For you. For us.
For growth.

半导体参数精密分析仪校准规范解读和校准方案探讨

- 杨胜利
- 电学产品经理
- 福禄克公司计量校准部(中国)
- 13910526912
- victor.yang@flukecal.com

讲座内容

- 半导体及其测试的基础知识
- 半导体参数精密分析仪性能一览
- 半导体参数精密分析仪的校准规范解读
- 半导体参数精密分析仪的校准方案探讨

©2026 Fluke Calibration

什么是半导体?

- 半导体：导电能力、导电性能介于导体和绝缘体之间的一类

类别	导电能力	禁带宽度	代表材料
导体	极易导电	禁带宽度≈0，电子自由移动，随时导电	铜、铝、金、银、铁
半导体	介于中间，可控变	禁带宽度 0.1 ~ 3.5eV 左右，常温下有少量自由电子	硅Si、锗Ge、碳化硅SiC、氮化镓GaN
绝缘体	几乎不导电	禁带宽度很大，电子无法挣脱束缚，不导电	塑料、玻璃、陶瓷、橡胶

- 半导体的独有特性
  - 掺杂可控导电性
    - 硅中掺入微量杂质，就能随意改变导电能力，做成N型、P型半导体，是二极管、三极管、MOS、IC的基础。
      - 掺五价杂质（磷、砷）→ 多出大量自由电子 → N型 掺得特别多 → N+
      - 掺三价杂质（硼）→ 多出大量空穴 → P型 掺得特别多 → P+
      - + 的物理意义： 载流子浓度极高 → 电阻率极低、导电性极好，近似金属导电。
  - 光敏特性

    光照越强，导电能力越强 → 衍生：光敏电阻、光电三极管、光耦、图像传感器。
  - 热敏特性

    温度越高，导电能力越强 → 用于热敏电阻、温度检测、器件温漂分析。
  - 整流单向导电特性

    可实现单向导通 → 二极管核心原理。

©2026 Fluke Calibration

半导体Semiconductor的发展简史

- 萌芽阶段(19世纪—20世纪初：天然半导体应用)
  - 1833年，法拉第发现硫化银具有负温度特性
  - 1874年，布朗发现硫化铅具有单向导电特性
  - 1883年，爱迪生发现金属——半导体整流效应
- 真空管时代(1904—1947：半导体前夜)
  - 1904年 弗莱明发明真空二极管
  - 1906年 德福雷斯特发明真空三极管
- 第一代半导体：硅、锗时代(1947—1990 成熟普及)
  - 里程碑：
    - 1947年 贝尔实验室发明锗(Ge) 双极型晶体管BJT
    - 1950年 制备出单晶锗，实现可控掺杂。
    - 1954年 第一块硅(Si) 单晶研制成功
    - 1958年 集成电路IC诞生，以硅为基底。
    - 1960年 MOSFET 问世，奠定现代数字芯片基础。
    - 1960—1990年 硅工艺飞速成熟：提纯、拉单晶、光刻、扩散、离子注入、PN结、CMOS工艺全面完善。
  - 代表材料：锗(Ge)、硅(Si) 核心特征：
    - 禁带宽度窄：Ge 0.67eV，Si 1.1eV
  - 可人工掺杂、形成PN结、可做二极管、BJT、MOSFET、IGBT
  - 耐压有限、开关速度受限、高温漏电流大

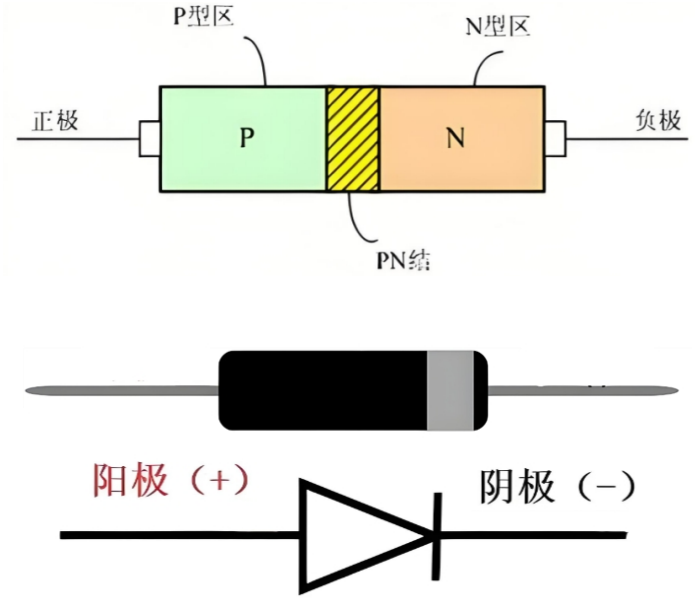
- 第二代半导体：化合物半导体(1980—2010 射频、光通信)
  - ➢ 代表材料：砷化镓 GaAs、磷化铟 InP
  - ➢ 核心特点
    - 属于Ⅲ-Ⅴ族化合物半导体
    - 电子迁移率远高于硅，高频性能极强
    - 发光特性好，可做光电器件
- 第三代半导体：宽禁带半导体(2010 至今 新能源主力)
  - ➢ 代表材料:碳化硅 SiC、氮化镓 GaN
    - 禁带宽度提升： SiC≈3.26eV，GaN≈3.4eV
    - 击穿场强是硅 10倍
    - 耐高温、耐高压、漏电流极小
    - 电子饱和速度高、开关速度极快、损耗极低
  - ➢ 新能源、碳中和、新能源车、光伏储能的核心基石，逐步替代传统硅基IGBT、MOSFET高端场景。
- 第四代半导体：超宽禁带(正在发展 未来10年主力)
  - ➢ 代表材料：氧化镓 Ga_2O_3 、金刚石、氮化铝 AlN
  - ➢ 核心特点
    - 禁带宽度更大(4.8～8eV)
    - 耐压是SiC的3～5倍
  - ➢ 适合特高压电网、轨道交通、航空航天、极端高温场景
  - ➢ 目前处于实验室→小规模产业化阶段，是下一代电力电子战略材料。

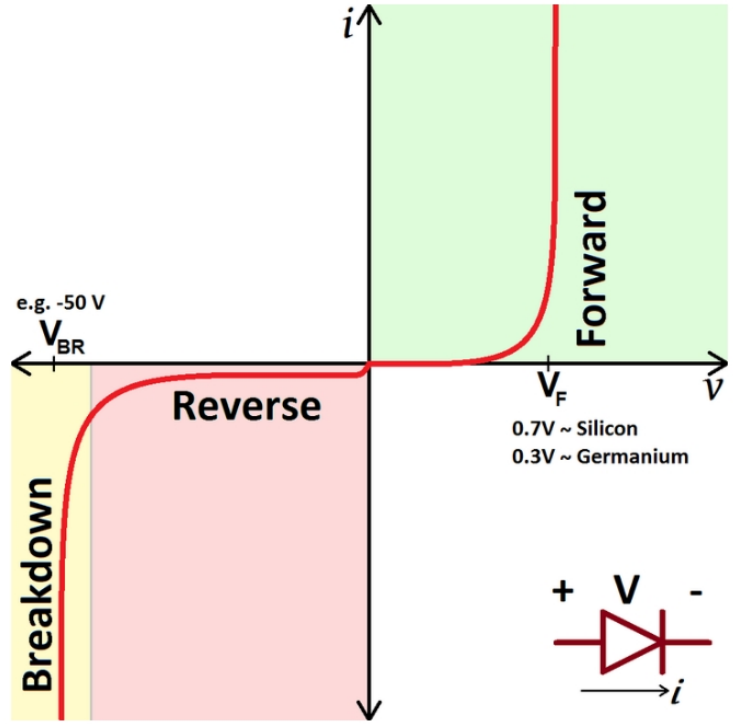
©2026 Fluke Calibration

二极管Diode的关键特性

- 共同底层本质：单个PN结
  - 载流子：P型半导体，空穴多(带正电)；N型半导体，自由电子多(带负电)
  - P和N烧结在一起，形成PN结，接触面附近，载流子扩散
  - 扩散后，形成耗尽层、内建电场，阻止载流子扩散，达到动态平衡。

- 三种工作状态
  - 正向偏置：
    - 低阻态导通，压降0.7V左右
  - 反向偏置：
    - 高阻态关断，微弱漏电流
  - 反向击穿：
    - 齐纳或雪崩击穿，可做稳压





©2026 Fluke Calibration

二极管：常见类型及应用

- 普通整流二极管
  - 原理：利用单向导电性，将交流电转换为直流电，是电源电路中的基础转换器件。
  - 应用：开关电源整流、电路电气隔离、各类电子仪器与设备的电源输入端。
- 稳压二极管（齐纳二极管）
  - 原理：设计用于反向击穿区工作，在电流变化较大时，击穿后的两端电压保持恒定。
  - 应用：精密电路中的基准电压源、简易电路稳压、以及电子设备的电源过压保护。
- 发光二极管（LED）
  - 原理：正向导通时，电子与空穴在PN结复合，能量以光子形式释放，从而将电能转化为光能。
  - 应用：各类设备状态指示灯、手机/电脑屏幕显示、通用照明光源、光伏设备状态显示等。

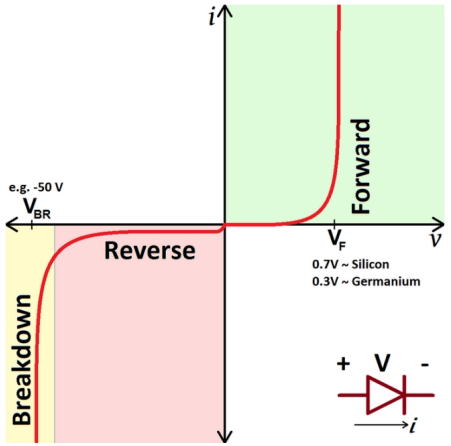
- 肖特基二极管（Schottky）
  - 结构：基于金属-半导体结，区别于传统的 PN 结结构。
  - 原理：依靠多数载流子导电，无少子存储效应，因此开关速度极快，且正向压降极低。
  - 特点：低压降、高频特性、低功耗、高效率。
  - 应用：高频开关电源、手机/电动车快充电路、光伏逆变器续流保护等。
- 光伏二极管 / 太阳能电池
  - 核心原理：光生伏特效应（Photovoltaic Effect）
    - 当太阳光照射半导体PN结时，能量激发产生电子-空穴对。在内建电场的作用下，正负电荷被分离并聚集，最终在两端形成稳定的电势差，输出直流电。
  - 典型应用场景
    - 广泛应用于各类光伏组件、大型地面/屋顶太阳能发电站、以及各类高校和科研机构的光电转换、材料物理等测试实验中。

二极管：核心技术参数与测试

- 普通整流二极管
  - ➢ 正向导通电压（VF）：
    - 额定电流下的正向压降，决定二极管导通时的能量损耗。
  - ➢ 额定正向电流（IF）：
    - 器件长期允许连续工作的最大正向电流，受散热条件限制。
  - ➢ 反向耐压（VRRM）/ 反向漏电流（IR）：
    - 分别指最大允许反向截止电压，及额定反向耐压下的微小漏电流。
  - ➢ 反向恢复时间（trr）：
    - 二极管从正向导通切换到反向截止状态所需的电荷恢复时间，是高频应用的关键指标。

- 稳压二极管（Zener Diode）
  - ➢ 稳压值（VZ）
    - 指器件在反向击穿区工作时，流过额定工作电流(IZ)时两端的稳定反向电压。它是稳压二极管最核心的参数，决定了稳压电路的输出电压基准。
  - ➢ 动态内阻（rz）
    - 定义为稳压管电流发生微小变化(ΔIZ)时，两端电压的相应变化量(ΔVZ)与电流变化量之比。数值越小，表明稳压管的稳压特性越好，输出电压越稳定。

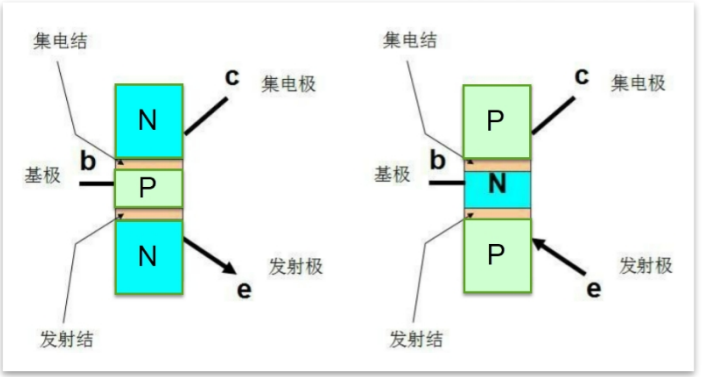
- 静态参数测试
  - ➢ 正向压降（VF）
    - 通过直流源向器件通以额定正向电流，利用万用表或数字电压表直接测量器件两端的电压降。
  - ➢ 反向耐压（VRRM）& 漏电流（IR）
    - 使用直流高压源逐步施加反向电压，实时监测器件的反向漏电流，确定器件的击穿电压与漏电流特性。
  - ➢ 常用仪器
    - 数字源表（SMU）
    - 半导体参数分析仪
    - 绝缘耐压测试仪



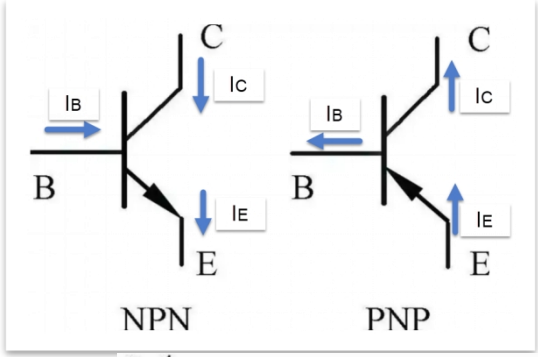
- 动态参数测试
  - ➢ 反向恢复时间（trr）
    - 利用高频脉冲信号源模拟器件的开关状态，通过高带宽示波器捕捉器件由正向导通转为反向截止瞬间的电流波形，分析并计算出反向恢复时间。
  - ➢ 常用仪器
    - 高速数字示波器
    - 高频脉冲信号发生器
    - 二极管动态参数综合测试系统

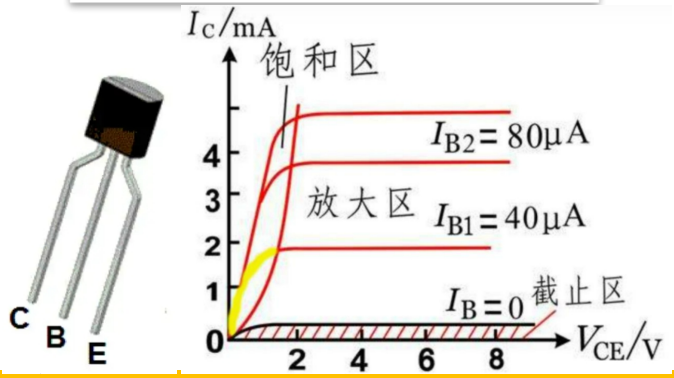
双极型三极管BJT的关键特性

- 共同底层本质：两个PN结背对背拼接而成
  - 分为NPN型和PNP型，三层区域分别为发射极E、基极B、集电极C。
  - 内部同时依靠电子、空穴两种载流子导电，故称双极型器件。
- 三种工作区域
  - 放大区：
    - 发射结需加正向偏置，集电结需加反向偏置。
    - 微小的基极电流(IB)可控制较大的集电极电流(IC)，IC随IB线性变化，用于小信号电压、电流放大，模拟电路核心单元
  - 饱和导通区：
    - 基极电流足够大，三极管完全导通，压降极低，等效开关闭合。
  - 截止区：
    - 基极电流为0，无集电极电流，等效开关断开。
- 电流控制器件：开关速度较慢
  - 需要持续消耗基极驱动电流以维持导通，会产生额外的功率损耗，高频特性受限



$I_C \approx \beta I_B$，$I_E = I_B + I_C$





©2026 Fluke Calibration

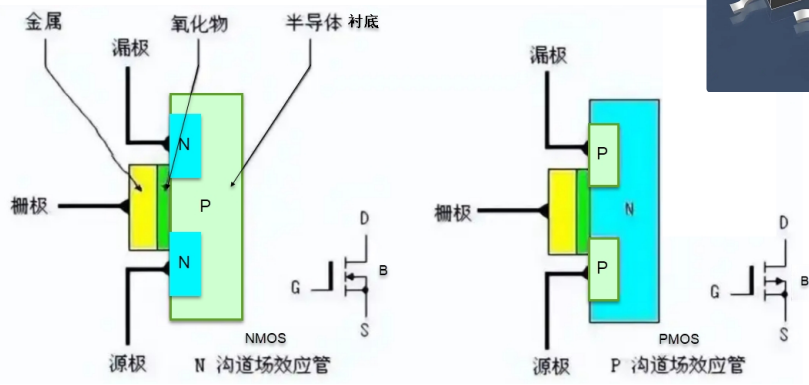
BJT：核心技术参数与测试

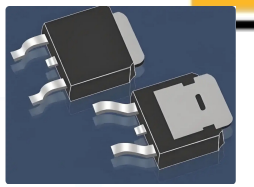
- 直流参数
  - ➢ 电流放大倍数（β / hFE)：
    - 定义为集电极电流与基极电流之比（IC / IB)，反映三极管的电流放大能力，是最核心的直流指标。
  - ➢ 穿透电流（ICEO)：
    - 指基极开路时，集电极与发射极之间的漏电流。数值越小，代表管子的温度稳定性越好。
  - ➢ 饱和压降（VCE(sat))：
    - 三极管工作在饱和导通状态时，集电极与发射极之间的电压。该值越低，导通时的功耗越小。
  - ➢ 击穿电压（VCEO, VCBO, VEBO)：
    - 分别指集射、集基、射基电极间的最大允许反向耐压，是器件选型时关键的安全指标。
- 交流参数
  - ➢ 特征频率（fT)
    - 指三极管的电流放大倍数 |β| 下降到 1 时的工作频率，是衡量管子高频放大能力的重要指标。当工作频率超过 fT 时，三极管将不再具备电流放大作用。
  - ➢ 极间电容（Cbe, Cbc, Cce)
    - 包括发射结电容、集电结电容等。这些寄生电容在高频信号下会产生显著的容抗，从而限制信号传输速度，是决定器件高频响应的物理基础。

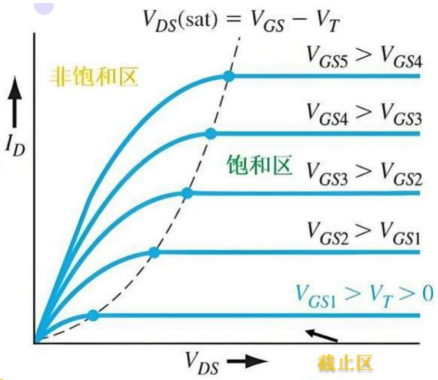
- 直流参数测试
  - ➢ 电流放大倍数（hFE / β)
    - 测试逻辑：给定固定的基极电流 IB，测量集电极电流 IC，通过公式 β = IC / IB 计算得出。
  - ➢ 饱和压降（VCE(sat))
    - 测试逻辑：在给定额定的基极电流 IB 和集电极电流 IC 条件下，直接测量三极管 C-E 两极间的电压值。
  - ➢ 常用仪器：
    - 晶体管参数测试仪、半导体参数分析仪、源表等
- 交流参数测试
  - ➢ 特征频率（fT)
    - 测试逻辑：通过注入高频信号源，逐频点测量放大倍数，最终通过拟合曲线确定截止频率点。
  - ➢ 极间电容(Cbe, Cbc, Cce)
    - 测试逻辑：测试逻辑：反映器件高频特性的关键参数，主要包含输入、输出及反向传输电容，通常在特定偏置电压下测量。
  - ➢ 关键测试设备：
    - 高频网络分析仪、半导体参数分析仪等

场效应管MOSFET的关键特性

- **FET共同本质：分JFET和MOSTFET两类**
  - 单极型导电
    - 仅依靠一种多数载流子(电子或空穴)参与导电过程
  - 电压控制电流
    - 通过栅极电压改变导电沟道宽窄，从而控制输出电流
  - 极高输入阻抗
    - 栅极与沟道物理绝缘，几乎无需驱动电流，能耗极低







- **MOSFET：金属氧化物半导体场效应管，应用最广泛的FET场响应管**

  - 基本结构
    - 由栅极(G)、绝缘层(SiO)、高掺杂的源极(S)和漏极(D)及低掺杂的衬底(B)组成，衬底与源极相连(NMOS)，或与漏极相连(PMOS)，源极(S)、漏极(D)中间通过栅极(G)感应出导电沟道。
  - 工作原理
    - 栅极施加电压时产生垂直电场，在衬底表面感应出与源漏区同类型的电荷，形成连接源漏的导电沟道，从而导通电流。
  - 电压控制器件，开关速度极快
    - 栅极输入阻抗极高，几乎不消耗驱动电流，静态功耗极低，非常适合高频开关和节能应用。

  - 放大作用(饱和区)
    - 栅极输入微小的电压变化，即可引起漏源电流呈线性变化。这一电流经过负载电阻后，能够被转化为幅度大得多的输出电压，从而实现信号的功率放大。
  - 开关作用(截止 / 导通)
    - 当栅源电压(VGS)小于开启阈值电压时，漏源之间无法形成导电沟道，器件处于高阻态，相当于“开关断开”。
    - 当VGS足够大时，导电沟道完全开启，器件导通电阻极小，电流顺畅通过，相当于“开关闭合”。

©2026 Fluke Calibration

MOSFET：核心技术参数与测试

FLUKE Calibration

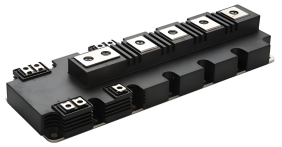
- 直流参数 DC Parameters
  - ➢ 阈值电压（VGS(th)）：
    - MOSFET从截止状态进入导通状态所需的最小栅源电压，决定器件开启难易程度。
  - ➢ 导通电阻（Rds(on)）：
    - 器件完全导通时源极和漏极之间的电阻，直接决定导通时的功率损耗，越低越好。
  - ➢ 最大漏源电压（VDS）：
    - 器件能承受的最大反向击穿电压，决定了器件在电路中的耐压能力。
  - ➢ 最大漏极电流（ID）：
    - 器件工作时允许通过的最大漏极电流，决定了器件的带负载能力。
- 交流与动态参数 AC & Dynamic
  - ➢ 跨导（gm）：
    - 定义为ΔID/ΔVGS，即栅源电压变化引起漏极电流变化的比值，是衡量电压控制电流放大能力的关键指标。
  - ➢ 极间电容（Ciss，Cgs，Cgd）：
    - 主要包括输入电容(Ciss)、栅源电容(Cgs)和栅漏电容(Cgd)。电容值越大，充放电所需时间越长，直接限制器件的开关频率。
  - ➢ 开关时间（tr，tf）：
    - 上升时间(tr)是器件从关断到导通的过渡时间，下降时间(tf)则相反。这两个参数共同决定了MOSFET的开关速度。

