

简化MOSFET和MOSCAP器件 特性分析

解答关于工具和技术的相关问题



索引

1. 半导体特性分析挑战
2. 我知道低电平 DC 测量中有误差，但怎样识别和消除这些误差呢？
3. 我的 AC 阻抗测量呢？我怎样诊断和校正误差？
4. 在 MOSFET 和 MOScaps 上进行 DC 测量时怎样使误差达到最小？
5. 在 MOSFETs 和 MOScaps 上进行常见 C-V 测量有哪些最佳惯例？
6. 在我不得不重新配置探头站从 DC I-V 测量切换到 C-V 测量时，我开始遇到测量问题，为什么这么复杂？
7. 那么我怎样进行连接？
8. 我怎样控制这个开关？
9. 我的实验室预算真的有限。我怎样进行这些测量，既采用最佳惯例，而又不用花太多的钱？
10. 我在哪里可以进一步了解怎样处理半导体特性分析挑战？

1



常见半导体测试目标

- 半导体设计人员规范测试
 - 保证器件满足要求的功率规范
 - 确定器件行为在整个范围内是否达到预期
 - 确认器件在任何条件下不会发生危险
- 材料研究人员测试
 - 考察样品劣化或故障
 - 确定样品纯度
 - 检查材料的均匀度

半导体特性分析挑战

工程师和研究人员一直面临着创建新半导体技术或工艺，或改善现有工艺的挑战。不管挑战是为下一代智能手机设计功率更低的前端，还是考察高效率太阳能电池板使用的新材料，您都需要测试工具和测试技术，进行精确的高精度和高效率电气测量。

本电子指南解答了有关如何更好的进行半导体测量的常见问题，重点解释 DC I-V 和电容 - 电压 (C-V) 测量。同时还介绍了更加具体的应用，及如何简化最具挑战测量的的应用要求。

诊断常见的半导体测试误差

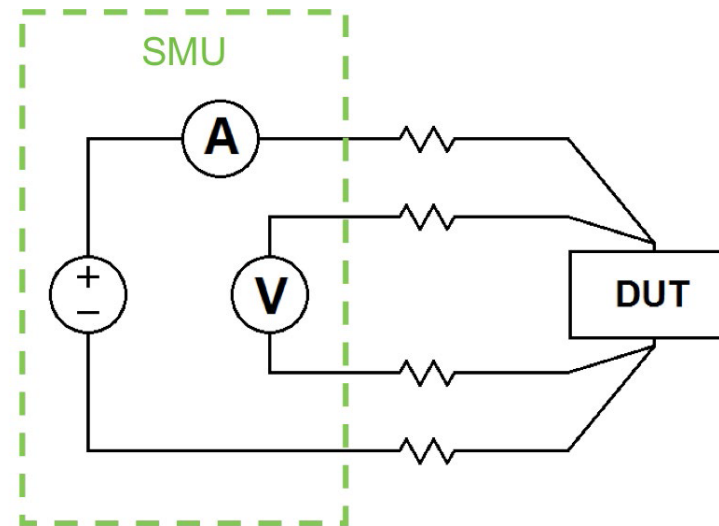
测试挑战	可能的问题来源
测量产生非预计结果	测量路径中的阻抗过高
	高电缆泄漏
	被测器件 (DUT) 接近发生故障
	测量正确，但器件的行为方式不合预期
测量产生无意义的结果	电缆已连接或接反
	DUT 爆表或瘫掉
	软件配置不正确或有漏洞
	测量硬件瘫掉或配置不正确

2

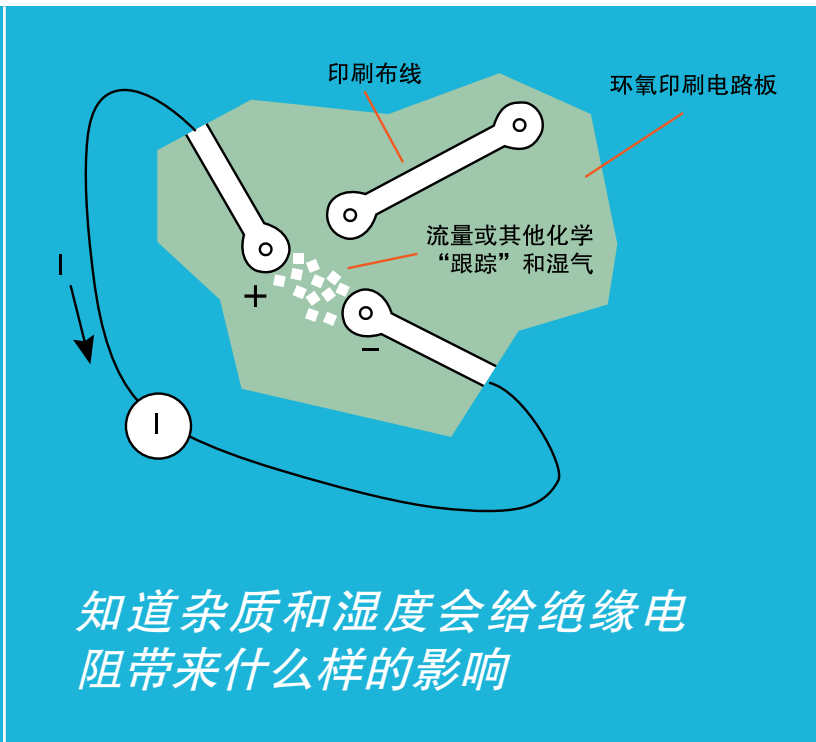
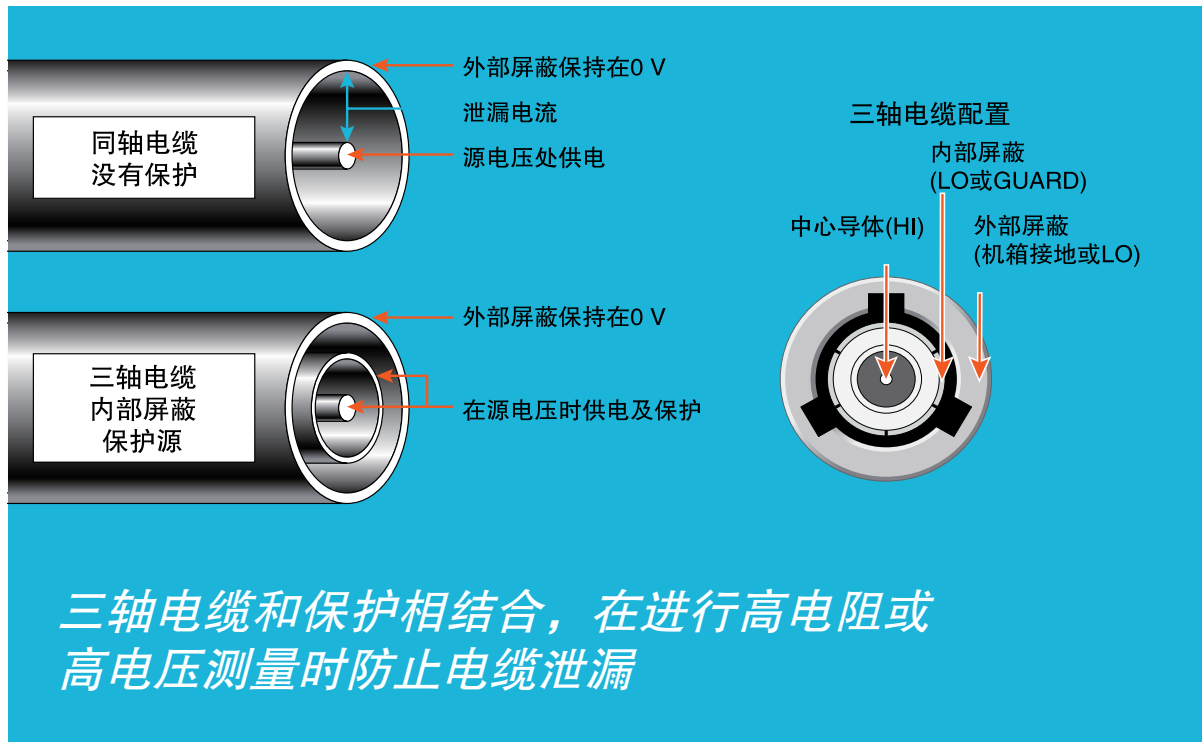
我知道低电平 DC 测量中有误差，但怎样识别和消除这些误差呢？

