

Tektronix

深度解析IV/CV参数测试难题

KEITHLEY
A Tektronix Company



目录

- 直流IV测试小技巧
 - 时间与精度
 - 负载与反馈
 - 2线与4线
 - 加压测流与加流测压
 - 同轴与三轴
- 脉冲IV测试噪声和尖峰的产生原因和解决方法
- CV拖尾等问题的解决方法

直流IV测试小技巧



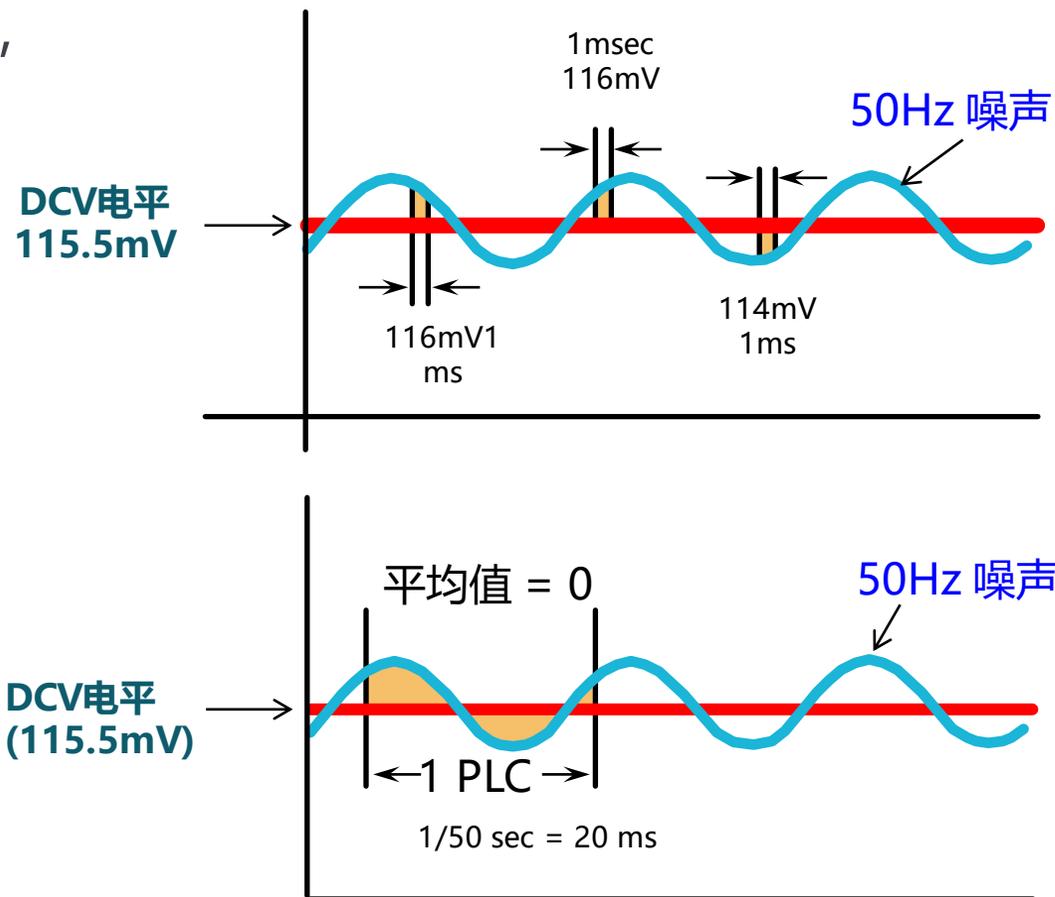
(一) 时间与精度

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

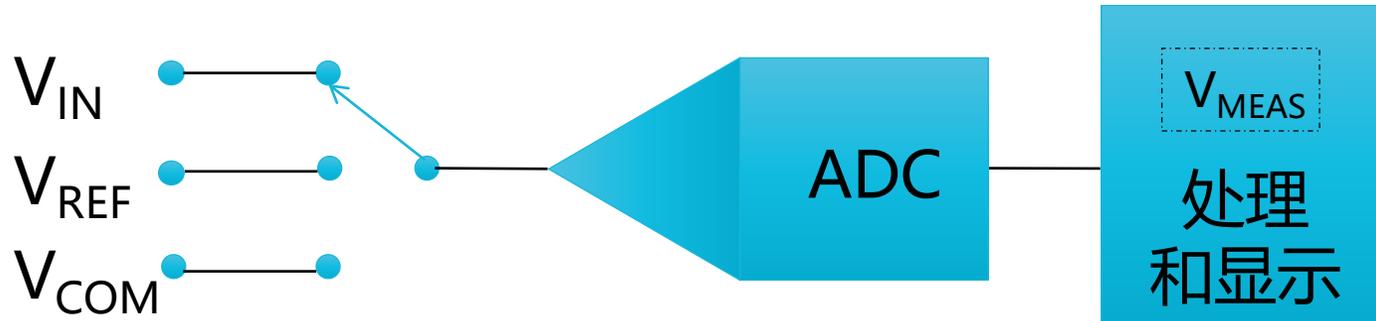


(一) 时间与精度