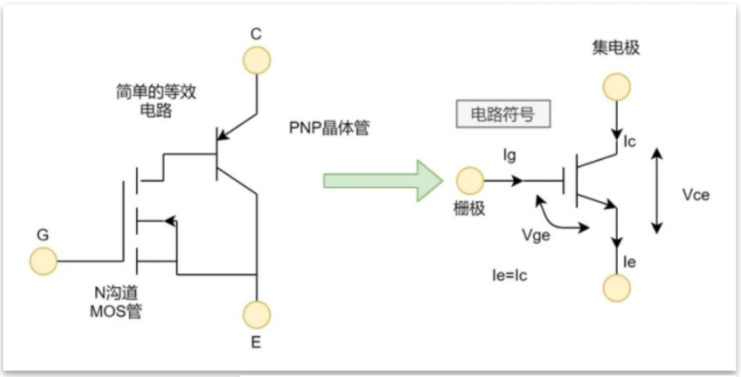
- 静态参数测试
  - ➢ 阈值电压（VGS(th)）
    - 测试逻辑：缓慢提升栅源电压 VGS，当漏极电流 ID 开始出现明显上升的临界点，即为器件的阈值电压。
  - ➢ 导通电阻（Rds(on)）
    - 测试逻辑：在额定栅压下使器件完全导通，通入额定漏极电流 ID，测量此时的漏源电压 VDS，计算 Rds = VDS / ID。
  - ➢ 常用测试仪器：
    - 半导体参数分析仪 、数字源表（SMU）。
- 动态参数测试
  - ➢ 开关特性（tr，tf，Eon，Eoff）
    - 测试逻辑：利用双脉冲测试平台（Double Pulse Test）配合高带宽示波器，模拟实际工况下器件的开通与关断过程，精确测量上升/下降时间及开关损耗。
  - ➢ 极间电容（Ciss，Coss，Crss）
    - 测试逻辑：反映器件高频特性的关键参数，主要包含输入、输出及反向传输电容，通常在特定偏置电压下测量。
  - ➢ 常用测试仪器：
    - 双脉冲测试板、高速示波器（1GHz+）、LCR电桥、高频阻抗分析仪、半导体参数分析仪 。

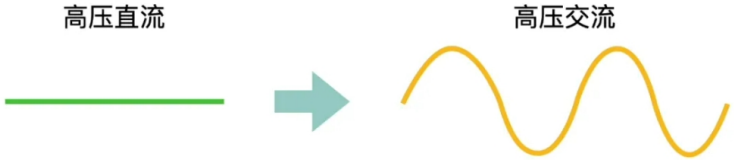
IGBT的关键特性

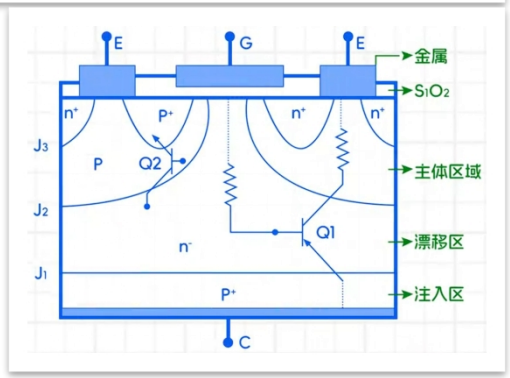
- 结构本质：MOSFET + BJT 复合器件
  - ➢ 控制部分（MOSFET）
    - 继承电压驱动结构，栅极电压控制，开关速度快，驱动功率小。
  - ➢ 导通部分（BJT-PNP）
    - 继承双极型导电特性，饱和压降低，通流能力强，耐高压。
- 工作原理
  - ➢ 开通沟道
    - 栅极加正向驱动电压，内部形成MOS导电沟道。
  - ➢ 触发电流
    - MOS沟道为PNP三极管提供基极电流，触发导通。
  - ➢ 承载功率
    - 三极管全面导通，承担高压大电流主回路。











电压控制	导通损耗低	开关速度	功率容量
驱动功率仅毫瓦级，远低于电流控制的BJT。栅极驱动电压仅需10-15V	通态压降仅1-3V(比MOSFET低50%)，适合大电流场景。1200V/100A IGBT导通损耗约0.5-1.5W	1-20kHz，支持高频逆变。光伏逆变器中可实现20kHz开关频率	单模块可承受6500V/600A,适用于高压大功率场景。如特斯拉Model 3逆变器采用24个IGBT模块

- 主要工作区
  - ➢ 放大线性区
    - VGE 电压居中微调，集电极电流 IC 线性连续可调。主要用于拟合正弦波波形、电压连续调节等精密控制场景。
  - ➢ 饱和导通区
    - 栅极施加足额驱动电压，使器件内部完全开通，实现低压降、低功耗运行，主要充当“高速电子开关”使用。
- 应用
  - ➢ 广泛应用于光伏逆变器 • 风电变流器 • 工业变频器 • 新能源汽车电控系统等能源与工业的核心领域。

©2026 Fluke Calibration

IGBT：核心技术参数与测试①

- 静态参数Static Parameters
  - **集电极-发射极额定电压（V_CE额定）：**
    - IGBT能长期承受的最大集电极-发射极反向电压
  - **集电极额定电流（I_C额定）：**
    - IGBT长期工作时，集电极能承受的最大连续电流
  - **栅极开启阈值电压（V_GE(th)）：**
    - 使IGBT开始导通的最小栅极-发射极电压
  - **集电极-发射极导通压降（V_CE(sat)）：**
    - IGBT导通时，集电极与发射极之间的电压降
  - **集电极-发射极漏电流（I_CEO）：**
    - IGBT关断时，集电极与发射极之间的漏电流
  - **栅极漏电流（I_GES）：**
    - 栅极与发射极之间的漏电流
  - **寄生电容：**
    - 包括输入电容（C_iss）、转移电容（C_rss）、输出电容（C_oss），影响IGBT的开关速度和抗干扰能力

- 静态参数测试
  - **集电极-发射极额定电压（V_CE额定）测试：**
    - 测试逻辑：栅极施加负偏压（或0V），使IGBT关断；逐步升高集电极-发射极之间的反向电压，直至漏电流达到规定值时的电压；
  - **集电极-发射极导通压降（V_CE(sat)）测试：**
    - 测试逻辑：栅极施加额定正向驱动电压（如15V），使IGBT完全导通；再向集电极通入额定电流（I_C额定），测量此时集电极与发射极之间的电压降，即为V_CE(sat)；
    - 可测试不同电流下的V_CE(sat)，绘制I_C-V_CE导通特性曲线。
  - **栅极开启阈值电压（V_GE(th)）测试：**
    - 测试逻辑：集电极施加一定正向电压（如10V），通入微小集电极电流（如1mA）；逐步升高栅极-发射极电压，直至集电极电流达到规定值，此时的栅极电压即为V_GE(th) 。
  - **漏电流（I_CEO、I_GES）测试：**
    - I_CEO测试逻辑：栅极悬空，集电极施加额定反向电压，测量集电极与发射极之间的漏电流；
    - I_GES测试：集电极悬空，栅极施加额定电压（如±20V），测量栅极与发射极之间的漏电流。
  - **寄生电容测试：**
    - 测试逻辑：施加固定频率的测试信号；分别测量输入电容（C_iss）、转移电容（C_rss）、输出电容（C_oss），记录不同V_GE下的电容变化曲线。
- 关键测试仪器
  - **半导体参数分析仪等**

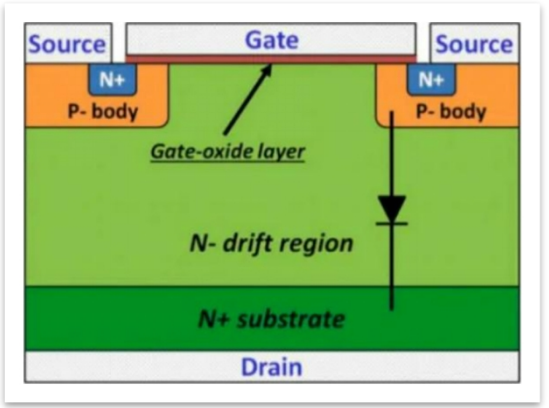
IGBT：核心技术参数与测试②

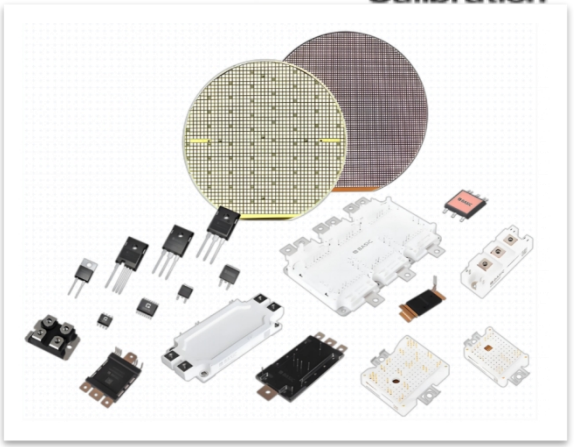
- 动态参数
  - ➢ 开通延迟时间（t_d(on)）：
    - 从栅极施加正向电压，到集电极电流上升至额定电流10%所需的时间
  - ➢ 上升时间（t_r）：
    - 集电极电流从额定电流10%上升至90%所需的时间，反映IGBT开通时的电流上升速度
  - ➢ 关断延迟时间（t_d(off)）：
    - 从栅极撤去正向电压，到集电极电流下降至额定电流90%所需的时间
  - ➢ 下降时间（t_f）：
    - 集电极电流从额定电流90%下降至10%所需的时间，反映IGBT关断时的电流下降速度
  - ➢ 开通损耗（E_on）：
    - IGBT开通过程中产生的功率损耗，与开关速度、驱动电压相关
  - ➢ 关断损耗（E_off）：
    - IGBT关断过程中产生的功率损耗，是高频场景的主要损耗来源
  - ➢ 反向恢复参数：
    - 包括反向恢复电流（I_rr）、反向恢复时间（t_rr）、反向恢复能量（E_rr），与内部寄生二极管相关，影响开关稳定性和EMI。

- 动态参数测试
  - ➢ 测试目的：验证IGBT的开关速度、开关损耗等动态特性，判断器件是否适配高频、高速开关场景，业界标准测试方法为“双脉冲测试法”。
  - ➢ 核心测试项目及方法（以双脉冲测试法为例）：
    - 搭建双脉冲测试电路，将IGBT与功率MOSFET开关、电感（模拟负载）串联在直流母线上，用脉冲信号发生器驱动MOSFET，配合高速示波器、电流/电压探头。
    - 施加第一个脉冲：开启MOSFET，使IGBT正向导通，流过预设的正向电流（I_C额定），稳定一段时间；
    - 短暂关断：关闭MOSFET，IGBT自然关断，短暂间隔（避免器件过热）；
    - 施加第二个脉冲：再次开启MOSFET，此时IGBT承受反向电压，发生反向恢复过程；
    - 波形捕捉：用高速示波器配合高频电流探头、电压探头，捕捉IGBT的电压（V_CE）和电流（I_C）波形；
    - 参数计算：从波形中直接测量t_d(on)、t_r、t_d(off)、t_f，通过积分计算E_on、E_off、Q_g，读取I_rr、t_rr、E_rr。
- 关键测试仪器
  - ➢ 双脉冲测试平台（DPT）、100M+ 带宽高速示波器、专用短路测试台等

SiC碳化硅的关键特性

- 类似硅基 MOSFET，属于宽禁带半导体（WBG）
  - 材料：SiC = 硅 + 碳
  - 主流是 N沟道、垂直结构：
    - 栅极 G：控制端（电压控制）
    - 源极 S：电子发射端
    - 漏极 D：高压端（接直流母线）
    - 电流方向：漏极D → 漂移层 → 沟道 → 源极S（垂直向下）
- 主要工作状态
  - 截止状态：
    - 栅源电压VGS<开启电压VGS(th)，无导电沟道，IDS≈0，器件截止，此时漏源之间可承受高压；
  - 导通状态：
    - 当VGS≥VGS(th)时，栅极产生强电场，形成N型垂直导电沟道，漏源之间施加正向电压VDS，电子从源极（表面）流向漏极（衬底），形成大电流IDS；
- 主要工作区：
  - 可变电阻区：
    - 大功率开关场景下，SiC-MOSFET通常工作在可变电阻区（导通时，低损耗）和截止区；
  - 饱和区：
    - 放大场景下，IDS基本不随VDS变化，仅由VGS控制，无需复杂散热措施即可承受大电流。





- 关键特性优势
  - 宽禁带，高击穿场强，高导热性
  - 开关速度快，能量损耗低
  - 同耐压同电流：SiC MOS 体积更小、导通电阻更小
  - 耐高温：SiC 可工作到 175℃~200℃，硅一般 150℃上限
  - 漏电流：SiC 高温下漏电流几乎不涨，硅会暴涨
  - 开关频率：SiC 可做到几百 kHz~MHz 级，硅 MOS 做不到
  - 适合大功率场景
- 核心场景
  - 800V 车载高压平台
  - 高效光伏逆变器
  - 新型储能系统

©2026 Fluke Calibration

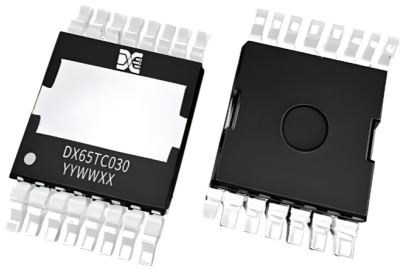
SiC：核心技术参数与测试

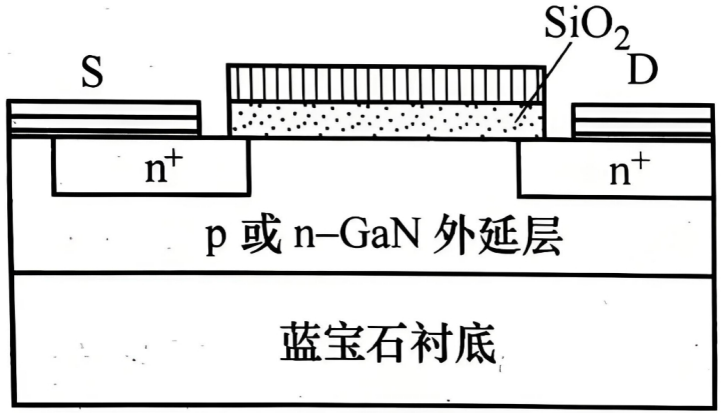
- 主要参数
  - **漏源击穿电压BVDS：**
    - 栅源短路时，漏源之间的最大允许电压，反映器件耐压能力；
  - **漏源导通电阻RDS(on)：**
    - 饱和导通时，漏源之间的电阻；
  - **漏源最大电流ID(max)：**
    - 长期允许连续通过的漏源电流，反映器件通流能力；
  - **开启电压VGS(th)：**
    - 使器件导通的最小栅源电压；
  - **开关时间（ton、toff）：**
    - 导通时间和关断时间，均为纳秒级，反映开关速度；
  - **最大漏源功率PDM：**
    - 器件长期工作时允许消耗的最大功率；
  - **栅源漏电流IGSS：**
    - 栅源之间施加额定电压时的漏电流，数值极小（nA级），反映绝缘层绝缘性能。

- 主要参数测试
  - **漏源击穿电压BVDS测试：**
    - 栅源短接，逐步升高漏源电压，直至IDS突增（发生击穿），记录此时的电压即为BVDS。
  - **漏源导通电阻RDS(on)测试：**
    - 给栅源施加足够大的正向电压（VGS≥VGS(th)+2V），确保器件饱和导通，通入额定漏源电流ID，测量漏源之间的电压VDS，根据公式RDS(on)=VDS/ID计算导通电阻。
  - **漏源最大电流ID(max)测试：**
    - 给栅源施加足够VGS，逐步增大漏源电流ID，同时用热电偶监测器件结温，当结温达到额定最高结温（175℃~200℃）或器件出现损坏时，此时的ID即为ID(max)。
  - **开关时间（ton、toff）测试：**
    - 搭建SiC-MOSFET开关测试电路，施加高频脉冲栅极驱动信号，使用高速示波器观测漏源电流IDS和漏源电压VDS的波形，读取ton和toff。
- 关键测试仪器
  - **可调直流高压源、直流大电流源、高精度电压表、高精度电流表、半导体参数分析仪、温度测试仪、热电偶、高速示波器、脉冲信号发生器、绝缘耐压测试仪等**

GaN氮化镓的关键特性

- GaN 器件结构
  - AlGaN/GaN 异质结横向平面结构， 采用水平横向导电，没有硅MOS、IGBT那种垂直漂移耐压层，也无传统PN结堆叠，源极、栅极、漏极都做在晶圆表面，属于平面型宽禁带功率器件（WBG）。
- 工作原理
  - 利用AlGaN与GaN材料极化效应，在异质结界面自发形成二维电子气2DEG，作为天然高浓度导电沟道；
  - 通过栅极施加电压改变下方耗尽层宽度，夹断或放开2DEG沟道，从而控制器件关断与导通，实现电压控开关。
    - 正压导通，负压或零关断
- 核心特性
  - 禁带宽度大、击穿电场高； 电子迁移率高、寄生电容极小、开关速度远超硅器件； 高频损耗低、体积可做极小、高温漏电流低，驱动简单，适合高频轻量化场景。
- 典型应用
  - 手机/笔记本氮化镓快充、高频开关电源、服务器电源、射频微波通信、光伏微逆变、车载高频电源。
  - 超高频、小型化、高效率，下一代高频电力电子核心材料





器件	结构	沟道来源	主打优势	适用频率
硅MOS	垂直结构	掺杂反型沟道	成本低、工艺成熟	几十kHz
SiC MOS	垂直结构	掺杂反型沟道	高压、高温、高可靠	百kHz级
GaN HEMT	横向平面异质结	极化2DEG天然沟道	超高频、小体积、低损耗	MHz级

©2026 Fluke Calibration

GaN：核心技术参数与测试

- 主要参数
  - **漏源击穿电压BVDS：**
    - 栅源短路时的漏源击穿电压，主流量产型号为650V，高压型号可达1200V；
  - **漏源导通电阻RDS(on)：**
    - 饱和导通时的漏源电阻，通常为几毫欧，数值随温度变化显著；
  - **漏源最大电流ID(max)：**
    - 长期允许连续通过的漏源电流，通常为几十安培，高温下电流能力会显著衰退；
  - **开启电压VGS(th)：**
    - 增强型GaN-HEMT的开启电压约1.5V，阈值电压较低，需注意防止误导通；
  - **开关时间（ton、toff）：**
    - 导通和关断时间，通常为几纳秒到几十纳秒，开关速度快于SiC器件；
  - **动态电阻Rdson(dyn)：**
    - 动态工作状态下的漏源导通电阻，需通过高频脉冲测试，反映器件高频工作时的损耗特性。
  - **最高工作频率（fmax）**
    - 具有极高的截止频率，适合高频、高功率密度的电源变换与射频通信应用场景。

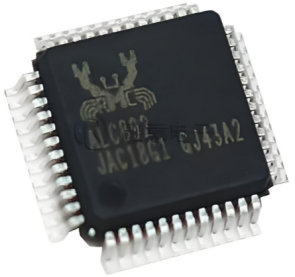
- 主要参数测试
  - **漏源击穿电压BVDS测试：**
    - 栅源短接，逐步升高漏源电压，监测漏源漏电流，当漏电流突增时，记录此时的电压（无法像SiC器件那样准确读取，需结合漏电流判断）。
  - **动态电阻Rdson(dyn)测试：**
    - 施加100kHz~500kHz方波脉冲开关电应力进行测试。
  - **开关时间（ton、toff）测试：**
    - 搭建GaN-HEMT开关测试电路，施加高频脉冲驱动信号，用高速示波器观测输入电流和输出电流波形，读取开关时间。
  - **漏源最大电流ID(max)测试：**
    - 给栅源施加额定VGS，逐步增大漏源电流，监测结温，当结温达到额定值或电流出现明显衰退时，记录此时的ID即为ID(max)。
  - **高频射频参数**
    - 使用矢量网络分析仪(VNA)进行S参数测试，分析器件的截止频率、最大振荡频率等高频特性，确保射频性能达标。
- 关键测试仪器
  - **可调直流高压源、直流大电流源、高精度电压表、高精度电流表、半导体参数分析仪、高速示波器、脉冲信号发生器、温度测试仪、热电偶、矢量网络分析仪VNA等**

IC集成电路的关键特性

- 底层本质
  - 所有IC内部，都是海量MOSFET(CMOS)或BJT等微小器件通过光刻、刻蚀等精密工艺，集成在一块硅片上，并通过金属导线实现器件间的电路互联，构成芯片硅片上的微型世界

- 数字IC
  - 用途：处理离散的0和1数字信号，逻辑运算能力强。
  - 参数：
    - 工作电压：芯片稳定运行的供电范围，如1.2V/3.3V/5V
    - 输入高低电平阈值：区分逻辑“0”与“1”的关键电压界限
    - 传输延迟时间：信号通过逻辑门的延迟，决定电路最大运行频率
    - 静态功耗：电路非翻转状态下的功耗，关乎电池续航能力
    - 扇出系数：单个输出端能驱动同类型输入端的最大数量

- 模拟IC（运放）
  - 用途：处理连续变化的模拟信号，如声音、温度等。
  - 参数
    - 输入失调电压：输入为零时的输出偏差电压
    - 开环增益：无反馈时的电压放大倍数
    - 温漂：失调电压随温度变化的程度
    - 共模抑制比（CMRR）：抑制共模干扰信号的能力
    - 带宽：运放保持增益稳定的频率范围



- ADC / DAC 转换芯片
  - 原理：
    - 连接模拟世界与数字世界的桥梁。ADC将模拟信号转化为数字编码，DAC则将数字信号还原为模拟信号。
  - 应用：
    - 各类数据采集系统、光伏/电网数据采样、高保真音频解码、精密仪器测量。
  - 参数：
    - 分辨率：输出变化1LSB所需输入变化量
    - 采样速率：每秒完成模数转换的次数
    - 信噪比（SNR）：有效信号功率与噪声功率之比
    - 积分非线性（INL）：实际传输曲线偏离理想直线的最大值
    - 微分非线性（DNL）：相邻两个刻度间实际变化与理想值的偏差

- 测试仪器
  - 逻辑分析仪、半导体参数分析仪、任意波形信号源、直流功耗测试仪、运放参数测试仪、射频信号源、高带宽示波器、网络分析仪、ADC/DAC自动测试系统、超高精度标准源、实时频谱分析仪等。

©2026 Fluke Calibration

半导体的分类总结

大类	代表器件	控制方式	载流子	核心原理	主要用途
二极管	整流管、稳压管、LED、光电管、光伏电池	无控制极，单向导通	电子+空穴	单个PN结、单向导电/光电转换	整流、稳压、发光、光伏发电
双极晶体管BJT	NPN、PNP三极管	电流控电流	电子+空穴	基极电流控制集电极电流	信号放大、低频开关
场效应管FET	JFET、NMOS、PMOS、CMOS	电压控电场	单一种多子	电场改变沟道宽窄	芯片、逻辑电路、低压开关
功率器件	功率MOS、IGBT、晶闸管、SiC/GaN	电压/触发控制	电子+空穴	MOS与BJT复合、宽禁带耐压高	光伏逆变、风电、电动车、变频器
光电器件	光耦、光电二极管、光敏管	光激励	光生电子空穴对	光子激发载流子、电场分离	信号隔离、光检测、传感
集成电路IC	CPU/MCU/运放/ADC	内部CMOS阵列	电子+空穴	海量MOS集成	数字运算、模拟处理、控制

