远超被测信号。

Guard 的解决方案：

15. 将 Triax 外层 (Guard) 驱动至与 Force 内层完全相同的电位
16. Guard 与 Force 之间的电位差 $\approx 0 \text{ V}$ ，绝缘层两端无电压，漏电流 = 0
17. 外界到 Force 的漏电流路径被 Guard 截断，流入 Guard 而非流入测量回路
18. Guard 不进入电流测量回路，因此对测量结果无影响

Guard 消除的误差量级：

- 典型 1 m Triax 线缆， $1 \text{ G}\Omega$ 绝缘电阻，施加 100 V ：
- 普通 BNC (无 Guard)：漏电流 = $100 \text{ V} / 1 \text{ G}\Omega = 100 \text{ pA}$ \rightarrow 对 1 fA 测量造成 100,000 倍误差
- Triax + Guard (有 Guard)：漏电流 ≈ 0 \rightarrow 1 fA 测量误差 $< 1\%$

关键： Guard 是 2636B 能够实现 0.1 fA 测量的决定性工程手段。没有 Guard，即使仪器内部精度再高，外部连接线的漏电流也会完全淹没 fA 级被测信号。

2.3 Guard 接线方式

使用 Guard 时，Triax 外层 Guard 导体需在靠近 DUT 处终止 (通常接 DUT 的金属屏蔽盒外壳或探针台的 Guard 环)，形成完整保护：

Guard 接线示意图 (高阻 DUT 测量)：





19. Force HI (Triax 内导体)：接 DUT 高电位端
20. Guard (Triax 外层)：接 DUT 金属屏蔽/Guard 环 (越靠近 DUT 越好)
21. Force LO (Triax 内导体)：接 DUT 低电位端 (通常为 GND)
22. 仪器自动驱动 Guard = Force 电位，无需用户额外操作

警告： Guard 连接点必须在 DUT 侧，不能在仪器侧。如果 Guard 不连接或悬空，则 Triax 外层相当于普通屏蔽层 (连接至地)，Guard 功能完全失效。

2.4 Triax 连接注意事项

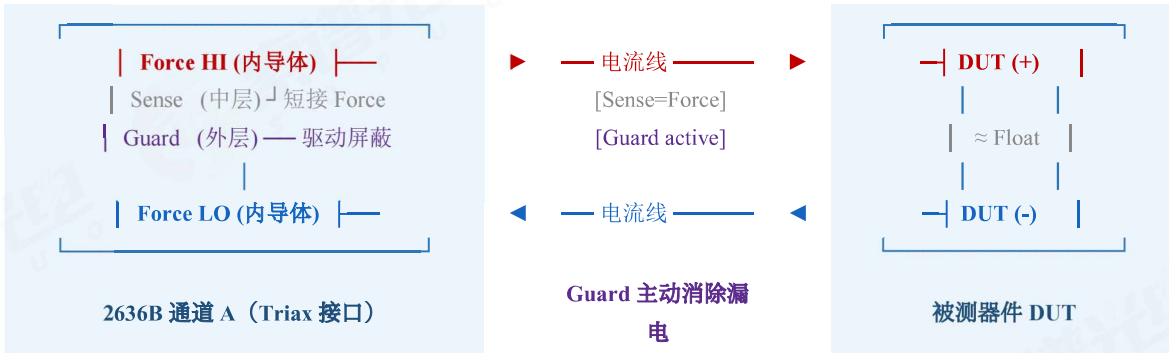
- **专用 Triax 线缆：**使用 Keithley 7078-TRX-10 (1 m) 或 7078-TRX-20 (2 m) 等原厂线缆，确保 Guard 连接完整
- **线缆长度：**尽量短 (≤ 1 m)，每延长 1 m，线缆电容增加约 100 pF，增大充电电流和噪声
- **Triax 清洁：**接头处污染 (油脂、水分) 会大幅降低绝缘电阻，定期用无水乙醇清洁
- **Triax 端接：**不使用的 Triax 端口需接上端帽 (Triax cap) 防止灰尘和静电干扰
- **法拉第屏蔽盒：**超低电流 (< 10 fA) 测量时，DUT 和连接线应置于金属屏蔽盒中，进一步屏蔽静电感应

第三章 接线方式

3.1 2 线制接线 (Local Sense, 含 Guard)

即使是 2 线制模式, 2636B 的 Guard 仍可主动驱动, 消除线缆漏电流:

接线示意图 (2 线制 + Guard, 通道 A):



操作步骤

23. Force HI Triax 内导体接 DUT 正端, Force LO 内导体接 DUT 负端
24. Sense (Triax 中层): 2 线制模式下仪器内部自动短接至 Force (无需外部连接)
25. Guard (Triax 外层): 确保 Triax 线缆外层连接至 DUT 屏蔽盒 Guard 环
26. TSP 命令: `smua.measure.sense = smua.SENSE_LOCAL`
27. Guard 功能始终激活, 无需额外设置

适用场景:

