



Tektronix

半导体材料与器件科学云讲堂

——微机电MEMS测试概述

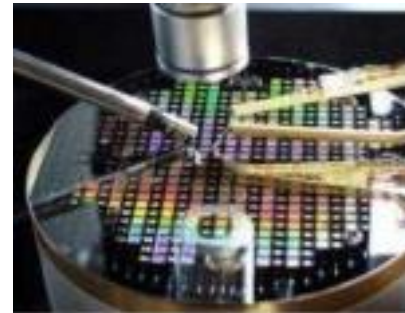
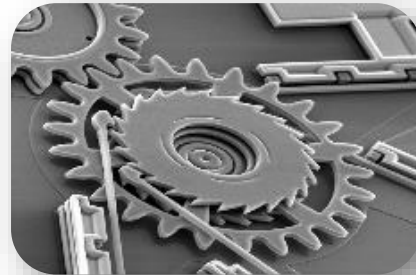
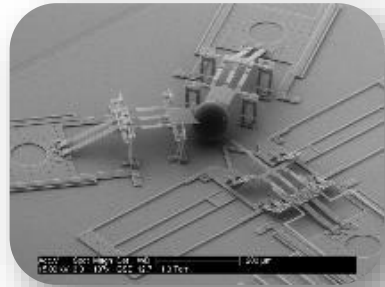
主讲人：林彩霞——半导体领域测试专家

2020/8/14

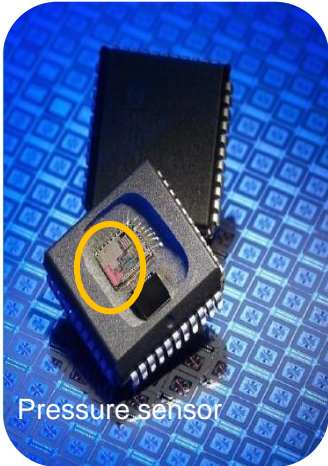
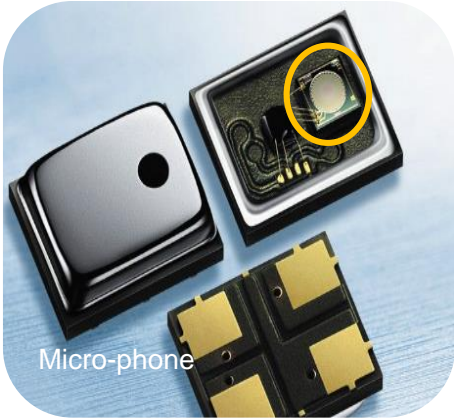
KEITHLEY
A Tektronix Company

MEMS介绍

- MEMS: Micro-Electro-Mechanical System
- 微机电系统, 微电子机械系统
- 尺寸在 μm ~ nm 的独立小系统
- 在电子技术基础上发展起来, 融合了光刻、腐蚀、薄膜、LIGA、硅微加工、非硅微加工和精密机械加工的高科技电子机械器件。
- 体积小、重量轻、功耗低、可靠性高、灵敏度高

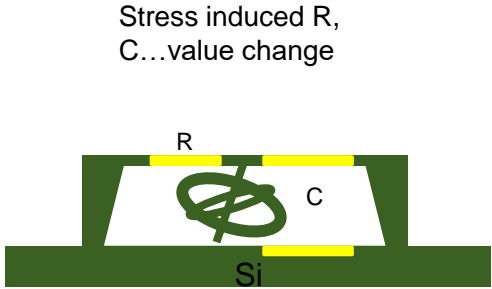


MEMS器件举例

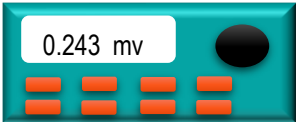


- ◆ Pressure/Force
- ◆ Light
- ◆ Vibration/ acoustic wave
- ◆ Fluidics
- ◆ Temperature
- ◆ Gyro
- ◆ Accel
- ...

Stress →

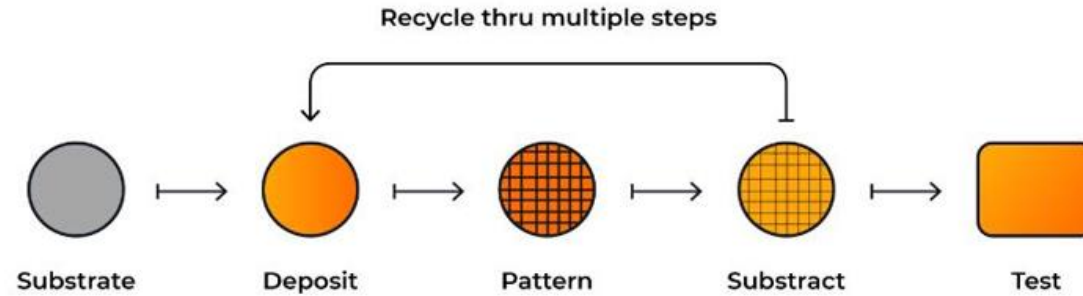


Measurable electrical signal



MEMS与IC芯片的区别：

相同：两者都始于基础衬底晶圆，再进行构建和雕刻。



不同：

- (1) MEMS采用了更多种沉积材料，例如压电材料（钽酸锂，铌酸锂和PZT）和贵金属电极层（金和银）。
- (2) 要产生复杂的三维结构，MEMS制造需要更广泛的处理步骤，包括深反应离子刻蚀（导致接近垂直的侧壁），晶圆级封装以及沉积可能小于一微米厚。
- (3) MEMS微结构的成形既发生在沉积层内又发生在基板内。
- (4) 测试更复杂。IC需要接收电流，MEMS需要交互操作。

MEMS优势

相较于宏观物体的优势

- 1) 尺寸。MEMS可以安装在全尺寸组件无法安装的位置。比如：智能手机、电子可穿戴设备、自动驾驶汽车。
- 2) 速度很快。组件之间的电气距离很短→响应时间快，频率高。
- 3) 性能和精度高、损耗低，灵敏度高。
- 4) 功耗小。对便携式电池的要求低。
- 5) 可靠性高。比如：硅材料可以承受很少的疲劳而反复弯曲，使用寿命长。
- 6) 设计成本虽然可能很高，但使用类似于IC行业的批处理技术可扩展的批量生产导致MEMS 的单位成本非常低。

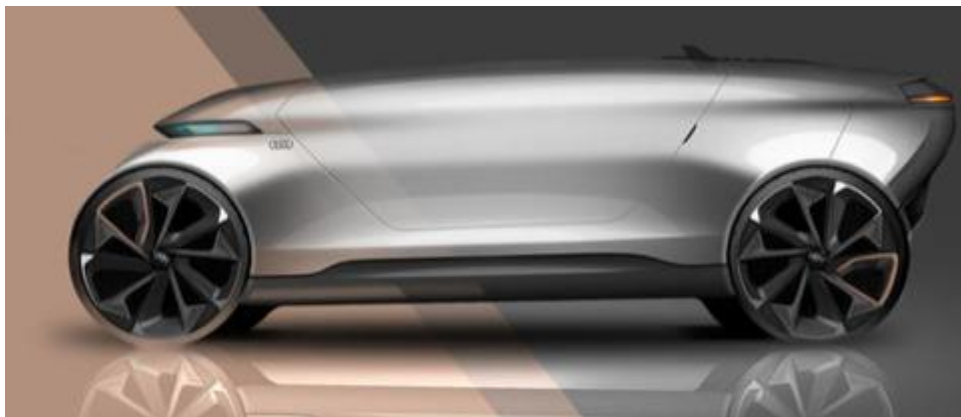
MEMS应用

MEMS传感器：惯性、环境、光学、生物等。

加速度计、陀螺仪、惯性测量单元(IMU)、麦克风、压力传感器等

应用：

自动化测试设备、自动驾驶汽车、宽带仪器仪表、开关矩阵以及数字衰减器、卫星开关网络、国防系统、智能基站天线等多种可重构电路或开关网络。

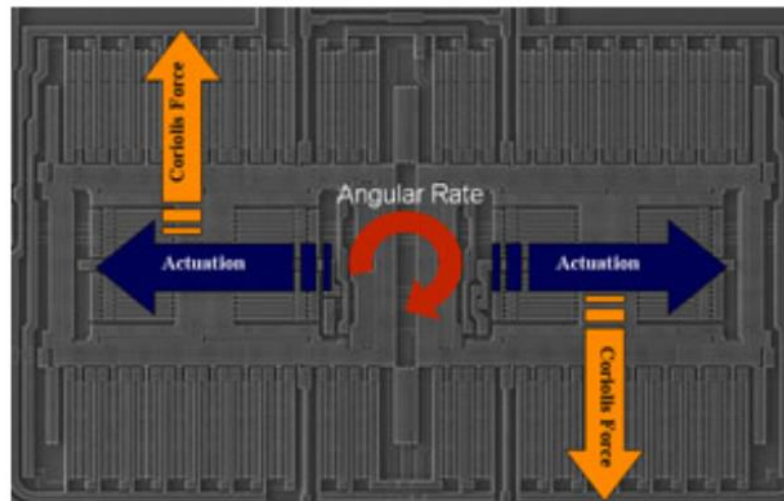


MEMS的IV和CV性能

- 加速度计：
 - 辐射敏感性
 - 交叉灵敏度
 - 重复性
 - 振动性
 - 测量范围
 - 灵敏度/分辨率
 - 零漂
 - 输出数据速率ODR
 - 噪声密度
 - 自检功能

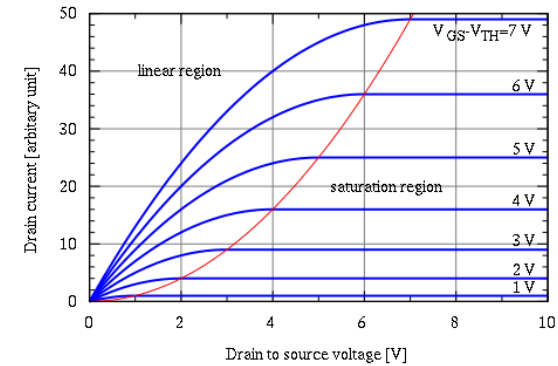
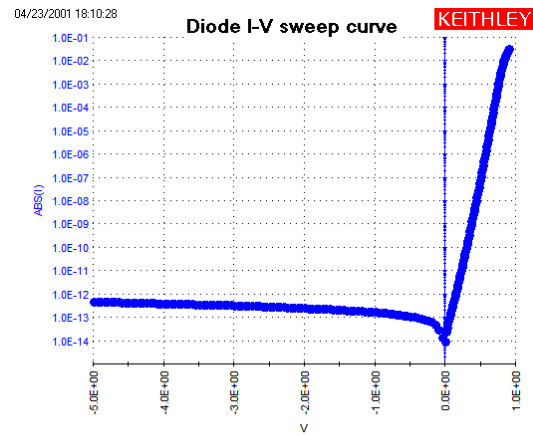
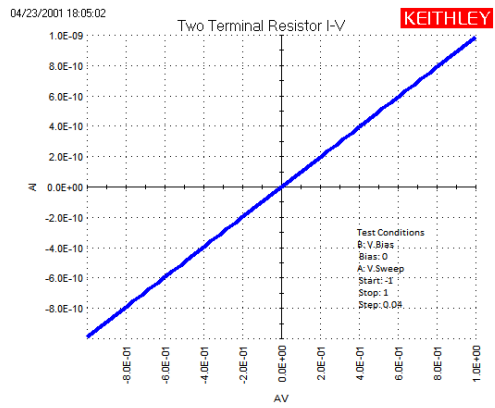
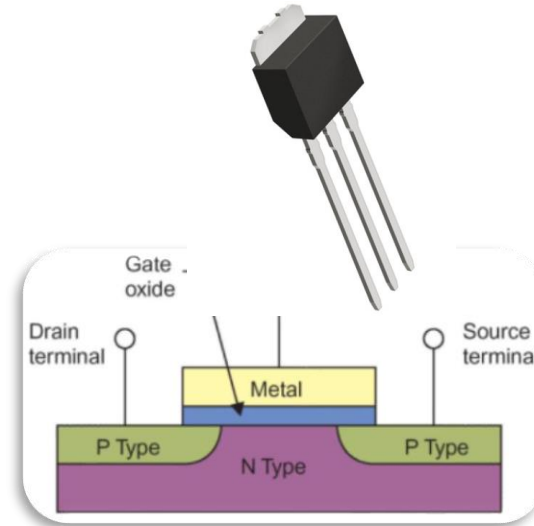
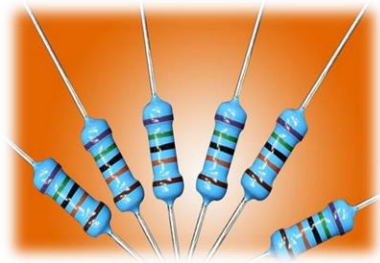
- 陀螺仪：
 - 量程（动态范围）
 - 灵敏度
 - 零角速度输出（零位输出）
 - 轴间交调灵敏
 - 非线性度
 - 线性加速度敏感度
 - 振动敏感度
 - 零偏稳定性
 - 噪声密度
 - 角度随意游走系统
 - 带宽
 - 偏置电压灵敏度

- MEMS陀螺仪的信号调节电路分两部分：
- 马达驱动部分：通过静电引动方法，使驱动电路前后振动，为机械元件提供激励。
- 感测部分：通过测量电容变化来测量科氏力在感测质量上产生的位移。