©2026 Fluke Calibration

讲座内容

- 半导体及其测试的基础知识
- **半导体参数精密分析仪性能一览**
- 半导体参数精密分析仪的校准规范解读
- 半导体参数精密分析仪的校准方案探讨

©2026 Fluke Calibration

Keithley 4200A-SCS半导体参数分析仪

- Keithley 4200A- SCS
  - 泰克/吉时利面向半导体器件、材料、工艺与可靠性研究的高端一体化参数分析平台，整合前沿测试技术与专业软件，为科研与制造提供高精度分析能力。
- 三种表征一机完成
  - 一台主机同步完成直流 I- V、电容- 电压 C- V、高速脉冲 I- V 三类核心电学表征。
- 模块化架构
  - 采用模块化硬件 + Clarius+ 图形化软件，支持灵活配置，适应多样的测试需求
- 自动化流程
  - 支持自动通道切换、连接补偿与参数提取，实现测试流程的全面自动化。
- 行业主流标准
  - 显著降低学习与测试成本，是全球高校、晶圆厂及器件建模实验室的首选。

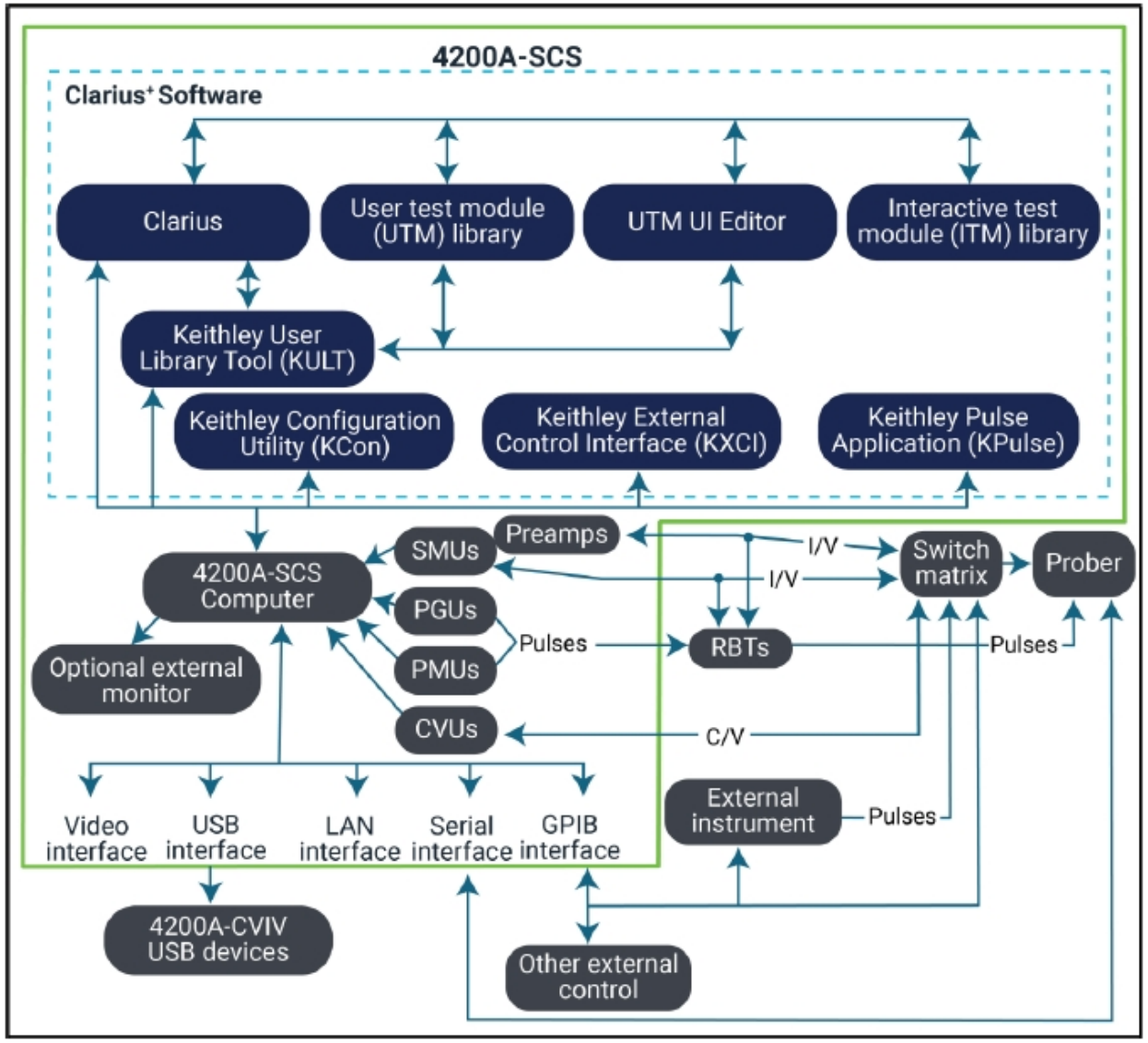




©2026 Fluke Calibration

4200A-SCS 系统整体构成

- 主机平台（4200A- SCS）
  - 一体化主机设计，集成了高速同步总线与精密触发系统，作为系统的“中枢神经”，保障所有硬件模块之间的同步与数据传输稳定性。
- 核心硬件模块
  - SMU/CVU/PMU：分别支持直流IV、CV、脉冲IV的精密测试。
    •CVIV：内置多路自动切换模块，实现测试功能的无缝切换。
- 软件系统
  - Clarius+：功能强大的图形化测试软件，提供灵活的测试配置、执行与数据分析功能。
  - KCon：专业的系统配置工具，实现硬件模块的统一管理与状态监控。
- 标准附件
  - 包含前置放大器、三轴电缆、SMA电缆、标准接地线及专业屏蔽测试夹具等全套附件，从信号传输到屏蔽防护，全方位保障测试精度与设备安全。

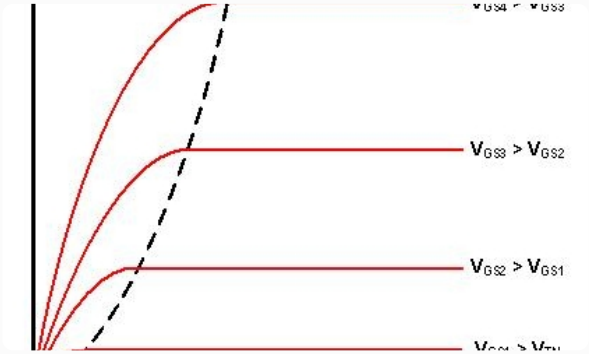


4200A-SCS 可测试与分析的半导体对象及参数

典型应用

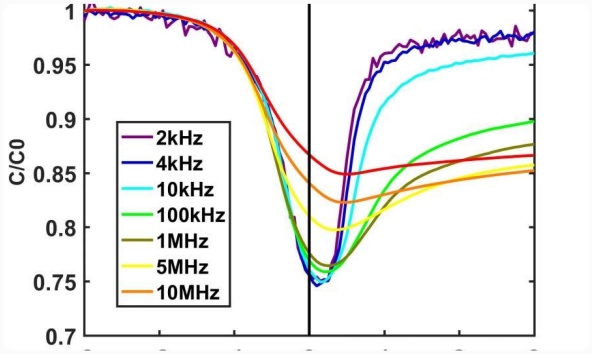
- MOSFET, BJT 晶体管
- 材料表征
- 非易失性存储设备
- 电阻率系数和霍尔效应测量
- NBTI/PBTI
- III–V 族器件
- 失效分析
- 纳米器件
- 二极管和 pn 联结
- 太阳能电池
- 传感器
- MEMS 器件
- 电化学
- LED 和 OLED

直流 I-V 特性 (SMU)



电阻:2/4线电阻、R-V 特性曲线分析
二极管:正向导通电压、反向漏电流、击穿电压
MOSFET/BJT:阈值电压、跨导、亚阈值摆幅、电流增益、厄尔利电压等关键特性

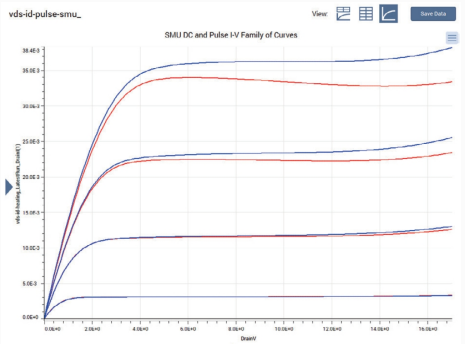
电容-电压 C-V 特性 (CVU)



C-V 曲线全区域扫描：
覆盖积累区、耗尽区与反型区，全面反映器件物理结构特性。

关键参数提取：
精确计算氧化层厚度 (Tox)、平带电压 (Vfb) 及掺杂浓度剖面 (N-profiles)。

脉冲与瞬态测试 (PMU)



动态特性分析：
支持高分辨率脉冲 I-V 测试，规避器件自热效应，还原真实动态性能。

瞬态响应：
精准捕捉电流/电压波形的瞬态变化，深入分析器件内部陷阱电荷响应。

4200A-SCS SMU 源测量单元：直流 I-V 测试核心

- SMU，即源测量单元（Source Measure Unit）
  - 核心特点：源测一体，实时同步
  - 将电压源、电流源、高精度电压表和高精度电流表的功能集成在单一模块中。
  - 连接DUT和分析系统的桥梁，方便高效精准获取器件完整I-V特性曲线

- 宽幅电压输出
  - 支持双向电压输出，最高可达±210 V

- 极致电流量程
  - 覆盖10 aA ~ 1 A的超宽动态范围，兼顾微小与大电流。

- 超高测量精度
  - 电压分辨 0.2 μV，电流分辨可达 10 aA，捕捉微小信号。

- 核心应用场景
  - 半导体器件（MOSFET/BJT）、二极管、功率器件的直流特性分析。

SMU 电流测量 [4]

				测量		源	
		电流量程 [1]	最大电压	分辨率 [3]	精度 ±(% 读数 + 安培)	分辨率 [3]	精度 ±(% 读数 + 安培)
4210-SMU 高功率 SMU 和 4211-SMU 高功率 SMU [2]		1 A	21 V	1μA	0.100% + 200μA	50μA	0.100% + 350μA
		100 mA	210 V	100 nA	0.045% + 3μA	5μA	0.050% + 15μA
	4200-SMU 中等功率 SMU 和 4201-SMU 中等功率 SMU [2]	100 mA	21 V	100 nA	0.045% + 3μA	5μA	0.050% + 15 μA
		10 mA	210 V	10 nA	0.037% + 300 nA	500 nA	0.042% + 1.5μA
		1 mA	210 V	1 nA	0.035% + 30 nA	50 nA	0.040% + 150 nA
		100 μA	210 V	100 pA	0.033% + 3 nA	5 nA	0.038% + 15 nA
		10 μA	210 V	10 pA	0.050% + 600 pA	500 pA	0.060% + 1.5 nA
		1 μA	210 V	1 pA	0.050% + 100 pA	50 pA	0.060% + 200 pA
		100 nA	210 V	100 fA	0.050% + 30 pA	5 pA	0.060% + 30 pA
42XX-SMU 加选配 4200-PA 前端放大器		10 nA	210 V	10 fA	0.050% + 1 pA	500 fA	0.060% + 3 pA
		1 nA	210 V	1 fA	0.050% + 100 fA	50 fA	0.060% + 300 fA
		100 pA	210 V	300 aA	0.100% + 30 fA	15 fA	0.100% + 80 fA
		10 pA	210 V	100 aA	0.500% + 15 fA	5 fA	0.500% + 50 fA
		1 pA	210 V	10 aA	1.000% + 10 fA	1.5 fA	1.000% + 40 fA
限压值：双极性限压值设置，可以设置所选电压量程的 10% 到满量程区间任意值。							

SMU 电压测量 [3]

电压范围 [1]	最大电流		测量		源	
	4200-SMU 和 4201-SMU	4210-SMU 和 4211-SMU	分辨率 [2]	精度 ±(% 读数 + 伏特)	分辨率 [2]	精度 ±(% 读数 + 伏特)
200 V	10.5 mA	105 mA	200 μV	0.015% + 3 mV	5 mV	0.02% + 15 mV
20 V	105 mA	1.05 A	20 μV	0.01% + 1 mV	500 μV	0.02% + 1.5 mV
2 V	105 mA	1.05 A	2 μV	0.012% + 150 μV	50 μV	0.02% + 300 μV
200 mV	105 mA	1.05 A	0.2 μV	0.012% + 100 μV	5 μV	0.02% + 150 μV
限流值：双极性限流值设置，可以设置所选电流量程的 10% 到满量程区间任意值。						

SMU 最大电容测量

	电流范围	Force HI 和 Force LO 端子之间的最大负载电容	Force HI 和 Guard 端子之间的最大保护电容	Guard 和 Force LO 端子之间的最大屏蔽电容
4211-SMU	1 A	100 μF	5 nF	10 nF
4201-SMU 或 4211-SMU	100 mA	100 μF		
4201-SMU 或 4211-SMU	100 nA ~ 10 mA	10 μF		
4201-SMU 或 4211-SMU，带 4200-PA 前端放大器	1 nA ~ 10 nA	10 μF		
	1 pA ~ 100 pA	1 μF		
4200-SMU, 4210-SMU	所有电流范围	10 nF	1500 pF	3300 pF

4200A-SCS SMU核心概念：四象限电压电流操作详解

- **“四象限操作”是SMU（源测量单元）区别于普通电源或电子负载的根本特性。**
  - **它基于一个以电压(V)为横轴，电流(I)为纵轴的二维坐标系，根据电压电流的正负组合，定义了四种截然不同的能量流向与工作模式。**

第一象限：正电压 · 正电流 (V > 0, I > 0)

源模式 (Sourcing)：SMU 主动向被测器件(DUT)提供正向功率，此时SMU作为一个标准的直流电源。

第二象限：负电压 · 正电流 (V < 0, I > 0)

阱模式 (Sinking)： SMU施加负电压并吸收DUT产生的正向电流，此时SMU吸收功率，起到能量“阱”的作用。

第三象限：负电压 · 负电流 (V < 0, I < 0)

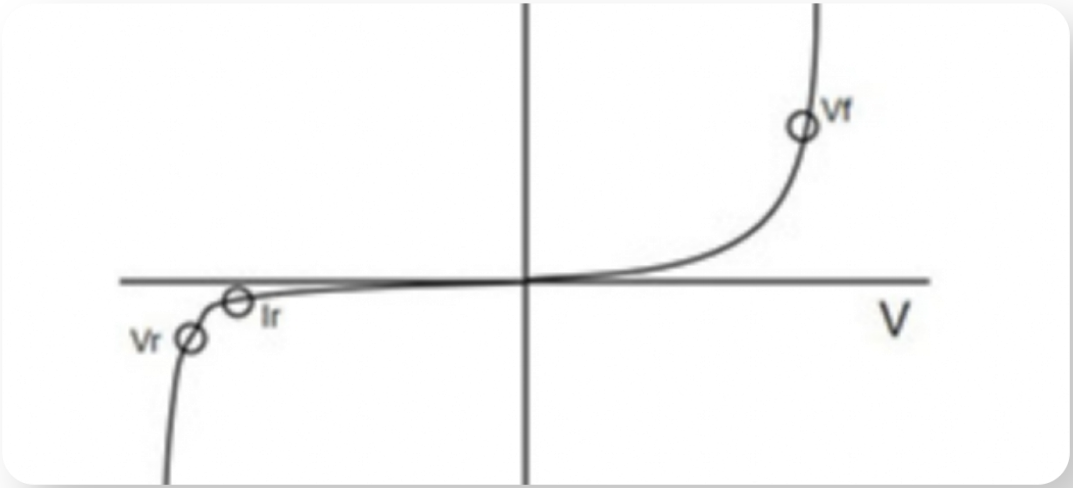
源模式 (Sourcing)：SMU向DUT提供负向的电压和电流，作为“反向功率源”，适用于反向偏置测试场景。

第四象限：正电压 · 负电流 (V > 0, I < 0)

阱模式 (Sinking)： SMU施加正电压并吸收DUT产生的负向电流，此时其功能等同于一台精密的电子负载。

正向导通 · 第一象限

SMU 作为**电源**输出，向二极管提供正向偏置电压，同步精准测量正向导通电流，直观描绘器件在导通状态下的伏安特性曲线。



反向截止 · 第四象限

SMU 切换为**电子负载（阱）**模式，施加反向电压并测量微小的反向漏电流，精准评估器件在截止状态下的绝缘性能与耐压能力。

4200A-SCS SMU核心概念二：双向电压输出

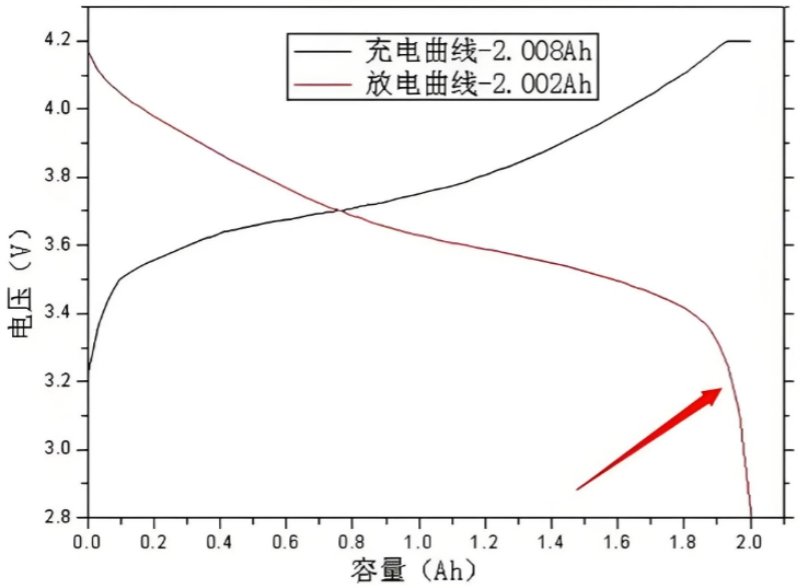
- **“双向电压输出”是指SMU能够同时输出正极性（+V)和负极性（-V)的电压，无需重新配置硬件连线，即可灵活实现充放电、正反向偏置等多种测试需求。**
  - **Keithley 4200A 参数指标：SMU 模块支持高达±210V的宽范围输出能力，可覆盖从 -210V 到 +210V 之间的任意电压点，为高电压器件测试提供强大支持。**

全面的器件特性表征
支持对二极管正向导通与反向击穿、晶体管正负偏置行为进行一站式测试，无需切换测试夹具。

电池与光伏器件测试
可在同一测试流程中完成对电池、超级电容等储能器件的充电(正电压)和放电(负电压)循环测试。

材料科学物理研究
在介电材料等研究中，可施加正负对称电场，精准研究材料的极化、疲劳及电压响应特性。

双向电压输出技术赋予了SMU独特的能力，使其能够灵活模拟电池在实际工况下的完整充放电循环过程。



充电过程 (第一象限)
SMU作为高精度电源输出正电压，向被测电池提供能量，实现稳定、可控的恒流或恒压充电。

放电过程 (第四象限)
SMU切换为“电子负载”模式，吸收电池释放的电流，并精准控制放电电压，模拟电池对外供电的场景。

通过全象限工作模式，研究人员能精确测量电池全生命周期的性能变化，是电池研发与品控的核心技术手段。

4200A-SCS CVU：半导体表征的参考标准

- Keithley 4200A CVU（Capacitance-Voltage Unit）
  - 4200A-SCS半导体特性分析系统的核心组成部分
  - 专为半导体器件的研发、表征和质量控制而设计，提供精准、全面的器件特性分析能力。
    - 可精确获取氧化层厚度、掺杂浓度剖面、平带电压等核心物理参数，辅助器件分析。
    - 全面覆盖 MOSFET、二极管、太阳能电池、MEMS传感器等多种半导体器件的研发测试需求
  - 测量过程
    - 在被测器件（DUT）两端施加小幅度的交流（AC）测试信号，并叠加扫描的直流（DC）偏置电压。
    - 精确测量器件的交流阻抗随直流偏置电压变化的动态响应过程。
    - 计算电容基于测得的交流电压与电流的幅值比和相位差，计算出器件的复数电容。
    - 逐步改变直流偏置电压，重复测量并记录，最终绘制出一条完整的C-V曲线。

核心功能
支持电容-电压(C-V)、电容-频率(C-f)、电容-时间(C-t)等多种特性测量模式。

宽频测量
覆盖 1 kHz 至 10 MHz 的频率范围，满足不同器件在不同频段的响应特性分析需求。

丰富的输出参数
Cp-Gp (并联), Cs-Rs (串联), Z-θ (阻抗-相位), Y-θ (导纳-相位), 以及损耗因子 D。

直流偏置
内置 ±30 V 偏置，配合 Bias Tee 扩展可支持高达 ±210 V 的宽范围偏置电压。

3. 多频率电容 – 电压单元

	4210-CVU	4215-CVU
基本信息		
测量配置	四端子对，High POT，High CUR，Low POT，Low CUR	四端子对，High POT，High CUR，Low POT，Low CUR
输出接口	四个 SMA 接口（母头）	四个 SMA 接口（母头）
标配电缆	100Ω, SMA（公头）到 SMA（公头）, 1.5 m, 4 根	100Ω, SMA（公头）到 SMA（公头）, 1.5 m, 4 根
选配电缆	100Ω, SMA（公头）到 SMA（公头）, 3 m	100Ω, SMA（公头）到 SMA（公头）, 3 m
测量功能		
测量参数	C_P–G, C_P–D, C_S–RS, C_S–D, R–jX, Z–theta	C_P–G, C_P–D, C_S–RS, C_S–D, R–jX, Z–theta
量程	自动和固定	自动和固定
测试速度	Fast, Normal, Quiet, 和自定义	Fast, Normal, Quiet, 和自定义
测试信号		
频率范围	1 kHz ~ 10 MHz	1 kHz ~ 10 MHz
最小分辨率	1 kHz, 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz, 视频率量程而定	对整个范围为 1 kHz
源频率精度	±0.1%	±0.1%
信号输出电平范围	10 mV rms ~ 100 mV rms	10 mV rms ~ 1 V rms
分辨率	1 mV rms	1 mV rms
精度	±(10.0% + 1 mV rms) 无负载时（在后面板）	±(10.0% + 1 mV rms) 无负载时（在后面板）
输出阻抗	100Ω, 典型值	100Ω, 典型值
DC 偏置功能		
DC 电压偏置范围	±30 V (60 V 差分)	±30 V (60 V 差分)
DC 电压偏置分辨率	1.0 mV	1.0 mV
DC 电压偏置精度	±(0.5% + 5.0 mV) 无负载时	±(0.5% + 5.0 mV) 无负载时
最大 DC 电流	10 mA	10 mA
扫描特性		
提供的扫描参数	DC 偏置电压，频率，AC 电压	DC 偏置电压，频率，AC 电压
扫描类型	线性，自定义	线性，自定义
扫描方向	向上扫描，向下扫描	向上扫描，向下扫描
测量点数	4096	4096