- DUT 阻值 $\geq 1 \text{ k}\Omega$ (线阻误差可接受), 但需要 Guard 消除漏电 (高阻薄膜、绝缘材料)
- 高压 + 超低电流场景 (如绝缘电阻 $\text{G}\Omega \sim \text{T}\Omega$ 级器件在高电压下的漏电流)

3.2 4 线制接线 (Remote Sense, 含 Guard)

4 线制同时提供精确电压采样和 Guard 漏电消除:

接线示意图 (4 线制 + Guard, 通道 A):



操作步骤

28. Force HI / Force LO: Triax 内导体接大电流通路
29. Sense HI / Sense LO: Triax 中层 (Sense) 直接在 DUT 两端采样电压
30. Guard (外层): 接 DUT 屏蔽盒 Guard 环, 在接触点附近终止
31. TSP 命令: `smua.measure.sense = smua.SENSE_REMOTE`

关键: 在 4 线制模式下, Triax 内导体为 Force, 中层为 Sense, 外层为 Guard。三层同时工作, 同时消除线阻误差和漏电流误差, 是 2636B 精度最高的接线方式。

适用场景:

- 超低电流 ($< 1 \text{ pA}$) + 精确电压 ($< 100 \text{ } \mu\text{V}$ 误差) 的高精度组合测量
- 纳米器件、有机半导体、光电探测器等极小信号测量
- 任何需要 Guard 保护且 DUT 阻值 $< 1 \text{ k}\Omega$ 的测量

3.3 线制与精度快速选用规则

- DUT $> 1 \text{ G}\Omega$ (绝缘测试): 2 线制 + Guard 通常已足够 (信号电流极小, 线阻误差可忽略)
- DUT $1 \text{ }\Omega \sim 1 \text{ G}\Omega$ + 低电流 ($< 1 \text{ nA}$): 4 线制 + Guard (消除线阻误差 + 消除漏电)
- DUT $< 100 \text{ }\Omega$ (低阻精密): 4 线制 (线阻误差主导, Guard 意义相对次要)

提示: 对于 2636B 的核心应用场景 (亚 pA 电流测量), 几乎所有情况都应开启 Guard。Guard 的成本只是多接一根 Triax 外层连线, 而收益是消除可能高达 $1000\times$ 的漏电流误差。

第四章 超低电流测量技术

4.1 影响超低电流测量的主要因素

在进行 fA 级（甚至 aA 级）电流测量时，以下因素都可能成为测量误差的主要来源：

- **线缆漏电流：**普通绝缘线缆在高压下漏电流可达 pA 级——Guard 是解决方案
- **环境湿度：**高湿度环境下，Triax 接头绝缘电阻急剧下降，漏电增加数倍——测试环境湿度应 < 70% RH
- **振动和机械扰动：**Triax 线缆弯折产生压电效应，引发 fA 级噪声脉冲——线缆固定后再测量
- **静电感应：**DUT 附近的电场变化通过电容耦合产生感应电流——法拉第屏蔽盒是解决方案
- **仪器预热不足：**内部元件温漂引起测量漂移——预热 ≥ 1 小时，精密测量 ≥ 2 小时
- **Autozero 延迟：**每次测量前的自动调零增加延迟——可改为 AUTOZERO_ONCE 在测量序列前只执行一次
- **EMI 干扰：**高频电磁干扰通过导线引入——增大 NPLC（积分时间），在整数 PLC 时间内积分消除工频干扰

4.2 超低电流测量最佳实践

环境准备

32. 预热仪器 ≥ 1 小时（精密测量 ≥ 2 小时），等待仪器热稳定
33. 将 DUT 和 Triax 线缆置于法拉第金属屏蔽盒中，连接屏蔽盒至大地
34. 测试环境温度稳定（推荐 $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ ），避免空调出风口直吹
35. 测试环境湿度 < 70% RH，潮湿季节可在屏蔽盒内放置干燥剂

连接准备

36. 用无水乙醇清洁所有 Triax 接头，待完全干燥后再连接
37. Triax 线缆长度 ≤ 1 m，线缆弯曲后用绝缘夹固定，避免测试过程中扰动
38. 确认 Guard 外层正确连接至 DUT 屏蔽盒 Guard 环（越靠近 DUT 越好）
39. 不使用的 Triax 端口接上端帽

仪器设置

40. 积分时间：NPLC = 10（精度最高）或 NPLC = 1（速度与精度均衡）
41. 自动量程：开启 autorangei，或手动选择最小合适量程
42. Autozero：smua.measure.autozero = smua.AUTOZERO_AUTO（正常）或 AUTOZERO_ONCE（高速）
43. 数字滤波：开启移动平均滤波（10 ~ 100 点），进一步抑制随机噪声
44. 稳定等待：施加电压后等待充电电流衰减（容性 DUT 需等待 10 倍 RC 时间常数）