每种低电平测量都受不同误差来源的影响，但有一些小贴士可以消除这些误差。

对低电阻测量，传统双线技术把不想要的引线电阻引入测量中。测试电流会在引线电阻中引起小的、但明显的电压暂降，因此仪表测量的电压与直接经过测试电阻的电压并不是一模一样，从而导致明显误差。通过使用图中所示的四线 (Kelvin) 连接方法，测试电流被强制通过测试电阻，通过一套测试线，然后使用单独的一套传感线测量经过 DUT 的电压。流经传感线的任何小的电流一般都可以忽略不计，因此源表 (SMU) 仪器测量的电压基本上与经过电阻的电压相同。电压传感引线连接时应尽量连接被测电阻器。

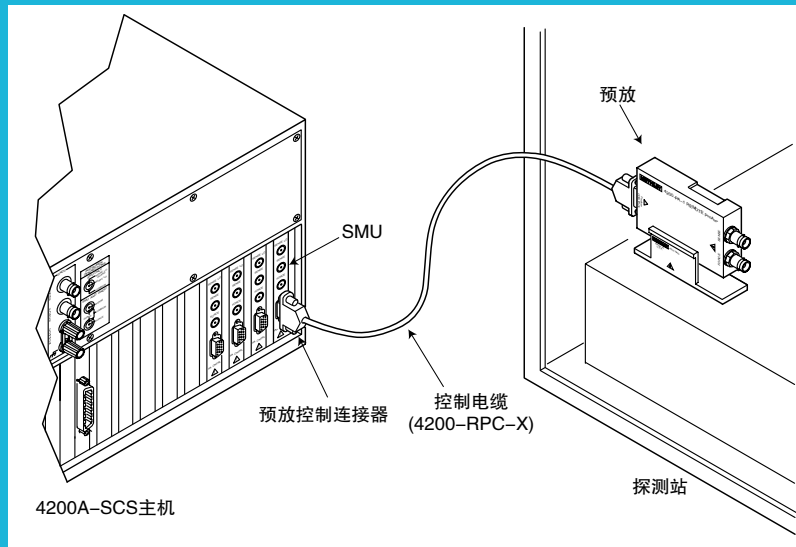


选择四线 DC 测量，而不是两线测量，最大限度地降低引线电阻误差。



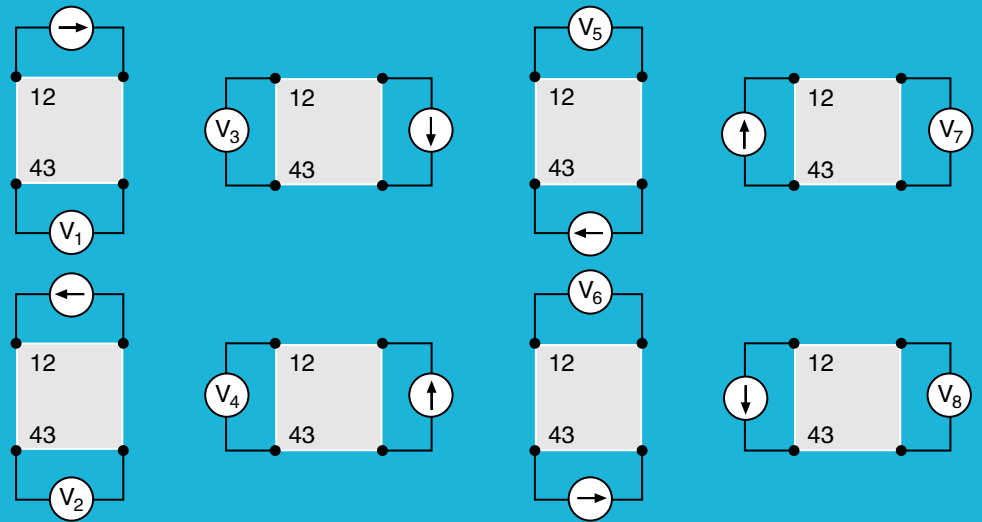
保护功能通常用来防止电缆绝缘出现电流泄漏。把保护电压连接到屏蔽或同轴电缆上，如果保护电压超过 30 Vrms，那么会出现安全隐患。三轴电缆消除了这种隐患，它在保护屏蔽周围加了一个外部屏蔽，外部屏蔽连接到接地或 LO 上。这种方法可以安全地传送两个信号，任何一个信号都可以不在接地电位，同时通过屏蔽两条线，在每条导体和接地之间保持高电阻，保持高阻抗完整性。在使用 SMU 测量低电流时，保护端子降低了电缆和测试夹具的泄漏电流。

高湿度（由于凝结或吸水）和离子污染（体油、盐或焊接热溶剂）会明显降低测试夹具的绝缘电阻，会给高阻抗测量带来严重影响。任何湿气都可能与存在的任何杂质相结合，产生电化学反应，可能会产生偏置电流。例如，如果环氧印刷电路板没有彻底清除蚀刻溶液、热溶剂或其他杂质，那么在导体之间会产生几纳安的电流。为避免这些问题，应选择耐吸水的绝缘体，使湿度保持在适当的水平（理想情况下 <50%）。测试系统中的所有元件和测试夹具应保持清洁，且没有杂质。