4200A-SCS CVU：测量模式和关键功能

C-V 模式

AC频率恒定，DC电压扫描

通过改变直流偏置电压并记录对应电容值，获取器件电容随电压变化的关系曲线，是半导体器件表征中最常用、最基础的测量模式。

C-f 模式

DC电压恒定，AC频率扫描

在固定的直流偏置条件下，改变交流测试信号的频率，观察器件电容随频率的变化规律，用于分析器件的界面态、频率响应及高频特性。

C-t 模式

DC电压 & AC频率均恒定

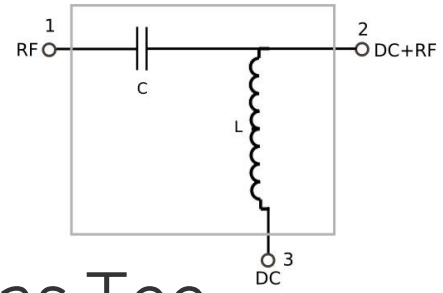
在固定的直流偏置与交流测试频率下，连续监测器件电容随时间的瞬态变化，适用于研究载流子的产生与复合、深能级陷阱及瞬态响应特性。

开路补偿

在不连接被测器件(DUT)的情况下，测量并记录测试系统的总寄生电容，在后续测量中自动减去，消除系统引入的电容误差。

短路补偿

将测试端口短接，测量并记录测试系统的串联电阻和导纳，以修正测试线缆、接触电阻等引起的系统误差，提升测量精度。



Bias Tee

集成在 CVU 内部，实现信号叠加和分离，是实现 C-V 测量的关键射频元件，

4200A-SCS PMU概述：超快速脉冲测量单元

- Keithley 4200A CVU（Capacitance-Voltage Unit）
  - 支持生成可编程高速脉冲，同步测量器件的瞬态电流与电压波形，广泛应用于半导体器件的脉冲 I-V 特性分析测试。
  - 采样率高，无显著热效应的前提下，分析器件的瞬态与稳态特性。

脉冲源特性

电压范围：±40 V (80 Vp-p)
电流范围：±800 mA
最小脉冲宽度：10 ns

测量特性

最高采样率：200 MS/s (5 ns)
垂直分辨率：14位 (16384码)

核心功能

生成纳秒级的电压或电流脉冲，并同步测量器件在脉冲激励下的瞬态响应，捕捉动态信号变化。

通道配置

每个PMU模块提供两个独立的通道，每个通道都集成了高速电压源和同步的、基于时间的电流/电压测量能力。

关键价值

解决传统直流（DC）测量无法解决的问题，例如有效规避器件自热效应，精准支持瞬态特性的前沿研究。

集成优势

将脉冲发生器、高速示波器和精密测量单元的功能集于一体，实现紧凑化、高集成度的测试方案。

		电压范围	电流范围	电流测量精度	电压源精度
4225–PMU与4225–RPM	4225–PMU	40 V	800 mA	±(0.25% + 3 mA)	±(0.25% + 40 mV)
			10 mA	±(0.5% + 100 µA)	
			100 µA	±(0.25% + 1 µA)	
		10 V	200 mA	±(0.25% + 250 µA)	±(0.25% + 10mV)
			10 mA [1]	±(0.25% + 100 µA) [1]	
	4225–PMU与4225–RPM	10 V	10 mA	±(0.5% + 10 µA)	±(0.25% + 10 mV)
			1 mA	±(0.5%+1 µA)	
			100 µA	±(0.5% + 100 nA)	
			10 µA	±(0.5% + 30 nA)	
			1 µA	±(0.5% + 1 nA)	
			100 nA	±(0.5% + 1 nA)	

PMU 脉冲 / 幅值 [1,2]

		10 V 量程	40 V 量程
V_{OUT}	50Ω 至 1 MΩ	−10 V ~ +10 V	−40 V ~ +40 V
	50Ω 至 50Ω	−5 V ~ +5 V	−20 V ~ +20 V
精度		±(0.5% + 10 mV)	±(0.2% + 20 mV)
分辨率	50Ω 至 50Ω	<250 µV	<750 µV
	50Ω 至 1 MΩ	<0.05 mV	<1.5 mV
过冲 / 预冲 / 振铃 [3]	50Ω 至 50Ω	±(3% + 20 mV)	±(3% + 80 mV)
	50Ω 至 50Ω, 最好情况典型值	±(2% + 20 mV)	±(0.8% + 40 mV)
基线噪声		±(0.3% + 1 mV) RMS 典型值	±(0.1% + 5 mV) RMS 典型值
源阻抗		50Ω 标称值	50Ω 标称值
电流至 50Ω 负载 (在满量程时)		±100 mA 典型值	±400 mA 典型值
短路电流		±200 mA	±800 mA
输出限制保护		可编程极限，保护被测器件	

PMU 脉冲定时

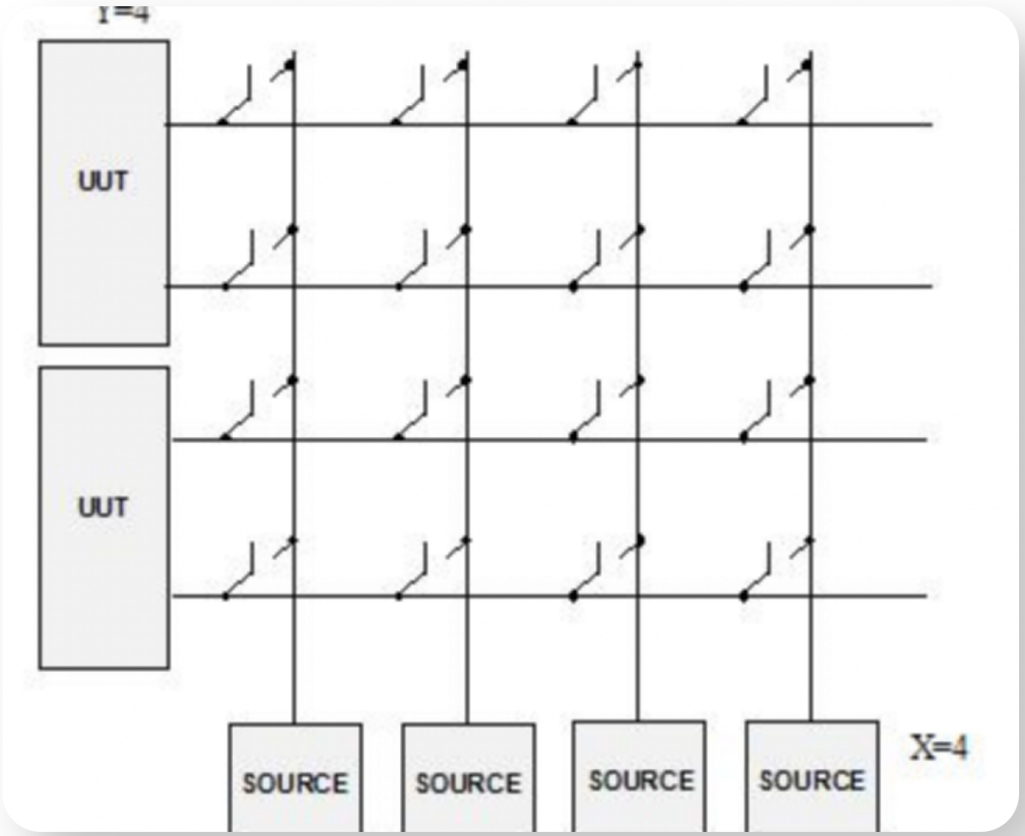
	10 V 量程仅源	10 V 量程带测量	40 V 量程仅源	40 V 范围带测量
频率范围	1 Hz ~ 50 MHz	1 Hz ~ 8.3 MHz	1 Hz ~ 10 MHz	1 Hz ~ 3.5 MHz
定时分辨率	10 ns	10 ns	10 ns	10 ns
RMS 抖动 (时间周期，宽度), 典型值	0.01% + 200 ps	0.01% + 200 ps	0.01% + 200 ps	0.01% + 200 ps
周期范围	20 ns ~ 1 s	120 ns ~ 1 s	100 ns ~ 1s	280 ns ~ 1s
精度	±1%	±1%	±1%	±1%
脉冲宽度范围	10 ns ~ (周期 −10 ns)	60 ns ~ (周期 −10 ns)	50 ns ~ (周期 −10 ns)	140 ns ~ (周期 −10 ns)
精度	±(1% + 200 ps)	±(1% + 200 ps)	±(1% + 5 ns)	±(1% + 5 ns)
可编程跳变时间 (0%–100%)	10 ns ~ 33 ms	20 ns ~ 33 ms	30 ns ~ 33 ms [1]	100 ns ~ 33 ms
跳变上升速率精度	±1%(跳变 > 100 ns)	±1%(跳变 > 100 ns)	±1%(跳变 > 1 µs)	±1%(跳变 > 100 ns)
固态继电器开 / 关时间	25µs	25µs	25µs	25µs

电阻 [2]	10V 量程		40V 量程	
	最大电压 [2]	最大电流 [2]	最大电压 [2]	最大电流 [2]
1 Ω	0.196 V	196 mA	0.784 V	784 mA
5 Ω	0.909 V	182 mA	3.64 V	727 mA
10 Ω	1.67 V	167 mA	6.67 V	667 mA
25 Ω	3.33 V	133 mA	13.3 V	533 mA
50 Ω	5.00 V	100 mA	20.0 V	400 mA
100 Ω	6.67 V	66.7 mA	26.7 V	267 mA
250 Ω	8.33 V	33.3 mA	33.3 V	133 mA
1 kΩ	9.52 V	9.5 mA	38.1 V	38.1 mA
10 kΩ	9.95 V	995 µA	39.8 V	3.98 mA

4200A-SCS CVIV 多路自动切换模块：效率核心



核心定义：CVIV的核心是一个**高速、低漏电的电子开关矩阵**，它的每个输出通道都配备了一组独立的电子开关阵列，以实现灵活配置。



核心作用
无需换线、无需抬针，即可自动在I-V测试和C-V测试之间无缝切换。

通道配置
提供4个独立通道，可灵活配置为SMU、CV HI、CV LO、Guard等多种工作模式。

直观显示
配备彩色LCD显示屏，可自定义显示端子名称(如Source/Drain/Gate)，方便快速识别。

效率提升
据官方数据显示，可将整体测试搭建时间与用户的学习上手成本降低高达50%。

Keysight B1500A系列：半导体器件分析仪

- B1500A：半导体器件分析仪，面向中小功率半导体器件（CMOS、BJT、TFT、纳米器件等）的直流/交流参数表征，是实验室级精密器件分析平台。
- B1505A：功率器件分析仪/曲线追踪仪，面向大功率器件（IGBT、MOSFET、SiC/GaN宽禁带器件），支持超高压/超大电流测试。
- B1506A：电路设计级功率器件分析仪，聚焦功率电路设计验证，覆盖宽温域与全参数快速测试，适配功率器件量产与选型评估。
- 系统基本组成
  - 10槽模块化架构，内置GNDU接地单元、SSD、15英寸触控LCD、USB/LAN/GPIB接口，运行Windows系统+EasyEXPERT软件。
  - 可插拔测量模块：
    - SMU系列（HPSMU/MPSMU/HRSMU/MCSMU）：源测量单元，负责电压/电流输出与精密测量
    - MFCMU：多频电容测量单元，实现C-V阻抗测试。
    - SPGU/WGFMU：脉冲/任意波形发生器，支持脉冲测试与快速采样。
    - 功率扩展模块（B1505A/B1506A专属）：UHVU超高压单元、UHCU超大电流单元、HVSMU/HCSMU等功率模块。
  - 附件系统：测试夹具、互连电缆、屏蔽盒、ASU/SCUU/GSWU等信号切换/防护组件、温控附件（B1505A/B1506A）。
  - 软件：EasyEXPERT图形化软件，提供Tracer/Application/Classic三种测试模式，内置200+测试库。

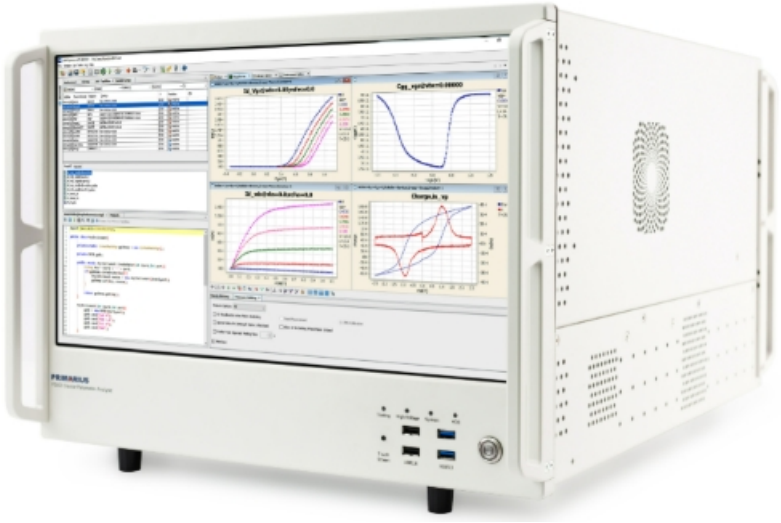


参数	B1500A	B1505A	B1506A
电压范围	±200V（HPSMU）、±100V（MPSMU/HRSMU）	±10kV（UHVU）、±3000V（HVSMU）	±3000V
电流范围	±1A（HPSMU）、±100mA（MPSMU/HRSMU）	±1500A（UHCU）、±2.5A（HVMCU）	20A/500A/1500A（可选）
测量分辨率	电流10aA、电压0.5μV	nA级~A级宽范围覆盖	电流10fA
电容测试	1kHz~5MHz，支持Cp-G/Cs-Rs等	1kHz~5MHz，高压偏置下C-V	1kHz~1MHz
脉冲能力	窄脉冲测试	μs级脉冲，防器件自热	10μs~1000s
温域能力	无内置温控	支持外接温控	-50℃~+250℃（集成温控）
核心能力	直流IV、交流CV、高分辨率微电流	超高功率IV、栅电荷Qg、功率损耗	全参数快速表征、自动生成器件手册

上海概伦电子：FS800器件参数分析仪

产品简介

FS800 器件参数分析仪是概伦电子的新一代半导体器件电学特性分析设备，具有功能全面配置灵活等特点，在一台设备中实现了电流电压(IV)测试、电容电压(CV)测试、快速波形发生与测试、低频噪声测试以及高速时域信号采集，可广泛应用于新材料和新器件研究、电性参数测试、器件模型数据测试、可靠性测试等领域。



性能强大

量程宽精度高

支持高速采样时域信号采集、

任意线性波形生成

功能完善

单机可支持高精度

IV、CV、脉冲IV、高速波形

和瞬态IV采样等测试应用

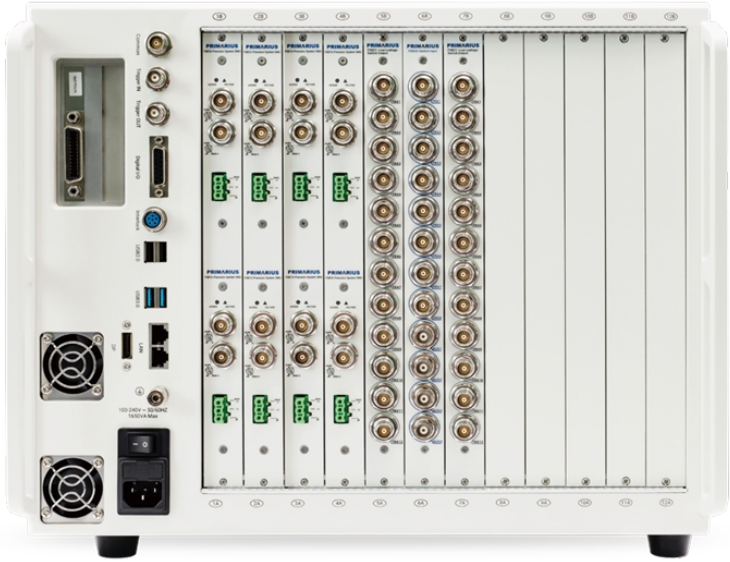
可扩展性强

可支持高达24个SMU

或132端口矩阵开关

支持同时安装高精度源表

和低漏电矩阵开关模块



测试效率高

单台设备内可完成

晶圆级电性参数的自动化测试

支持并行测试

简单易用

内置labExpress测试软件

提供丰富的内置测试算法库、

数据分析工具和灵活的自定义能力

上海概伦电子：FS800器件参数分析仪

FLUKE Calibration

硬件规格

- 高效率可扩展的硬件平台
  - 自主研发的测试硬件架构和数据总线
  - 可支持高达 24 个 SMU，或 132 通道的矩阵开关
  - 可同时支持 SMU 和矩阵开关模块，在单台台式设备内实现晶圆级电性参数的自动化测试
  - 支持多通道并行测试和多点位并行测试
  - 可扩展 GPIB 接口
  - 可扩展 PXI 机箱

应用领域

- CMOS 参数测试
  - MOSFET 与 BJT 晶体管参数测试
  - 二极管与 PN 结参数测试
  - MEMS 与传感器参数测试
- 新材料新器件参数测试
  - 薄膜晶体管、显示器件参数测试
  - 二维材料、光电探测器参数测试
  - 非易失性存储器与材料参数测试
  - 神经形态器件、忆阻器等参数测试
  - 柔性电子器件、可穿戴电子器件参数测试
- 半导体器件特性分析
- 半导体器件建模
- 半导体器件可靠性测试
- 产线测试

- FS810 高精度 SMU
  - 0.1fA 高分辨率
  - 最高电流测试精度可达 15fA
  - 最大电压 200V，最大电流 1A，最大直流功率 20W
  - 1.5MS/s 采样率的时域信号采集

- FK401B 快速波形发生与测试套件
  - 2 个快速 IV 通道，最大电压 10V，最大电流 10mA
  - 100MS/s 采样率的高速时域信号采集
  - 快速脉冲 IV 测试，最小脉冲宽度 130ns
  - 支持 SMU 直通
  - 可扩充至最多 5 个模块（10 通道）

- FS338/FS339 高精度 LCR 模块
  - 40V 直流偏压范围
  - FS338 带宽：20Hz~2MHz
  - FS339 带宽：20Hz~10MHz

- FS821 低漏电矩阵开关输出模块
  - 12 个三同轴输出接口
  - 200V 负载电压，1A 负载电流
  - 100fA 偏移电流
  - 30MHz 带宽

苏州联讯仪器：SA8000半导体参数分析仪

SA8000半导体参数分析仪可完成从基础的电流-电压（IV）、电容-电压（CV）表征，到快速精准的脉冲IV测试等全方位测量。其18槽模块化设计支持按需添加或升级测量模块，灵活应对不断变化的测试需求。作为集成化测试平台，SA8000致力于为全球半导体研发工程师提供精准、高效的测量方案。



全功能/高精度测试测量

HPSMU 源测量分辨率（100nV/1fA）
HRSMU 源测量精度 （100nV/0.1fA）
HV-SPGU 超快速脉冲和瞬态IV测量 (Rise/Fall time, 20ns)
WGFMU 复杂波形的生成(ALWG)及快速测量(Fast I/V, 500MSa/s)
MFCMU 多频率电容测量(10MHz)

高端测试平台

亚飞安级电流分辨率

极致微弱电流探测

0.1 fA（10^{-16} A）的电流测量分辨率

全集成多维度测试能力

灵活组合直流IV、CV及快速脉冲测量单元

无需编程的Quick Test模式

快速测试器件的特性曲线或关键参数

武汉微泰电子：VT321半导体参数测试仪

VT321半导体参数测试仪，支持SMU、LCR、PGU、PMU等PXIe标准模块，满足复杂测试需求。配备15.6英寸高清屏，预装Windows 10及VTNext软件，提供I-V、C-V、脉冲I-V测试功能，内置MOSFET、BJT、二极管、电阻及电容等丰富的器件类型库，为现代半导体、材料和工艺表征提供高级测试定义、参数分析、图表绘制和自动化功能。

- 高精密源测量单元，四象限输出
- 高速量测，采样率1.8MS/s
- 电压范围：±200V，电压灵敏度：100nV
- 电流范围：±1A(直流)，±3A(脉冲)，电流灵敏度：10fA
- 具备优秀的人机交互设计能力，可操作图形化控件，也可通过编写脚本的方式实现定制化测量



VT321半导体参数测试仪基础信息	
尺寸外形	470mm(W)×277mm(H)×560mm(D)
电气输入	100V ~ 240V，50/60Hz
操作环境	0 ~ +50℃，相对湿度 20% ~ 80%RH
控制器	Core i5 CPU 8G内存 512GB硬盘，15.6寸集成显示器，分辨率1920x1080，Windows 10 64bit系统
SMU	支持多达8路通道，三同轴接口，带有远端反馈接口（Remote Sense）和高压安全锁
共地端	三同轴接口

脉冲测试	
输出	最大10W
电压范围	-200V ~ +200V
电流范围	-3A ~ +3A
脉冲宽度	最小50μs
直流参数	
输出功率	最大20W
电压范围	-200V ~ +200V
电流范围	-1A ~ +1A

电压编程和测量精度及分辨率

电压档位	源分辨率	源精度	测量分辨率	测量精度	最大电流
600mV	100nV	0.02% + 30μV	100nV	0.02% + 30μV	1A
6V	1μV	0.02% + 100μV	1μV	0.02% + 100μV	1A
20V	10μV	0.02% + 1mV	10μV	0.02% + 1mV	1A
200V	100μV	0.025% + 10mV	100μV	0.025% + 10mV	100mA

电流编程和测量精度及分辨率

电流档位	源分辨率	源精度	测量分辨率	测量精度	最大电压
100pA	0.1fA	0.2%+70fA	0.1fA	0.2%+70fA	200V
1nA	1fA	0.1%+225fA	1fA	0.1%+225fA	200V
10nA	10fA	0.05%+750fA	10fA	0.05%+750fA	200V
1μA	100fA	0.025%+80pA	100fA	0.025%+80pA	200V
100μA	10pA	0.025%+5nA	10pA	0.025%+5nA	200V
1mA	100pA	0.025%+50nA	100pA	0.025%+50nA	200V
10mA	1nA	0.025%+500nA	1nA	0.025%+500nA	200V
100mA	10nA	0.025%+5μA	10nA	0.025%+5μA	200V
1A	100nA	0.025%+50μA	100nA	0.025%+50μA	/
3A（脉冲）	1μA	0.08%+800μA	1μA	0.08%+800μA	脉冲

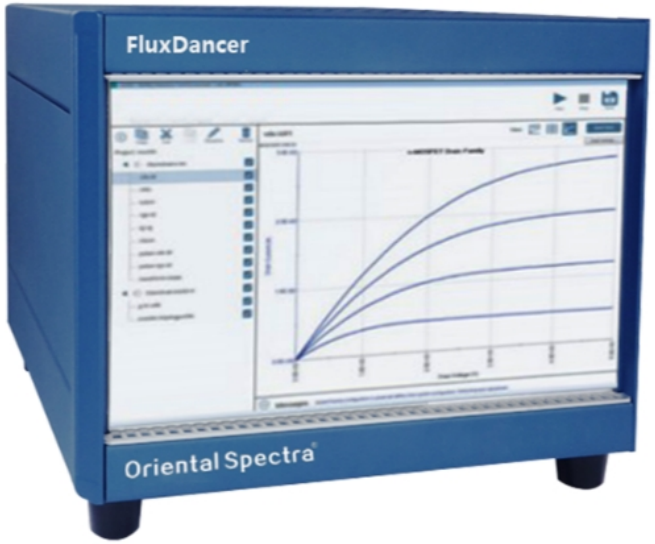
外置LCR模块

测试频率		20Hz ~ 2MHz
基本精度		0.05%
AC信号源	电压	10mVrms ~ 2Vrms（f≤1MHz）/1Vrms（f>1MHz）
	电流	50μArms ~ 100mArms
DC偏置	电压	±40V
	电流	±100mA