4.3 Autozero 策略

Autozero（自动调零）是消除内部偏移的关键机制，2636B 提供三种模式：

- **AUTOZERO_AUTO**: 每次测量自动调零，精度最高，速度最慢（适合低速高精度测试）
- **AUTOZERO_ONCE**: 仅在下一次测量前执行一次调零，之后不再调零——高速测量序列前使用一次，速度提升 3~5×
- **AUTOZERO_OFF**: 完全禁用调零，速度最快，但误差随时间漂移增大——仅限于特定高速场景

提示： 在 fA 级精密测量中，强烈推荐 AUTOZERO_AUTO。若需要高速扫描 (> 100 点/秒)，可在扫描序列开始前执行一次 AUTOZERO_ONCE，然后在整个扫描过程中保持调零结果。

4.4 数字滤波器

路径：TSP 命令 smua.measure.filter；SCPI 命令 :SENS:CURR:AVER

- **移动平均 (Moving Average)**：对最近 N 次测量取平均，每次测量输出一个值——适合实时显示和扫描
- **重复平均 (Repeat Average)**：积累 N 次后输出一个均值，输出频率低但精度更高——适合静态精测
- 推荐点数：10~100 点（fA 级测量，噪声越大取越多）
- 过滤窗口过大时，DUT 特性快速变化（如瞬态）会被平均掉，注意权衡

第五章 精度规格

5.1 电压规格（源 / 测，1 PLC，23°C±5°C，1 年校准）

量程	分辨率	源精度 (23°C±5°C)	测量精度 (23°C±5°C)	输入阻抗
100 nV	1 nV	0.02% + 375 μ V	0.015% + 350 μ V	> 1 G Ω
1 V	10 nV	0.02% + 1.5 mV	0.015% + 1 mV	> 1 G Ω
6 V	100 nV	0.02% + 5 mV	0.015% + 3.5 mV	> 1 G Ω
40 V	1 μ V	0.02% + 12 mV	0.015% + 10 mV	> 1 G Ω
200 V	10 μ V	0.02% + 50 mV	0.02% + 50 mV	> 1 G Ω

注意：2636B 电压规格与 2612B 完全相同（同样最高 200 V），两者在电压方面的差异主要体现在仪器内部采样电路精度，实际规格数值一致。

5.2 电流规格（源 / 测，1 PLC，23°C±5°C，1 年校准）

量程	分辨率	源精度 (23°C±5°C)	测量精度 (23°C±5°C)	电压负担
1 pA *	1 aA	0.1% + 800 aA	0.1% + 400 aA	< 1 mV
10 pA *	10 aA	0.1% + 1 fA	0.1% + 500 aA	< 1 mV
100 pA *	100 aA	0.1% + 5 fA	0.1% + 2.5 fA	< 1 mV
1 nA	1 fA	0.05% + 50 fA	0.05% + 25 fA	< 1 mV
10 nA	10 fA	0.05% + 150 fA	0.05% + 100 fA	< 1 mV
100 nA	100 fA	0.05% + 1.5 pA	0.05% + 500 fA	< 1 mV
1 μ A	1 pA	0.025% + 15 pA	0.025% + 5 pA	< 1 mV
10 μ A	10 pA	0.025% + 150 pA	0.025% + 50 pA	< 1 mV
100 μ A	100 pA	0.02% + 1.5 nA	0.02% + 500 pA	< 1 mV
1 mA	1 nA	0.02% + 15 nA	0.02% + 5 nA	< 1 mV
10 mA	10 nA	0.02% + 150 nA	0.02% + 50 nA	< 1 mV
100 mA	100 nA	0.02% + 1.5 μ A	0.02% + 500 nA	< 1 mV
1 A	1 μ A	0.03% + 900 μ A	0.03% + 200 μ A	< 1 mV
1.5 A (DC)	10 μ A	0.05% + 2.5 mA	0.05% + 2.5 mA	< 1 mV

关键：★ 标注的量程（1 pA / 10 pA / 100 pA）为 2636B 超低电流专属量程，这三个量程在 2602B/2612B 中不存在。1 pA 量程分辨率 1 aA，意味着可稳定分辨约 6000 个电子/秒的微弱电流。

注意：1.5 A DC 量程在高电压时受 30.3 W 功率包络限制：200 V 时最大约 150 mA DC。超低电流量程（1 pA ~ 100 pA）必须在仪器充分预热、Guard 正确连接、法拉第屏蔽下使用，否则精度无法保证。

5.3 功率包络

每通道最大 DC 功率 30.3 W，与 2612B 相同，代表性操作点：

- **±200 V @ ±150 mA**：30 W 高压区（200 V × 150 mA）
- **±40 V @ ±750 mA**：30 W 中压区
- **±6 V @ ±1.5 A**：9 W 低压大电流
- **±200 V @ ±10 A**：脉冲模式（占空比 < 10%，脉宽 < 1 ms）

5.4 精度规格说明

规格格式：±(% 读数 + 偏置)。以 1 nA 量程测量 500 pA 为例：

$$\text{误差} \leq 0.05\% \times 500 \text{ pA} + 25 \text{ fA} = 0.25 \text{ fA} + 25 \text{ fA} = 25.25 \text{ fA} \approx 5\%$$