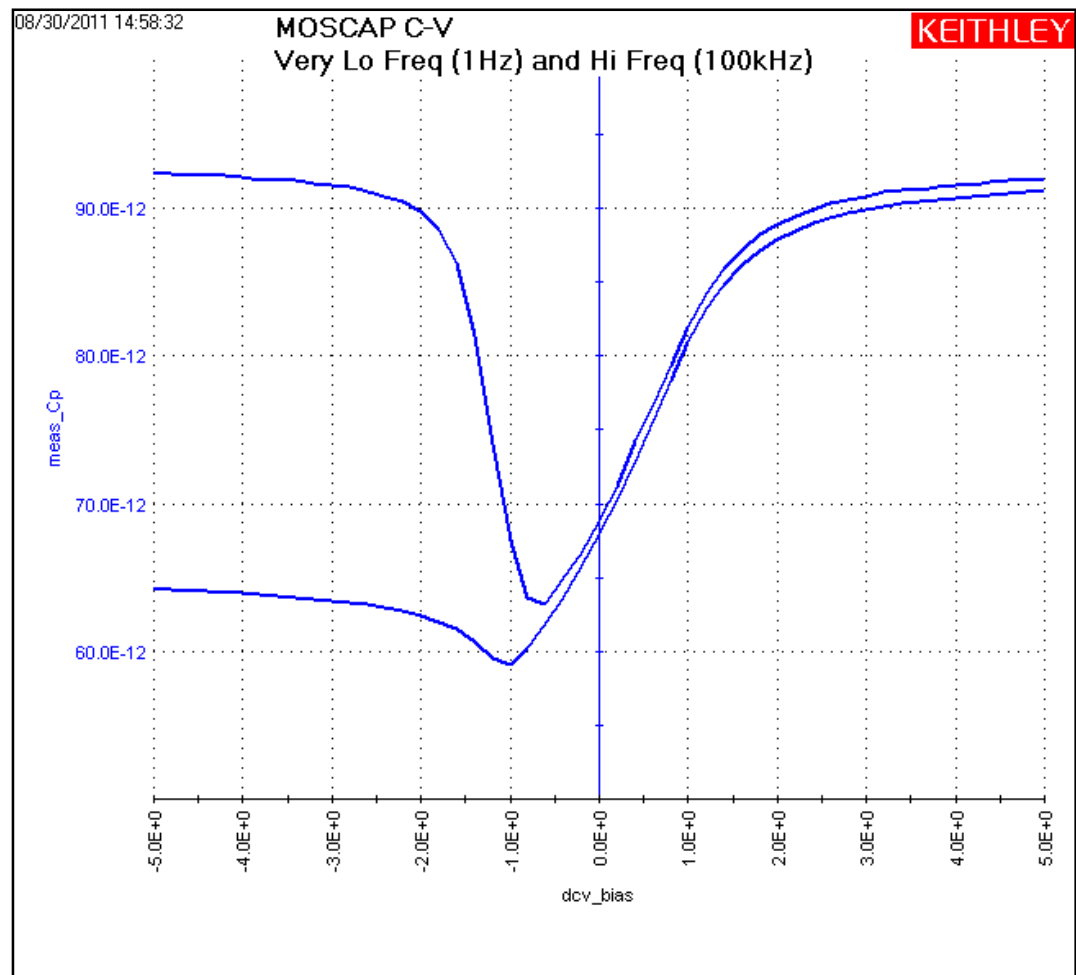
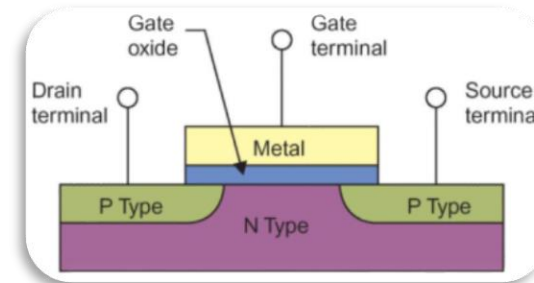


直流 (DC) I-V特性测量

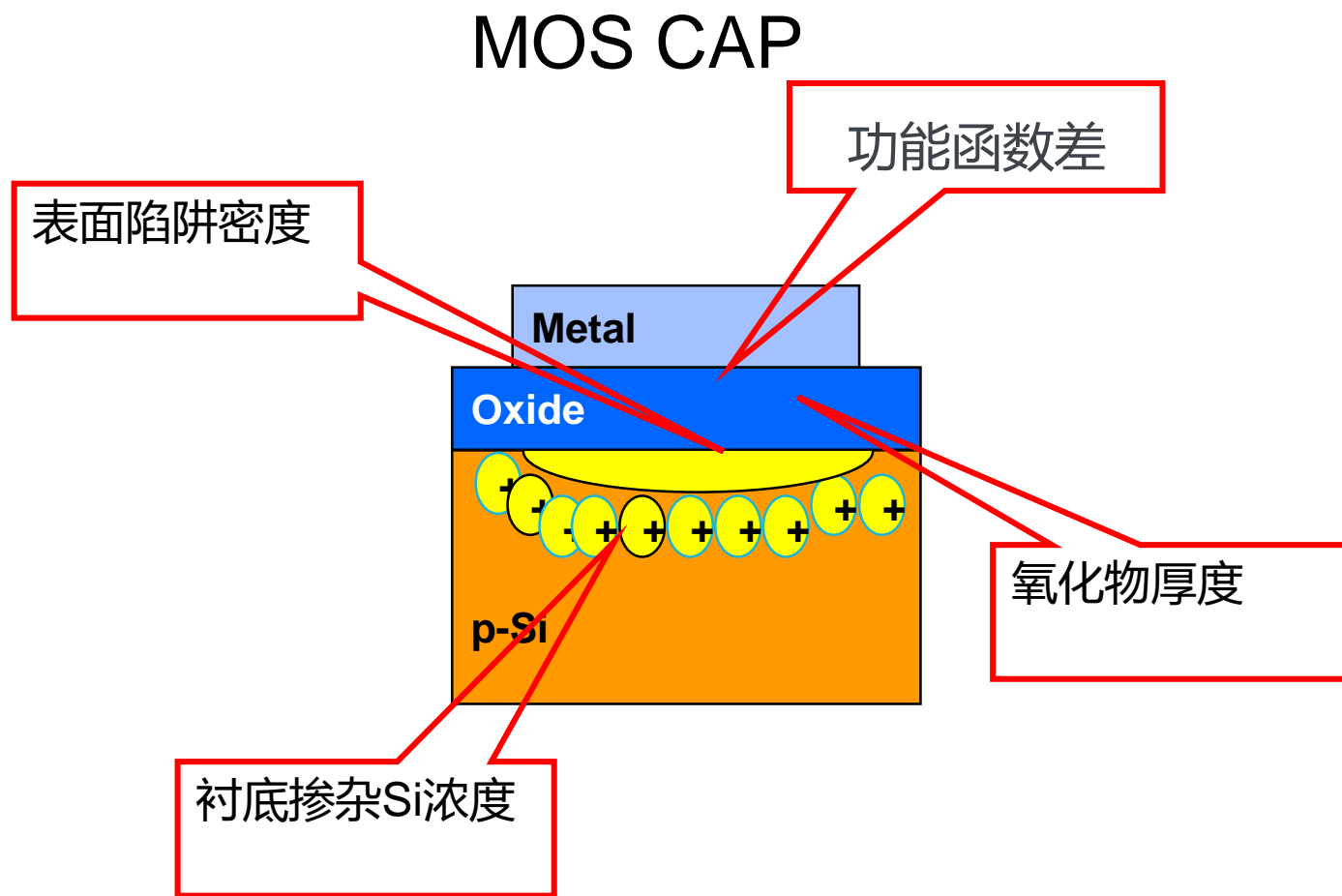
DC I-V 测量是器件及材料特性测量的最基本测试手段



交流 C-V测试



CV测试的原因



MEMS的测试挑战

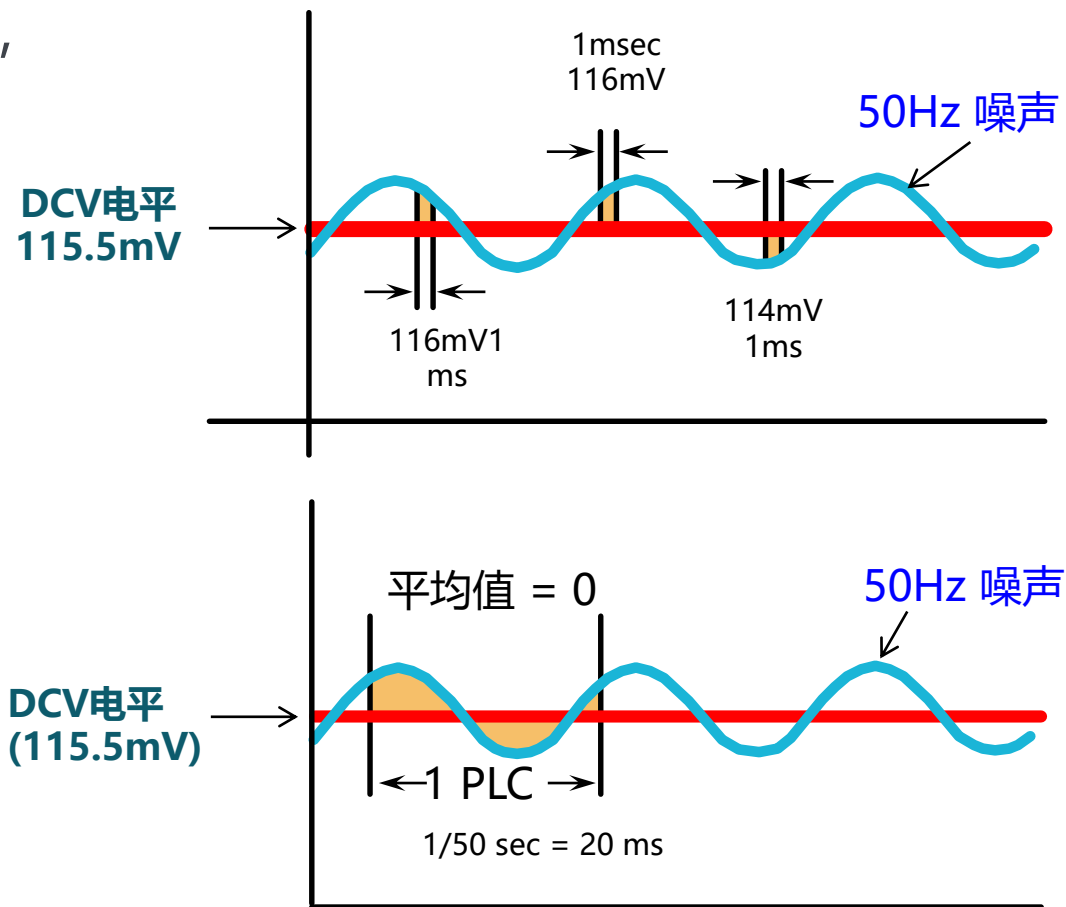
- 时间与精度
- 负载与反馈
- 2线与4线（开尔文测试和四探针测试）
- 加压测流与加流测压
- 同轴与三轴
- 阻抗与电容

(一) 时间与精度

想要快速获得精确测试结果，需要在测试时间与测试精度中选择一个平衡点：

- 测试窗口的积分时间
 - 自动校零
 - 上电稳定时间
 - 自动选择量程/切换时间

工频干扰对测试结果的影响可以通过增加ADC的测量时间来解决，即调高NPLC的数值

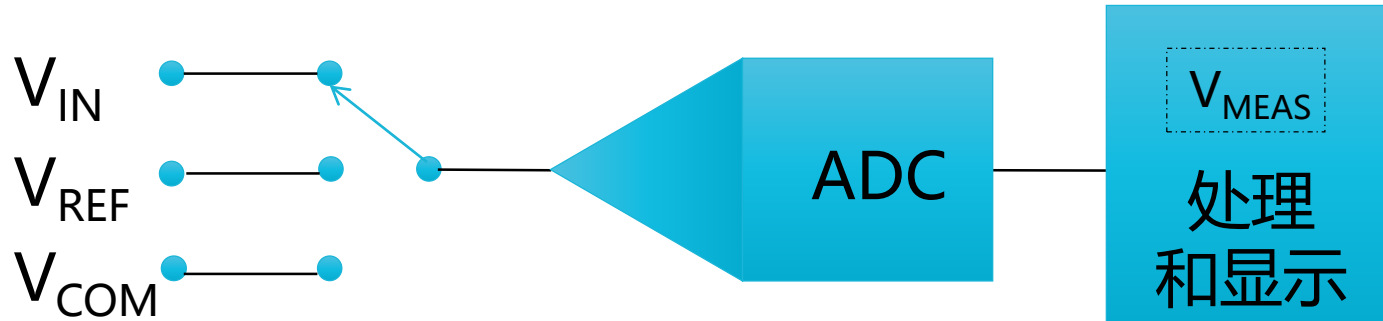


(一) 时间与精度

- 测试窗口的积分时间
 - 自动校零
 - 上电稳定时间
 - 自动选择量程/切换时间

确保精度： 读数要测量三次

$$V_{\text{MEAS}} = \frac{V_{\text{IN}} - V_{\text{COM}}}{V_{\text{REF}} - V_{\text{COM}}} \times V_{\text{CAL}}$$