- 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

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



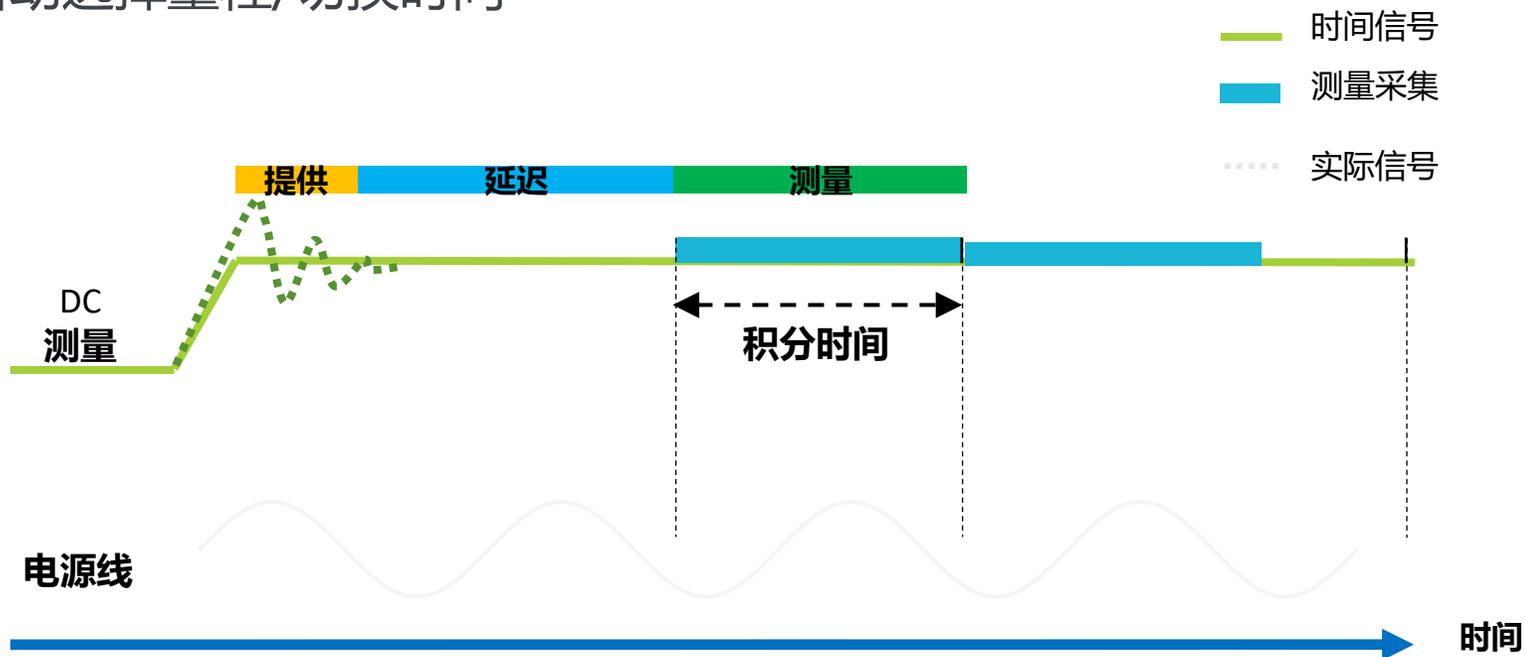
追求速度： AUTO ZERO OFF - 只测量 V_{IN}

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

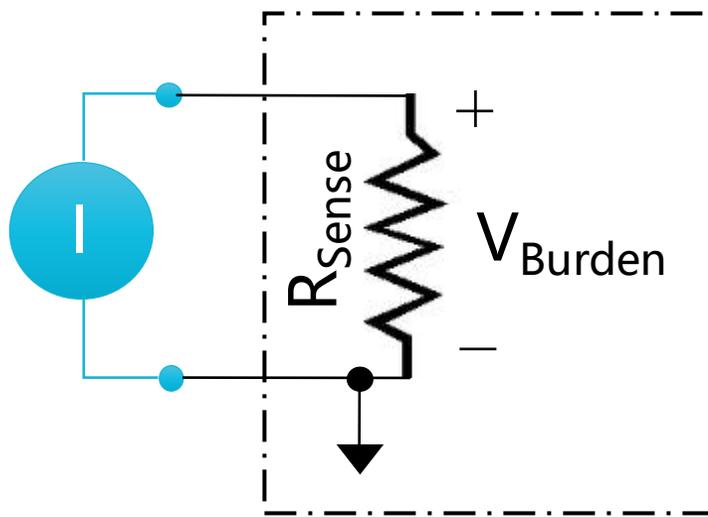
DC 电信号开始施加到样品上时，有可能会需要一定的时间才会稳定，我们希望在信号稳定后再进行测试