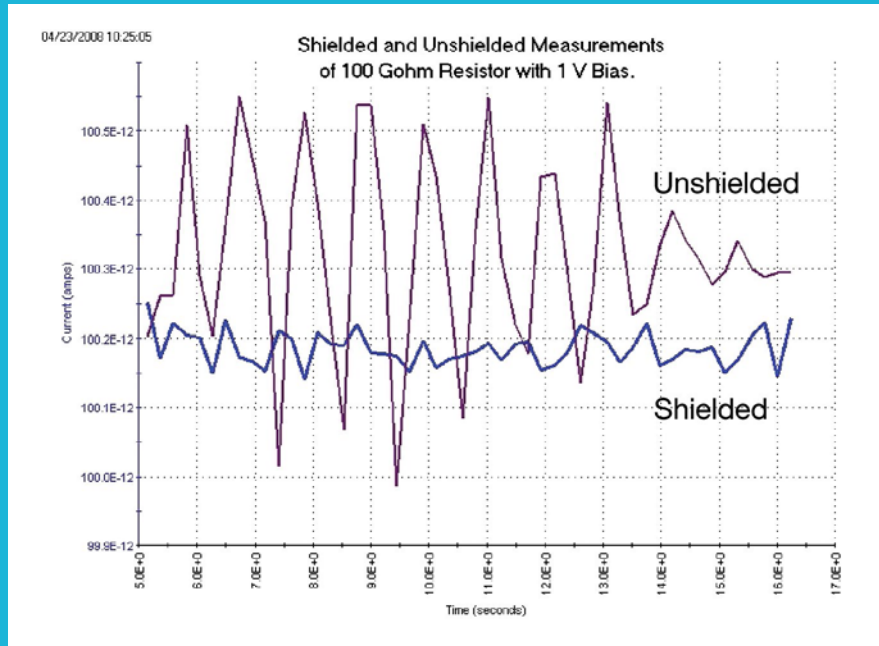
使用预放，使测量系统尽可能靠近 DUT

对超低电流或超高电阻测量，仪器线缆中的少量噪声都会产生很差的信噪比。最好把测量系统移到离 DUT 更近的地方，以消除这类噪声，但很难把仪器直接放在 DUT 旁边。然而，在探测支架或测试夹具上，在 DUT 附近装一个预放模块，则可以更简便地把关心的信号拉出噪底。



使用四点探测技术，确定半导体材料的电阻系数。

在四探头或 Kelvin 技术中，用其中两只探头供应电流，用另两只电流测量电压。使用四只探头消除了由于探头电阻、每只探头下的扩展电阻以及每只金属探头和半导体材料之间接触电阻导致的测量误差。由于高阻抗电压表吸收的电流很少，因此探头电阻、扩展电阻和接触电阻中的电压暂降非常小。



使用静电屏蔽防止静电场导致的测量不稳定。

在充电的物体放到未充电的物体附近时，会发生静电干扰。通常来说，干扰的影响是注意不到的，因为电荷在低电阻时会迅速消散。然而，高电阻材料不允许电荷迅速衰落，可能会导致测量不稳定。一般来说，在进行 $\leq 1 \text{ nA}$ 电流测量或 $\geq 1 \text{ G}\Omega$ 电阻测量时，静电干扰才是问题。为降低这些场的影响，被测电路可以密封在静电屏蔽内。注意 $100 \text{ G}\Omega$ 电阻器没有屏蔽的测量和屏蔽的测量之间显示出明显差异。没有屏蔽的测量的噪声要比屏蔽的测量高得多。

FOUR STEP ERROR CHECKER

FREE! For your measurement handbook

HOW TO AVOID COMMON MEASUREMENT ERRORS

1 Measurement Type and Typical Applications	2 Error Symptoms	3 Likely Causes	4 How to Avoid
Low Voltage Standard Cell Interconnect and Interconnectivity Milli-Voltage Thermocouple High-Resistance Contact Voltage Low Voltage Sensors	Offset Voltage Noisy Readings	Thermoelectric EMF Thermocouple age Magnetic Interference Ground Loops Leadwire Inductance	Keep all connections clean and secure See above Cover the leads or shield pairs, particularly from magnetic fields Change in ground at only one "star" point
Low Current Diode Reverse Leakage Current MEMS Gas Leakage Current MEMS Jet-Stream Current Single Electron Device Low Electron Current IC Leakage Current Piezo Charge Pumping Current Photocurrent Current	Offset Current Noisy Readings	Stray Field Current Dielectric Loss Current Dielectric Loss Current Electrostatic Coupling Adhesion / Information High Input Impedance Offset Current Error Voltage Divider	Shield the leads and connections from walls Shield the contacts with RTI Shield and avoid high voltage and magnetic fields Include zero calibration, the low noise cables the short connector and shield connections Shield the connector for all and water
Low Resistance Superconductor Resistance Material Conductivity Relay/Connector Contact Resistance Conductive Ink Silicon Structures	Offset Resistance Noisy Readings	Lead Resistance Thermoelectric EMF Magnetic Interference	Four-wire method (Kelvin connections) Pulse test signal Shield the leads from magnetic fields Remove leads at contact points
High Resistance Insulating Resistance Resistor Resistance Pulverine Conductivity Semiconductor Resistance Spreading Resistance Semiconductor Resistance Van der Waals Resistance	Reading Too Low Noisy Readings	Fluxgate Resistance Low Resistance with RTI Low Voltage Range & Offset Current Electrostatic Coupling Common Mode Current	Use three voltage / source current method Shield or shield the resistor offset with lead shield off the differential voltage Shield and avoid movement and fluctuating voltage away from alternating voltage Ground one side of RTI low noise system
Voltage Drop High Impedance Source	Reading Too Low Loading Error Noisy Readings	Shield Resistance Offset Current Electrostatic Coupling	Protect and cables with higher resistance to loading will effectively increase their ESR See above Shield and avoid movement and fluctuating voltage away from alternating voltage Use electrostatic