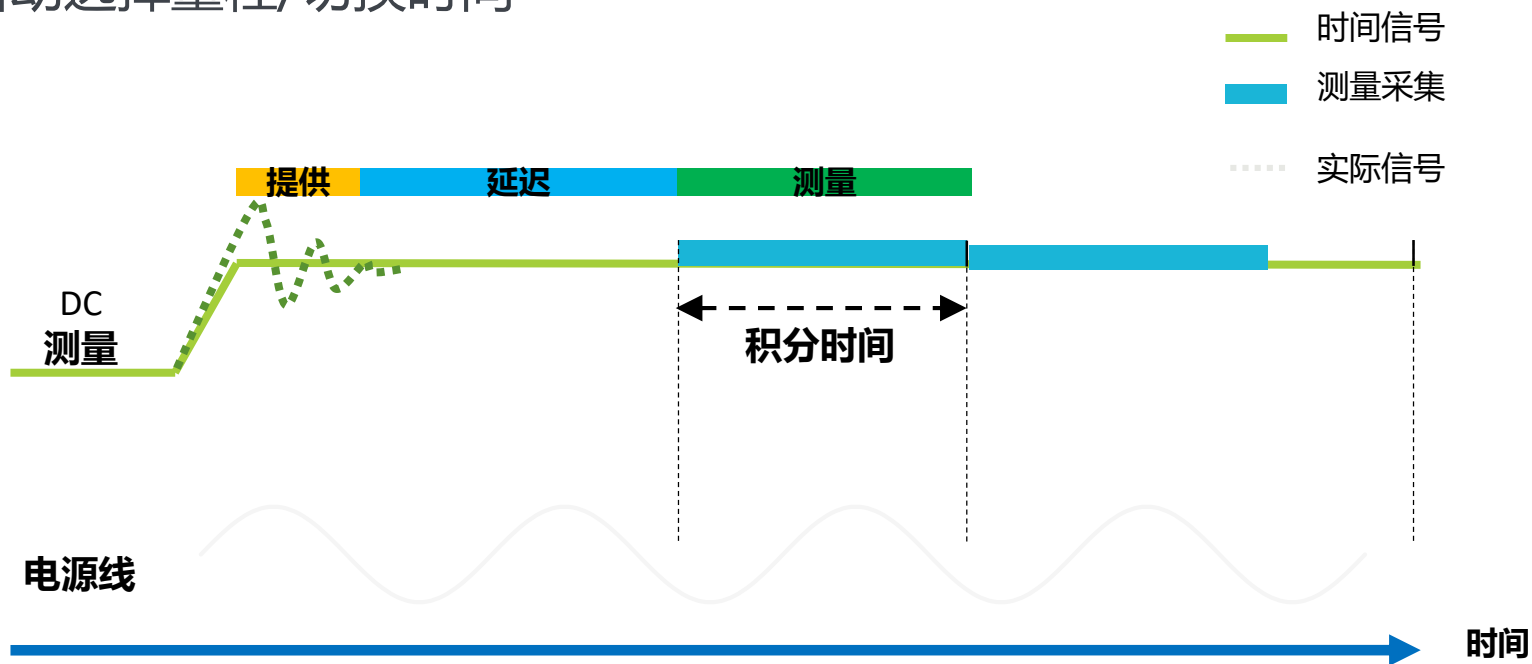
追求速度： AUTO ZERO OFF - 只测量 V_{IN}

您可能会面临着速度和精度的平衡

(一) 时间与精度

- 测试窗口的积分时间
 - 自动校零
 - **上电稳定时间**
 - 自动选择量程/切换时间

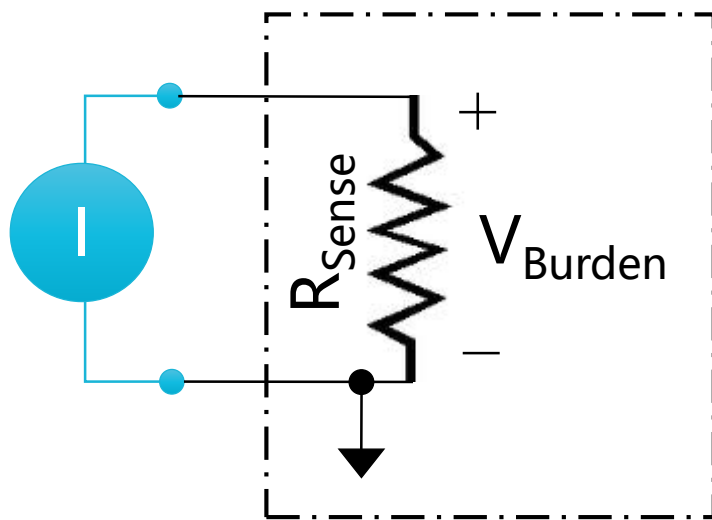
DC 电信号开始施加到样品上时，有可能会需要一定的时间才会稳定，我们希望在信号稳定后再进行测试



(二) 负载与反馈 式设计

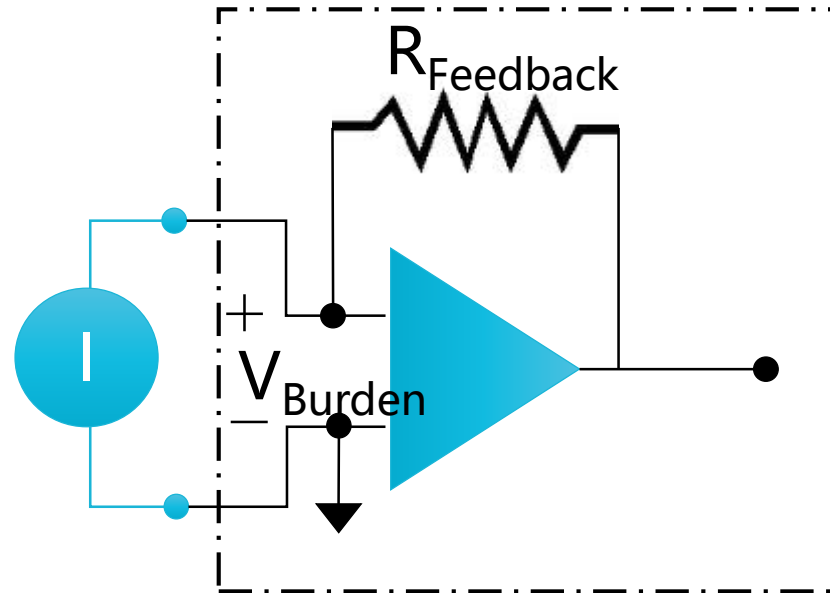
- 选用合适设计的测试设备，对器件微弱电流做精确测量

并联电阻技术



$$V_{BURDEN} < 30 \text{ mV} \sim 1\text{V}$$

反馈电流表技术



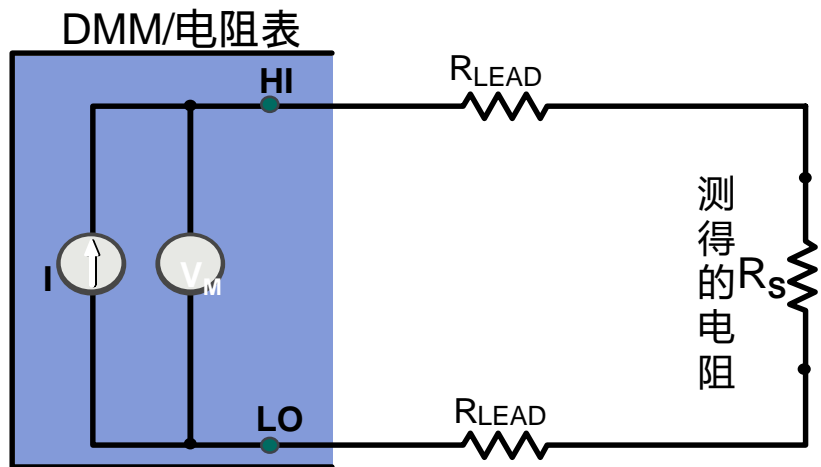
$$V_{BURDEN} < 200\mu\text{V}$$

输入端压降最小化

(三-1) 2线与4线 开尔文测试

- 选用合适的连线方式，减小大电流、小电阻时导线电阻带来的影响，以及保证输出电压的准确

2线电阻测量 (Local sense)

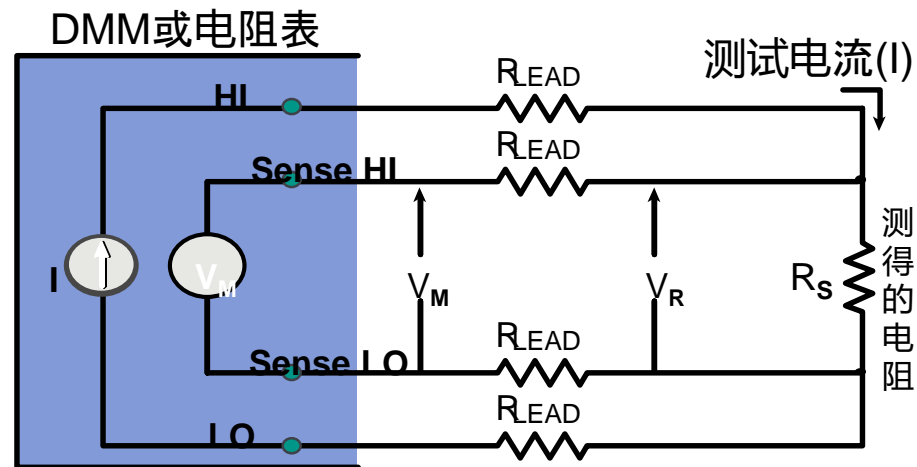


$$R_{\text{measured}} = R_S + R_{\text{LEAD}} + R_{\text{LEAD}}$$

$$R_S \gg R_{\text{LEAD}}$$

需要2个SMU

4线电阻测量(remote sense)



V_M = 电阻表测得的电压

V_R = 经过电阻器的电压

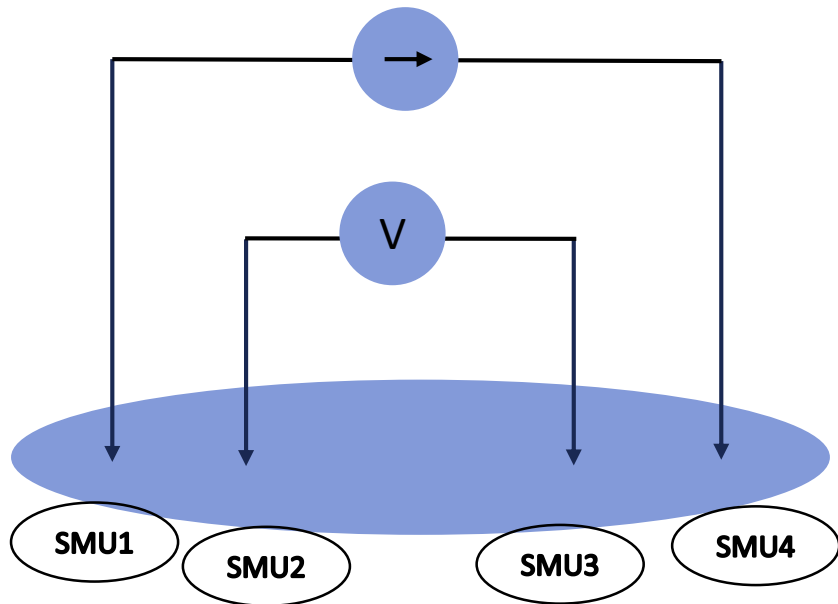
可以忽略Sense 端电流, $V_M = V_R$

$$\text{测得的电阻} = \frac{V_M}{I} = \frac{V_R}{I}$$

(三-2) 四探针法测试

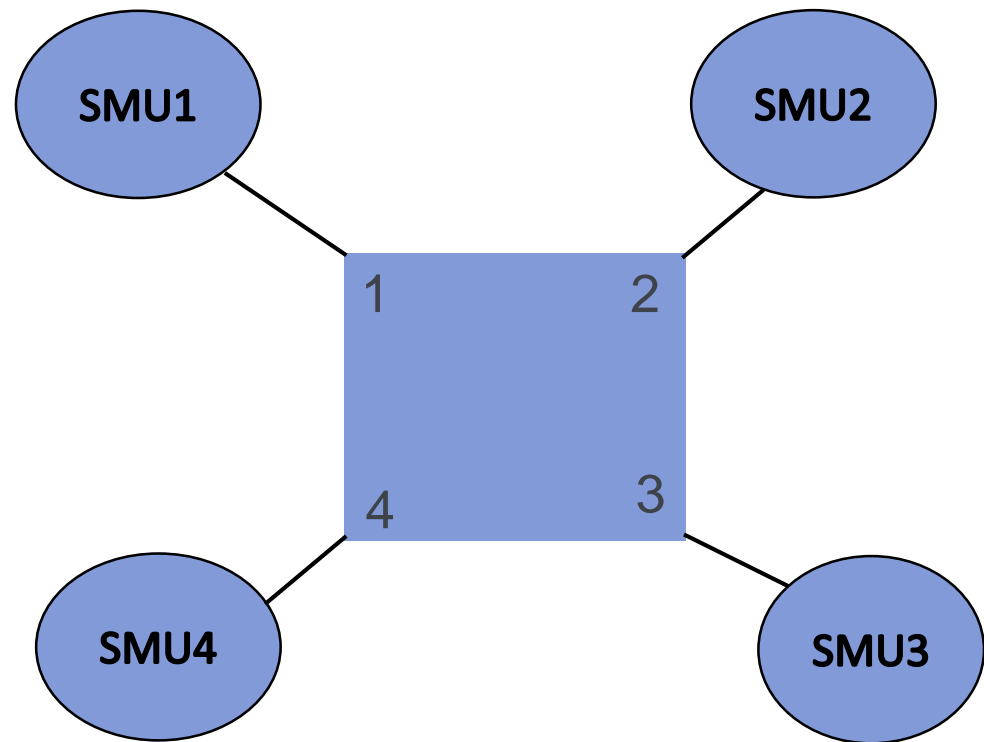
- 适用于薄膜材料和方块电阻的表面电阻率及体电阻率测试，保证稳定电流源和精准电压的测量。