- 在超低电流量程中，偏置项（固定误差）往往比比例项更重要——选择更小量程可降低偏置项
- 温度系数：偏离 23°C 每 1°C，误差额外增加基本精度的 0.15 倍——温度稳定性对 fA 测量至关重要
- 保证条件：输出 ON、Autozero AUTO、预热 ≥ 1 小时、Guard 正确连接

第六章 远程通信接口

6.1 接口总览

接口	位置	说明
GPIB (IEEE-488)	后面板 24 针	IEEE 488.1/488.2, 传统自动化测试总线
USB 2.0 Device	后面板 Type-B	USBTMC, 即插即用, PC 直连首选
Ethernet (LXI-C)	后面板 RJ-45	10/100Base-T, DHCP/静态 IP, 内置 Web 控制
RS-232	后面板 DB9	波特率最高 115200, 兼容老旧系统
TSP-Link	后面板 RJ-45×2	最多 32 台 SMU 同步级联
Digital I/O	后面板 DB15	14 路数字 I/O, 触发/Handler 控制

注意： 2636B 的接口配置与 2612B 完全相同（均有 RS-232、TSP-Link 等），差别仅在后面板信号接口（Triax vs 螺丝端子）。远程编程命令也完全兼容，可复用 2612B 的测试代码。

6.2 USB 连接

45. USB Type-A 转 Type-B 连接 PC 与 2636B 后面板 USB Device
46. 安装 NI-VISA (≥ 19.5) 或 Keithley I/O Layer
47. VISA 地址：USB0::0x05E6::0x2636::xxxxxxxx::INSTR

6.3 TSP-Link 多机超低电流并行测试

在晶圆级多引脚低电流测试中，TSP-Link 允许多台 2636B 精确同步 (< 500 ns)，每台各自完成独立超低电流测量通道：

48. 菊花链连接各仪器 TSP-Link 端口，主机执行 `tsplink.reset()` 识别
49. `node[N].smua` 访问第 N 台从机通道 A
50. Triax 每通道独立连接至探针台对应引脚，确保 Guard 在每个测量点独立接入

警告： 多台 2636B 组成阵列时，各仪器的 Guard 回路必须独立处理——不同通道的 Guard 不应互相短接，否则会引入交叉漏电流。每个 Triax 通道的 Guard 只连接该通道 DUT 侧的屏蔽。

第七章 编程控制

7.1 编程语言

- **TSP (推荐)** : `smua.source.rangev = 200` 选高压; `smua.measure.rangei = 1e-12` 选 1 pA 量程——语义直接对应硬件
- **SCPI (2400 仿真)** : 切换: MENU → Communication → Command Set → 2400; `:SENS:CURR:RANG 1e-12` 选超低电流量程

提示: SCPI 2400 仿真模式完全兼容 2612B 代码, `smub` 命令在 SCPI 中同样加 "2" 后缀。

7.2 SCPI 常用命令参考

SCPI 命令	功能说明
<code>:SOUR:FUNC VOLT</code>	通道 A 设为电压源
<code>:SOUR:VOLT:RANG 200</code>	选 200 V 量程 (高压档)
<code>:SOUR:VOLT:LEV 100</code>	输出 100 V
<code>:SENS:FUNC "CURR"</code>	测量功能设为电流
<code>:SENS:CURR:RANG 1e-9</code>	强制选 1 nA 量程 (超低电流)
<code>:SENS:CURR:RANG:AUTO ON</code>	开启电流自动量程
<code>:SENS:CURR:PROT 1e-6</code>	电流保护 1 μ A
<code>:SENS:CURR:NPLC 10</code>	积分时间 10 PLC (高精度)
<code>:SYST:RSEN ON</code>	开启 4 线制 (Remote Sense)
<code>:OUTP ON</code>	开启通道 A 输出
<code>:MEAS:CURR?</code>	读取电流测量值
<code>:OUTP OFF</code>	关闭输出
<code>SOUR2:VOLT:RANG 200</code>	通道 B 200 V 量程
<code>OUTP2 ON</code>	开启通道 B 输出
<code>*RST</code>	复位仪器
<code>*IDN?</code>	查询仪器型号/序列号