(二) 负载与反馈 式设计

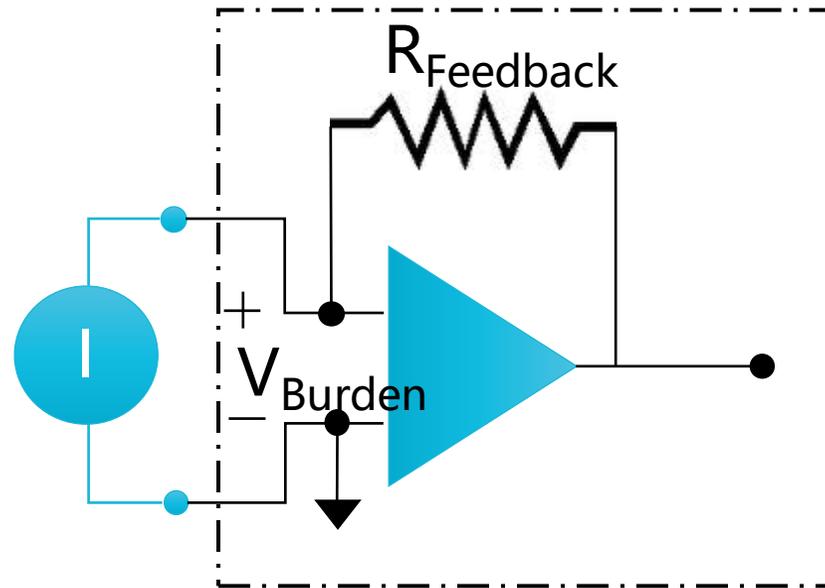
- 选用合适设计的测试设备，对器件微弱电流做精确测量

并联电阻技术



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

反馈电流表技术



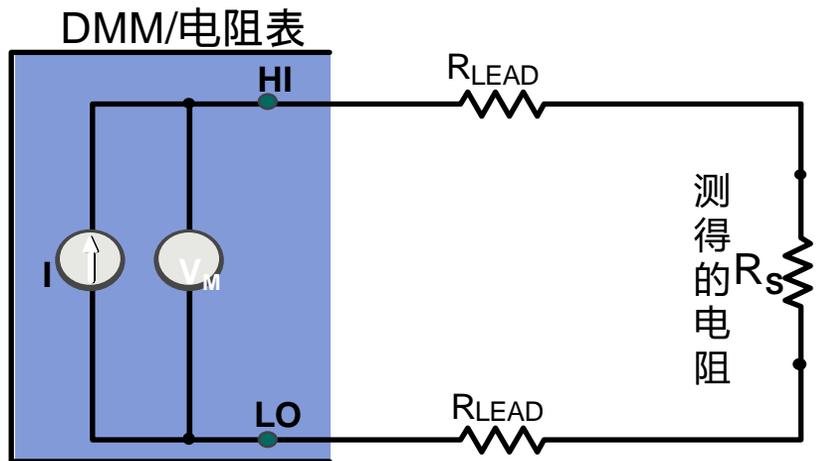
$$V_{BURDEN} < 200\mu\text{V}$$

输入端压降最小化

(三) 2线与4线 连线方式

- 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

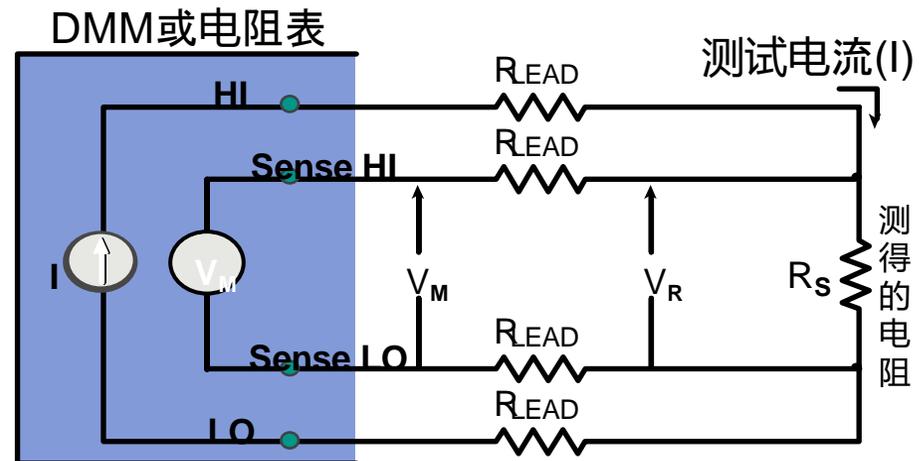
2线电阻测量 (Local sense)