KEITHLEY
A Tektronix Company

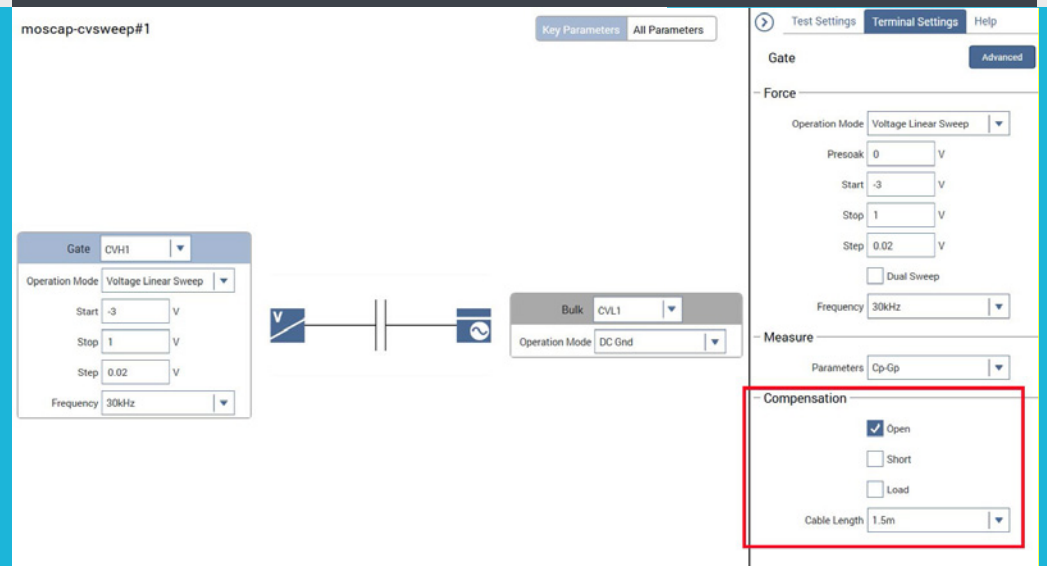
使用我们的四步查错器，进一步了解怎样避免常见的测量误差

3

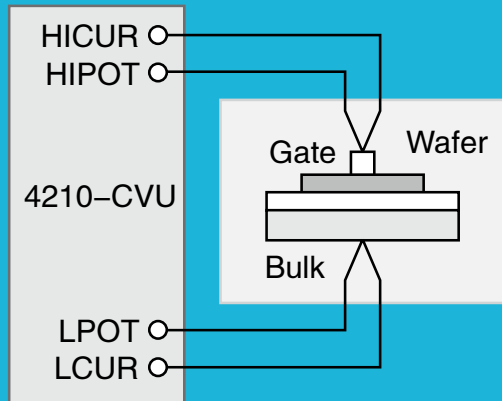
我的 AC 阻抗测量呢？
我怎样诊断和校正误差？

可以使用各种技术追踪 AC 阻抗测量问题的来源。

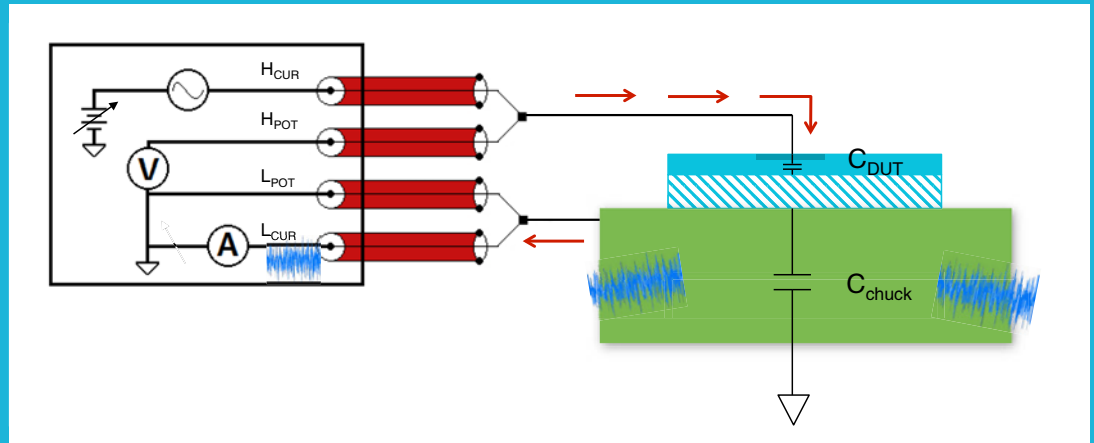
保护功能通常用来防止电缆绝缘出现电流泄漏。把保护电压连接到屏蔽或同轴电缆上，如果保护电压超过 30 Vrms，那么会出现安全隐患。三轴电缆消除了这种隐患，它在保护屏蔽周围加了一个外部屏蔽，外部屏蔽连接到接地或 LO 上。这种方法可以安全地传送信号，同时通过屏蔽所有线、HI、LO、Sense HI 和 Sense LO，并在每条导体和接地或机箱接地之间保持高电阻，来保持高阻抗完整性。在使用 SMU 测量低电流时，保护装置消除了所有不可避免与 HI 和 Sense HI 端子接触的材料上的电压，有助于降低泄漏电流。



使用三轴电缆和保护，在测量高阻抗或高电压时防止电缆泄漏。



另外还可以进行四线 AC 电容测量。



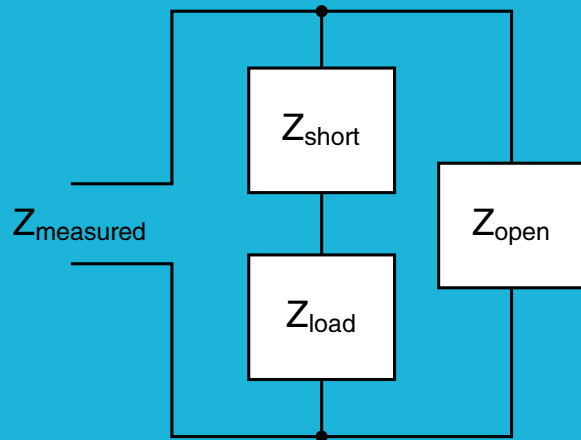
如果信号仍有噪声，则交换高低引线。

与 DC I-V 测量一样，电缆中的寄生阻抗会导致电压暂降，除非被补偿，否则会导致测量不准确。新型 C-V 表通常会配备内置偏置校正工具。

即使使用四线配置和电缆补偿，有噪声的信号偶尔仍会扰乱关键测量。这种噪声在电容测量中特别明显，因为它们需要测量非常小的电流，特别容易发生噪声，另外因为供电和测量在不同端子上进行。似乎安静的系统仍可能会有噪声，只是因为它位于测量端子附近。由于供电和测量分开，所以通常可以通过交换高低引线的位置，改变测量发生的端子，来降低或消除这种噪声。

探测站块是一种超大电容器，可以作为大型天线，收集随机噪声。由于基底在电气上连接到探头有噪声的接地，安培表对这种噪声很灵敏，会导致电容测量误差。在进行电容测量时，应一直把 AC 电流表连接到噪声最低的器件端子上，一般来说，这也意味着到接地的电容量最小。

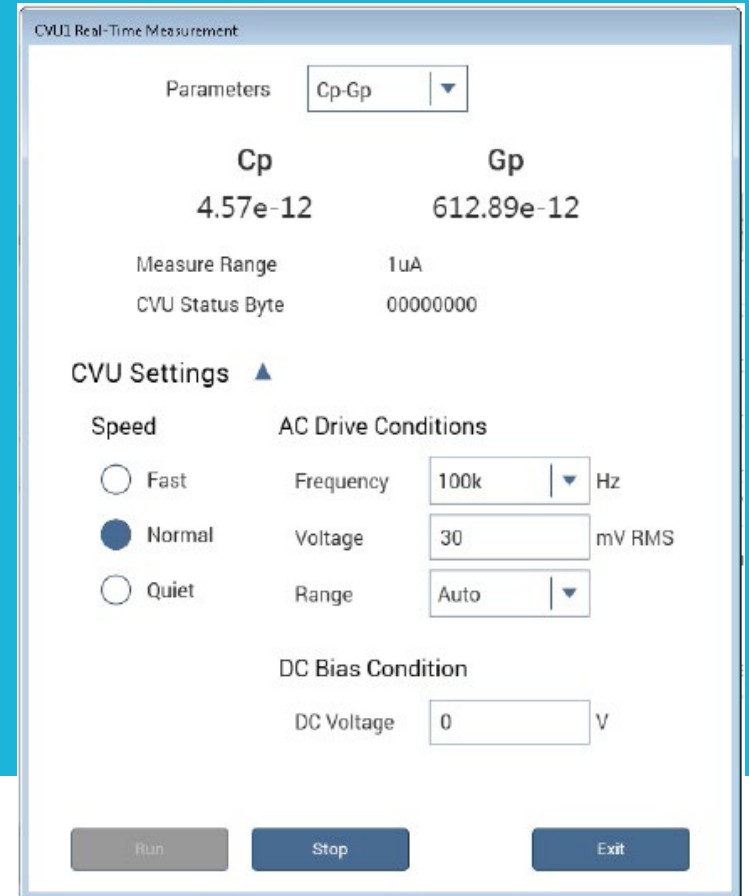
尽管可以手动找到噪声最低的器件端子，但新型系统提供了软件，支持在 AC 源、DC 偏置和电流表位置周围切换，找到最安静的端子，而不必手动改变电缆，抬升探针，或改变测试设置。这可以保证在噪声最低的端子上测量 AC 信号。