东谱科技：FluxDancer E900半导体参数分析仪

FLUKE Calibration

FluxDancer半导体参数分析仪是由Oriental Spectra精心打造的高精度测试设备，专为测量和分析半导体器件的电学特性而设计。这款仪器融合了众多前沿测量技术，包括电源、电压表、电流表、LCR表和开关矩阵等，使其能够执行电流-电压（IV）和电容-电压（CV）测量，以及快速脉冲IV测量等多种测试。



产品特点

- 电流-电压（IV）、电容-电压（CV）、脉冲IV测试等全面功能；
- 电流测量分辨率最高0.1 fA，测试精度30 fA；
- IV-t测试模式，最快采样率不低于65 us/点；
- 支持脉冲模式下的最短脉冲宽度为10 ns；
- 测试功能：IV、IV-t、PIV (脉冲IV)、Super-PIV (10 ns sampling)CV、阻抗、1/f (100 KHz)、Super-1/f (1 MHz)、Solar cell、FET、BJT、EL等 。
- 高精度和高分辨率的测量能力；
- 快速测量和分析，支持多种测量模式；
- 模块化设计，易于升级和扩展：配置 > 10个插槽，支持最大吸收电流至4A；
- 适用器件、材料，有源/无源元器件等类型的电子器件；
- 直观的用户界面，简化操作流程；
- 支持自动化测试和数据分析。

大功率SMU

- 电压范围：± 100 V-±200V
- 直流电流范围：± 1A
- 脉冲电流范围：± 2A-±3A
- 最小电流分辨率：0.1 fA
- 最小电压分辨率：100nV
- 电流测量精度分辨率：10fA
- 电压测量精度分辨率：0.5uV
- 直流功率：20W或者40W可选
- 最大脉冲功率：480W （最大电压160V，最大电流3A）
- 脉冲模式最小宽度：50 us，可输出50us脉冲测试
- 支持四象限测试
- 支持2线或4线测试
- 支持IV-T测试模式，最快采样率550ns每点，数据存储点可以设置为10K，1M，10M或100M

东谱科技：FluxDancer E900半导体参数分析仪

支持源表数量	• 1-5可选
前置放大	• 可配置前置放大，SMU电流测量分辨率提高至0.1fA

大功率SMU	• 电压范围：± 100 V-±200V • 直流电流范围：± 1A • 脉冲电流范围：± 2A-±3A • 最小电流分辨率：0.1 fA • 最小电压分辨率：100nV • 电流测量精度分辨率：10fA • 电压测量精度分辨率：0.5uV • 直流功率：20W或者40W可选 • 最大脉冲功率：480W （最大电压160V，最大电流3A） • 脉冲模式最小宽度：50 us，可输出50us脉冲测试 • 支持四象限测试 • 支持2线或4线测试 • 支持IV-T测试模式，最快采样率550ns每点，数据存储点可以设置为10K，1M，10M或100M

中功率SMU	• 电压范围：±40-±50 V • 电流范围：±1.5A • 最小电流分辨率：400 pA • 最小电压分辨率：4 uV • 电流测试分辨率：10fA • 电压测量分辨率：0.5uV • 支持四象限测试 • 支持2线或4线测

小功率SMU	• 电压范围：±14 V • 电流范围：±40 mA • 最小电流分辨率：200 nA • 最小电压分辨率：60 uV • 电流测量分辨率：10fA • 电压测量分辨率：0.5uV • 支持四象限测试 • 支持2线或4线测试

C-V 多频率电容单元 (CVU)	• AC 阻抗测量 (C-V, C-f, C-t) • 1 kHz - 10 MHz 频率范围，最小频率分辨率1mHz • 电容测试精度1pF@1MHz≤±0.3%，10pF@1MHz≤±0.15%，10pF@100kHz≤±0.2% • ±30 V (60 V差分)，内置 DC 偏置源可以 • 扩展到 ± 210 V(420 V差分) • 具有IV、CV自动切换测量功能 • 支持C-V，C-f电容测量扫描方
脉冲式I-V 超快速脉冲测量单元 (PMU)	• 两个独立的高速脉冲 I-V 源和测量通道 • 200 MSa/s，5 ns 样点间隔 • ±40 V (80 V p-p)，±800 mA • 瞬态波形捕获模式 • 任意波形发生器，10 ns 可编程分辨
高压脉冲发生器单元 (PGU)	• 两个高速脉冲电压源通道 • ±40 V (80 V p-p)，± 800 mA • 任意波形发生器，10 ns 可编程分辨率
I-V/C-V 多通道开关模块 (CVIV)	• 在 I-V 和 C-V 之间切换，无需抬起探针 • 任意端子C-V测量，无需抬起探针 • 支持 ±210 V DC 偏置
1/f噪声测试模块（FNU）	• 速度8～10s/bias • 带宽1Hz～100KHz • 噪声本底：2*1028A2/Hz • 全带宽下的偏压为±200
电气输入	• 100V～240V，50/60Hz • 可选配UPS不间断电

常州同惠：TH521系列功率器件分析仪

FLUKE Calibration

TH521 的常规特性

- 高达 3.5kV/1800A的宽广工作范围
- 从 -50 °C 到 +250 °C 的全自动快速热测试
- 自动创建功率器件（半导体和元器件）的技术资料
- 自动记录功能可防止数据丢失
- AI辅助编写python测试脚本

TH521 套件的完整特性

- IV 套件的全部特性
- 测量封装器件在 3.5 kV 时的晶体管输入、输出和反向传输电容（Ciss、Coss、Crss、Cies、Coes、Cres）以及栅极电阻（Rg）
- 测量封装器件的栅极电荷（Qg）曲线
- 计算功率损耗（传导、驱动和开关损耗）

TH521 IV 套件特性

- 可对封装和晶圆上器件进行全自动快速 IV 测量（Ron、BV、泄漏、Vth、Vsat 等）
- 窄 IV 脉冲宽度（最窄 10 μs）可防止器件自发热，更准确地测试器件实际性能
- 示波器视图（时域视图）可以监测实际电压/电流脉冲波形，以便进行准确测量
- 配置可以灵活选择（电流范围可从20 A 到 200 A、600 A 或 1800 A灵活选择），CV 和 Qg作为选配

- 半导体功率器件

二极管、三极管、MOSFET、IGBT、晶闸管、集成电路、光电子芯片等寄生电容测试、C-V特性分析

- 半导体材料

晶圆切割、C-V特性分析

- 液晶材料

弹性常数分析、液晶切割

- 电容元件

电容器C-V特性测试及分析，电容式传感器测试分析



常州同惠：TH521系列功率器件分析仪

FLUKE Calibration

MCSMU

电压范围、分辨率和精度

电压量程	输出/测量分辨率	输出/测量精度（% + mV + mV）	最大电流
200mV	200nV	±(0.06 + 0.14 + Io x 0.05)	1A
2V	2μV	±(0.06 + 0.6 + Io x 0.5)	1A
20V	20μV	±(0.06 + 3 + Io x 5)	1A
40V	40μV	±(0.06 + 3 + Io x 10)	1A

电流范围、分辨率和精度	输出/测量分辨率	输出/测量精度（%+A+A）	最高电压
10μA	10pA	±(0.06+ 1E-8 + Vo x 1E-10)	30V
100μA	100pA	±(0.06 + 2E-8 + Vo x 1E-9)	30V
1mA	1nA	±(0.06 + 2E-7 + Vo x 1E-8)	30V
10mA	10nA	±(0.06 + 2E-6 + Vo x 1E-7)	30V
100mA	100nA	±(0.06 + 2E-5 + Vo x 1E-6)	30V
1A	1uA	±(0.4 + 2E-4 + Vo x 1E-5)	30V

MPSMU

电压范围、分辨率和精度

电压量程	输出/测量分辨率	输出/测量精度（% + mV + mV）	最大电流
100mV	100nV	±(0.06 + 0.14 + Io x 0.05)	100mA
1V	1μV	±(0.06 + 0.6 + Io x 0.5)	100mA
10V	10μV	±(0.06 + 3 + Io x 5)	100mA
100V	100μV	±(0.012 + 2.5 + Io x 10)	20mA(≥40V) 50mA(≤40V) 100mA(≤20V)

电流范围、分辨率和精度	输出/测量分辨率	输出/测量精度（%+A+A）	最高电压
10nA	10fA	±(0.1 + 1E-12 + Vo x 1E-14)	100V
100nA	100fA	±(0.05 + 2E-11 + Vo x 1E-13)	100V
1μA	1pA	±(0.05 + 1E-10 + Vo x 1E-12)	100V
10μA	10pA	±(0.04 + 2E-9 + Vo x 1E-11)	100V
100μA	100pA	±(0.03 + 3E-9 + Vo x 1E-10)	100V
1mA	1nA	±(0.03 + 6E-8 + Vo x 1E-9)	100V
10mA	10nA	±(0.03 + 2E-7 + Vo x 1E-8)	100V
100mA	100nA	±(0.04 + 6E-6 + Vo x 1E-7)	100V(≤20mA) 40V(≤50mA) 20V(≤100mA)

MFCMU

频率	频率范围	1kHz~10MHz
	最小频率分辨率	1mHz
	频率精度	±0.008%
AC电平	电平范围	0~1V
	分辨率	0.1mVrms
	精度	±(10%*设定值+2mV)
DC偏置	范围	0~±25V
	分辨率	1mV
	准确度	1%*设定电压+8mV
输出阻抗		100Ω
测试端配置		四端对
测试时间		0.05plc~100plc(1plc=20ms)
电容	显示范围	0.00001pF~9.99999F
	最高准确度	0.1%

HCSMU

电压范围、分辨率和精度

电压量程	输出/测量分辨率	输出/测量精度（% + mV + mV）	最大电流
200mV	200nV	±(0.06 + 0.6 + Io x 0.05)	20A
2V	2μV	±(0.06 + 0.6 + Io x 0.5)	20A
20V	20μV	±(0.06 + 3 + Io x 5)	20A
40V	40μV	±(0.06 + 3 + Io x 10)	1A

电流范围、分辨率和精度	输出/测量分辨率	输出/测量精度（%+A+A）	最高电压
10μA	10pA	±(0.06+ 1E-8 + Vo x 1E-10)	40V
100μA	100pA	±(0.06 + 2E-8 + Vo x 1E-9)	40V
1mA	1nA	±(0.06 + 2E-7 + Vo x 1E-8)	40V
10mA	10nA	±(0.06 + 2E-6 + Vo x 1E-7)	40V
100mA	100nA	±(0.06 + 2E-5 + Vo x 1E-6)	40V
1A	1μA	±(0.4 + 2E-4 + Vo x 1E-5)	40V
20A	20μA	±(0.4 + 2E-3+Vo x 1E-4)	20V

HVSMU

电压范围、分辨率和精度

电压量程	输出/测量分辨率	输出/测量精度±(%+mV)	最大电流
200V	200uV	±(0.03+40)	8mA
500V	500uV	±(0.03+100)	8mA
1500V	1.5mV	±(0.03+300)	8mA
3500V	3.5mV	±(0.03+600)	4mA

电流范围、分辨率和精度	输出/测量分辨率	输出/测量精度（%+A+A）	最高电压
10nA	10fA	±(0.1 + 1E-9 + Vo x 8E-12)	3500V
1μA	1pA	±(0.05 + 1E-9 + Vo x 8E-12)	3500V
100μA	100pA	±(0.03 + 3E-9 + Vo x 1E-11)	3500V
10mA	10nA	±(0.03 + 2E-7+ Vo x 1E-9)	1500V

UHCU

电压范围、分辨率和精度

电压量程	测量分辨率	输出分辨率	输出/测量精度±(%+mV)
60V	100μV	200μV	±(0.2+10)
6V(仅测量)	10μV	------	------

电流范围、分辨率和精度	测量分辨率	输出分辨率	输出/测量精度（%+A+A）
200A	500μA	1mA	±(0.6 + 0.3 + 0.01*Vo)
600A	500μA	1mA	±(0.6 + 0.3 + 0.01*Vo)
1800A	2mA	4mA	±(0.8 + 0.9 + 0.02*Vo)

脉冲最大占空比	0.4%（600A量程）；0.1%（1800A量程）
脉冲最小宽度	10μs
脉冲最大宽度	1ms（600A量程）；500μs（1800A量程）
脉冲最大峰值	200A、600A、1800A
脉冲分辨率	2μs

讲座内容

半导体及其测试的基础知识

半导体参数精密分析仪性能一览

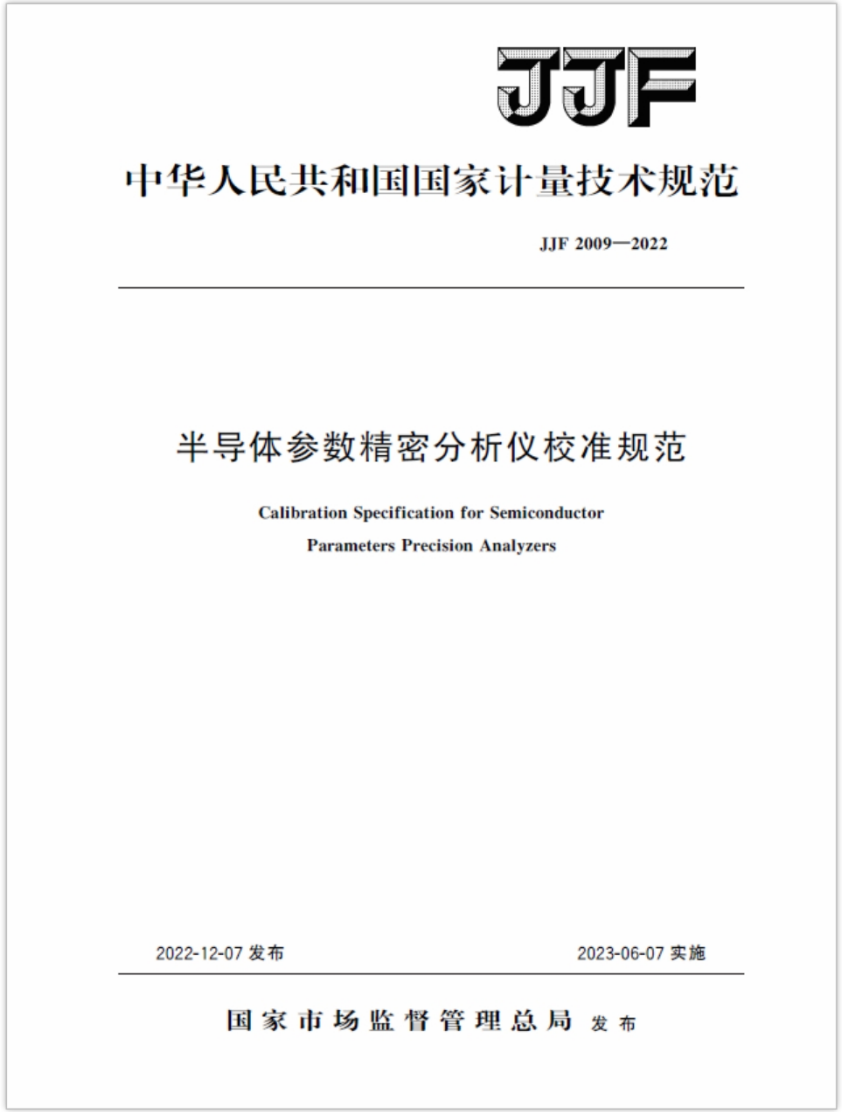
半导体参数精密分析仪的校准规范解读

半导体参数精密分析仪的校准方案探讨

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

- 组织：全国无线电专业委员会
- 起草：
  - 中国电子技术标准化研究院
  - 中国计量科学研究院
  - 中国电子科技集团公司第十三研究所
  - 批准：国家市场监督管理总局
- 发布：2022年12月7日
- 实施：2023年6月7日


JJF

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2009—2022

半导体参数精密分析仪校准规范

Calibration Specification for Semiconductor Parameters Precision Analyzers

2022-12-07 发布　　2023-06-07 实施

国家市场监督管理总局 发布

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

1 范围

- 范围
  - 本规范适用于电压测量范围±(0.1V~3000V)、电流测量范围±(1pA~1500A)的半导体参数精密分析仪的校准。

2 引用文件

- 引用文件
  - 本规范无引用文件

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

3

概述

- 半导体参数精密分析仪(以下简称被校仪器)主要由大功率电源/测量单元、中功率电源/测量单元、大电流电源/测量单元、高压电源/测量单元、中电流电源/测量单元、多频率电容测量单元、超大电流扩展器等部分组成,通过加压测流和加流测压模式实现IV、CV曲线扫描,从而完成二极管、晶体管、场效应晶体管(MOSFET)和绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等半导体器件的击穿电压、泄漏电流、结电容等参数的精密测试

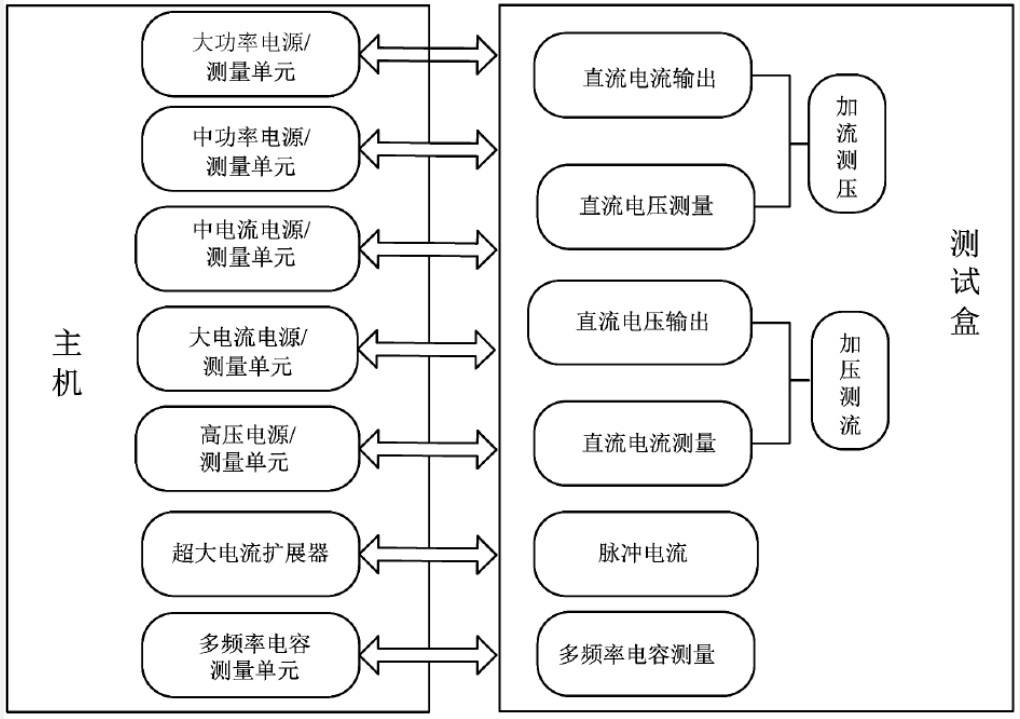


图 1　被校仪器原理框图

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

4 计量特性

- 4.1 直流电流输出
  - 4.1.1 输出范围:±(1pA~10μA);最大允许误差:±(0.3%~6%)。
  - 4.1.2 输出范围:±(10μA~10A);最大允许误差:±(0.05%~0.5%)。
- 4.2 直流电流测量
  - 4.2.1 测量范围:±(1pA~10μA);最大允许误差:±(0.08%~6%)。
  - 4.2.2 测量范围:±(10μA~10A);最大允许误差:±(0.05%~0.5%)
- 4.3 直流电压输出
  - 输出范围:±(100mV~3000V);
  - 最大允许误差:±(0.05%~0.2%)。
- 4.4 直流电压测量
  - 测量范围:±(100mV~3000V);
  - 最大允许误差:±(0.05%~1%)。
- 4.5 脉冲电流
  - 测量范围:±(10A~1500A);
  - 最大允许误差:±(0.5%~2%);
  - 单脉冲,脉冲宽度:250μs~10ms。
- 注：以上指标不是用于合格性判别，仅供参考。

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

5

校准条件

- 5.1 环境条件
  - 5.1.1 环境温度:(23±5)℃。
  - 5.1.2 相对湿度:≤80%。
  - 5.1.3 供电电源:(220±11)V,(50±1)Hz。
  - 5.1.4 周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

5

校准条件

- 5.1 环境条件
  - 5.1.1 环境温度:(23±5)℃。
  - 5.1.2 相对湿度:≤80%。
  - 5.1.3 供电电源:(220±11)V,(50±1)Hz。
  - 5.1.4 周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

5 校准条件

- 5.2 测量标准及其他设备

➢ 5.2.1 直流电压源

- 范围:±(0.1V~100V);
- 最大允许误差:±0.01%。

➢ 5.2.2 直流电压表

- 测量范围:±(0.1V~1000V);
- 最大允许误差:±0.01%;
- 输入阻抗:≥10MΩ。

➢ 5.2.3 直流电流表

- 测量范围:±(10μA~10A);
- 最大允许误差:±(0.01%~0.1%)。

➢ 5.2.4 指零仪

- 直流电流测量范围:±(0.1pA~10μA);
- 最大允许误差:±(1.5%~0.3%)。
- 20pA电流量程固有输入电流3fA;
- 电流短期稳定性:零电流极差在10fA (3min稳定性测量)。

➢ 5.2.5 高压分压器

- 分压比:500∶1,1000∶1;
- 最大允许误差:±0.1%;
- 直流额定电压:≥5kV。

➢ 5.2.6 数字化仪

- 脉冲电压测量范围:±(0.1V~20V);
- 最大允许误差:±0.7%;
- 带宽: ≥1 MHz。

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

5

校准条件

- 5.2 测量标准及其他设备

➢ 5.2.7 标准电阻

- 阻值：0.01Ω,0.1Ω,1Ω,10Ω,100Ω,1kΩ,10kΩ
  最大允许误差:±0.1%。

➢ 5.2.8 高压电阻

- 阻值:1MΩ,工作电压:≥1kV,最大允许误差:±0.1%;
- 阻值:10MΩ,工作电压:≥2kV,最大允许误差:±0.1%;
- 阻值:100MΩ,工作电压:≥3kV,最大允许误差:±0.1%

➢ 5.2.9 高值电阻箱

- 阻值:10MΩ,测量不确定度:0.005% (k=2);
- 阻值:100MΩ,测量不确定度:0.005% (k=2);
- 阻值:1GΩ,测量不确定度:0.01% (k=2);
- 阻值:10GΩ,测量不确定度:0.05% (k=2);
- 阻值:100GΩ,测量不确定度:0.1% (k=2);
- 阻值:1TΩ,测量不确定度:0.2% (k=2)。

➢ 5.2.10 脉冲分流器

- 阻值:0.005Ω,0.01Ω,0.1Ω,1Ω;
- 最大允许误差:±0.15%;
- 功率:≥10W;
- 带宽:≥10kHz。

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

5

校准条件

- 5.2 测量标准及其他设备

➢ 5.2.11 频率计

- 测量范围:1kHz~5MHz;
- 最大允许误差:±0.001%。

➢ 5.2.12 标准电容

- 电容值:1pF,工作频率:1MHz~5MHz,测量不确定度:0.05%~0.3%(k=2);
- 电容值:10pF,工作频率:100kHz~5 MHz,测量不确定度:0.02%~0.1%(k=2);
- 电容值:100pF,工作频率:100kHz~5 MHz,测量不确定度:0.02%~0.1%(k=2);
- 电容值:1nF,工作频率:100kHz~5 MHz,测量不确定度:0.02% ~0.3%(k=2);
- 电容值:10nF,工作频率:1kHz~100kHz,测量不确定度:0.02%~0.03%(k=2);
- 电容值:100nF,工作频率:1kHz~10kHz,测量不确定度:0.02% (k=2)