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

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

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

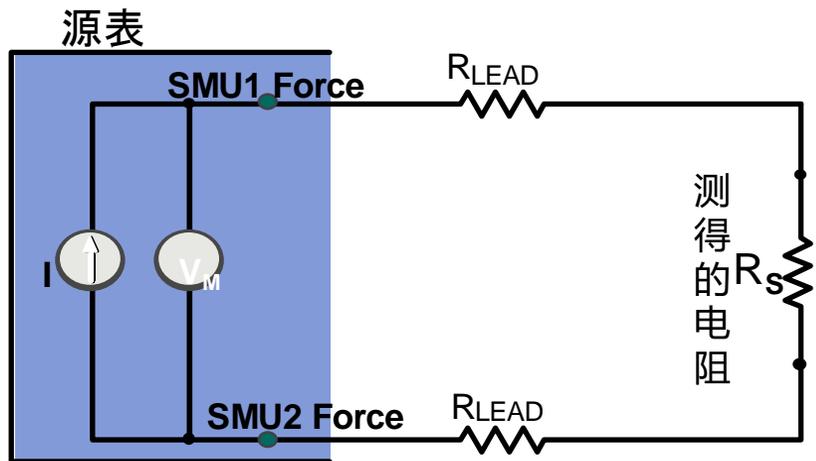
可以忽略Sense 端电流, $V_M = V_R$

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

(三) 2线与4线 连线方式

- 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

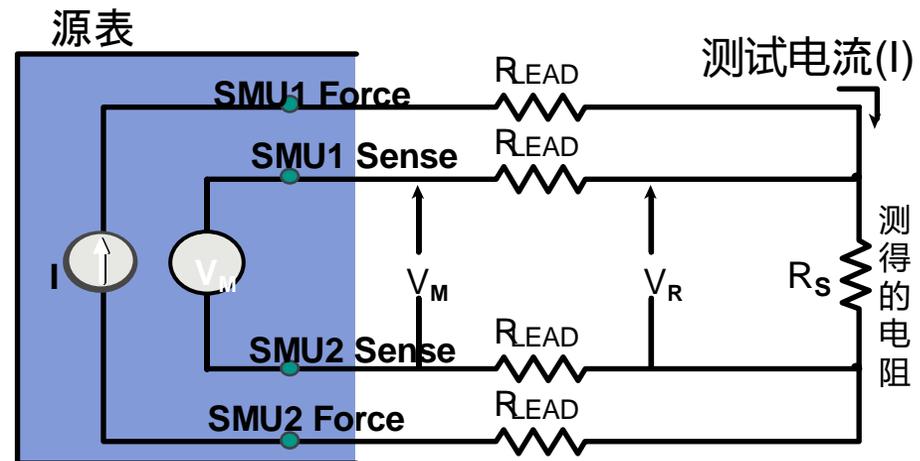
2线电阻测量 (Local sense)



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

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

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, $V_M = V_R$

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

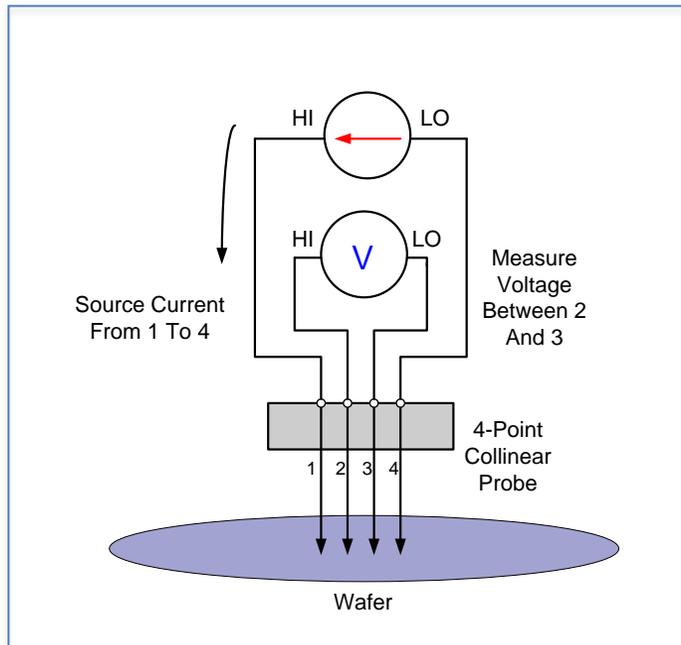
(四) 加压测流与加流测压 测试方法的选用

- 要看测试是相当于低阻测试还是高阻测试:

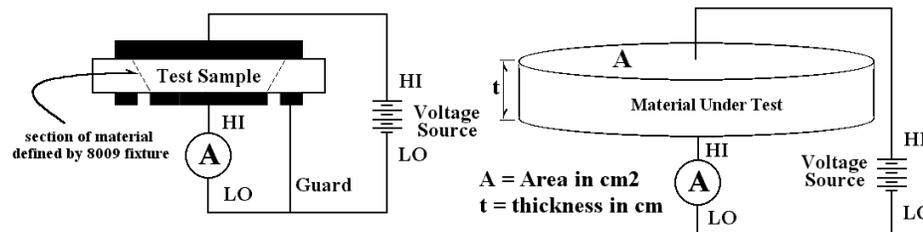
Low Current measurements: $<10\text{nA}$ (10^{-8}A)

High Resistance measurements: $>1\text{G}\Omega$ ($10^9\Omega$)