7.3 TSP 常用命令参考

TSP 命令	功能说明
<code>smua.source.func =</code>	通道 A 设为直流电压源

<code>smua.OUTPUT_DCVOLTS</code>	
<code>smua.source.rangev = 200</code>	200 V 量程
<code>smua.source.levelv = 100</code>	输出 100 V
<code>smua.source.limits = 1e-6</code>	电流保护 1 μ A
<code>smua.measure.func = smua.MEASURE_DCAMPS</code>	测量直流电流
<code>smua.measure.rangei = 1e-9</code>	强制选 1 nA 量程
<code>smua.measure.autorangei = smua.AUTORANGE_ON</code>	开启电流自动量程
<code>smua.measure.nplc = 10</code>	积分时间 10 PLC
<code>smua.measure.autozero = smua.AUTOZERO_AUTO</code>	自动调零
<code>smua.measure.sense = smua.SENSE_REMOTE</code>	开启 4 线制 (Remote Sense)
<code>smua.output = smua.OUTPUT_ON</code>	开启输出
<code>print(smua.measure.i())</code>	读取电流
<code>smua.output = smua.OUTPUT_OFF</code>	关闭输出
<code>smub.source.func = smub.OUTPUT_DCVOLTS</code>	通道 B 电压源
<code>smub.source.rangev = 200</code>	通道 B 200 V 量程
<code>smub.output = smub.OUTPUT_ON</code>	开启通道 B
<code>print(smub.measure.i())</code>	读取通道 B 电流
<code>reset()</code>	复位仪器
<code>print(errorqueue.next())</code>	读取错误队列

TSP 超低电流精密测量序列 (标准配置)

```
-- 2636B 超低电流精密测量标准初始化
reset()
-- 通道 A: 电压源 + 超低电流测量
smua.source.func = smua.OUTPUT_DCVOLTS
smua.source.rangev = 40      -- 40 V 量程 (低压精密)
smua.source.levelv = 10
smua.source.limits = 100e-12 -- 100 pA 保护

smua.measure.func = smua.MEASURE_DCAMPS
smua.measure.rangei = 1e-12  -- 强制选 1 pA 量程
smua.measure.nplc = 10      -- 10 PLC (高精度)
smua.measure.autozero = smua.AUTOZERO_AUTO
smua.measure.sense = smua.SENSE_REMOTE -- 4 线制

-- 开启数字滤波: 移动平均 10 点
smua.measure.filter.count = 10
smua.measure.filter.type = smua.FILTER_MOVING_AVG
smua.measure.filter.enable = smua.FILTER_ON
```

```

smua.output = smua.OUTPUT_ON
delay(1.0)          -- 等待充电电流衰减

-- 连续读取 10 次，取均值
local sum = 0
for k = 1, 10 do
    sum = sum + smua.measure.i()
end
print('Average current (A):', sum / 10)

smua.output = smua.OUTPUT_OFF

```

TSP 高压 + 超低电流 I-V 扫描（绝缘电阻谱）

```

-- 绝缘电阻 I-V 扫描：0 ~ 200 V，测量漏电流
reset()
smua.source.func = smua.OUTPUT_DCVOLTS
smua.source.rangev = 200
smua.source.limits = 1e-6    -- 1 μA 保护
smua.measure.nplc = 1
smua.measure.autozero = smua.AUTOZERO_ONCE -- 扫描前调零一次
smua.measure.filter.count = 5
smua.measure.filter.type = smua.FILTER_MOVING_AVG
smua.measure.filter.enable = smua.FILTER_ON

local buf = smua.makebuffer(201)
smua.output = smua.OUTPUT_ON

for v = 0, 200, 1 do      -- 0 ~ 200 V，步进 1 V
    smua.source.levelv = v
    delay(0.5)           -- 每步等待 500 ms
    smua.measure.i(buf)
    -- 检查 Compliance
    if smua.source.compliance then
        print('Breakdown at', v, 'V'); break
    end
end

smua.output = smua.OUTPUT_OFF
printbuffer(1, buf.n, buf.sourcevalues, buf.readings)

```

TSP 双通道同步测量（有机 TFT 器件）

```

-- 有机 TFT 特性：CH-A 控制 Vgs，CH-B 扫描 Vds
reset()
-- 通道 A：Gate 偏置
smua.source.func = smua.OUTPUT_DCVOLTS
smua.source.rangev = 40
smua.source.limits = 10e-9    -- Gate 限流 10 nA
-- 通道 B：Drain 扫描，测超低漏电流
smub.source.func = smub.OUTPUT_DCVOLTS
smub.source.rangev = 40
smub.source.limits = 10e-6    -- Drain 限流 10 μA
smub.measure.rangei = 10e-9   -- 10 nA 量程（有机 TFT 典型电流）
smub.measure.nplc = 1

local Vgs_steps = {0, -5, -10, -15, -20}
local buf = smub.makebuffer(101)

smua.output = smua.OUTPUT_ON
smub.output = smub.OUTPUT_ON

for _, vgs in ipairs(Vgs_steps) do
    smua.source.levelv = vgs
    delay(0.1)

```

```
buf.clear()
for vds = 0, -40, -0.4 do
    smub.source.levelv = vds
    smub.measure.i(buf)
end
print('Vgs =', vgs, ':')
printbuffer(1, buf.n, buf.readings)
end
smua.output = smua.OUTPUT_OFF
smub.output = smub.OUTPUT_OFF
```