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

6

6.1 校准项目

编号	项目名称
1	外观和工作正常性检查
2	直流电流输出
3	直流电流测量
4	直流电压输出
5	直流电压测量
6	脉冲电流
7	频率
8	电容测量

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

6

6.2外观和工作正常性检查

- 6.2 外观和工作正常性检查
  - 6.2.1 接通电源前要检查被校仪器,不应有影响正常工作及读数的机械损伤。要求各旋钮转动灵活、无松动;波段开关跳步清晰,定位正确;琴键开关起跳自如,能自锁互锁。
  - 6.2.2 应附有被校仪器正常工作的必要的附件。
  - 6.2.3 通电预热后,被校仪器应能正常工作。
  - 6.2.4 将检查结果记入表A.1中。

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

6

6.3
直流电流输出

- 6.3 直流电流输出

➢ 6.3.1 ±(1pA~10μA)

a)按图2连接仪器。

b) 选择被校量程。

c) 设置输出电流I11 (一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点)。

d) 选择合适的高值电阻R01,设置直流电压源合适的电压。

e) 开启测试,调节直流电压源输出电压使得指零仪显示值为零。

f) 读取直流电压源的输出值V01,按公式(1)计算直流电流输出的标准值I01,按公式(2)计算相对误差δ1,并将校准结果填入表A.2中。

式中:

δ1 ———直流电流输出的相对误差;

V01———直流电压源的输出值,V;

R01———高值电阻箱电阻标准值,Ω;

I01 ———被校仪器直流电流标准值,A;

I11 ———被校仪器直流电流设置值,A。

$$I_{01} = \frac{V_{01}}{R_{01}} \quad (1)$$

$$\delta_1 = \frac{I_{11} - I_{01}}{I_{01}} \times 100\% \quad (2)$$

g)重复步骤c)~f),完成其他校准点的校准。

h)改变量程,重复步骤c)~g),完成校准。

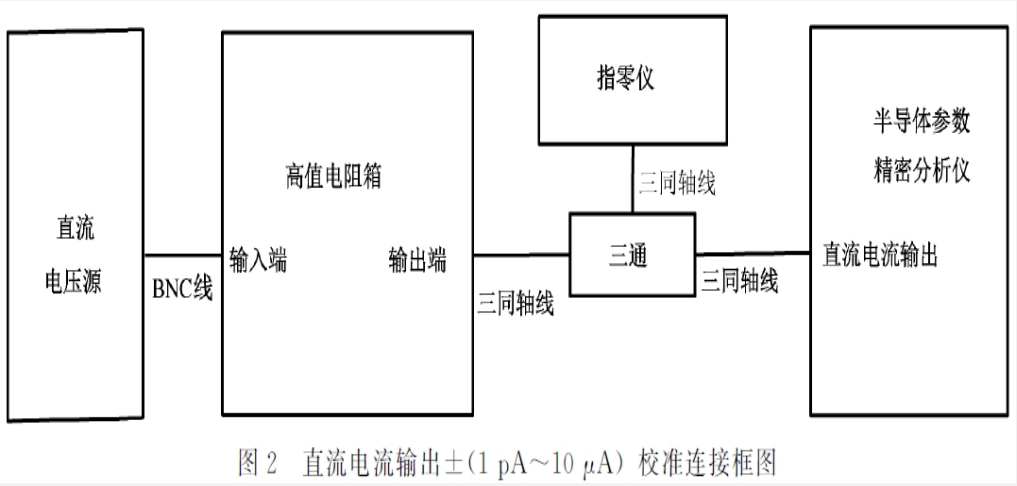


图 2　直流电流输出±(1 pA~10 μA) 校准连接框图

- 校准难点
  - ➢ 如何产生精准pA级电流？
    - 电压源和高阻箱选择很关键
  - ➢ 如何防干扰？
    - 三同轴电缆连接很关键
    - 屏蔽保护端Guard连接很关键
  - ➢ 电流如何指零？
    - 被测SMU输出要反向很关键

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

6

6.3 直流电流输出

6.3 直流电流输出

➢ 6.3.2 ±(10μA~10A)

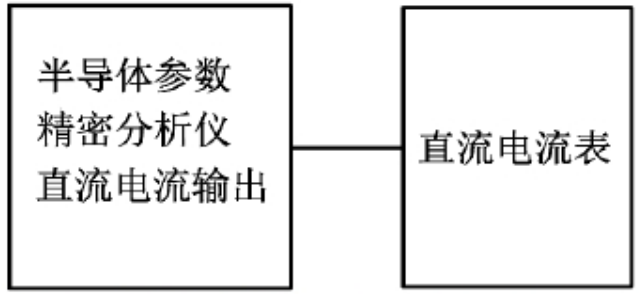


图 3 直流电流输出±(10 μA～10 A) 校准连接框图

a)按图3连接仪器。

b) 选择被校量程。

c) 设置电流I12 (一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点),开启测试,读取直流电流表的测量值I02,按公式(3)计算δ2,并将校准结果填入表A.3中。

式中:

δ2 ———直流电流输出的相对误差;

I12 ———被校仪器直流电流设置值,A;

I02 ———直流电流表测量的标准值,A。

$$\delta_2 = \frac{I_{12} - I_{02}}{I_{02}} \times 100\% \qquad (3)$$

d)重复步骤c),完成其他校准点的校准。

e) 改变量程,重复步骤c)~d),完成校准。

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

6

6.4
直流电流测量

- 6.4 直流电流测量

➢ 6.4.1 ±(1pA~10μA)

a) 按图4连接仪器。

b)选择被校量程。

c) 根据选择的量程(一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点),选择合适的高值电阻R02,设置直流电压源合适的电压。

d) 开启测试,直流电压源输出,读取被校仪器的直流电流测量值I13,按公式(4)计算直流电流测量的标准值,按公式(5)计算相对误差δ3,并将校准结果填入表A.4中。

式中:

δ3 ———直流电流测量的相对误差;

V02———直流电压源的输出值,V;

R02———高值电阻箱电阻标准值,Ω;

I03 ———被校仪器直流电流测量标准值,A;

I13 ———被校仪器直流电流测量值,A。

$$I_{03} = \frac{V_{02}}{R_{02}} \qquad (4)$$

$$\delta_3 = \frac{I_{13} - I_{03}}{I_{03}} \times 100\% \qquad (5)$$

e)重复步骤c)~d),完成其他校准点的校准。

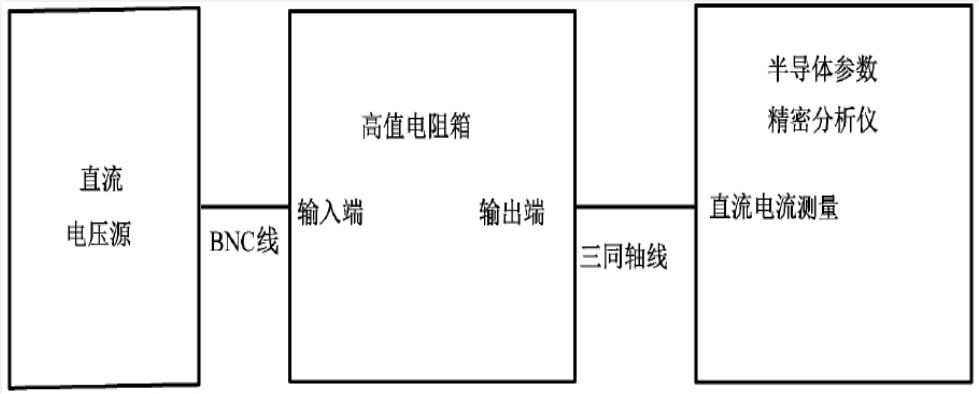


图 4　直流电流测量±(1 pA~10 μA) 校准连接框图

- 校准难点
  - ➢ 如何产生精准pA级电流？
    - 电压源和高阻箱选择很关键
  - ➢ 如何防干扰？
    - 三同轴电缆连接很关键
    - 屏蔽保护端Guard连接很关键

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

6

6.4
直流电流测量

- 6.4 直流电流测量

➢ 6.4.2 ±(10μA~10A)

a) 按图5连接仪器。

b) 选择被校量程。

c) 根据选择的量程(一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点),选取合适的标准电阻,设置被校仪器合适的电压值。

d) 开启测试,读取直流电压表的测量值V03,读取被校仪器的电流测量值I14,按公式(6)计算标准电流值,按公式(7)计算相对误差δ4,并将校准结果填入表A.5中。

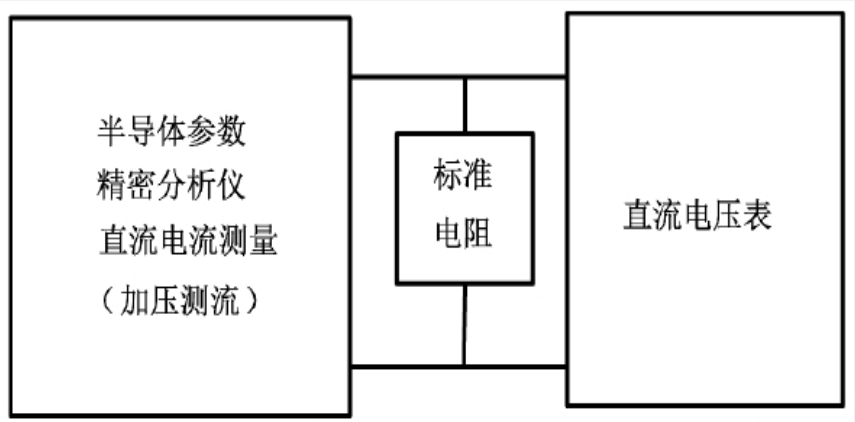


图 5　直流电流测量±(10 μA～10 A) 校准连接框图

式中:

δ4 ———直流电流测量的相对误差;

V03———直流电压表测量值,V;

R03———标准电阻电阻标准值,Ω;

I04 ———被校仪器直流电流测量标准值

I14 ———被校仪器直流电流测量值,A。

$$I_{04} = \frac{V_{03}}{R_{03}} \quad (6)$$

$$\delta_4 = \frac{I_{14} - I_{04}}{I_{04}} \times 100\% \quad (7)$$

e)重复步骤c)~d),完成其他校准点的校准。

f)改变量程,重复步骤c)~e),完成校准。

- 校准难点
  - ➢ 为啥是加压测流，但标准器却是电压表？
  - ➢ 为啥要用标准电阻？

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

6

6.5
直流电压输出

• 6.5 直流电压输出

➢ 6.5.1 ±(0.1V~1000V)

a)按图6连接仪器。

b)选择被校量程。

c)设置输出电压V11 (一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点),开启测试,读取直流电压表的测量值V04,按公式(8)计算相对误差δ5,并将校准结果填入表A.6中。

式中:

δ5 ———直流电压输出的相对误差;

V11———被校仪器直流电压设置值,V;

V04———直流电压表测得的标准值,V。

d)重复步骤c),完成其他校准点的校准。

e)改变量程,重复步骤c)~d),完成校准。

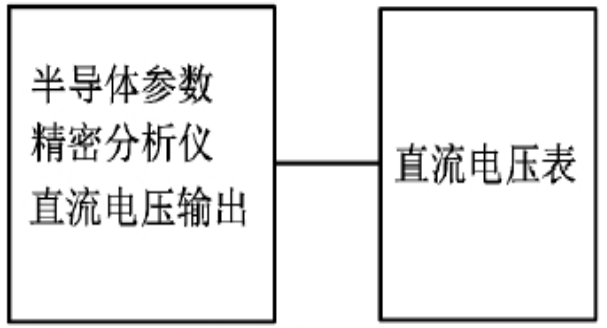


图 6　直流电压输出±(0.1 V～1 000 V) 校准连接框图

$$\delta_5 = \frac{V_{11} - V_{04}}{V_{04}} \times 100\% \qquad (8)$$

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

6

6.5
直流电压输出

• 6.5 直流电压输出

➢ 6.5.2 ±(1000V~3kV)

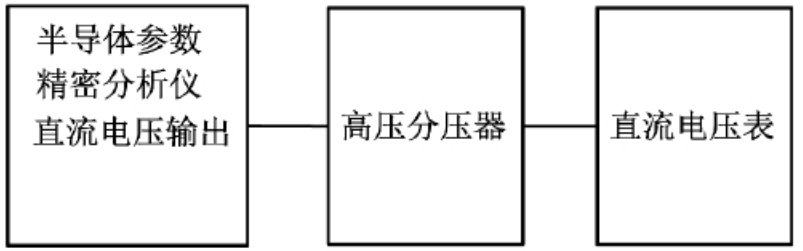


图 7　直流电压输出±(1 000 V～3 kV) 校准连接框图

a)按图7连接仪器

b)选择被校量程。

c)设置输出电压V12 (一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点),开启测试,读取直流电压表的测量值V05,按公式(9)计算相对误差δ6,并将校准结果填入表A.7中。

式中:

δ6 ———直流电压输出的相对误差;

k ———直流高压分压器分压比;

V05———直流电压表测量值,V;

V12———被校仪器直流电压设置值,V。

$$\delta_6 = \frac{V_{12} - V_{05} \times k}{V_{05} \times k} \times 100\% \quad (9)$$

d)重复步骤c),完成其他校准点的校准。

e)改变量程,重复步骤c)~d),完成校准。

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

6

6.6
直流电压测量

- 6.6 直流电压测量
  - ➢ 6.6.1 ±(0.1V~100V)

a)按图8连接仪器。

b)选择被校量程。

c)根据选择的量程(一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点),选取合适的标准电阻,设置被校仪器合适的电流值。

d)开启测试,读取直流电压表的测量值V06,读取被校仪器直流电压测量值V13,按公式(10)计算相对误差δ7,并将校准结果填入表A.8中。

式中:

δ7 ———直流电压测量的相对误差;

V13———被校仪器的直流电压测量值,V;

V06———直流电压表测得的标准值,V。

$$\delta_7 = \frac{V_{13} - V_{06}}{V_{06}} \times 100\% \qquad (10)$$

e)重复步骤c)~d),完成其他校准点的校准。

f)改变量程,重复步骤c)~e),完成校准。

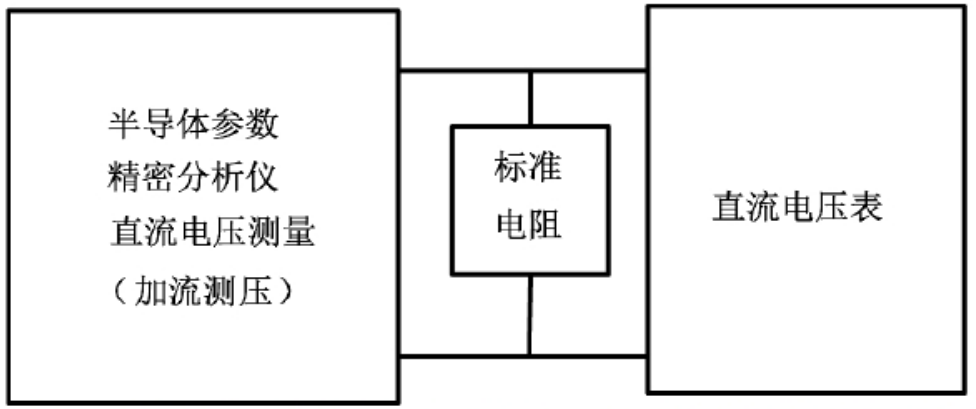


图 8　直流电压测量±(0.1 V～100 V) 校准连接框图

- 校准难点
  - ➢ 为啥被测直流电压测量功能，但标准器却是电压表？为啥不用标准源？加流测压啥概念？
  - ➢ 为啥用标准电阻？

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

6

6.6
直流电压测量

- 6.6 直流电压测量

6.6.2 ±(100V~3kV)

a)按图9连接仪器。

b)选择被校量程。

c)根据选择的量程(一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点),选取合适的高压电阻,设置被校仪器合适的电流值。

d)开启测试,读取被校仪器的电压测量值V14,按公式(11)计算相对误差δ8,

并将校准结果填入表A.9中。

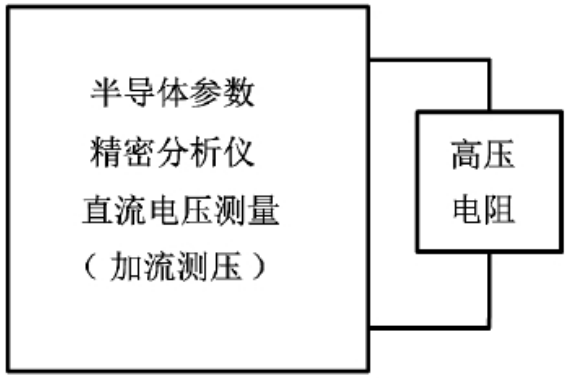


图 9　直流电压测量±(100 V～3 kV) 校准连接框图

式中:

δ8 ———直流电压测量的相对误差;

R04———高压电阻标准值,Ω;

I05 ———设置被校仪器电流的标准值,A;

V14———被校仪器直流电压测量值,V。

$$\delta_8 = \frac{V_{14} - I_{05} \times R_{04}}{I_{05} \times R_{04}} \times 100\% \qquad (11)$$

e)重复步骤c)~d),完成其他校准点的校准。

g)改变量程,重复步骤c)~e),完成校准。

- 校准难点
  - 为啥被测直流电压测量功能，但标准器却好像只有一个标准高压电阻,为啥没有标准电压表？
  - 加流测压啥概念？

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

6

6.7
脉冲电流

• 6.7 脉冲电流

a)按图10连接仪器。

b)选择被校量程,选择合适的脉冲宽度。

c)设置输出脉冲电流I15 (一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点),开启测试,根据数字化仪显示的数据波形,除另有规定外,取中间稳定部分1/3的平均值作为电压测量值V07,读取被校仪器脉冲电流测量值I16,按公式(12)计算被校脉冲电流的标准值I05,按公式(13)计算相对误差δ9,按公式(14)计算相对误差δ10,并将校准结果填入表A.10中。

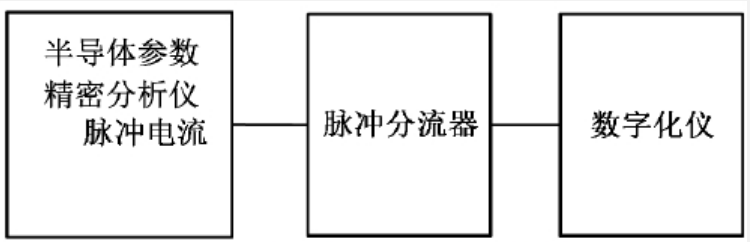


图 10　脉冲电流校准连接框图

式中:

δ9 ———脉冲电流输出的相对误差;

δ10 ———脉冲电流测量的相对误差;

I05 ———被校脉冲电流标准值,A;

V07———数字化仪电压测量值,V;

R05———脉冲分流器电阻标准值,Ω;

I15 ———被校仪器脉冲电流设置值,A;

I16 ———被校仪器脉冲电流测量值,A。

$$I_{05} = \frac{V_{07}}{R_{05}} \qquad (12)$$

$$\delta_9 = \frac{I_{15} - I_{05}}{I_{05}} \times 100\% \qquad (13)$$

$$\delta_{10} = \frac{I_{16} - I_{05}}{I_{05}} \times 100\% \qquad (14)$$

d)重复步骤c),完成其他校准点的校准。

e)改变量程,重复步骤c)~d),完成校准。

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

6

6.8
频率

• 6.8 频率

a)按图11连接仪器。

b)选择合适的电平,设置频率值f1 (一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点)。

c)开启测试,读取频率计的测量值f0,按公式(15)计算相对误差δ11,并将校准结果填入表A.11中。

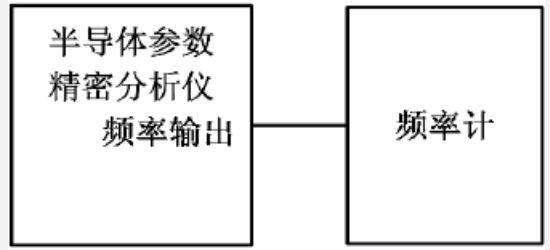


图 11　频率校准连接框图

式中:

δ11———频率的相对误差;

f1 ———被校仪器频率设置值,Hz;

f0 ———频率计测量值,Hz。

$$\delta_{11} = \frac{f_1 - f_0}{f_0} \times 100\% \qquad (15)$$

d)其他校准点的校准,重复b)~c)的操作。

©2026 Fluke Calibration

JJF 2009-2022半导体参数精密分析仪校准规范

6

6.9
电容测量

• 6.9 电容测量

a)按图12连接仪器 。

b)选择合适的电平,设置频率值f1 (一般每个量程至少按低、中、高选取三个校准点)。

c)开启测试,读取频率计的测量值f0,按公式(15)计算相对误差δ11,并将校准结果填入表A.11中。

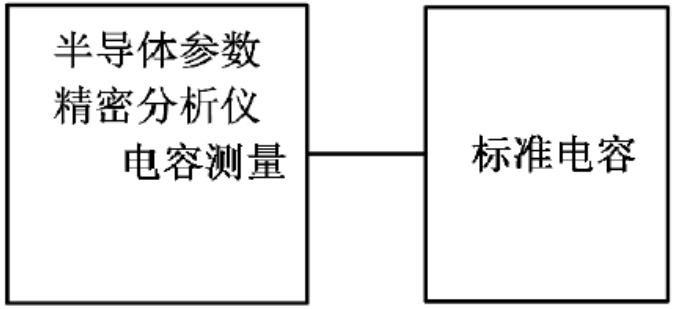


图 12　电容测量校准连接框图

式中:

δ_{12}———电容测量的相对误差;

C_1———被校仪器电容测量值,F;

C_0———标准电容的标准值,F。

d)重复步骤c),完成其他校准点的校准。

e)改变量程,重复步骤c)~d),完成校准。

$$\delta_{12} = \frac{C_1 - C_0}{C_0} \times 100\% \quad (16)$$

©2026 Fluke Calibration

讲座内容

- 半导体及其测试的基础知识
- 半导体参数精密分析仪性能一览
- 半导体参数精密分析仪的校准规范解读
- **半导体参数精密分析仪的校准方案探讨**

©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案——直流电压源的选择

- JJF 2009-2002 要求
  - 5.2.1 直流电压源
    - 范围:±(0.1V~100V);
    - 最大允许误差:±0.01%。
  - 很显然，Fluke 55x0A/57x0A均可以满足。

5730A 直流电压技术指标

量程	分辨力	绝对准确度 校准温度的 ±5 °C			
		24 小时	90 天	180 天	1 年
		±（ppm 输出 + μV）			
99% 置信水平					
220 mV	10 nV	5 + 0.5	7 + 0.5	8 + 0.5	9 + 0.5
2.2 V	100 nV	3.5 + 0.8	4 + 0.8	4.5 + 0.8	6 + 0.8
11 V	1 μV	2.5 + 3	3 + 3	3.5 + 3	4 + 3
22 V	1 μV	2.5 + 5	3 + 5	3.5 + 5	4 + 5
220 V	10 μV	3.5 + 50	4 + 50	5 + 50	6 + 50
1100 V	100 μV	5 + 500	6 + 500	7 + 500	8 + 500