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



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

$\rho = \text{Volume Resistivity (ohm-cm)}$

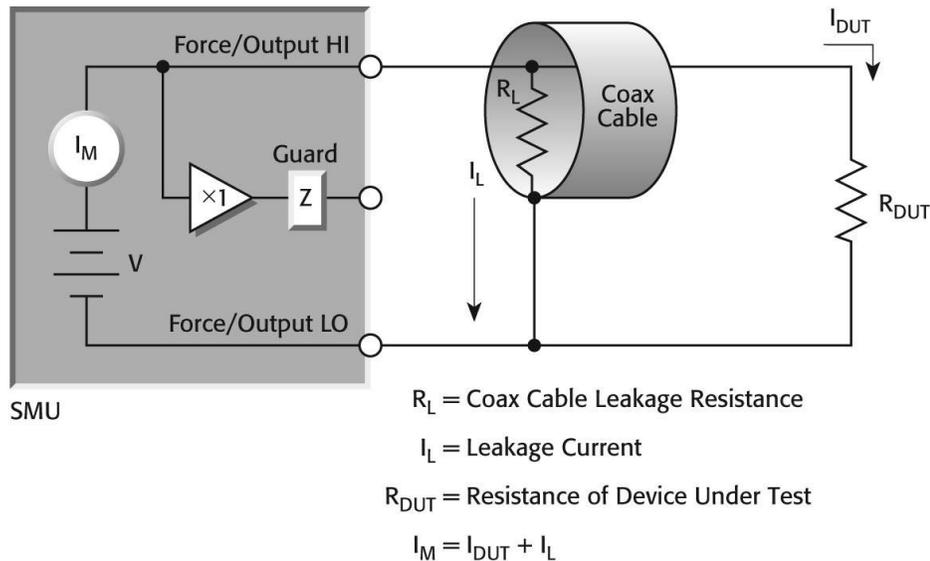
对于低阻测试一般采用加流测压的方式，典型的应用比如四探针法测导体 / 半导体的电阻率