采用实时电容
测量窗口。

使用要求的开路、短路和负载
电缆补偿任意组合，增强
测量完整性。

开路补偿会移除 DUT，主要用来补偿线缆或测试夹具中的任何电容。短路补偿会用跳线代替 DUT，主要用来补偿线缆或测试夹具中的任何电感。负载补偿要求在仪表整个频率范围内校准的负载，用这个负载代替 DUT，补偿实际测量中的任何非线性度或增益误差。



这种实时 C-V 表显示了迅速准确的电容测量，无需运行预编程测试，可以用来在执行测量补偿前确保开路和短路。它还可以用来调试测试设置和 DUT。

参阅下面的调试指南，获得与识别常见 AC 测量问题来源有关的进一步建议。

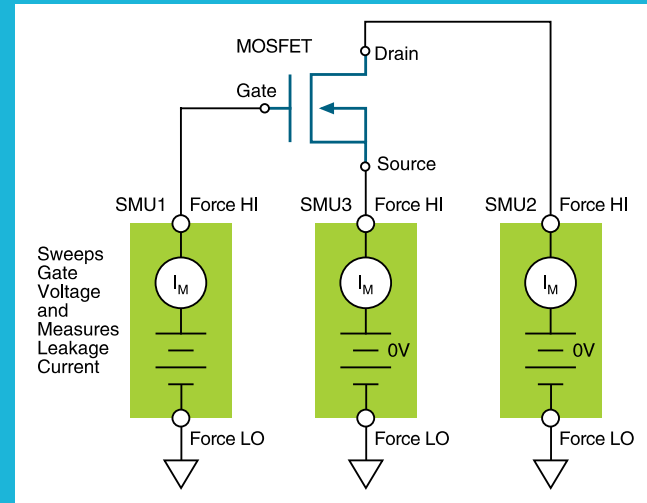
误差症状	可能原因	最小化或避免误差的建议
预计电容过高	寄生线缆和连接电容影响测量	<ul style="list-style-type: none"> ■ 执行测量补偿和 Enable ■ 使用短接地环路，最大限度地降低寄生电容 ■ 尽可能缩短电缆长度
	灯一直开着或盖子打开	<ul style="list-style-type: none"> ■ 关灯或盖上盖子
	其他端子不想要的电容影响测量	<ul style="list-style-type: none"> ■ 使用保护装置
	DUT 短路	<ul style="list-style-type: none"> ■ 试试另一个 DUT，使用 Confidence Check 进行检验
预计电容值太低	器件没有平衡	<ul style="list-style-type: none"> ■ 提高延时 ■ 使用 Confidence Check 检验连接 ■ 可能需要改善晶圆和卡盘之间的接触
	DUT 开路	<ul style="list-style-type: none"> ■ 试试另一个 DUT，检验问题是 DUT 还是其他东西 ■ 使用 Confidence Check
	同轴电缆屏蔽未连接	<ul style="list-style-type: none"> ■ 在 DUT 附近连接屏蔽 ■ 降低测试频率
测量有噪声	DUT 或环境有噪声	<ul style="list-style-type: none"> ■ 使用静音或自定义模式 ■ 视电容幅度提高或降低测试频率 ■ 检验探头与 DUT 接触情况
	DUT 没有静电屏蔽	<ul style="list-style-type: none"> ■ 保证正确的测试夹具屏蔽。屏蔽在电气上必须连接到同轴电缆屏蔽
C-V 最后出现尾部	器件没有平衡	<ul style="list-style-type: none"> ■ 把 PreSoak 电压设置成扫描中的第一个电压，运用充足的保持时间，让 DUT 充电
	器件有泄漏	<ul style="list-style-type: none"> ■ 试着使用 SMU 测量泄漏电流，降低 DC 电压

4

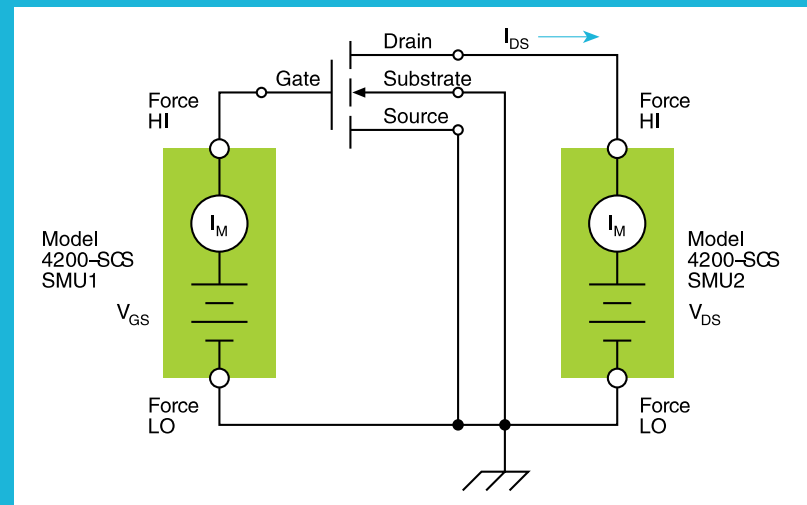
在 MOSFET 和 MOScaps 上进行 DC 测量时怎样使误差达到最小？

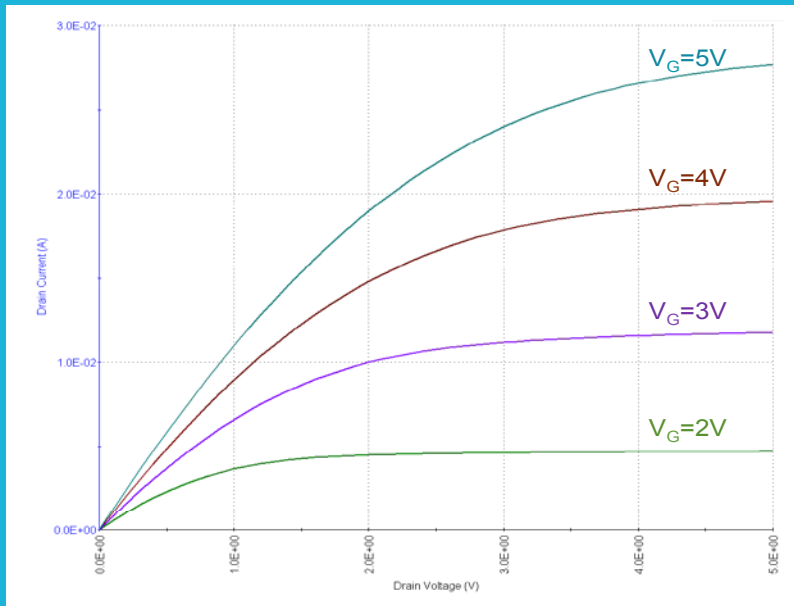
对经常执行的 DC 测试，应遵守下述最佳惯例，如 $V_{DS}-I_D$ 扫描、 $V_{GS}-I_D$ 扫描和低于阈值的电压扫描。