7.4 Python 连接示例 (PyVISA + TSP)

```
import pyvisa, time

rm = pyvisa.ResourceManager()
smu = rm.open_resource('USB0::0x05E6::0x2636::xxxxxxxx::INSTR')
smu.timeout = 60000 # 60 s (超低电流测量需长超时)

smu.write('reset()')
smu.write('smua.source.func = smua.OUTPUT_DCVOLTS')
smu.write('smua.source.rangev = 40')
smu.write('smua.source.levelv = 10')
smu.write('smua.source.limiti = 100e-12') # 100 pA
smu.write('smua.measure.nplc = 10')
smu.write('smua.measure.autozero = smua.AUTOZERO_AUTO')
smu.write('smua.output = smua.OUTPUT_ON')
time.sleep(2) # 等待稳定

smu.write('print(smua.measure.i())')
i_val = float(smu.read())
print(f'Current = {i_val*1e15:.3f} fA')

smu.write('smua.output = smua.OUTPUT_OFF')
smu.close()
```

第八章 典型测试应用

8.1 纳米材料与二维材料电导率测量

单层石墨烯、MoS₂ 等二维材料的本征导电率极低，在初始状态下通道电流可低至 fA ~ pA 级，是 2636B 最典型的应用场景之一：

51. 接线：4 线制（Kelvin 探针接触），全程 Guard 保护，置于法拉第屏蔽盒内
52. CH-A：电压源（如 1 mV ~ 1 V），限流 1 pA，测量通道电流
53. CH-B（可选）：施加 Gate 电压（背栅偏置），观察场效应调控
54. NPLC = 10，移动平均滤波 10 点，每点等待 RC 稳定时间
55. 典型结果：原始石墨烯薄层电导率约 $1 \mu\text{S}/\square \sim 1 \text{mS}/\square$ ，对应电流约 1 nA ~ 1 μA （1 V 偏压）

提示： 二维材料测量中，探针接触电阻（R_c）通常远大于材料本身电阻，4 线制（Kelvin 接触）是消除 R_c 误差的唯一手段。探针与材料的接触质量（接触力、尖端半径）直接影响测量重复性。

8.2 光电探测器量子效率测量

高性能光电探测器（PIN 光电二极管、量子点探测器）在光照微弱时响应电流可低至 fA 级：

56. 接线：2 线制 + Guard，2636B 通道 A，探测器置于屏蔽光学暗箱中
57. 模式：反偏电压源（如 -1 V ~ -10 V），测量光电流（暗电流 + 光电流）
58. 暗态测量：遮光条件下，先测暗电流基线（通常 1 ~ 100 fA）
59. 光照测量：光源开启，测量总电流，差值即为净光电流
60. 响应度 $R = I_{\text{photo}} / P_{\text{optical}}$ (A/W)，外量子效率 $\text{EQE} = R \times hc / (q \times \lambda)$

警告： 光电探测器测量对光学屏蔽要求极高。任何杂散光漏入暗箱都会引入 pA ~ fA 级额外光电流，使测量失效。建议使用 O 形密封光学暗箱，并在光源切换后等待 ≥ 5 秒稳定。

8.3 高阻材料绝缘电阻测量（G Ω ~ T Ω ）

绝缘薄膜（SiO₂、HfO₂、聚合物绝缘层）、高纯硅片等高阻材料的绝缘电阻测量，DUT 阻值可达 T Ω （10¹² Ω ）：

61. 接线：2 线制 + Guard，Guard 接 DUT 金属电极外围 Guard 环
62. 施加电压：从小电压步进至测试电压（通常 10 ~ 100 V）
63. 等待极化稳定：每个电压点等待 30 ~ 300 秒（极化弛豫）再读数
64. 计算绝缘电阻： $R = V / I_{\text{measured}}$
65. 典型结果：优质 SiO₂（100 nm）绝缘电阻 > 100 G Ω ，漏电流 < 1 pA

注意： 高阻测量中，测量时间越长，结果越稳定，但 DUT 中积累的电荷也越多。测量结束后务必等待 DUT 充分放电（接入 1 M Ω 放电电阻 ≥ 1 分钟），再进行下一次测量。

8.4 有机薄膜晶体管（OTFT）完整表征

有机 TFT 的迁移率、阈值电压、亚阈值斜率等关键参数，需要超低噪声双通道同步测量：

66. CH-A (smua) : Gate 偏置电压 (V_{gs}) , 限流 10 nA (有机绝缘层耐压通常 < 10 V)
67. CH-B (smub) : Drain 扫描电压 (V_{ds}) , 测量漏极电流 I_d (典型 1 pA ~ 10 μ A)
68. 全程 Guard 保护, 置于法拉第屏蔽盒内, 屏蔽盒接地
69. 转移特性: 固定 $V_{ds} = -2$ V, 扫描 V_{gs} ($0 \sim -30$ V) , 获取 I_d - V_{gs} 曲线
70. 输出特性: 固定 V_{gs} 系列值, 扫描 V_{ds} ($0 \sim -30$ V) , 获取 I_d - V_{ds} 族曲线
71. 提取迁移率: $\mu = (dI_d/dV_{gs}) \times L / (W \times C_i \times V_{ds})$ (线性区公式)