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

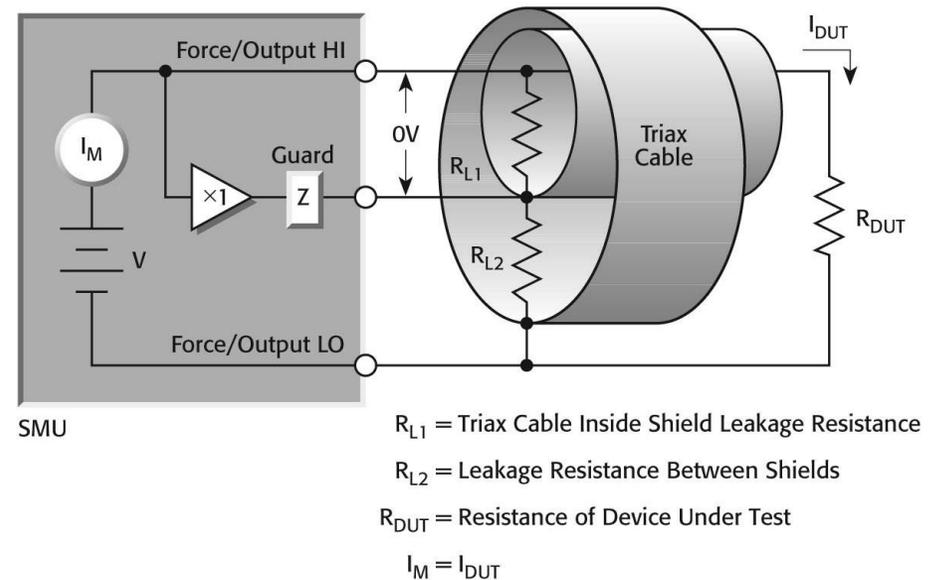
- 在做小电流测试时，选用合适的电缆消除泄漏电流带来的影响

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

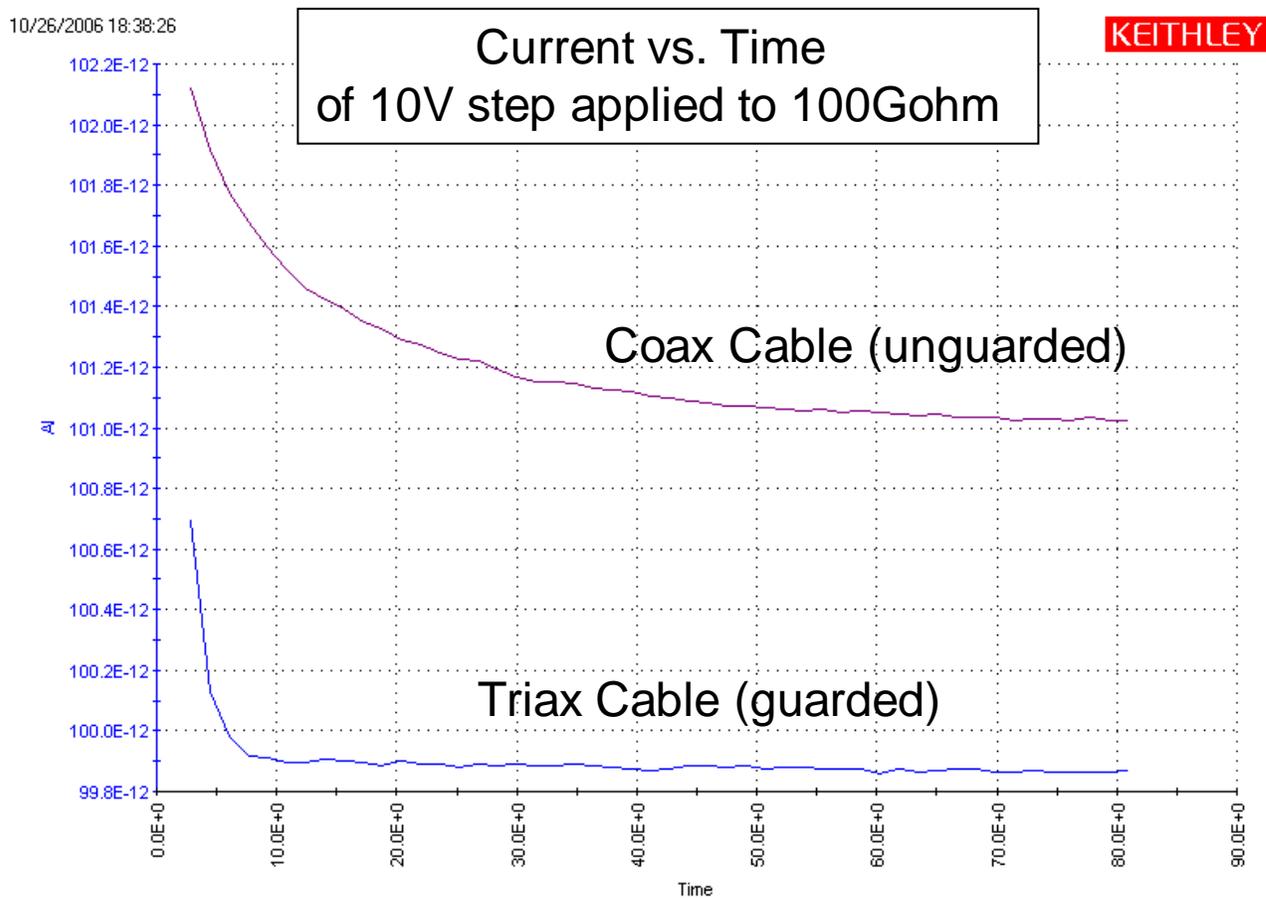
b) Guarded Circuit



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



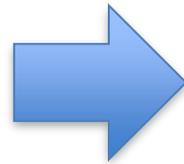
对皮安级别的测试，选择三同轴电缆更利于获得准确的测试结果

SMUs VS. 电源——精度



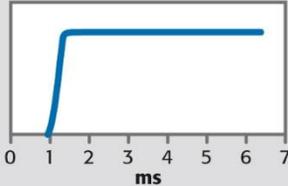
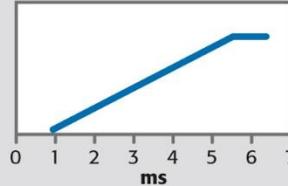
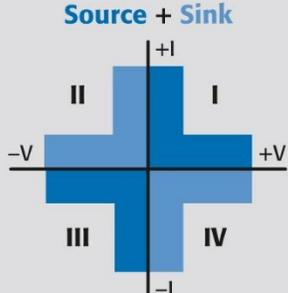
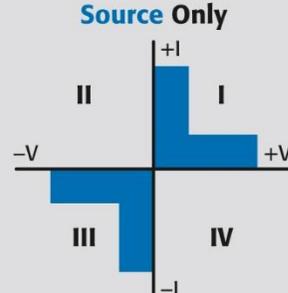
	2602A SourceMeter Instrument	Typical Power Supply
Speed		
Source/Measure Precision	10 μ A measurement uncertainty = 5nA	10 μ A measurement uncertainty = 2500nA
Voltage and Current Resolution	<p>Voltage</p> <p>1μV 40V</p> <p>Current</p> <p>1pA 3A</p>	<p>Voltage</p> <p>1μV 1mV 40V</p> <p>Current</p> <p>1pA 1mA 3A</p>
4 Quadrant Operation	<p>Source + Sink</p>	<p>Source Only</p>

SMUs VS. 电源——分辨率



	2602A SourceMeter Instrument	Typical Power Supply
Speed		
Source/Measure Precision	10 μ A measurement uncertainty = 5nA	10 μ A measurement uncertainty = 2500nA
Voltage and Current Resolution	<p>Voltage</p> <p>1μV 40V</p> <p>Current</p> <p>1pA 3A</p>	<p>Voltage</p> <p>1μV 1mV 40V</p> <p>Current</p> <p>1pA 1mA 3A</p>
4 Quadrant Operation	<p>Source + Sink</p>	<p>Source Only</p>

SMUs VS. 电源——四象限工作

	2602A SourceMeter Instrument	Typical Power Supply
Speed		
Source/Measure Precision	10 μ A measurement uncertainty = 5nA	10 μ A measurement uncertainty = 2500nA
Voltage and Current Resolution	<p>Voltage</p>  <p>Current</p> 	<p>Voltage</p>  <p>Current</p> 
4 Quadrant Operation	<p>Source + Sink</p> 	<p>Source Only</p> 