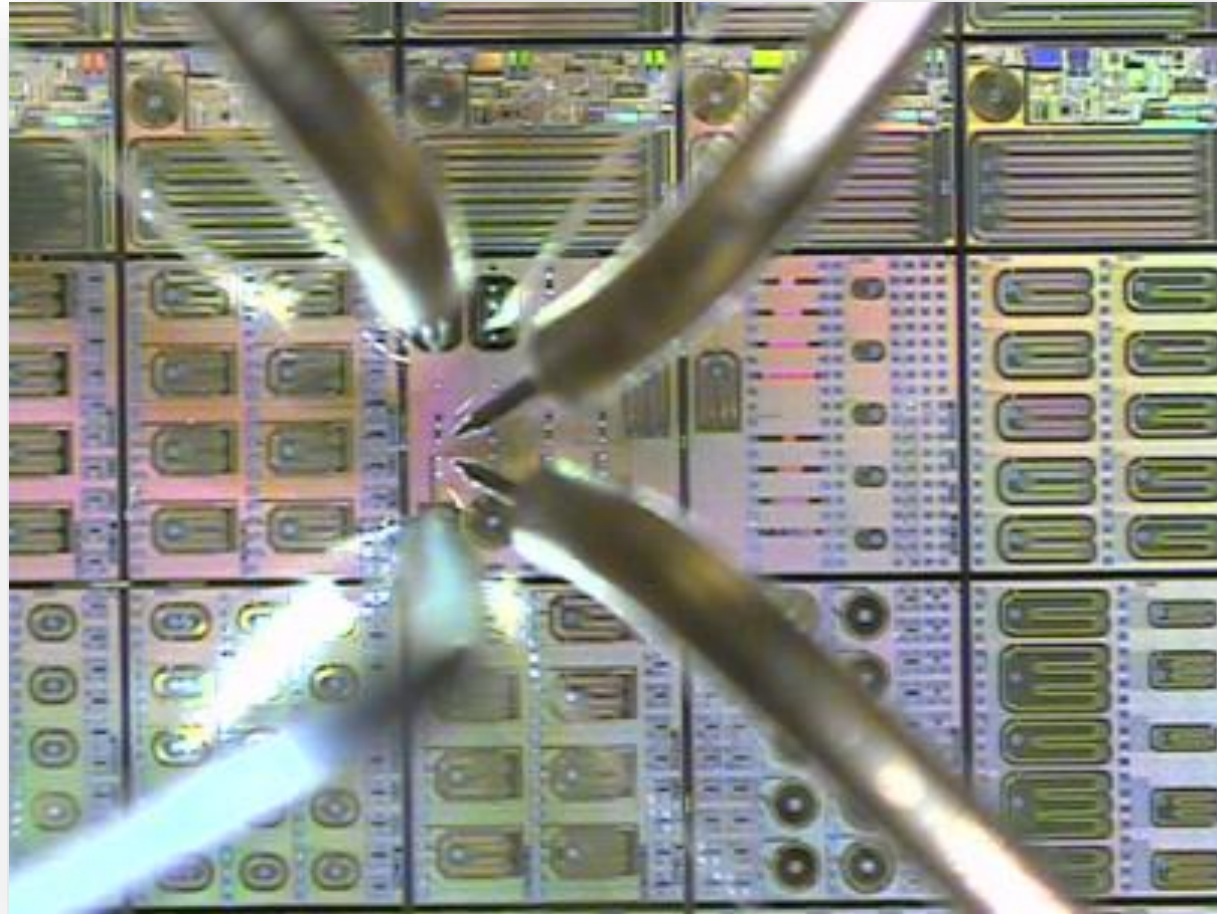
4探针法测量



需要4个SMU

范德堡法测试

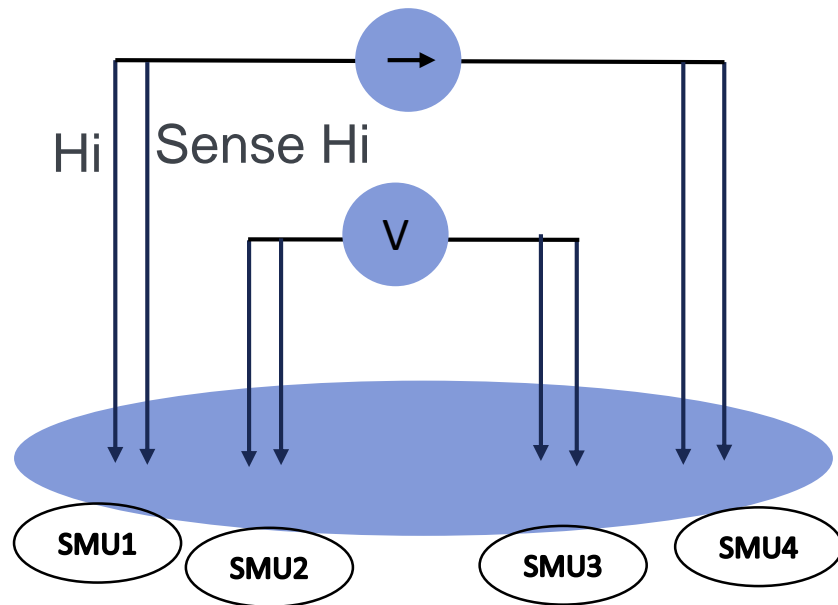




(三-3) 四探针测试的四线法

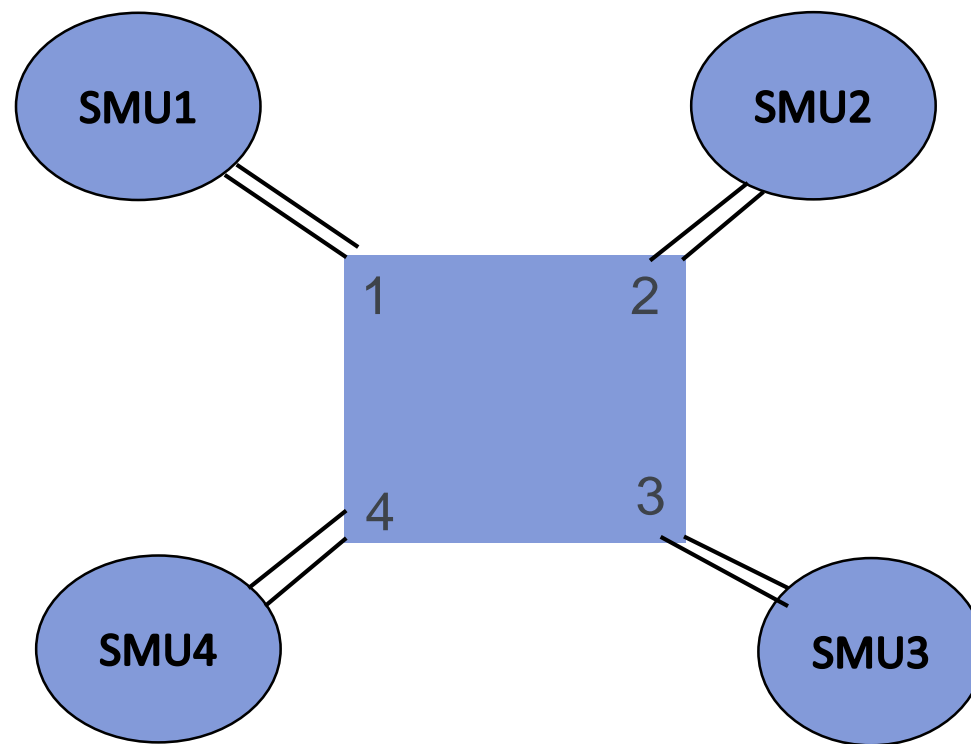
- 适用于薄膜材料和方块电阻的表面电阻率及体电阻率测试，保证稳定电流源和精准电压的测量。

4探针法测量



需要4个SMU

范德堡法测试



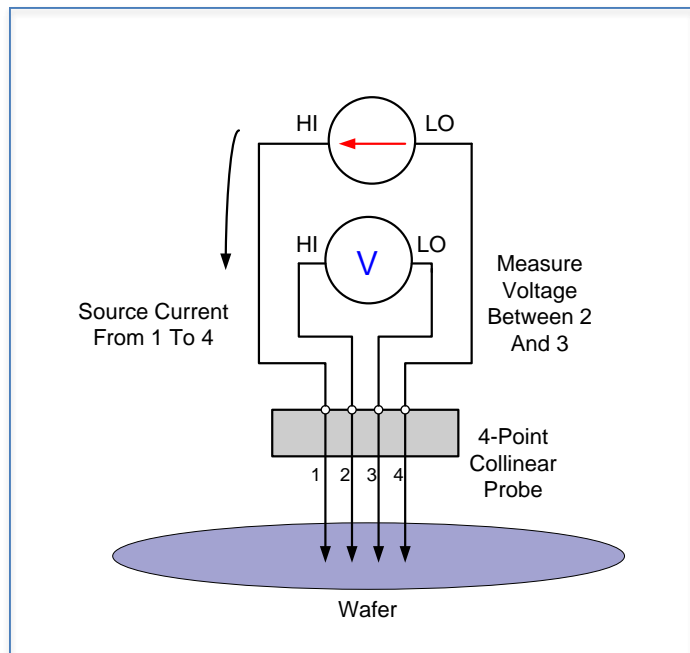
(四) 加压测流与加流测压 测试方法的选用

- 要看测试是相当于低阻测试还是高阻测试：

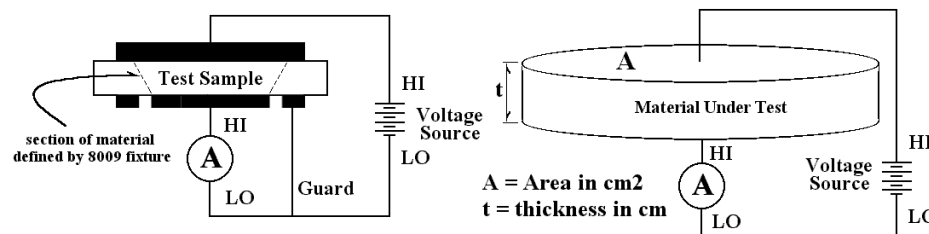
低电流测量: $<10\text{nA}$ (10^{-8}A)

高阻测量: $>1\text{G}\Omega$ ($10^9\Omega$)

具体高阻和低阻的区分可以从多方面考率：导线电阻值是否与被测件相近，激励信号是否容易实现以及期待测量信号是否容易测得。



8009 Test Fixture



$$\rho = \left(\frac{V}{I}\right)\left(\frac{A}{t}\right) = \left(\frac{V}{I}\right)\left(\frac{22.9}{t}\right) = R \frac{A}{t} \text{ ohms} \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}} \quad (\text{ohm} \cdot \text{cm})$$

$\rho =$ Volume Resistivity (ohm-cm)

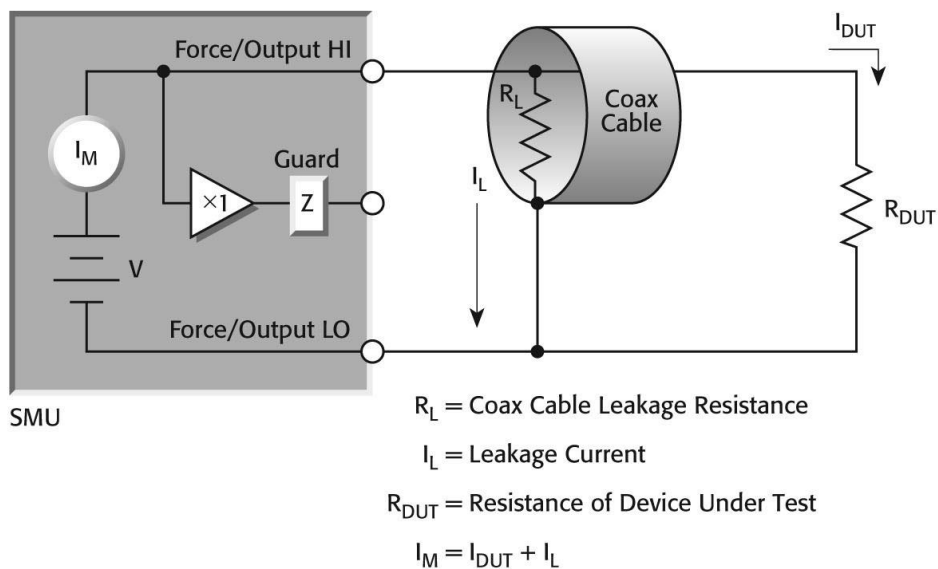
对于低阻测试一般采用加流测压的方式，典型的应用比如四探针法测导体 / 半导体的电阻率