上方的配置方法允许每个节点保持在反馈控制的电压上，测量每个电流。但如果如果没有为每条通道提供一个单独的 SMU，那么可以像下方的连接一样进行连接。但是，这种配置更容易受到有噪声的接地连接影响，在使用长电缆时会产生接地环路。另外，不能测量源极端子上的电流和电压，这可能会导致计算错误。



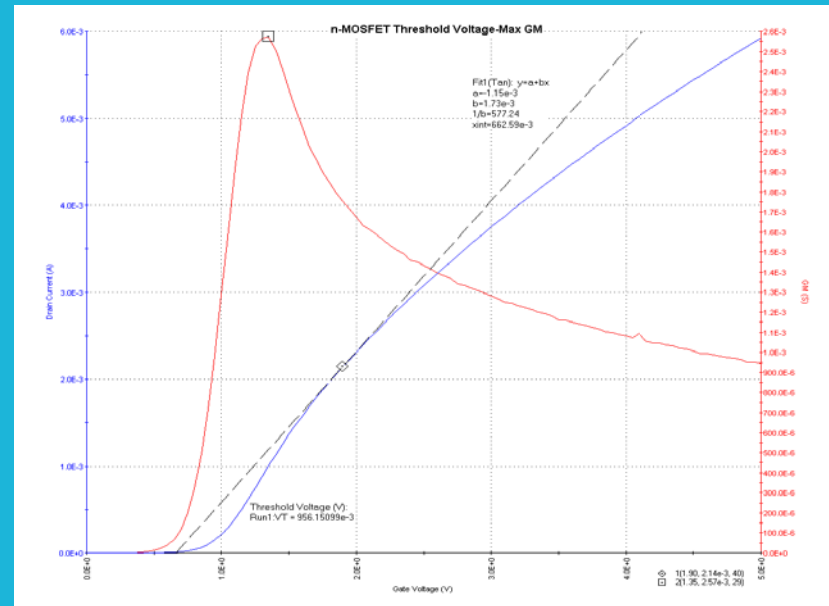
在连接到 FET 时，应把所有引脚捆扎到不同的仪器上，每条通道都有一个 SMU 相连。





使用 $V_{DS}-I_D$ 测试了解器件属性，并在设计中采用它所需的特性分析。

$V_{DS}-I_D$ 测试需要扫描漏极 - 源极电压，同时使栅极 - 源极电压保持不变。这种测试会产生与 MOSFET 特性分析有关的用户熟悉的一系列曲线。为产生这里所示的曲线，栅极设置成从 2 V 步进到 5 V，共使用四个 1 V 步进。对每个栅极电压步进，从 0 V 到 5 V 扫描漏极电压。这些结果为了了解器件属性提供了重要信息。



在执行 $V_{GS}-I_D$ 测试时，应让栅极相对于源极保持在恒定电压，扫描栅极 - 源极电压，测量漏极电流。

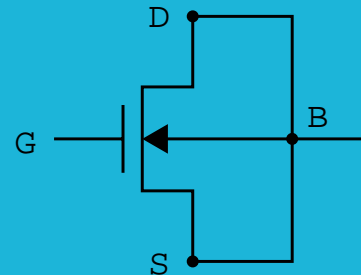
图表中的蓝线说明了 FET 可以怎样作为压控电流源使用。改变栅极电压，同时保持漏极电压不变，会得到重要的特性分析曲线。通过推断与曲线正切的直线，找到零截距，这种测量还可以以图形方式计算阈值电压。图表中的红线说明了计算互特 (g_m)，找到最大互导值 (V_{th})。

5

在 MOSFETs 和 MOScaps 上进行常见 C-V 测量有哪些最佳惯例?

FET 的许多 C-V 测量要求把漏极、源极和块端子捆扎起来，可以是焊接，也可以进行相应的探头站连接。首先要把 C-V 表的 CV HI 端子连接到器件的栅极上，把 CV LO 端子连接到器件的漏极 / 源极 / 块上。然后执行电缆补偿测量：首先移出器件，执行开路补偿；在栅级和漏极 / 源极 / 块端子之间放一条跳线，执行短路补偿；最后，插入一个负载代替跳线，执行负载补偿。一旦替换了 FET，进行准确 C-V 测量的设置就完成了。

简单的 C-V 扫描结果可以提供与 MOS 器件有关的大量信息。栅极 - 块电压和栅极电容测量可以揭示氧化物厚度和杂质浓度。从这些值中，可以使用标准并联板电容器公式算出栅极氧化物厚度，用其他公式算出杂质浓度和 Fermi 电位。