吉时利半导体测试解决方案

4200A-SCS



半导体测试系统, 集成PC及测试软件,
工作站式测试

Parametric Curve Tracer



高功率, 可灵活配置及组合的参数曲线追踪仪;
集成功能强大的测试软件

S530, S500 & ACS



自动化半导体测试设备; 面向半导体器件级特性分析的参数测试系统及软件

Model 4200A-SCS参数分析仪

15.6" LCD 宽屏, 1920x1080 高清显示, 电容屏, 5U高度, Windows 10, 固态硬盘。

中等功率SMU 2.1W

210 V, 100 mA, 10fA最小电流, 10 aA分辨率

高功率SMU 21W

210 V, 1 A, 10fA最小电流, 10 aA分辨率

脉冲测量单元

- 超快速I-V
- 示波器视图
- 波形生成: 10ns
- 脉冲和测量: 70ns

切换开关

- 4225-RPM切换开关
- 707B/708B开关矩阵

多频率C-V测量单元

1 kHz – 10 MHz, 30V单端, 60V差分直流偏置, 1000Vrms交流



典型应用

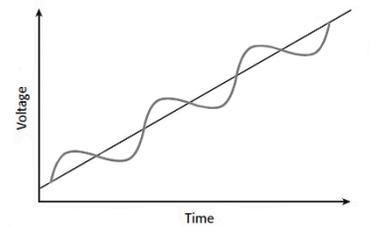
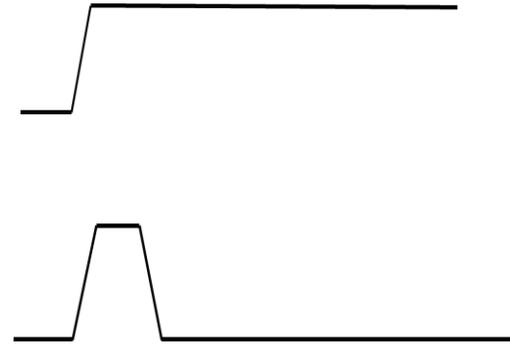
- MOSFET, BJT 晶体管
- 材料特性分析
- 非易失性存储设备
- 电阻率系数和霍尔效应测量
- NBTI/PBTI
- III-V 族器件
- 失效分析
- 纳米器件
- 二极管和 pn 联结
- 太阳能电池
- 传感器
- MEMS 器件
- 电化学
- LED 和 OLED



脉冲/瞬态测试的结合

要完全理解任何器件、材料或工艺特性,你需要三种方式的测量:

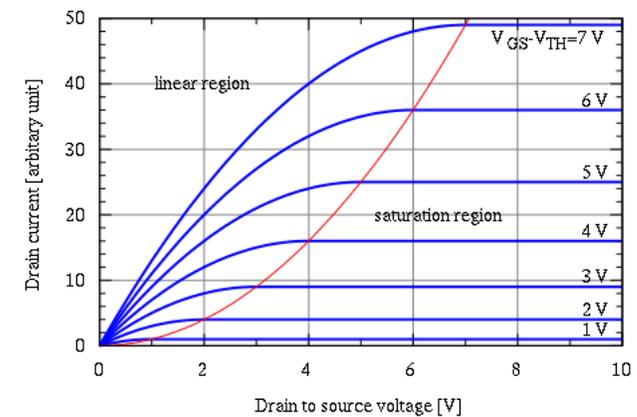
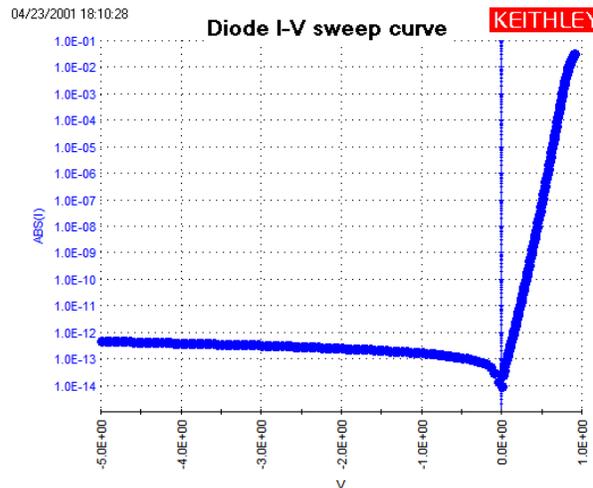
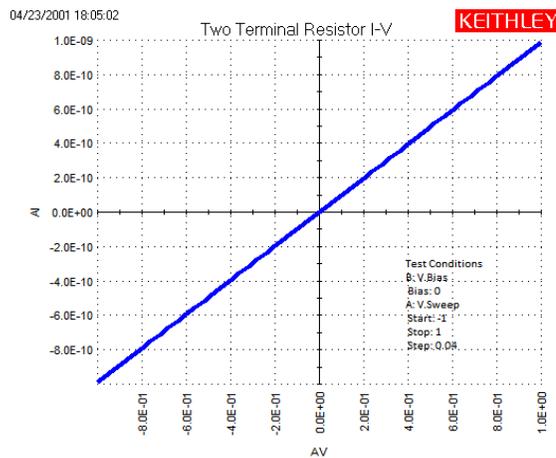
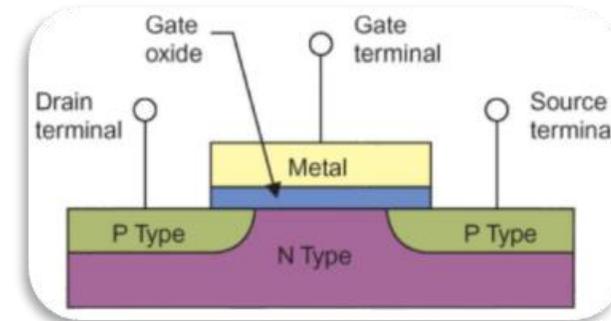
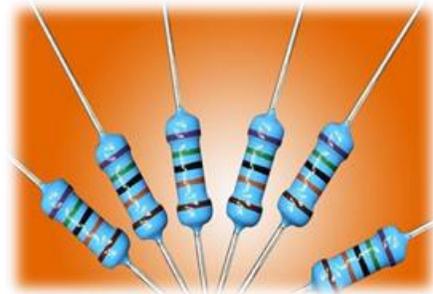
- 精密DC I-V
- 超快的电流-电压(脉冲/瞬态)
- 多频C-V(交流阻抗)