1-8 *5520A 用户手册*

1-14、直流电压技术指标

量程	绝对不确定度 tcal±5°C ±（ppm 输出+μV）		稳定性 24 小时，±1°C ±（ppm 输出+μ V ）	分辨力 μV	最大负荷 [1]
	90 天	1 年			
0–329.9999mV	15+1	20+1	3 + 1	0.1	50Ω（输出电阻）
0–3.299999V	9+2	11+2	2+1.5	1	10mA
0–32.99999V	10+15	12+15	2+10	10	10 mA
30–329.9999V	15+150	18+150	2.5+100	100	5 mA
100–1020.000V	15+1500	18+1500	3+300	1000	5 mA

直流电压技术指标 ❑ Fluke 5540A/5530A

外部感知适用于 1.2 V、12 V 和 120 V 量程。

直流电压指标，±(μV/V 输出 + 本底)			
量程	99 %置信度 1 年	95 %置信度 1 年	本底
120 mV	47	37	1.6 μV [1]
1.2 V	31	24	2 μV
12 V	31	24	20 μV
120 V	42	33	200 μV
1020 V	42	33	2000 μV

©2026 Fluke Calibration

校准器系列——57x0A系列

- 57x0A多功能源：
  - 交直流电压电流电阻五项基本功能输出
  - 量程范围广，精度高
  - 可搭配更大量程放大器和宽带选件
  - 早期的5700A/5720A，到现在的5730A，纵横市场已30多年，
  - 计量届认可的8位半以下数字多用表经典校准标准
  - 高等级校准实验室广泛选择。

功能	量程	最优 年指标 95% 置信度
DCV	220mV 至 1100 V	3.5 ppm+2.5uV
ACV	220 mV 至 1100 V, 10 Hz 至 1 MHz	42 ppm+8uV
DCI	0 至 2.2 A (11 A 配 5725A, 100 A 配52120A(5730A))	35 ppm+7nA
ACI	9 µA 至 2.2 A (11 A 至5725A,120 A 至 52120A(5730A)), 10 Hz 至 10 kHz	103 ppm+8nA
电阻	0 至 100 MΩ, x1 和 x1.9 共18个十进步进值	6.5 ppm
宽带选件	300 µV 至 3.5 V, 10 Hz 至 30 MHz	±0.4% 设置值



©2026 Fluke Calibration

校准器系列——55x0A

- 55x0A系列多产品校准器：
  - 十多种电学校准功能集于一身
  - 可覆盖6位半以下数字多用表，还可覆盖钳形表、功率表、温度二次仪表等多种电学常见校准负荷
  - 轻巧便携，操作简单
  - 适配现场校准与实验室校准，单机可构建一个小型电学实验室
  - 早期5500A/5520A，到5502A/5522A，最新5560A/5550A/5540A/5530A
  - 为广大企业及校准机构青睐，市场覆盖广，客户信赖多。

特性	Fluke 多产品校准器					
						
	5560A	5550A	5540A	5530A	5522A	5502A
直流电压，1V	7.4	9.7	26.0	26.0	10.1	42.6

©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案——直流电压源的选择

FLUKE Calibration

- JJF 2009-2002 要求
  - 5.2.1 直流电压源
    - 范围:±(0.1V~100V);
    - 最大允许误差:±0.01%。
  - 并非用来校准被测直流电压测量功能！
  - 指标很明显也不够。
  - 6.4 直流电流测量
    - 6.4.1 ±(1pA~10μA)
  - 它的真正目的是为了和高阻电阻配合产生pA级电流！
  - 也并不是指标范围满足的就可以！
  - 它的屏蔽保护端Guard能否与输出LO端和大地Ground断开非常关键！
    - ExGuard ON！ 并且Guard 要跟随输出HI端!
    - Fluke 57x0A/55x0A 均可支持

SMU 电压测量 [3]

电压范围 [1]	最大电流		测量		源	
	4200-SMU 和 4201-SMU	4210-SMU 和 4211-SMU	分辨率 [2]	精度 ±(% 读数 + 伏特)	分辨率 [2]	精度 ±(% 读数 + 伏特)
200 V	10.5 mA	105 mA	200 μV	0.015% + 3 mV	5 mV	0.02% + 15 mV
20 V	105 mA	1.05 A	20 μV	0.01% + 1 mV	500 μV	0.02% + 1.5 mV
2 V	105 mA	1.05 A	2 μV	0.012% + 150 μV	50 μV	0.02% + 300 μV
200 mV	105 mA	1.05 A	0.2 μV	0.012% + 100 μV	5 μV	0.02% + 150 μV
限流值：双极性限流值设置，可以设置所选电流量程的 10% 到满量程区间任意值。						

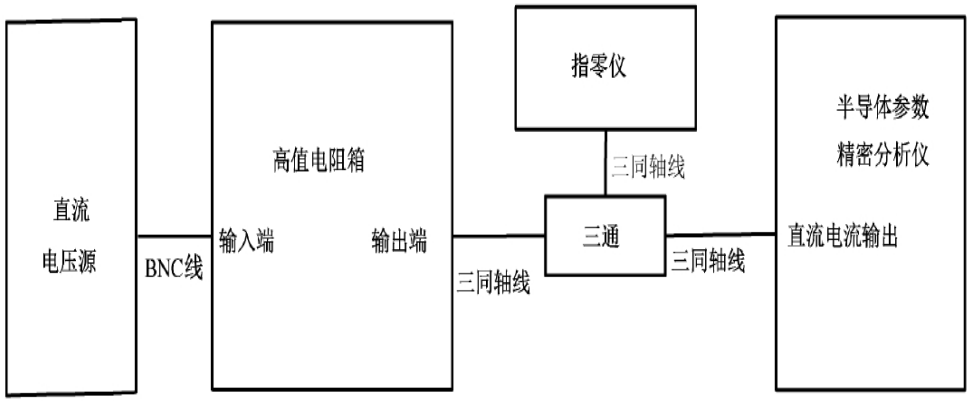


图 2 直流电流输出±(1 pA~10 μA) 校准连接框图

©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案——同轴线的差异

- 普通同轴电缆（单同轴）
  - ➢ 两层结构：芯线 + 单屏蔽
    - 内芯信号 → 一层绝缘 → 单层屏蔽网 → 外护套
- 50Ω BNC射频同轴电缆
  - ➢ 本质还是普通单同轴
    - 只是特征阻抗精准做成50Ω，配BNC接头，用于射频、高频、脉冲、信号传输。
- 三同轴电缆（Triax 三同轴）
  - ➢ 三层结构：芯线 + 内屏蔽(Guard) + 外屏蔽(安全地)
    - 内芯HI信号 → 内层绝缘 → 中间屏蔽层Guard保护端 → 外层绝缘 → 外层屏蔽层LO/机壳地



©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案
——pA级电流为何要用三同轴线？

- 三同轴电缆 核心专属特性（pA/fA 微电流测量专用）
  - **带独立Guard保护层（最核心）**
    - 中间一层保护屏蔽层可通过线路跟随信号芯线电位，实现真正等电位屏蔽!
      - 芯线与Guard等电位，几乎无电位差 → 彻底消除电缆绝缘层表面漏电流，普通同轴做不到，无法到pA级
  - **漏电流极低、绝缘极高**
    - 专用高纯绝缘材料，体积电阻率极大，自身fA级漏流，适合：pA、fA、高阻标准电阻、SMU、静电计
  - **抗干扰极强 双层屏蔽：**
    - 内屏蔽防绝缘漏电，外屏蔽防外界电磁干扰、工频干扰
  - **不追求50Ω阻抗匹配**
    - 三同轴不是50Ω/75Ω射频阻抗设计
    - 用途是直流+超低频微弱电流测量，不是传高频射频
  - **必须三端接法：**
    - HI / GUARD / LO 严格分离 不能当普通两线用，否则失去保护意义，漏电流暴涨

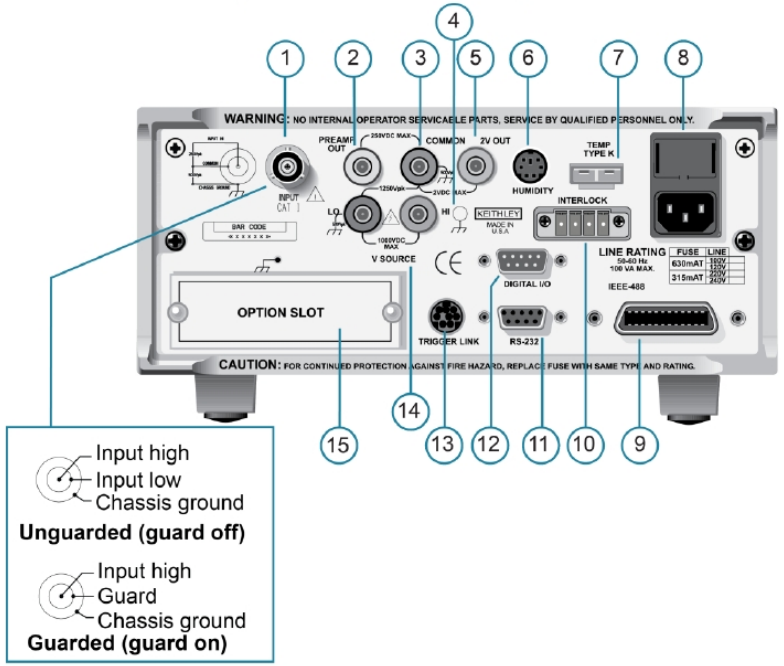
©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案
——指零仪的选择，Keithley 6517B静电计/高阻表

- 全球科研实验室灵敏测量的标准
  - 超灵敏电流表，可测量 10 aA ~ 20 mA 电流
  - 阻抗最高的电压表，可测量 1mV ~ 200 V 电压
  - 超高范围电阻表，可测量 1Ω ~ 10^{18} Ω 电阻
  - 灵敏的电量计，可测量 1 fC ~ 2μC 电荷
  - 输入阻抗超过 200 TΩ
  - 独有高阻测量交换电极电压源和测量方法
  - 内置测试序列，支持四种不同器件表征测试、表面和体电阻率、表面绝缘电阻和电压扫描
  - 选配插入式扫描卡，可使用一个测试设置测试最多 10 个器件或材料样本
- 电流测量，内部特有跟随器线路，实现等电位屏蔽
  - 6517B测量小电流时，内部结构=电压跟随器+采样电阻，
  - 三同轴线连接时，复制内芯HI电压，送到Guard端,HI和Guard同电位，无漏电流



Figure 2: Model 6517B rear panel



©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案
——高值电阻的选择，Keithley 7177或等效

FLUKE Calibration

5.2 测量标准及其他设备

➢ 5.2.7 标准电阻

- 阻值：0.01Ω,0.1Ω,1Ω,10Ω,100Ω,1kΩ,10kΩ
  最大允许误差:±0.1%。

➢ 5.2.8 高压电阻

- 阻值:1MΩ,工作电压:≥1kV,最大允许误差:±0.1%;
- 阻值:10MΩ,工作电压:≥2kV,最大允许误差:±0.1%;
- 阻值:100MΩ,工作电压:≥3kV,最大允许误差:±0.1%

➢ 5.2.9 高值电阻箱

- 阻值:10MΩ,测量不确定度:0.005% (k=2);
- 阻值:100MΩ,测量不确定度:0.005% (k=2);
- 阻值:1GΩ,测量不确定度:0.01% (k=2);
- 阻值:10GΩ,测量不确定度:0.05% (k=2);
- 阻值:100GΩ,测量不确定度:0.1% (k=2);
- 阻值:1TΩ,测量不确定度:0.2% (k=2)。

➢ 5.2.10 脉冲分流器

- 阻值:0.005Ω,0.01Ω,0.1Ω,1Ω;
- 最大允许误差:±0.15%;
- 功率:≥10W;
- 带宽:≥10kHz。



- keithley 7177 SRU 标准电阻单元
- 可溯源、低漂移、四端精密标准电阻

  - ➢ 100 Ω
  - ➢ 1 kΩ
  - ➢ 10 kΩ
  - ➢ 100 kΩ
  - ➢ 1 MΩ
  - ➢ 10 MΩ
  - ➢ 100 MΩ
  - ➢ 1 GΩ
  - ➢ 10 GΩ
  - ➢ 100 GΩ
  - ➢ 1 TΩ

- 电阻精度
  - ➢ 典型：±0.01% ～ ±0.05%（100Ω～1GΩ）
  - ➢ 高阻10GΩ～1TΩ：±0.1% ～ ±0.2%
- 年稳定性（年漂移）
  - ➢ ≤ ±50 ppm/年（中低值阻）
  - ➢ ≤ ±100 ppm/年（高阻1TΩ）
- 温度系数 TCR
  - ➢ ±1 ppm/℃ ～ ±5 ppm/℃（典型）
- 绝缘电阻
  - ➢ 壳对电阻：≥10^{14} Ω
- 三同轴屏蔽结构
  - ➢ 漏电流<1fA 级
- 接线方式
  - ➢ 四端开尔文（Kelvin）
  - ➢ Triax 三同轴输入/输出

©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案
——高值电阻的选择，Keithley 5156DR或等效

FLUKE Calibration

5.2 测量标准及其他设备

➢ 5.2.7 标准电阻

- 阻值：0.01Ω,0.1Ω,1Ω,10Ω,100Ω,1kΩ,10kΩ
  最大允许误差:±0.1%。

➢ 5.2.8 高压电阻

- 阻值:1MΩ,工作电压:≥1kV,最大允许误差:±0.1%;
- 阻值:10MΩ,工作电压:≥2kV,最大允许误差:±0.1%;
- 阻值:100MΩ,工作电压:≥3kV,最大允许误差:±0.1%

➢ 5.2.9 高值电阻箱

- 阻值:10MΩ,测量不确定度:0.005% (k=2);
- 阻值:100MΩ,测量不确定度:0.005% (k=2);
- 阻值:1GΩ,测量不确定度:0.01% (k=2);
- 阻值:10GΩ,测量不确定度:0.05% (k=2);
- 阻值:100GΩ,测量不确定度:0.1% (k=2);
- 阻值:1TΩ,测量不确定度:0.2% (k=2)。

➢ 5.2.10 脉冲分流器

- 阻值:0.005Ω,0.01Ω,0.1Ω,1Ω;
- 最大允许误差:±0.15%;
- 功率:≥10W;
- 带宽:≥10kHz。



- keithley 5156DR 低热电势标准电阻及电容单元
  - ➢ 用途：配合多功能电压校准源（如5700A/5730A），检定6517B、6430等静电计/皮安表的电流档、电荷档、高阻档量程，是计量实验室标配标准件。

- ➢ 1 nF
- ➢ 100 MΩ
- ➢ 1 GΩ
- ➢ 10 GΩ
- ➢ 100 GΩ
- ➢ 100 nF

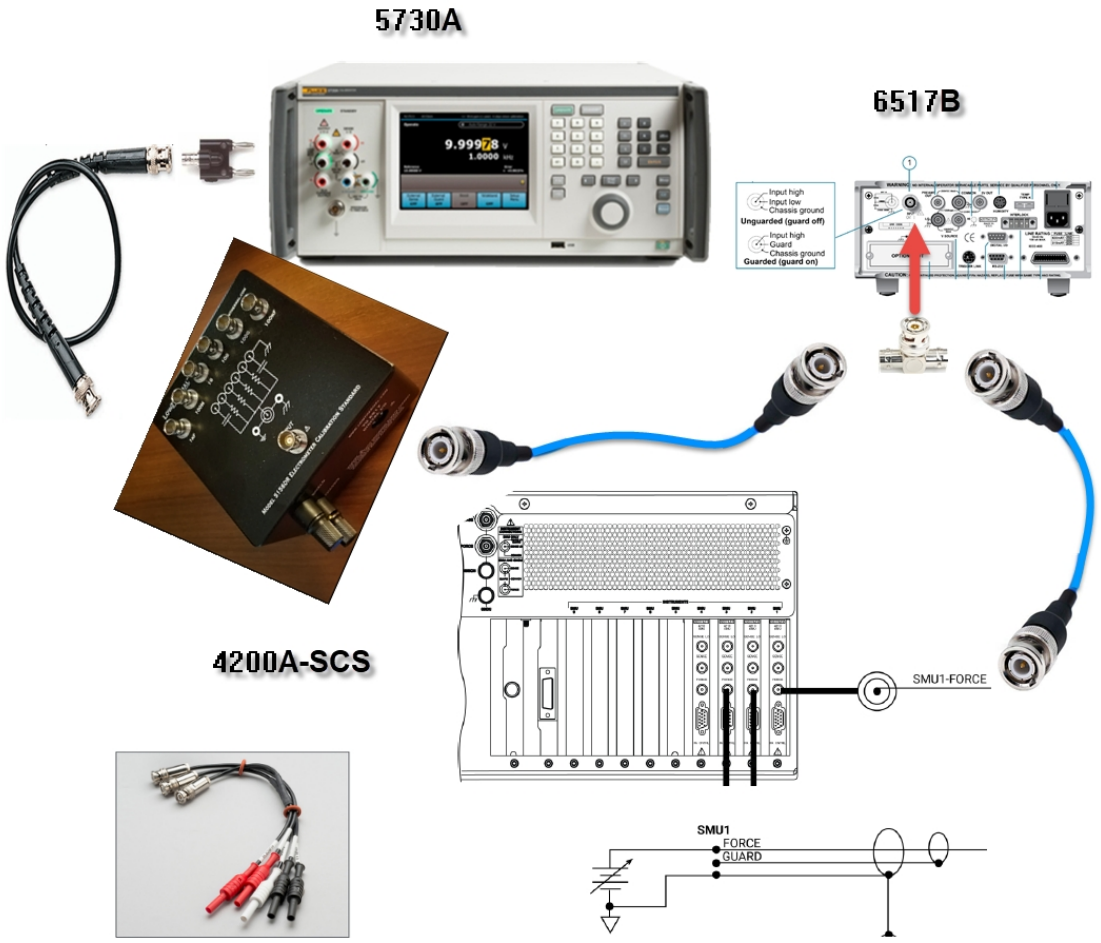
5156DR 高阻箱核心技术指标汇总表

标准件标称值	校准精度（ppm）	温度系数（ppm/℃）	电压系数（ppm/V）	标称公差（±%）	年最大稳定性（ppm/年）
100 MΩ	200	＜25	＜1	2	200
1 GΩ	300	＜25	＜1	2	500
10 GΩ	400	＜25	＜1	2	500
100 GΩ	500	＜100	＜1	2	800
1 nF	1000	＜120	＜5	5	1000
100 nF	1000	＜120	＜5	5	1000

©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案——pA级电流生成

- 5730A输出直流电压，经过高阻箱，形成pA电流
  - Guard保护层外移（核心）
    - 开启EXSENS ON（外部敏感模式），拆除机内Guard与机壳地的短路片，确保Guard浮空（不连LO、不接地）
  - 65178B Guard，系统Guard总线
    - 从6517B Triax接口插一根三同轴电缆，引出中间Guard层作为「系统Guard总线」。
    - 5700A的Guard端子，并接到系统Guard总线。
    - 高阻标准电阻的保护环，并接到系统Guard总线。
  - 被测SMU
    - 三同轴电缆的Guard层，均并接到系统Guard总线（实现全域等电位跟随）。
  - 6517B电流指零
    - 设置标准电流和被测电流标称幅度相等，极性相反时可在三通处对消，根据电流实际指零值，得到被测电流



2450-TRX-BAN: For adapting the 2450's rear panel triaxial connectors to banana jack inputs. Length: 0.3 m (1 ft).
For use with: 2450

©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案——pA级电流生成视频演示



视频：

[5700A_5156_6517_pA电流实验.mp4]

©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案
——pA级电流指零测量视频演示









视频：

[5730A_5156_6517B_2410_pA电流抵消实验3.MOV]

©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案
——pA级电流指零测量视频演示









视频：

[5730A_5156_6517B_2410_pA电流抵消实验4——独立guard.MOV]

©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案——电压表、电流表的选择

FLUKE Calibration

- JJF 2009-2022要求
  - ➢ 5.2.2 直流电压表
    - 测量范围:±(0.1V~1000V);
    - 最大允许误差:±0.01%;
    - 输入阻抗:≥10MΩ。
    - 似乎6.5位数表即可满足
  - ➢ 5.2.3 直流电流表
    - 测量范围:±(10μA~10A);
    - 最大允许误差:±(0.01%~0.1%)
    - Keithley 原厂选择2002作为校准标准
    - Fluke 8588A具有更好的准确度和范围。
- 综合考虑8588A更优

DC Amps **Keithley 2002**

DCI Input Characteristics and Accuracy

Range	Full Scale	Resolution	Maximum Burden Voltage[6]	Relative Accuracy[1] ±(ppm of reading + ppm of range) 24 Hours[2]	90 Days[3]	1 Year[3]	2 Years[3]
200 µA	210.00000	10 pA	0.25 V	50 + 6	275 + 25	350 + 25	500 + 25
2 mA	2.1000000	100 pA	0.3 V	50 + 5	275 + 20	350 + 20	500 + 20
20 mA	21.000000	1 nA	0.35 V	50 + 5	275 + 20	350 + 20	500 + 20
200 mA	210.00000	10 nA	0.35 V	75 + 5	300 + 20	375 + 20	525 + 20
2 A	2.1000000	100 nA	1.1 V	350 + 5	600 + 20	750 + 20	1000 + 20

直流电流 [1][2][3][4] **Fluke 8588A**

直流电流最大分辨率为 7 位数

总体测量指标 = (读数指标 + 量程指标) + (孔径指标 + 孔径量程指标) + (读数间隔指标 + 读数间隔量程指标)

读数和量程指标

孔径 ≥100 µs

95 % 置信水平

量程	满刻度	相对精度 ± (µA/A 读数 + µA/A 量程) 传输，20 min [15]	24 小时 Tcal ± 1 °C	90 天 Tcal ± 1 °C	365 天 Tcal ± 1 °C	2 年 Tcal ± 1 °C	绝对精度 365 天 Tcal ± 1 °C	365 天 Tcal ± 5 °C	2 年 Tcal ± 5 °C
10 µ A	20.200 000 µA	5.0 + 20	10 + 40	15 + 40	20 + 40	30 + 40	24 + 40	27 + 40	40 + 40
100 µ A	202.00 00 µA	0.25 + 1	5.50 + 4	6.0 + 4	6.5 + 4	9.8 + 4	8.2 + 4	9.8 + 4	15 + 4
1 mA	2.020 000 0 mA	0.25 + 1	5.50 + 4	6.0 + 4	6.5 + 4	9.8 + 4	7.6 + 4	9.2 + 4	14 + 4
10 mA	20.200 000 mA	0.25 + 1	6.50 + 4	7.0 + 4	8.0 + 4	12 + 4	8.9 + 4	14 + 4	20 + 4
100 mA	202.000 00 mA	1.0 + 4	28 + 10	30 + 10	33 + 10	50 + 10	33 + 10	57 + 10	86 + 10
1 A	2.020 000 0 A	2.0 + 25	60 + 100	80 + 100	100 + 100	150 + 100	100 + 100	132 + 100	199 + 100
10 A [8]	20.200 000 A [8]	4.0 + 10	80 + 40	125 + 40	170 + 40	255 + 40	174 + 40	234 + 40	351 + 40
30 A [8]	30.200 000 A [8]	4.0 + 35	240 + 146	390 + 146	490 + 146	735 + 146	491 + 146	551 + 146	827 + 146