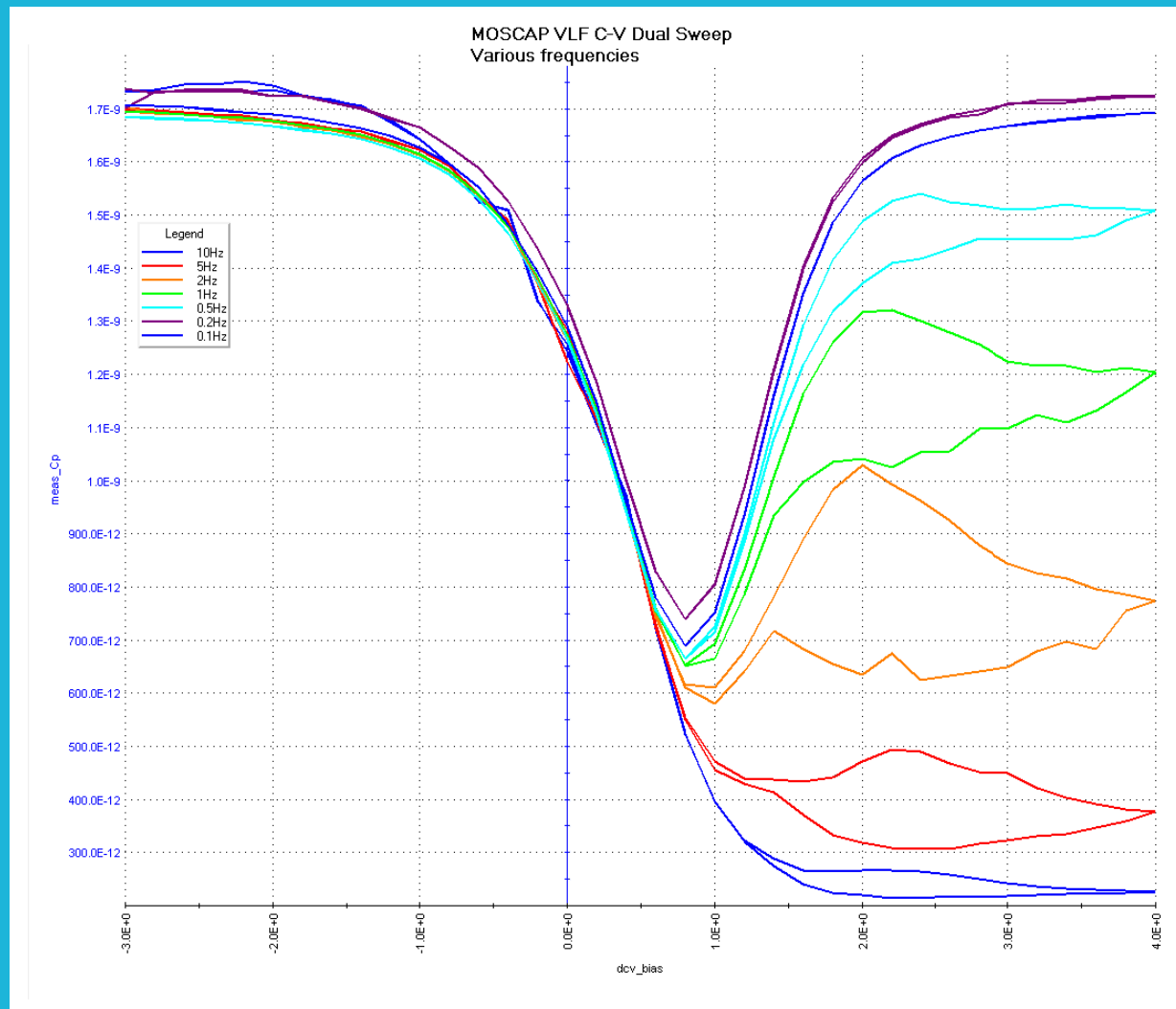


正确连接，确保测量精度。

把漏极、源极和块捆扎在一起

使用软件包，最大限度地减少手动计算 C-V 扫描结果的需求。

在电容器上进行 10 Hz C-V 扫描可以分析只在低频率时显现的器件特点。这一器件一般在晶圆其他地方测试的 MOScap 器件上进行。由于 10 Hz 的最大测试频率完全位于 SMU 仪器的性能能力范围之内，因此它采用 SMU 进行超低电流测量。



使用四线测量、保护和屏蔽，确保超低频率 C-V 测试结果精度，并使用预放。

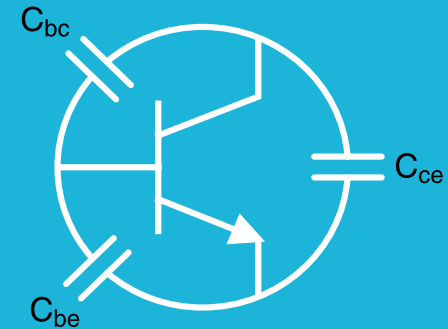
6

在我不得不重新配置探头站从 DC I-V 测量切换到 C-V 测量时，我开始遇到测量问题，为什么这么复杂？

使用探头站在晶圆级进行的测量一般要求使用配线板，配线板上的连接器与 C-V 表会不匹配，因此也与 DC 仪器不匹配。这些连接对每种配置要求不同的适配器，可能位于实验室中很难接触的位置。一般来说，每次测试配置要求重新布线时，电缆常数都会略微变化。这必需重新运行任何补偿，来更新使用的常数，这会降慢测试流程，提高出错的机率。在必须重复以前的测试时，需要重复所有这些步骤，所以根本不可能完全复现与以前一样的常数。

4200A-CVIV I-V/C-V 多开关模块可以消除这种麻烦和测量不确定度。在与 4200A-SCS 参数分析仪一起使用时，它在 I-V 测量和 C-V 测量之间自动切换。此外，C-V 测量可以移到任何输出通道，而不需重新布线。通过把探针保持在晶圆测试站上，这种 4 通道开关可以在 I-V 和 C-V 测试过程中简便地保持相同的阻抗。此外，它不必改变测试设置和电缆，从而可以增强测量效率。

由于四条输出通道，4200A-CVIV 可以独立开关最多四个 SMU。它还为 CV HI 端子、CV LO 端子及 CVU 电缆外部屏蔽提供了三个 1×4 复用器。每条 CVU 通道可以切换到任意或多条输出通道。任意通道可以切换到开路，让输出保持浮动。四条 SMU 输入通道中每条通道都能支持一个预放模块（用来增强低电流性能）或一个直传模块。



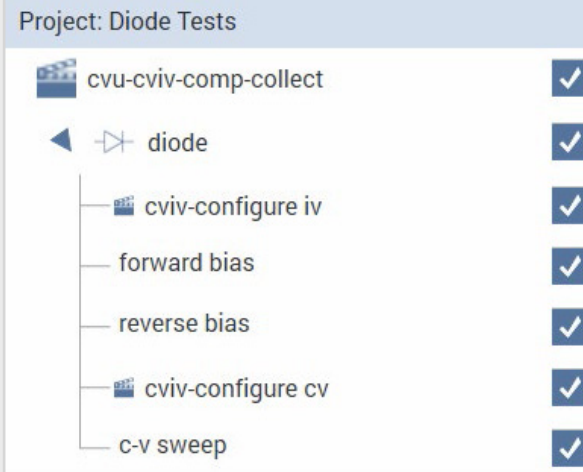
有更简单、耗时更短、更准确的方式从 DC I-V 切换到 C-V。

那么我怎样进行连接呢？



下面是 4200A-CVIV 多通道开关的外部连接。C-V 测量可以移到任何输出通道上，而不需重新布线。用户可以配置每条通道，使用 4200-PA 预放进行低电流测量，或使用 SMU 直传 4200A-CVIV-SPT 实现标准电流分辨率。4200A-CVIV 通过 USB 电缆从 4200A-SCS 主机供电。

我怎样控制这个开关呢？



Clarius™ 基于 GUI 的软件在 4200A-SCS 上运行，可以简便地控制 4200-CVIV 多开关，对要求在相同的器件上进行 I-V 和 C-V 测量的任何应用，其创建了更快速、更高效的器件测试工作流程。除配置 CVIV 开关的自定义操作步骤外，Clarius 提供了每种 CVIV 配置独有的电缆补偿操作步骤。简便易用的项目树结果，如这里所示顺序，简化了应用所需的测试顺序设置。

下面是 4200A-CVIV 可以完成的操作

- 在同一器件上简便地在测量 I-V 和测量 C-V 之间切换
 - 不需要重新布线
 - 不需要重新运行补偿
 - 简便地重新运行不同配置的测试
- 在相同器件多套端子之间测量 C-V，而不需切换电缆
 - 节省时间和线缆
- 开关最多四个 SMU
- 把 CVHI 或 CVLO 复用到四条通道的任意组合
- 使任何端子开路，保持浮动
- 把 CV 保护屏蔽连接到任意通道上，消除噪声