对于高阻测试一般采用加压测流的方式，典型的应用如测绝缘体的电阻率或结构的漏电流。

(五) 同轴与三轴 电缆的选用

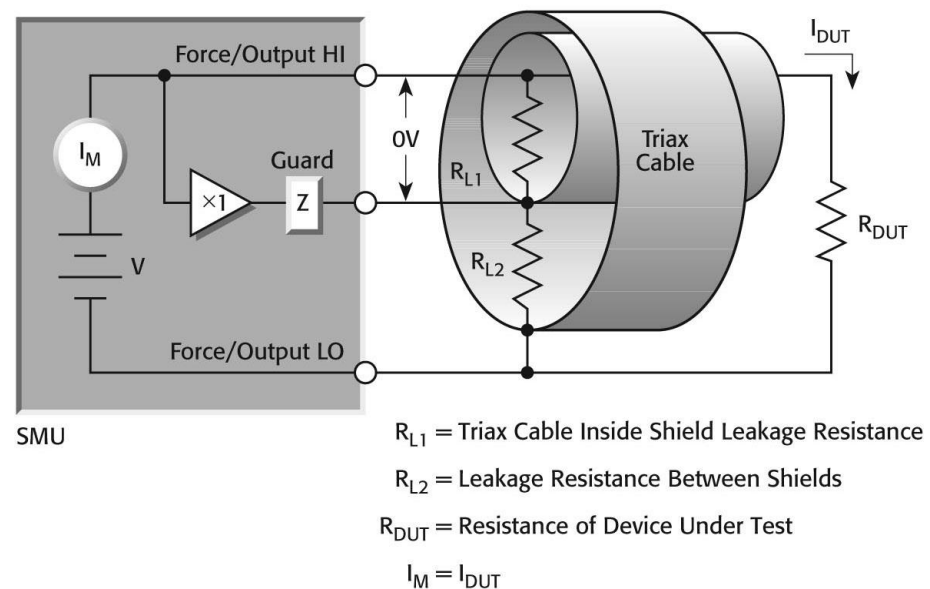
- 在做小电流测试时，选用合适的电缆消除泄漏电流带来的影响

a) Unguarded Circuit



在测量pA级或更低的电流时，
泄漏电流可能会非常明显

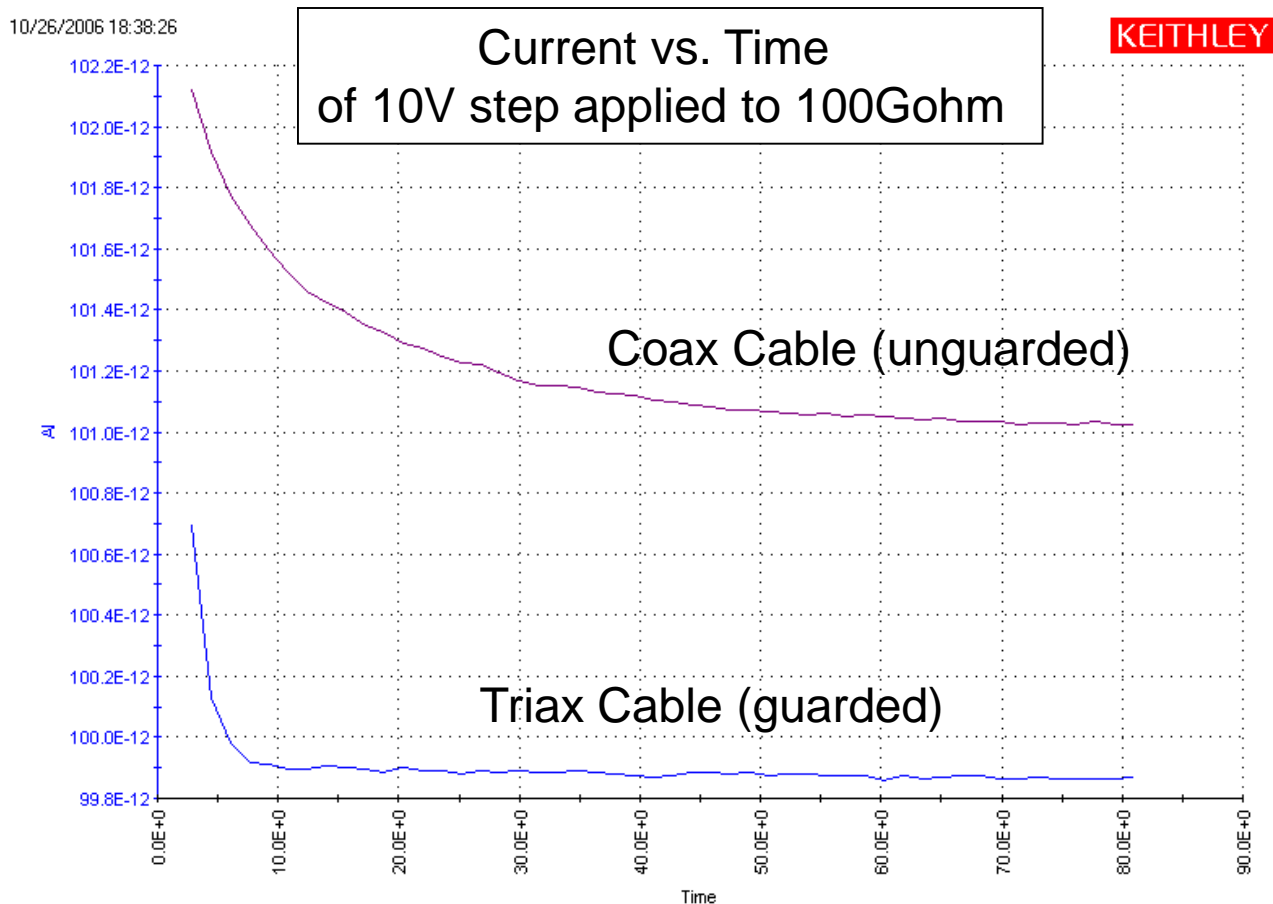
b) Guarded Circuit



没有泄漏电流：Guard技术
对内部保护层施加 V_{OUT} 电位，
因此 $\Delta V = 0V$

(五) 同轴与三轴 电缆的选用

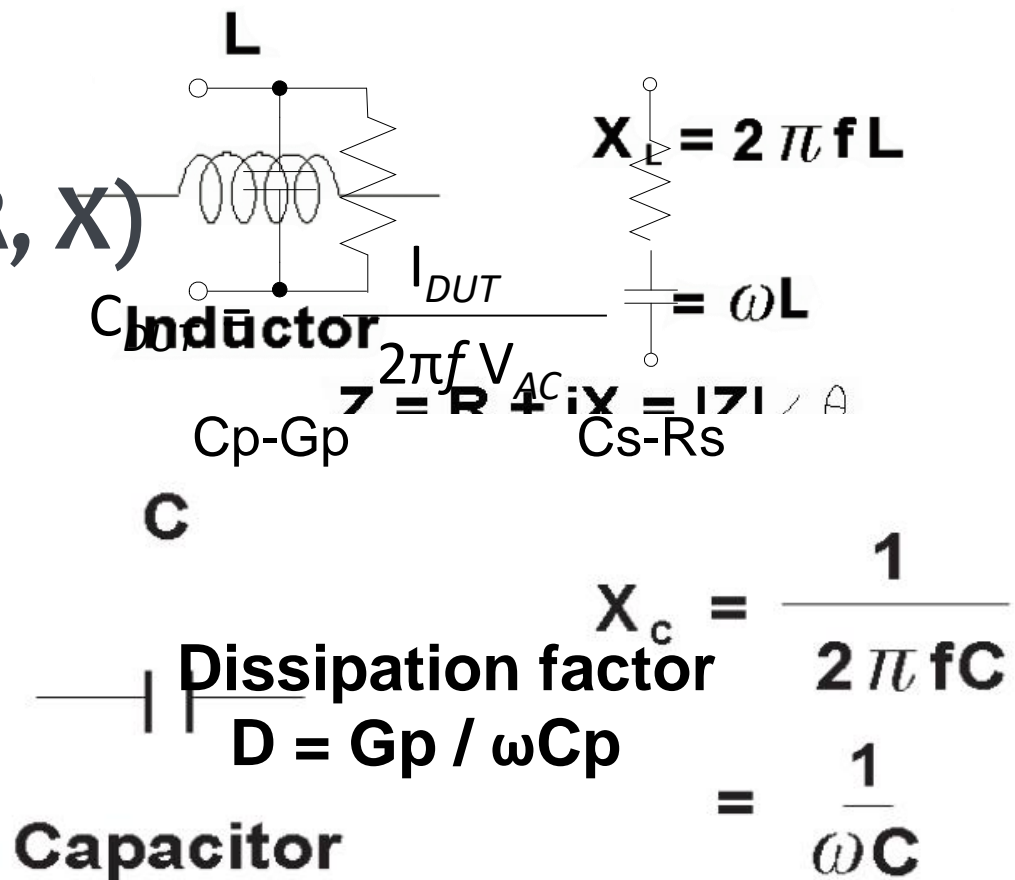
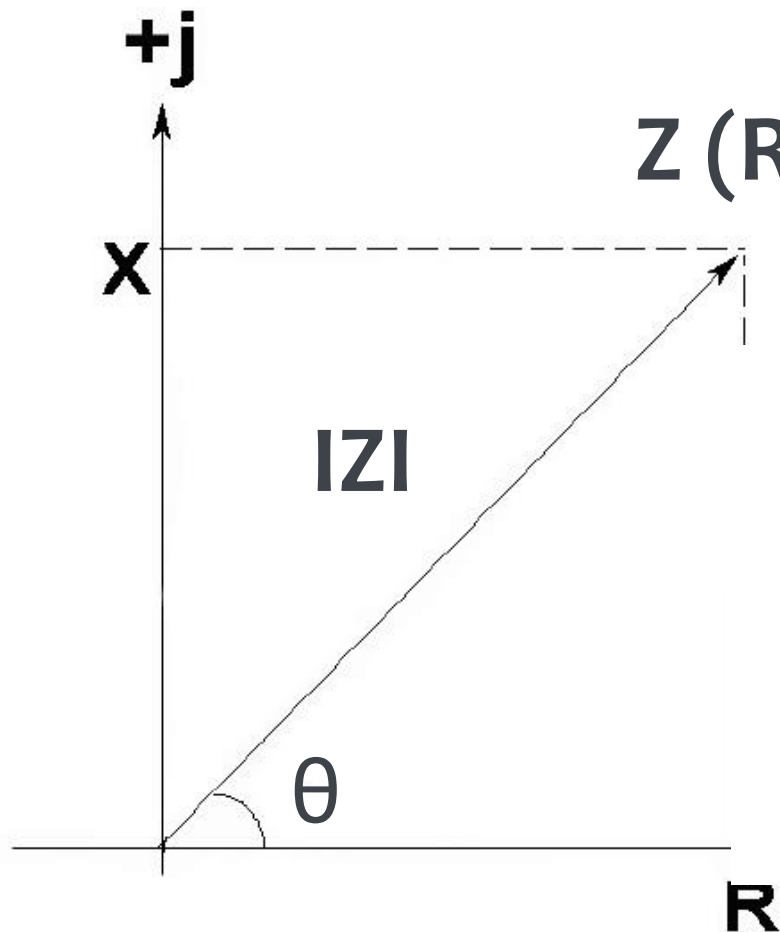
- 在做小电流测试时，选用合适的电缆消除泄漏电流带来的影响



对皮安级别的测试，选择三同轴电缆更利于获得准确的测试结果

(六) 阻抗与电容

Imaginary axis



(六) 阻抗与电容

Measure amplitude of the impedance and the phase angle between voltage and current

Z, Theta – 阻抗和相位角

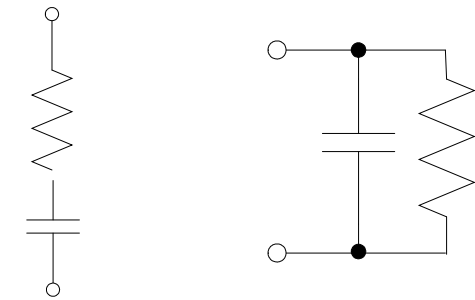
R + jX – 电阻和感抗/容抗

Cp-Gp – 并联模式的电容和电导

Cs-Rs – 串联模式的电容和电阻

Cp-D – 并联模式的电容和耗散因子

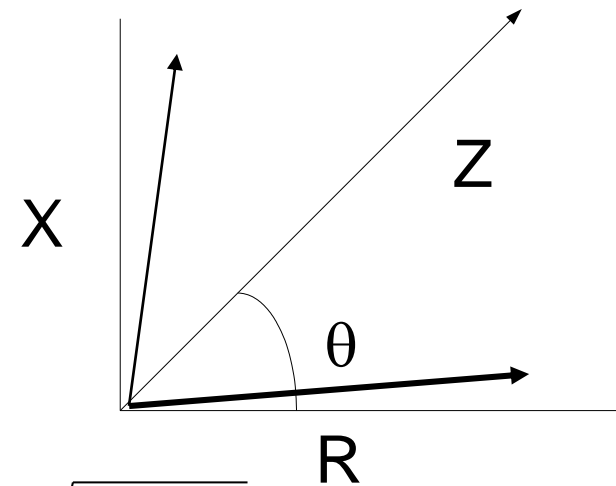
Cs-D – 串联模式的电容和耗散因子



Cs-Rs

Cp-Gp

$$D = Gp / \omega Cp$$



$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$Z = R + jX$$
$$\theta = \arctan\left(\frac{X}{R}\right)$$

$$R = Z \cos \theta$$

$$X = Z \sin \theta$$

$$Y = \frac{1}{Z} = G + jB$$

其中:

Z=impedance

theta=phase angle

R=resistance

X=reactance

Y=admittance

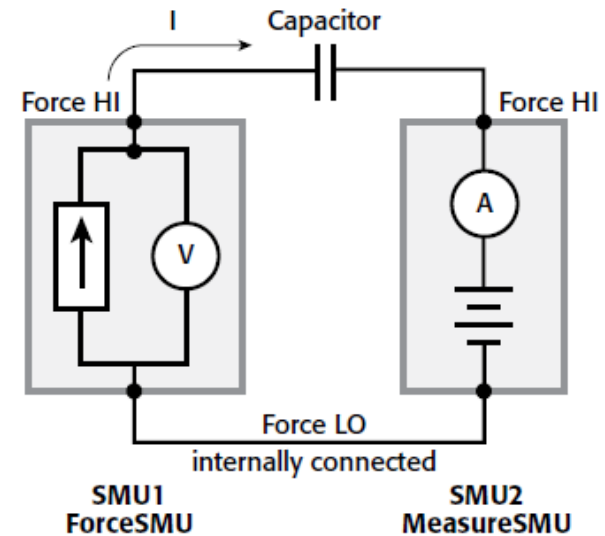
G=conductance

B=susceptance

静态和准静态C-V测试——期待下次直播

- Some capacitance measurement applications require a DC measurement technique called *quasi-static C-V* (or QSCV) because they are performed at a very low test frequency, that is, almost DC.