8.5 Bio-FET / 离子传感器测量

生物传感器 (Bio-FET) 探测蛋白质、DNA 等生物分子时, 传感器表面的电荷变化引起极微弱电流或电压变化:

72. 典型信号: 电流变化 1 fA ~ 100 pA (对应分子吸附浓度变化)
73. 接线: 4 线制 + Guard, 探针与溶液/衬底的接触电阻用 Kelvin 接法消除
74. CH-A: 恒定 V_{ds} 偏置 (如 50 mV) , 测量 I_d 的微弱变化
75. CH-B: V_{gs} (参考电极偏置, 如 Ag/AgCl 参考电极)
76. 实时监测: 高速读取 I_d vs 时间, 观察生物分子结合/解离动力学

提示: 溶液/电解质环境下, 溶液电阻和 DUT 接触阻抗均较大, 导线漏电流路径复杂。建议在测量前对系统进行完整的背景漏电流测试 (拔除 DUT 后测量残余电流) , 确认 Guard 和屏蔽效果。

8.6 击穿电压 (BV) + 超低漏电流测量

2636B 同时具备 ± 200 V 高压和 0.1 fA 超低电流, 可在单次扫描中同时完成 BV 测试和精密漏电流谱:

77. 扫描电压: $0 \sim 200$ V, 步进 $1 \sim 5$ V, 每步等待 100 ms
78. 电流量程: 自动量程 (覆盖 fA 到 mA 的宽范围)
79. Guard 保护: 在高电压低漏电区 (100 V 以上, 漏电 < 1 pA) , Guard 消除线缆漏电至关重要
80. 击穿判断: Compliance 触发或电流突增 > 10 倍

典型应用: GaN HEMT BVds 测试, 漏电流从 fA 级到 μ A 级的宽动态范围扫描

第九章 故障排查

9.1 常见故障与解决方法

故障现象	可能原因	排查/解决方法
超低电流测量值漂移	温度变化；未开 Guard；Triax 污染	预热 ≥ 1 小时；开启 Guard；用无水乙醇清洁 Triax 接头
fA/pA 级测量噪声大	未使用屏蔽盒；Triax 线缆过长	使用法拉第屏蔽盒；线缆 ≤ 1 m；NPLC ≥ 10 ；开启数字滤波
测量值比预期大 10~100 倍	Guard 未连接或连接错误	检查 Triax 外层 Guard 是否正确连接；确认 smua.contact 配置
低电流量程测量偏慢	Autozero 开销 + 高 NPLC	smua.measure.autozero = ONCE（手动触发），避免每次测量重新调零
高压输出噪声大	接地不良；导线过长；电源干扰	检查接地；NPLC ≥ 1 ；减短导线；使用屏蔽双绞线
立即进入 Compliance	保护值设置过小；DUT 短路	重新评估 limiti/limitv；先用高量程确认 DUT 状态
TSP 脚本执行中断	smua/smub 命令对象混用	检查通道对象名称；print(errorqueue.next()) 查错误代码
双通道串扰	通道间浮置电位差超规格	两通道 LO 端连接方式检查；浮置电位差不超过 ± 250 V
仪器无法输出 200 V	量程未设为 200 V 档	smua.source.rangev = 200 / :SOUR:VOLT:RANG 200

9.2 错误代码查询

81. 前面板：MENU \rightarrow Error Queue

82. TSP：print(errorqueue.next())

83. SCPI：:SYST:ERR?

常见错误：

- -113：SCPI 命令语法错误
- -222：参数超范围（如量程超过 1 pA ~ 1.5 A 有效范围）
- +800：Compliance/Overload 触发
- +802：Interlock 开路（高压输出被拒绝）
- +801：Contact Check 失败（接触电阻过高）

9.3 校准与维护

- 建议每 12 个月送厂校准一次，超低电流量程 ($< 1 \text{ nA}$) 校准需特殊低噪声标准源，请确认校准机构具备此能力
 - Triax 接头每季度用无水乙醇清洁，保持绝缘电阻 $> 1 \text{ T}\Omega$
 - Triax 线缆出现裂纹、弯折变形或外层破损时立即更换，否则 Guard 失效
 - 存储环境： $-25^{\circ}\text{C} \sim 65^{\circ}\text{C}$ ，湿度 $< 70\% \text{ RH}$ ；长期存储时接上 Triax 端帽防尘
 - 法拉第屏蔽盒的接地连线需定期检查，确保电气连接完好
-

第十章 使用注意事项与安全规范

10.1 安全注意事项

警告： 2636B 最高输出 $\pm 200\text{ V}$ （与 2612B 相同），属于危险电压。高压操作时：① 必须连接 Interlock；② 佩戴绝缘手套；③ 严禁带电接线；④ 测试完成后等待 DUT 放电后再触碰。Triax 接头在 200 V 下带有危险高压，不得徒手触摸接头金属部分。