©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案——脉冲分流器的选择

- JJF 2009-2022要求
  - 5.2.10 脉冲分流器
    - 阻值:0.005Ω,0.01Ω,0.1Ω,1Ω;
    - 最大允许误差:±0.15%;
    - 功率:≥10W;
    - 带宽:≥10kHz。
- Fluke A40B分流器
  - 1mA~100A,14支
  - 0.008Ω~800Ω
  - 直流、交流、脉冲均可采集
  - 最优直流20ppm，交流23ppm
  - 带宽高达100kHz
  - 校准实验室广泛选择
  - 配合8588A校准PMU脉冲测量单元不错的选择



©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案——数字化仪的选择

- JJF 2009-2022要求
  - 5.2.6 数字化仪
    - 脉冲电压测量范围:±(0.1V~20V);
    - 最大允许误差:±0.7%;
    - 带宽：≥1 MHz。
  - 以前往往选择数字示波器充当
    - 测量精度偏低

- Fluke 8588A数字化采样方式
  - 实时采样率高达5MS/s
  - 电流采集准确度44ppm
  - 带宽高达4MHz
  - 理想的选择

数字化直流电流

孔径为 0 至 ≤3 ms 时，分辨率为 18 比特

95 % 置信水平		相对精度				绝对精度		
		±（µA/A 读数 + µA/A 量程）						
量程	满刻度	24 小时 Tcal ± 1 °C	90 天 Tcal ± 1 °C	365 天 Tcal ± 1 °C	2 年 Tcal ± 1 °C	365 天 Tcal ± 1 °C	365 天 Tcal ± 5 °C	2 年 Tcal ± 5 °C
10 µA	20.2 µ A	35 + 80	40 + 80	44 + 80	66 + 80	48 + 80	60 + 80	78 + 80
100 µA	202 µ A	6 + 70	22 + 70	44 + 70	66 + 70	48 + 70	60 + 70	78 + 70
1 mA	2.02 mA	6 + 70	22 + 70	44 + 70	66 + 70	48 + 70	60 + 70	78 + 70
10 mA	20.2 mA	7 + 70	22 + 70	44 + 70	66 + 70	48 + 70	60 + 70	78 + 70
100 mA	202 mA	18 + 70	22 + 70	44 + 70	66 + 70	48 + 70	80 + 70	90 + 70
1 A	2.02 A	60 + 125	65 + 125	110 + 125	165 + 125	112 + 125	144 + 125	197 + 125
10 A [8]	20.2 A [8]	80 + 160	125 + 160	180 + 160	270 + 160	184 + 160	244 + 160	330 + 160
30 A [8]	30.2 A [8]	240 + 180	390 + 180	500 + 180	750 + 180	501 + 180	561 + 180	810 + 180

©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案——直流电流的测量

- JJF 2009-2022要求
  - 6.4.2 ±(10uA~10A)
- 什么是加压测流？
  - MOSFET少量参数是加电压测电流（FVMI）
    - 给 G/D 加电压
    - 测电流 Ids、Ig
    - 类似参数还有二极管正向压降VF等
  - 因此规范才用被测电流加到标准电阻上产生电压，再用标准表读数和标准电阻值换算标准电流，与被测设置值比较。
- 此功能也可以通过标准电流源来校准
  - 前提是直流电压输出设为0
  - 直接输入标准电流，只校准直流电流表
  - 简单，但与实际工作模式不太符合

$$I_{04} = \frac{V_{03}}{R_{03}} \quad (6)$$

$$\delta_4 = \frac{I_{14} - I_{04}}{I_{04}} \times 100\% \quad (7)$$

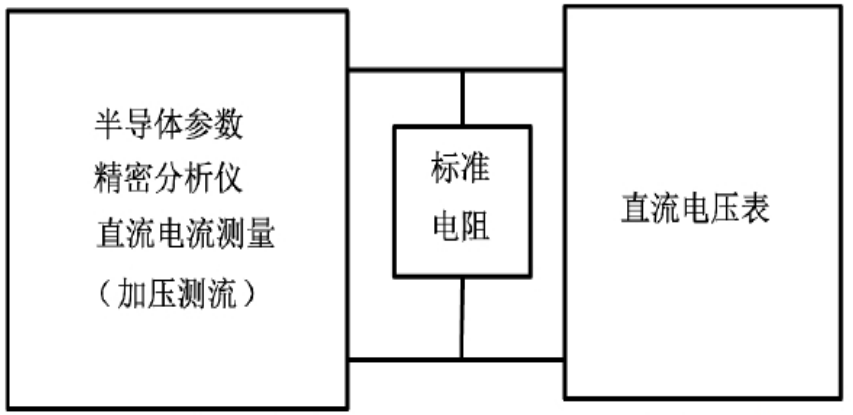


图 5　直流电流测量±(10 μA～10 A) 校准连接框图

- 校准难点
  - 为啥是加压测流，但标准器却是电压表？
  - 为啥要用标准电阻？

©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案——直流电压的测量

- JJF 2009-2022要求
  - 6.6.1 ±(0.1V~100V)
- 什么是加流测压？
  - 大多数MOSFET参数都是加电流测电压（1mA）
    - 测二极管 IV 曲线（最典型）
      - 仪器：输出小电流 I（比如 1mA）
      - 加到二极管两端
      - 仪器测量二极管电压 V
      - 得到 VF 正向压降
      - 不断改变 I，画出一整条 IV 曲线
    - 导通电阻 Rds(on)
      - 方法：给 D-S 通一个恒定电流 I
      - 测量：Vds 电压
      - 公式：R = V / I
  - 因此规范才用被测电流加到标准电阻上产生电压，再比较内部电压表和标准表读数，以判断内部电压表的准确性。
- 此功能也可以通过标准电压源校准
  - 前提是直流电流输出设为0
  - 直接输入标准电压，只校准直流电压表
  - 简单，但与实际工作模式不太符合

$$\delta_7 = \frac{V_{13} - V_{06}}{V_{06}} \times 100\% \qquad (10)$$

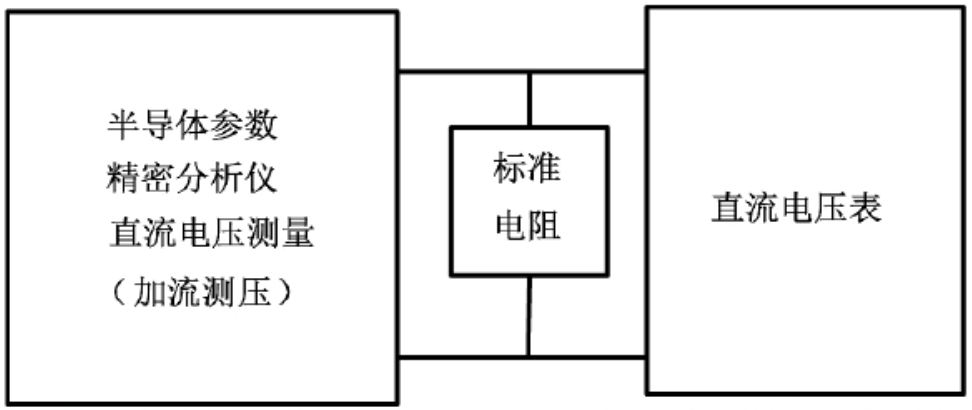


图 8　直流电压测量±(0.1 V～100 V) 校准连接框图

- 校准难点
  - 为啥被测直流电压测量功能，但标准器却是电压表？为啥不用标准源？加流测压啥概念？
  - 为啥用标准电阻？

©2026 Fluke Calibration

半导体参数分析仪校准方案——直流电压的测量

- JJF 2009-2022要求
  - 6.6.2 ±(100V~3kV)

$$\delta_8 = \frac{V_{14} - I_{05} \times R_{04}}{I_{05} \times R_{04}} \times 100\% \quad (11$$

- 什么是加流测压？
  - 大多数MOSFET参数都是加电流测电压（FIMV）
  - 此处利用被测的精密电流和高压标准电阻的乘机计算标准高压电压$V_{真值}=I_{回路}\times R_{标准}$，与内部电压表读数$V_x$比较计算误差
  - 由于标准电压表在高压测量时需要通过分压器进行，且电压表输入阻抗会造成负载效应，若与标准电阻并联还会导致分压比大幅改变，所以此处没有用标准电压表或高压电压表。

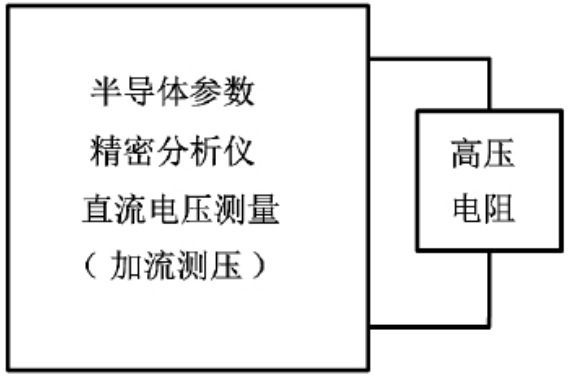


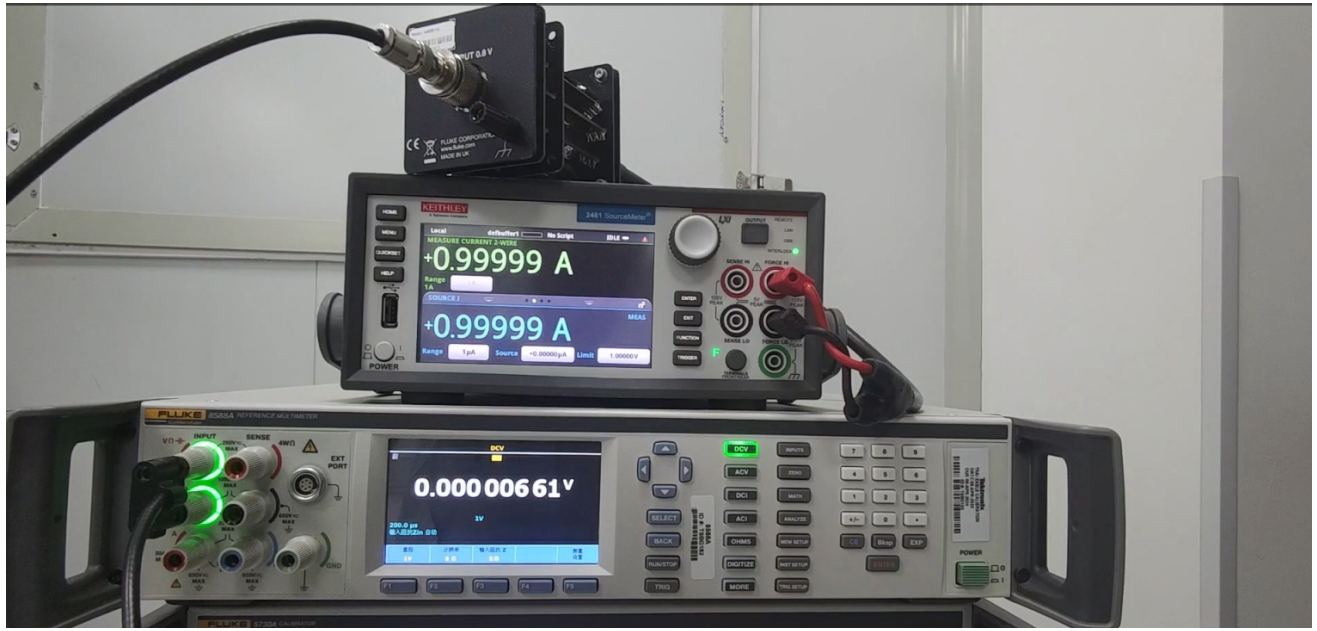
图 9　直流电压测量±(100 V～3 kV) 校准连接框图

- 校准难点
  - 为啥被测直流电压测量功能，但标准器却好像只有一个标准高压电阻？
  - 加流测压啥概念？

©2026 Fluke Calibration

标准表+分流器法校准脉冲电流演示——使用8588A+A40B

脉冲电流校准——电流最大可到100A，取决于具体分流器型号



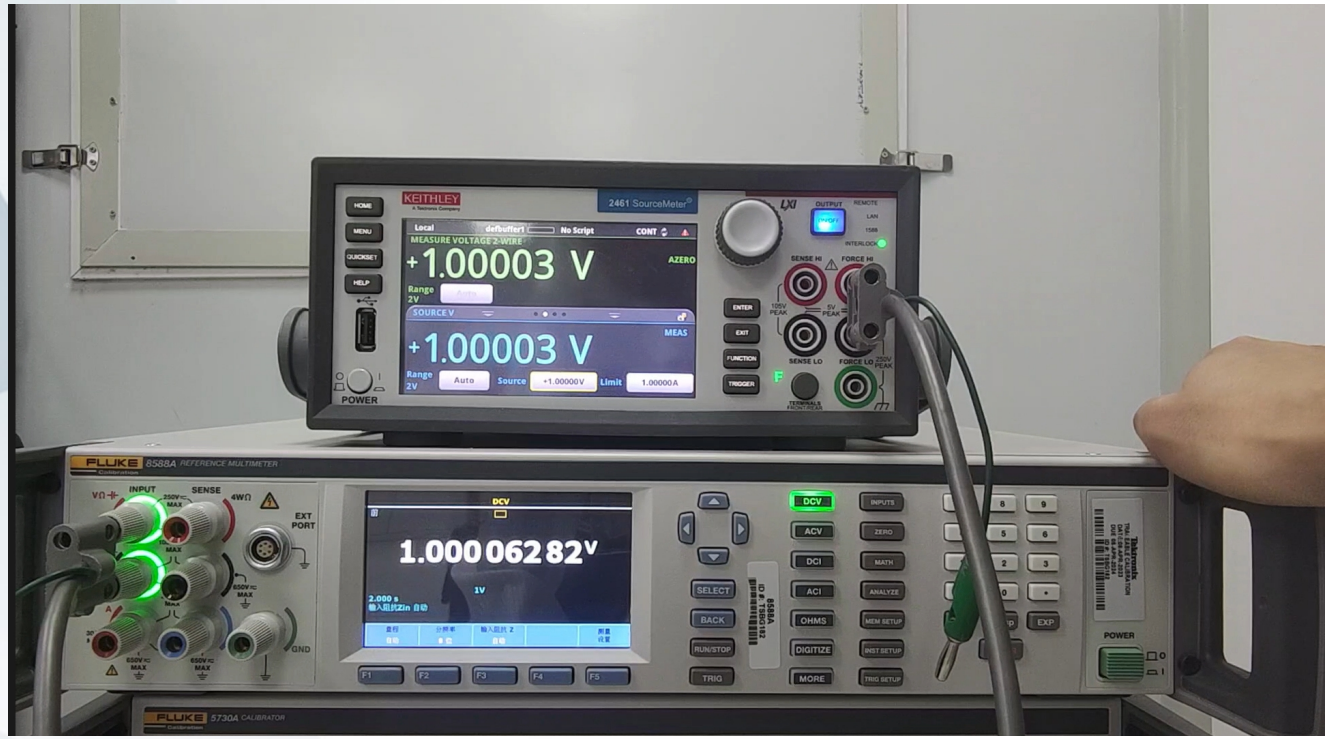
视频：[用8588A和A40B测试源表脉冲电流功能.MP4]



©2020 Fluke Calibration

标准表法校准直流电压演示——使用8588A

- 直流电压校准

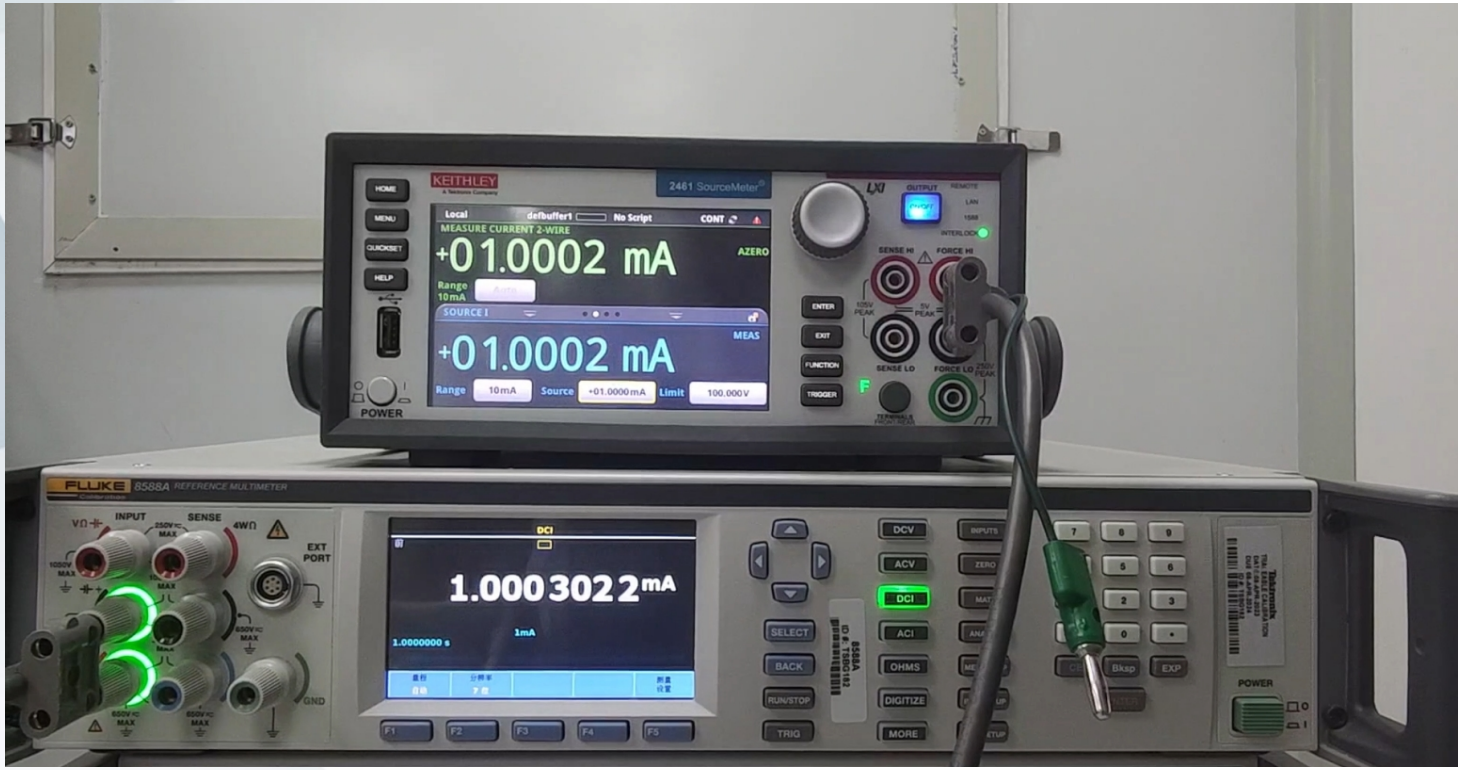


视频：[用8588A测试源表电压功能.MP4]

©2020 Fluke Calibration

标准表法校准直流电流演示——使用8588A

- 直流电流校准

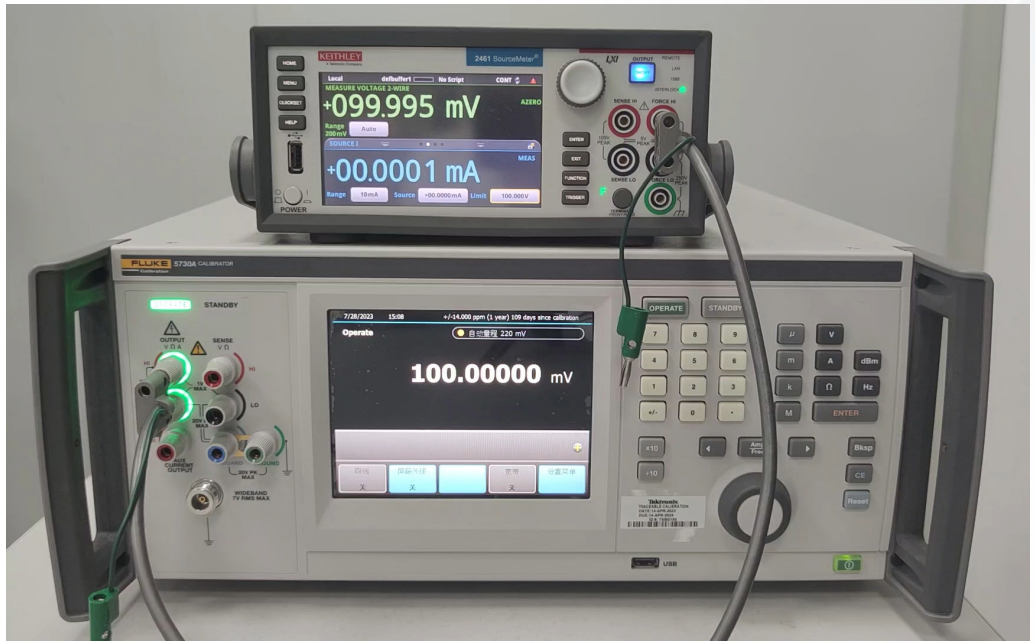


视频：用8588A测试源表电流功能.MP4

©2020 Fluke Calibration

标准源法校准直流电压演示——使用5730A

- 源表的直流电压表功能
  - 做为直流电压表时，将源表设置为电流源模式，输出电流设置为0，测量电压。
  - 5730A输出直流电压，源表进行电压测量。
- 源表的直流电流表功能
  - 做为直流电流表时，将源表设置为电压源模式，输出电压设置为0，测量电流。
  - 用5730A输出电流，源表进行电流测量。



视频：用5730A测试源表电压电流功能.MP4

©2020 Fluke Calibration

谢谢各位！

- 福禄克公司计量校准部网页：cn.flukecal.com
  - 配音/视频的产品和技术介绍
  - 视频培训资料
  - 产品说明书和应用文章
  - 留言，提出问题。
  - 参加福禄克计量学院课程



- 电学技术支持：
- 杨胜利：　　139 1052 6912
- 施　冉：　　159 1053 8924
- 董文祺：　　183 1060 3711

©2026 Fluke Calibration

总结

- 半导体参数测试仪校准参数多，校准过程复杂，需要众多校准标准协助，福禄克一些设备可以在其中发挥关键作用
  - 8588A 核心优势：
    - 高精度(3.5μV/V DCV 准确度)、宽量程、5MS/s 高速数字化采样，不仅可以直接与半导体参数测试仪内部的电压表进行比对，也可以结合标准高阻箱测量其回路电流，从而实现对半导体参数测试仪内部的电流表的校准。
  - 5730A 核心优势：
    - 输出电压准确度高（3.5ppm），长期稳定性号，且具有完备的屏蔽保护功能，可以配合高阻箱或电流指零仪实现精确的pA级电流测量
  - A40B分流器 核心优势
    - 自身电阻准确度高，稳定性好，结合8588A可以实现半导体参数测试仪的PMU模块精确校准。
- 福禄克产品具有精准、易用、耐用、安全的良好口碑，可以帮助用户实现半导体参数测试仪的精准高效校准。



©2026 Fluke Calibration