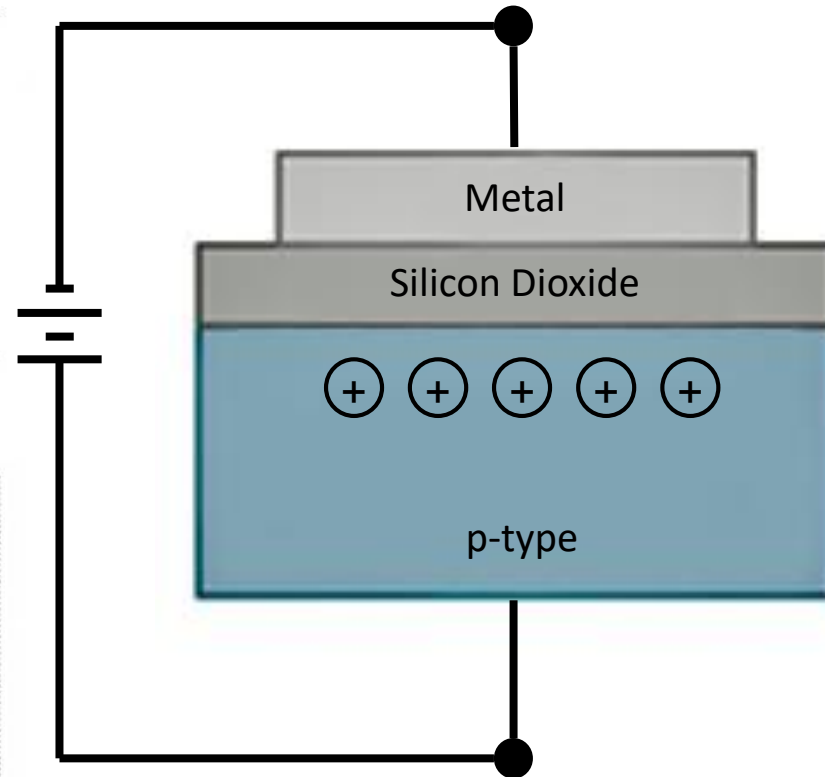
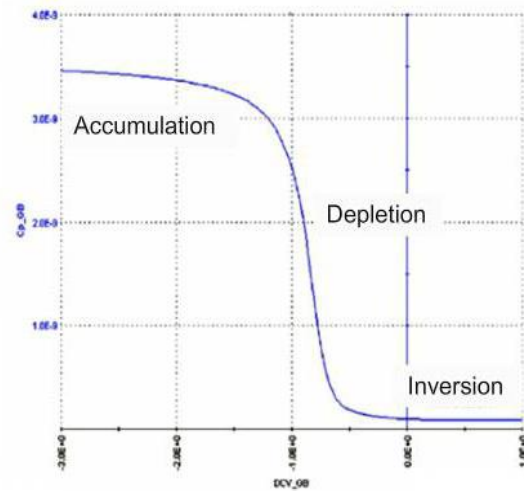
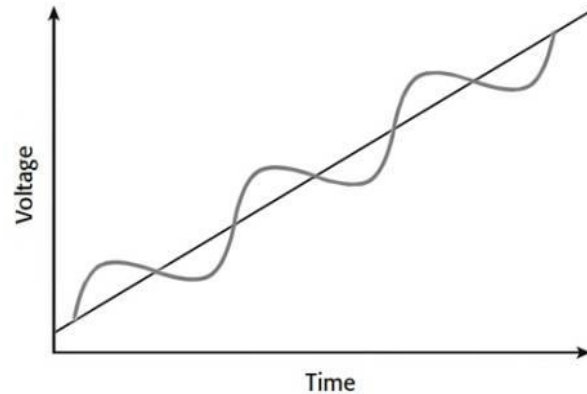
$$C = dQ/dV \quad Q = \int I dt$$



(六) 阻抗与电容

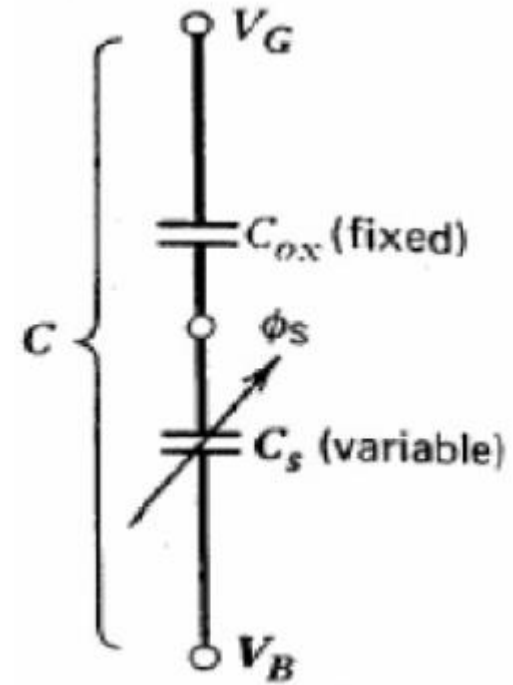
• 通过电容值我们可以得到以下参数

- 栅极氧化物厚度
- 衬底掺杂浓度
- 费米势能
- 德拜长度
- 最小耗尽层电容
- 耗尽层平带电容
- 平带电容
- 表面电荷密度
- 开启 (阈值) 电压



$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{SC}}$$

$$\frac{C}{C_{ox}} = \frac{1}{1 + \frac{C_{ox}}{C_{SC}}}$$



(六) 阻抗与电容

- 极氧化物厚度 d_{ox} : $C_{ox} = dQ_G / dV_{OX} = \epsilon_{OX} \epsilon_0 / d_{OX}$

- 衬底掺杂浓度 N_A (N_D) : $C = \frac{C_{ox}}{\sqrt{1 + (2C_{ox}^2 V_g / \epsilon_{Si} q N_A)}}$

- 费米势能 E_F : $E_F = E_i + \frac{1}{2} kT \ln N_A$

- 德拜长度 L_D : $L_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_{rs}\epsilon_0 kT}{e^2 N_A}}$

- 最小耗尽层电容 $\frac{1}{C_{min}} = \frac{1}{C_{ox}} + \sqrt{\frac{4kT \ln(N_A/n_i)}{\epsilon_{Si} q^2 N_A}}$

- 耗尽层平带电容

- 平带电容 C_{FBS} : $C_{FBS} = -\frac{dQ_{SC}}{dV_s} \Big|_{V_s \rightarrow 0} = \frac{\sqrt{2}\epsilon_{rs}\epsilon_0}{L_D}$

- 表面电荷密度 $Q_{SC} = -\epsilon_{rs}\epsilon_0 E_s = -eN_A d$

- 开启 (阈值) 电压 V_T

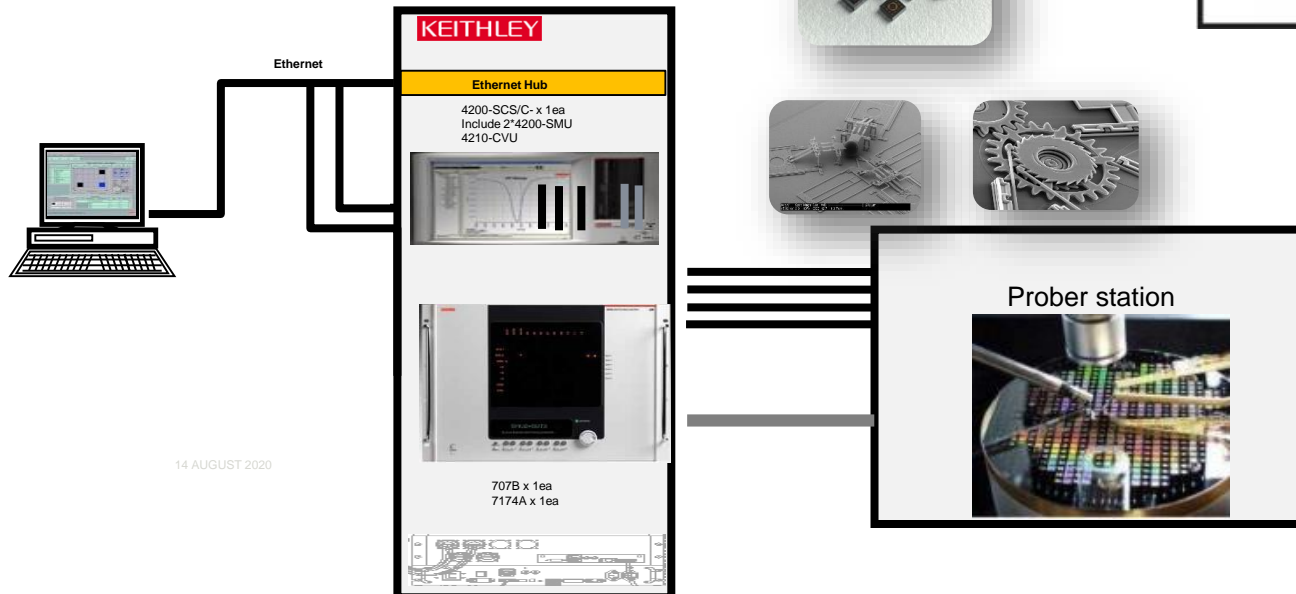
MEMS的产品选型和综合测试方案



MEMS的综合测试方案

□经典配置: 可提供定制化系统配置

- 4200-SCS/C * 1 707B * 1
- 4210-CVU*1 7174A * 1
- 4200-SMU*2
- 4200-PA*1



Model 4200-SCS参数分析仪

中等功率SMU

210 V, 100 mA, 10fA最小电流, 100 aA分辨率

高功率SMU

210 V, 1 A, 10fA最小电流, 100 aA分辨率

脉冲测量单元

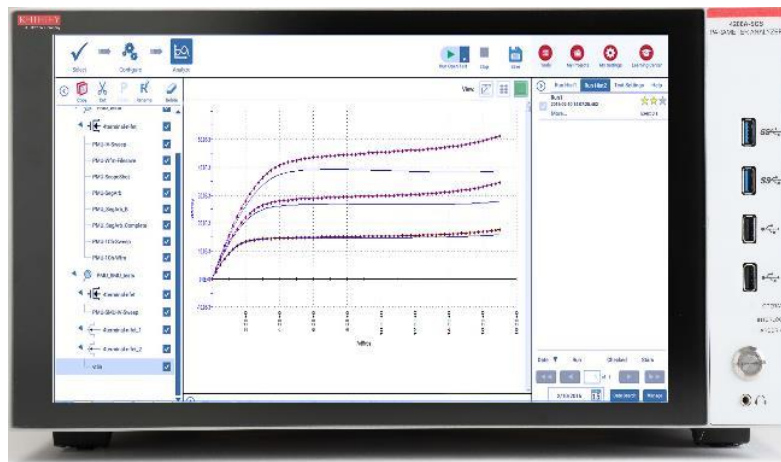
- 超快速I-V
- 示波器视图
- 波形生成
- 脉冲和测量

多频率C-V测量单元

1 kHz – 10 MHz

应用测试

超过450项应用测试, 而且数量在不断增加



切换开关

- 4225-RPM切换开关
- 707B/708B开关矩阵

脉冲发生器和示波器卡

元器件测量的好帮手:源测量单元 Source Measure Unit (SMU)

- 电压和电流: 源和测量功能。即: 电压源、电流源、电压表、电流表
- 电子负载



Precision DMM

Source Measure Unit (SMU)