- 最大输出电压： $\pm 200\text{ V DC}$ / 脉冲峰值更高（参见 User Manual 脉冲规格）
- 最大 DC 电流： $\pm 1.5\text{ A}$ （每通道）/ 脉冲 $\pm 10\text{ A}$
- 最大功率： 30.3 W/通道
- 两通道最大浮置电压： $\pm 250\text{ V}$ （对机壳地）
- Triax 线缆额定电压：使用 Keithley 原厂线缆，不得使用普通 BNC 或香蕉线

10.2 超低电流测量安全注意事项

警告： 超低电流（ $\text{fA} \sim \text{aA}$ ）测量中，人体静电（可达数千 V ）是最常见的破坏源。接触 DUT 或调整接线前，必须先用防静电腕带接地放电，再操作 Triax 接线。

- 人体静电可在 DUT 或线缆上感应出 $\text{fA} \sim \text{pA}$ 级电流，操作时需佩戴防静电腕带
- 不得在测量中途用手触碰 Triax 线缆，机械扰动产生的压电效应可引发 fA 级噪声脉冲
- 超低电流量程测量中，任何振动源（空调、仪器风扇、走路振动）都需要隔离，建议使用气浮光学台

10.3 测量最佳实践

- **Guard 始终开启：** 2636B 的 Guard 默认始终激活，无需手动开启，但必须确认 Guard 物理连接正确
- **先测背景噪声：** 正式测量前，先在不接 DUT 的状态下读取仪器噪声本底（电流值应 $< 1\text{ fA}$ ），确认系统状态良好
- **预热充分：** 超低电流测量预热 ≥ 2 小时，普通测量预热 ≥ 1 小时
- **从高量程开始：** 先用高电流量程（ $\mu\text{A} \sim \text{mA}$ ）确认 DUT 大致特性，再切换到低量程精测
- **TSP 本地脚本：** 超低电流高速扫描（如 OLED 退化监测）应使用 TSP 本地脚本，避免通信延迟
- **法拉第屏蔽：** fA 级测量必须使用屏蔽盒，DUT、Triax 接头、开尔文探针均置于盒内

10.4 型号选用终极建议

在四个 2600B 型号中，2636B 的适用场景：

- 必须选 2636B：需要 $< 100\text{ pA}$ 测量（纳米器件、有机半导体、生物传感）
- 必须选 2636B：需要同时高压（ $> 40\text{ V}$ ）和超低电流（ $< 1\text{ nA}$ ）的组合（高压击穿 + 漏电流谱）
- 可选 2612B 代替：电压需要 $> 40\text{ V}$ ，但电流 $\geq 100\text{ pA}$ （节约成本）
- 可选 2602B 代替：电压 $\leq 40\text{ V}$ ，电流 $\geq 100\text{ pA}$ ，且需要大电流（ $\geq 1.5\text{ A DC}$ ）
- 可选 2450 代替：单通道、触摸屏操作、无需超低电流

注意： 2636B 的价格约为 2602B 的 3 倍、2612B 的 1.5 倍。投资 2636B 的唯一充分理由是需要 Guard 保护

的超低电流 ($< 100 \text{ pA}$) 测量, 或者需要 Triax 接口的特殊测试夹具兼容性。如果测试不涉及这两点, 选择 2612B 或 2602B 性价比更高。

附录 参考资料与资源

A. 官方技术文档

- Series 2600B System SourceMeter SMU Instruments User Manual (部件号 2600B-901-01)
- SPEC-2600B 精度规格书 (tek.com/keithley 下载)
- 2636B Datasheet (Tektronix 官网)
- Application Note: Low Level Measurements Handbook, 7th Edition (Keithley 经典参考手册, 系统讲解 fA 级测量技术)
- Application Note: Characterizing Nanoscale Devices with the Model 2636B (Keithley AN-2636)
- 2600B Series TSP/TSP-Link Programming Reference Manual

B. 软件资源

- NI-VISA: <https://www.ni.com/visa>
- Test Script Builder (TSB): TSP 脚本开发 IDE, 官网免费下载
- PyVISA: `pip install pyvisa`
- ACS Basic Edition: 可选购, 适合有机半导体/纳米器件特性化
- LabTracer 2.0: 免费, Keithley 提供的 I-V 特性测试软件

C. 精度规格补充

- 所有精度规格在 1 PLC、Autozero AUTO、输出 ON、预热 ≥ 1 小时、Guard 正确连接条件下成立
- 1 pA / 10 pA / 100 pA 超低量程还需要: 法拉第屏蔽、湿度 $< 70\% \text{ RH}$ 、温度稳定 $23^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$
- 温度系数: 每偏离 $23^\circ\text{C} 1^\circ\text{C}$, 误差额外增加基本精度的 0.15 倍
- 校准周期: 1 年; 超低电流量程的校准需专用低噪声设备, 请送 Tektronix 授权服务中心

本文档综合整理自 Keithley/Tektronix 官方手册及规格书, 仅供技术参考。最终规格以 tek.com 官方发布文档为准。