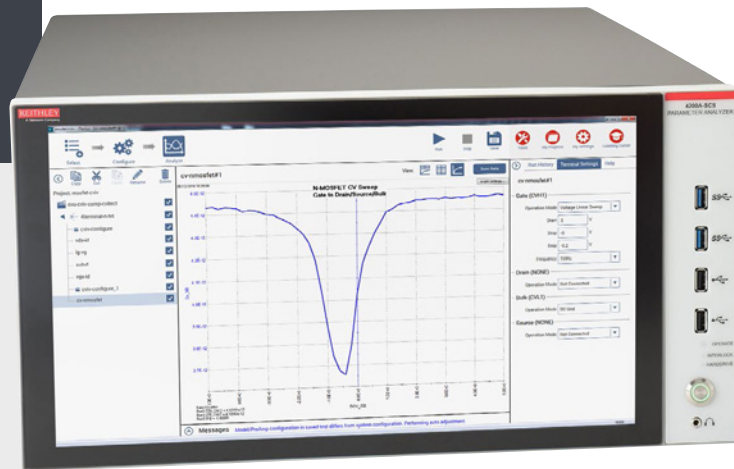
7

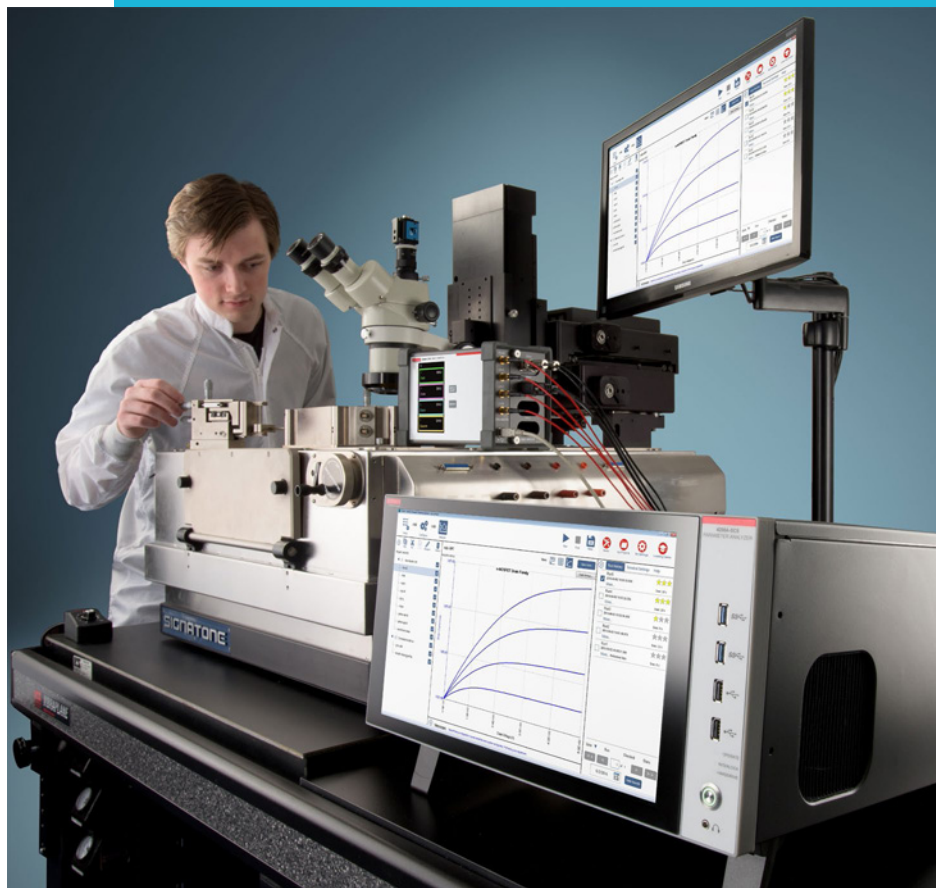
我的实验室预算真的有限。我怎样进行这些测量，既采用最佳惯例，而又不用花太多的钱？

查找可以通过多种方式配置的解决方案，既满足多种测试需求，而又不会降低性能或准确度。

4200A-SCS 参数分析仪可以配置最多 9 个 SMU。我们提供了两款 SMU：中等功率 SMU，范围最高 210 V/100 mA；高功率 SMU，范围最高 210 V/1 A。每台 4200-SMU 中等功率 SMU 或 4210-SMU 高功率 SMU 在主机中占用一个插槽，可以一起用于 4200A-SCS 系统中。所有 4200A-SCS SMUs 都有屏蔽的三轴连接，积极保护低电流和高阻抗测量，并有四线 (Kelvin) 强制和传感连接。

4200A-SCS 选配 4210-CVU 多频率 C-V 仪器模块测量 AC 阻抗，它应用一个 DC 偏置电压，对被测器件 (DUT) 提供一个 AC 电压，然后测量得到的 AC 电流和相位角。它可以在 1 kHz ~ 10 MHz 的测试频率上进行从几飞法拉到几微法拉的多频率电容测量，同时提供高达 ± 30 V 或 60 V 差分 DC 偏置电压。由于多达 4096 个测量点，它可以用来测量电容相对于电压关系 (C-V)、电容相对于频率关系 (C-f) 和电容相对于时间关系 (C-t)，提取许多重要参数，包括掺杂曲线、氧化物厚度、载波寿命以及联结、引脚到引脚和互连电容。





4200A-CVIV 多开关可以在相同的器件上简便地执行 I-V 和 C-V 测量，而不需改变电缆，因为这可能会引入误差或损坏器件。4200A-SCS 和 Clarius 软件可以简便地控制 4200A-CVIV，把 C-V 和 I-V 测试集成起来，集成到一个无缝连续执行的项目中。

当 4200A-SCS 中安装的 SMU 选配 4200-PA 远程预放时，它们能够执行超低电流测量。通过在任意 SMU 型号中增加额外的电流范围，4200-PA 提供了 10 aA 分辨率。对用户来说，SMU 只是表现为提供了额外的测量分辨率。4200-PA 可以安装在 4200A-SCS 背面板上，或放在远程位置（如不透光的机箱或探针板），消除由于长电缆引起的测量问题。

我在哪里可以进一步了解怎样处理半导体特性分析挑战？

参阅我们不断扩大的半导体特性分析资源库。

[半导体特性分析方法和技术](#)

[使用 4200A-SCS 参数分析仪优化低电流测量](#)

[使用 4200A-SCS 参数分析仪进行范德堡和霍尔效应测量](#)

[使用 4200A-SCS 参数分析仪和 4 点共线探头测量半导体材料的电阻系数](#)

[分析材料特性时的电阻系数测量技术](#)

[测量通道有效迁移性的超快速单脉冲 \(UFSP\) 技术](#)

[使用 4200A-SCS 参数分析仪分析 MOS 电容器的 CV 特性](#)

[使用 4200A-SCS 参数分析仪在高阻抗器件上执行超低频电容 - 电压测量](#)

[通过 4200A-SCS 参数分析仪使用缓变率方法进行准静态 C-V 测量](#)

[通过 4200A-SCS 参数分析仪使用](#)

[4200-CVU-PWR C-V 功率分析软件进行高电压和高电流 CV 测量](#)

[使用 4200A-CVIV 多开关和 4200A-SCS 参数分析仪在 C-V 和 I-V 测量之间切换](#)

[“使用 4200A-SCS 参数分析仪把 I-V 和 C-V 测量速度提高两倍” 视频](#)

[怎样进行自动 I-V 和 C-V 测量](#)

[使用 4200A-SCS 参数分析仪分析碳纳米管晶体管 \(CNT FETs\) 的电气特点](#)

[使用 4200A-SCS 参数分析仪分析光伏材料和太阳能电池的电气特性](#)

[4200A-SCS 概览](#)

[4200A-SCS 产品技术资料](#)

[视频：轻松进行参数测试 - 4200 SCS](#)