Precision Power Supply

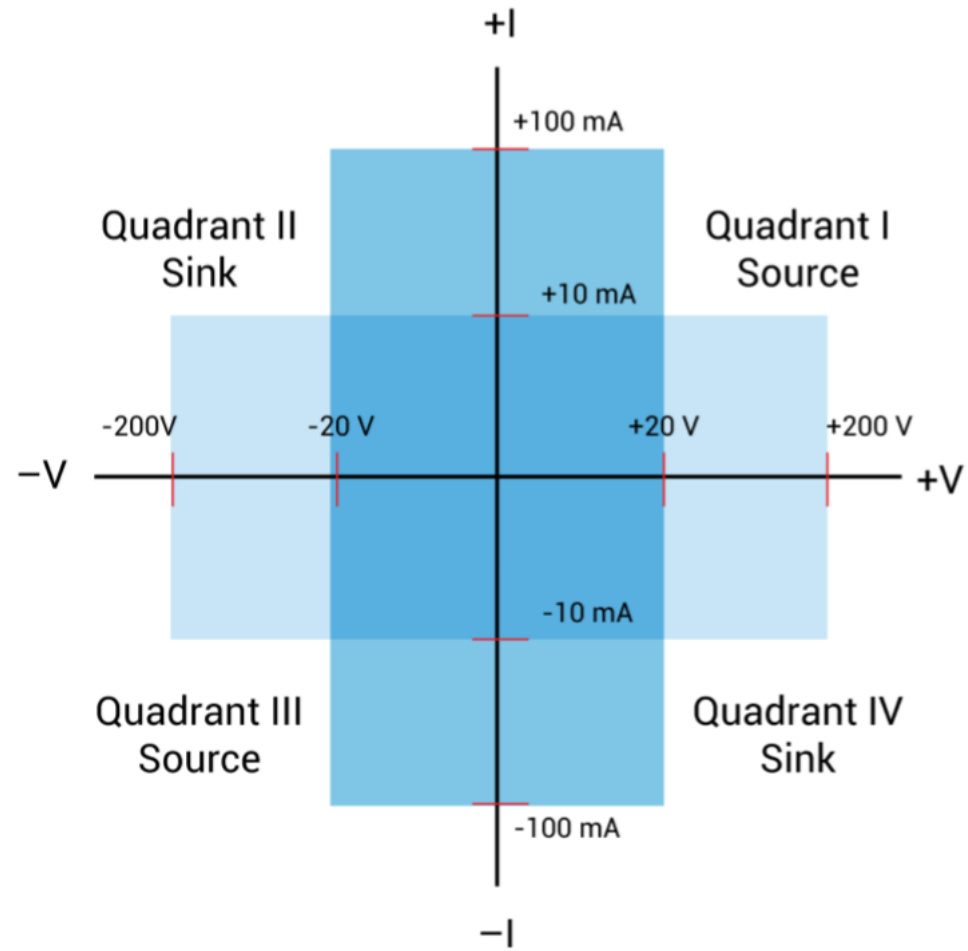


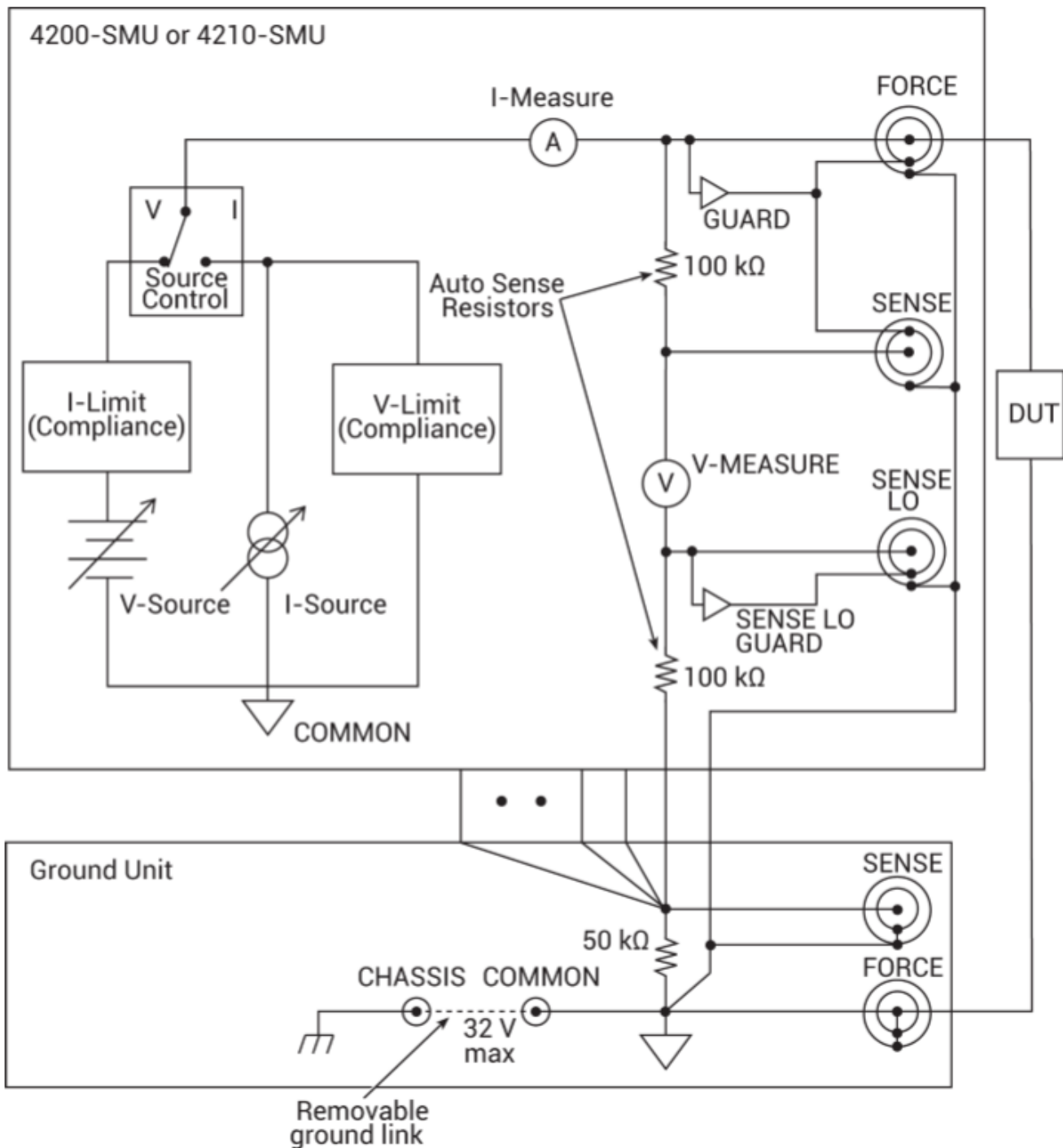
True Current Source



Electronic Load

Figure 31: 4200-SMU and 4200-PA operating boundaries





SMU 电流测量⁴

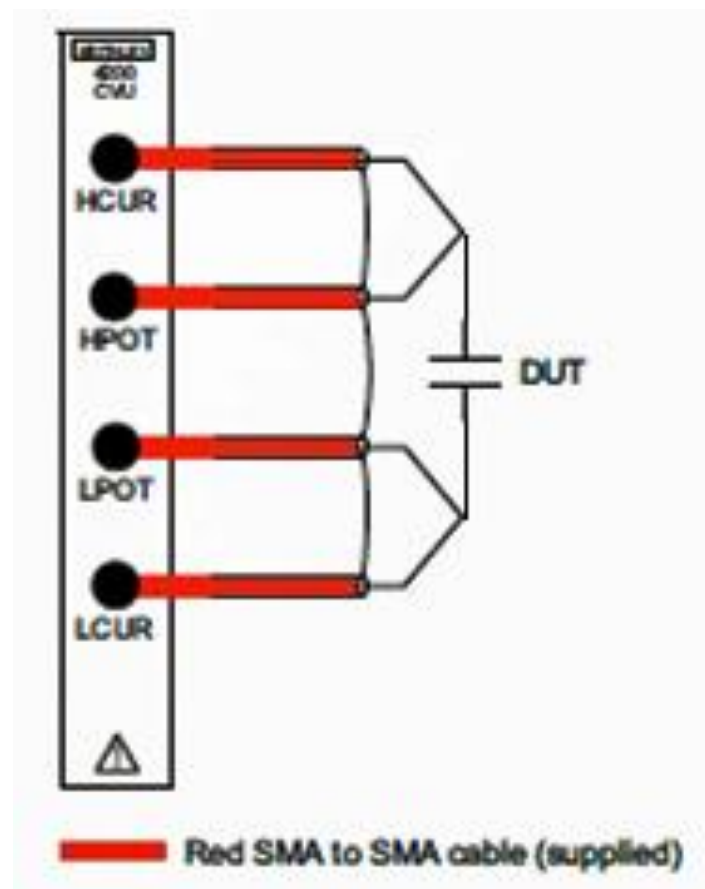
	电流量程 ¹	最大电压	测量		源		
			分辨率 ³	精度 ± (% 读数 + 安培)	分辨率 ³	精度 ± (% 读数 + 安培)	
4210-SMU 高功率 SMU ²	1 A	21 V	1 μA	0.100% + 200 μA	50 μA	0.100% + 350 μA	
	100 mA	210 V	100 nA	0.045% + 3 μA	5 μA	0.050% + 15 μA	
	4200-SMU 中 等功率 SMU ²	100 mA	21 V	100 nA	0.045% + 3 μA	5 μA	0.050% + 15 μA
		10 mA	210 V	10 nA	0.037% + 300 nA	500 nA	0.042% + 1.5 μA
		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
4200-SMU 和 4210-SMU 加选配 4200-PA 前端放大器	100 nA	210 V	100 fA	0.050% + 30 pA	5 pA	0.060% + 30 pA	
	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	

SMU 电压测量³

电压范围 ¹	最大电流		测量		源	
	4200-SMU	4210-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。

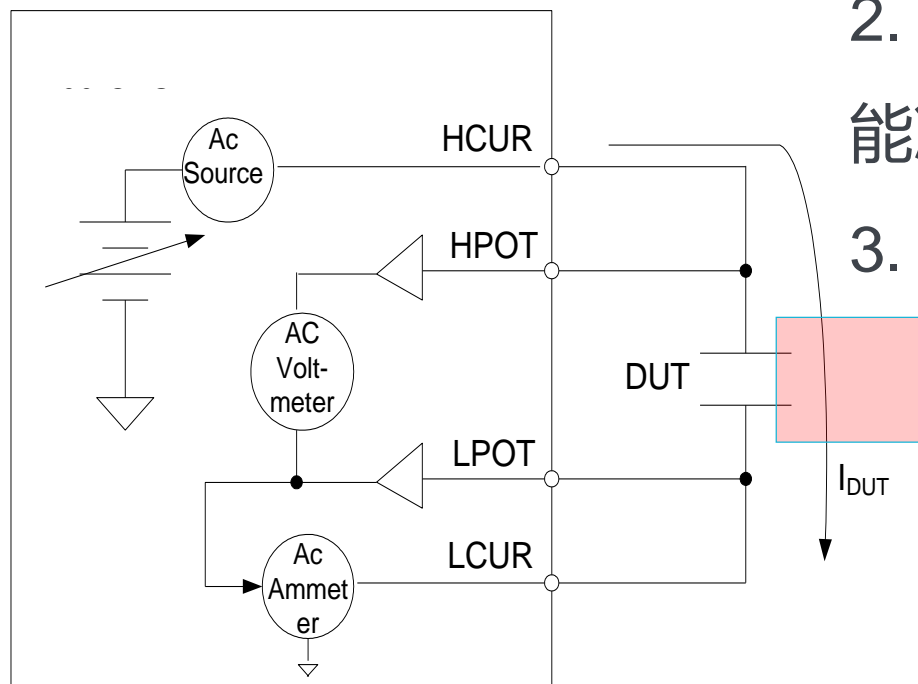
CVU模块



使用CVU做多频信号下的电容测量



C-V 测量

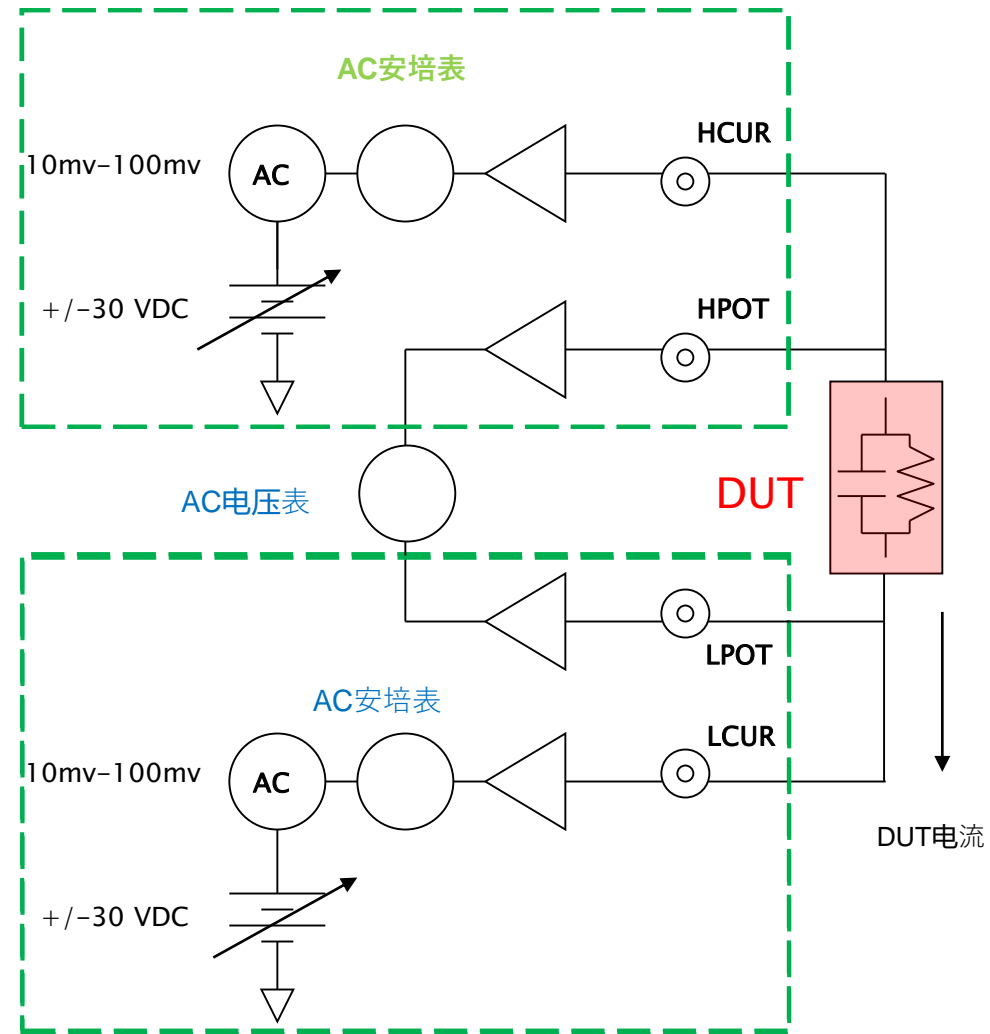


Typical AC source is 1 kHz to 10 MHz

1. AC源加到DUT上。
2. 电压和电流用电桥平衡结构，能准确确定相位角。
3. 电容由阻抗和相位角算出来。

$$C_{DUT} = \frac{I_{DUT}}{2\pi f V_{ac}}$$

吉时利利用对称电路改善CV测试

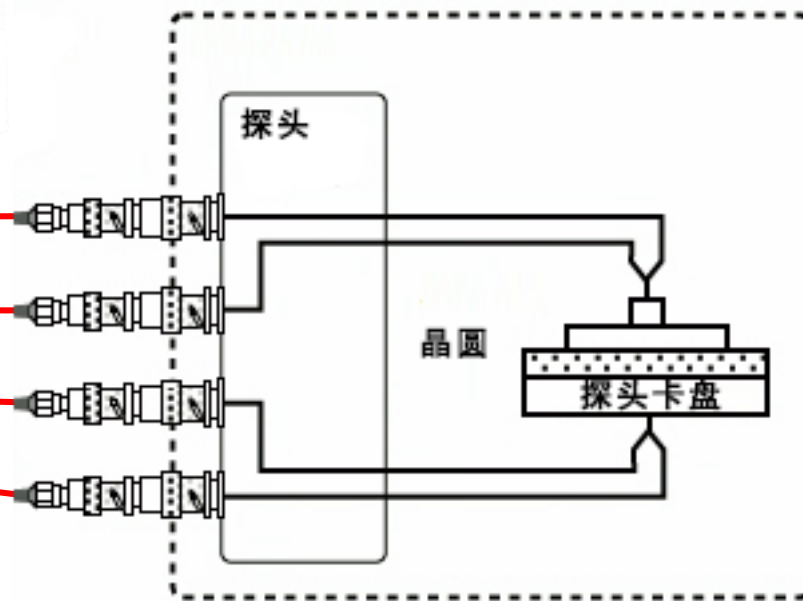


如何提高测量精确度



补偿

校准后的测量平面



一般经验法则

开路

- $< 10 \text{ pF}$
 - $> 1 \text{ M } \Omega$,
- 大阻抗 DUT**

短路

- $> 10 \text{ nF}$
 - $< 10 \text{ } \Omega$,
- 小阻抗 DUT**

负载

- **增益误差校正**
- **对DUT使用负载补偿尽可能接近真值**

Why are these new features important to customers?

New CVU Features	Benefits and Apps
Higher AC Drive voltage, (1V AC rms)	<ul style="list-style-type: none">• Enables more sensitive, quieter C-V measurements• Accurate 1fF (1E-15 F) measurements• Quieter measurements are important for applications, such as doping profile, that require taking the derivative of the capacitance
More Frequency Steps (10,000)	<ul style="list-style-type: none">• Enables customers to see resonance in C-f sweeps due to either external interference or device• Helps to determine optimal test frequency for C-V measurements
Log f sweeps (new feature)	Enables customers to plot the Impedance vs log f which is very common for many applications including organic FETs, traditional semi devices, electrochemistry apps
AC drive voltage sweep (UTMs)	Plotting capacitance as a function of AC drive voltage enables the customer to derive certain device parameters such as defect density of a solar cell

Example #1: Measuring a 1fF (1E-15F) Capacitor

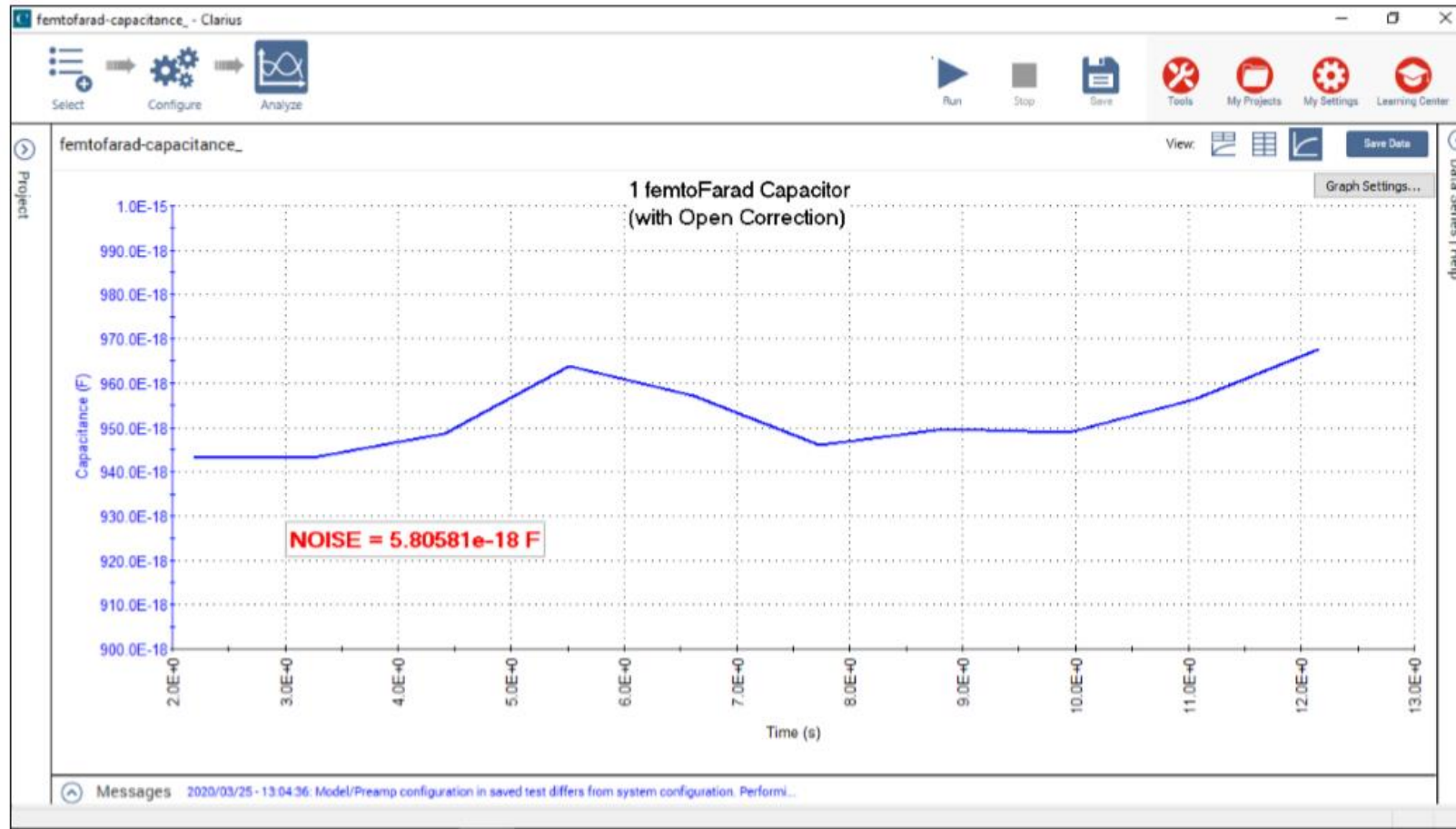


Commercially available 1fF capacitor
<https://www.ietlabs.com/genrad-1403-series-high-frequency-standard-capacitor.html>

$$1\text{E-}15\text{ F} = 0.0000000000000001\text{ F}$$

Can I measure this with the 4215-CVU?

Yes! 1E-15F measurements!



调试指引

错误表现	可能原因	最大限度地减少错误或避免错误的建议
测得电容比预期高很多	线缆和连接电容影响测量	<ol style="list-style-type: none">1. 执行测量补偿和Enable2. 使用短接地环路，使寄生电容达到最小3. 尽可能缩短电缆长度
	开灯测试或未关闭屏蔽箱	<ol style="list-style-type: none">1.关灯或关闭屏蔽箱
	其他端子寄生电容影响测量	<ol style="list-style-type: none">1.使用GUARD
	DUT短路	<ol style="list-style-type: none">1.试试另一个DUT。使用confidence check进行检验。

调试指引

错误表现	可能原因	最大限度地减少错误或避免错误的建议
测得电容值太低	器件没有处于平衡状态	1.提高延迟时间
	器件接触不良或没有接触	1. 使用置信度检查, 检验连接 2. 可能需要改善晶圆和卡盘之间的接触
	DUT开路	1. 试试另一个DUT, 检验问题是由DUT引起的还是其他地方引起的 2. 使用confidence check
	没有连接同轴电缆屏蔽	1. 在DUT附近连接屏蔽 2. 降低测试频率。

调试指引

错误表现	可能原因	最大限度地减少错误或避免错误的建议
测量有噪声	DUT或环境有噪声	使用安静模式或自定义模式； 视电容幅度，提高或降低测试频率； 检查探针是否与DUT良好接触
	DUT没有进行静电屏蔽	保证正确屏蔽测试夹具。屏蔽必须在与同轴电缆屏蔽层短接
C-V扫描最后出现“尾巴”	器件没有处于平衡状态	把PreSoak电压设置成扫描中第一个电压， 使用足够的Hold Time（保持时间）， 让DUT充电
	器件有泄漏	试着使用SMU测量泄漏电流， 降低dc电压

S530及S500系统

- 自动测试解决方案

软件



硬件



S530 Parametric Test System



S500 Integrated Test System



Instruments

配置标准化的测试系统

可根据实际情测试需求定制硬件及特殊测试程序

Keithley Family of SMU - Instruments



Graphical SMU 2450,2460,2461

- * Industry-first 5" color touchscreen GUI
- * Sub pA and sub μ V resolution



Basic Bench 2400 Series

- * Industry standard SMU
- * Family of models from 1100V to 10.5A



Speed 2600B Series

- TSP[®] (Test Script Processor) technology for industry-best throughput and lowest cost of test
- Single- or Dual-channel models



Power 2650A Series

- Industry-best 3kV, 50A with up to 2000W pulsed power and sub pA resolution
- 1uSec digitizer

Keithley SMU Family - Systems



Parametric Curve Tracers

- Power device characterization up to 3kV and 100A including high quality instruments, cables, test fixturing, and software
- ACS Basic Edition software features real-time curve tracing and full parametric characterization



4200A-SCS Parameter Analyzer

- Multi-channel, turn-key characterization system: I-V, C-V, and Pulse measurements
- Characterize devices, materials, and semiconductor processes with sub-fA resolution
- Easy-to-use Windows® GUI, modular architecture, and over 450 user-modifiable test applications



S530 & S540 Parametric Test Systems

- High-speed semiconductor parametric testing with low cost of ownership
- Designed for production and lab environments managing a broad range of devices and product wafers



S500 Parametric Test Systems

- Highly configurable and scalable SMU instrument-based system
- Semiconductor device testing along with Automated Characterization Suite (ACS) at the device, wafer, or cassette level

吉时利低电平测量仪器

吉时利电表

- 高电阻
- 低DC电流
- DC电压
- 电荷

6514



6517B
+ V Source



6430
最灵敏



6485
1通道



吉时利皮安表

- 低DC电流

6487
+ V source



6482
2通道



吉时利纳伏表和电流源

- 低DC电压
- 低电阻(使用622x电流源)

2182A
nV



6220, 6221
电流源



Atto – Femto – Pico – Nano – Micro – Milli 1 Kilo – Mega – Giga – Tera – Peta
 10^{-18} 10^{-15} 10^{-12} 10^{-9} 10^{-6} 10^{-3} 10^0 10^3 10^6 10^9 10^{12} 10^{15}



预约泰克线下实验室



泰克高速串行实验室预约

实验室设备涵盖各系列高速示波器、误码仪、源表、电源功率分析仪及各种配套探头和测试专用夹具。支持各种工业应用标准及高速接口测试环境。



北京



上海



深圳



西安



成都

泰克电源实验室预约

实验室具备数十台测试仪器组成的电源设计全流程测试方案，功率器件选择，查找主要损耗点，优化效率及电源标准预认证。另外实验室里还有GaN, SiC评估板供您体验！



北京



上海



深圳



半导体材料与器件科学云讲堂

- ✓ 专业测试平台
- ✓ 六大类测试流程
- ✓ 剖析、解决半导体新问题



关注“泰克科技”公众号



每月2期专题直播，等您解锁！

直播日程

第一季 直播课程 (4~6月)

- 纳米材料及纳米电子器件IV和CV测试 4月29日
- 二维材料/石墨烯及其电子器件IV和CV测试 5月15日
- 量子材料及超导材料电输运物性表征测试 5月29日
- 超快脉冲在先进的NVM测试中的应用及神经元网络测试前瞻 6月

番外篇一

测试技巧: 半导体参数测试仪使用技巧及案例集锦 6月

第二季 直播课程 (7~9月)

- 宽禁带半导体(GaN/SiC)材料及器件测试
- 功率IGBT器件测试系统及自动化简介
- 微机电系统MEMS测试概述
- MOSFET的准静态CV/超低频CV测试
- 半导体器件可靠性HCI/NBTI测试

番外篇二

测试技巧: 快速上手自动化半导体参数测试系统