直流 (DC) I-V特性测量：精准测量



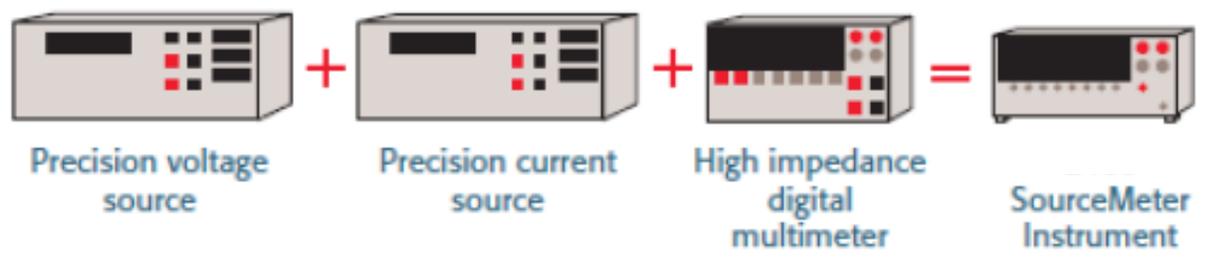
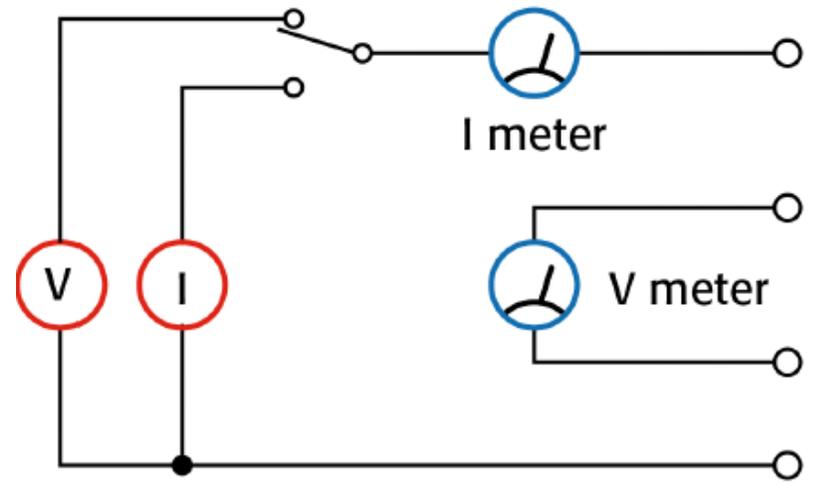
- DC I-V 测量是器件及材料特性测量的最基本测试手段



*1(+9.00e1, +3.50e-2, 92)

直流测试的理想测试设备SMU:

- 通过SMU可以让您同时给被测器件激励并同时测量, 一台4200可集成 2~9 块SMU单元

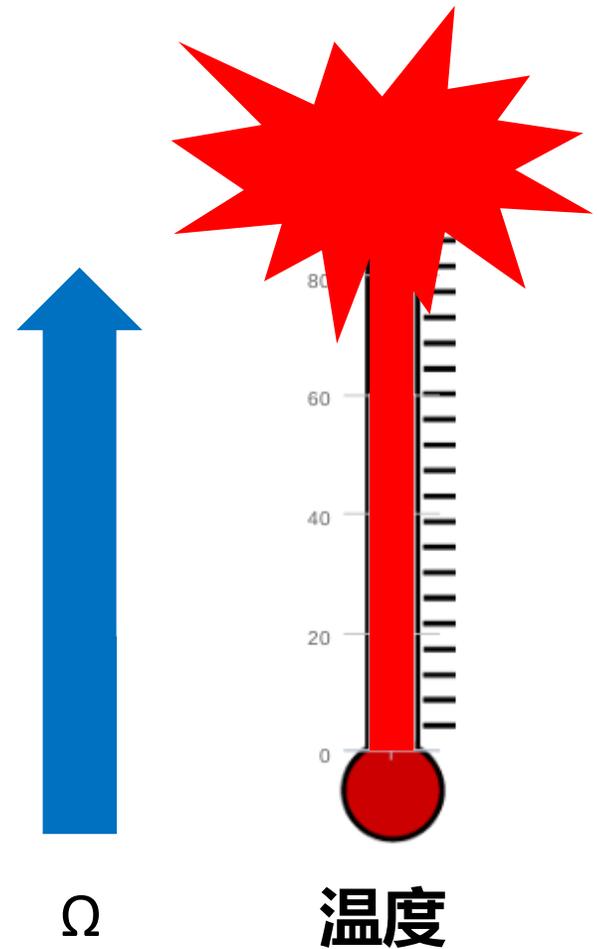
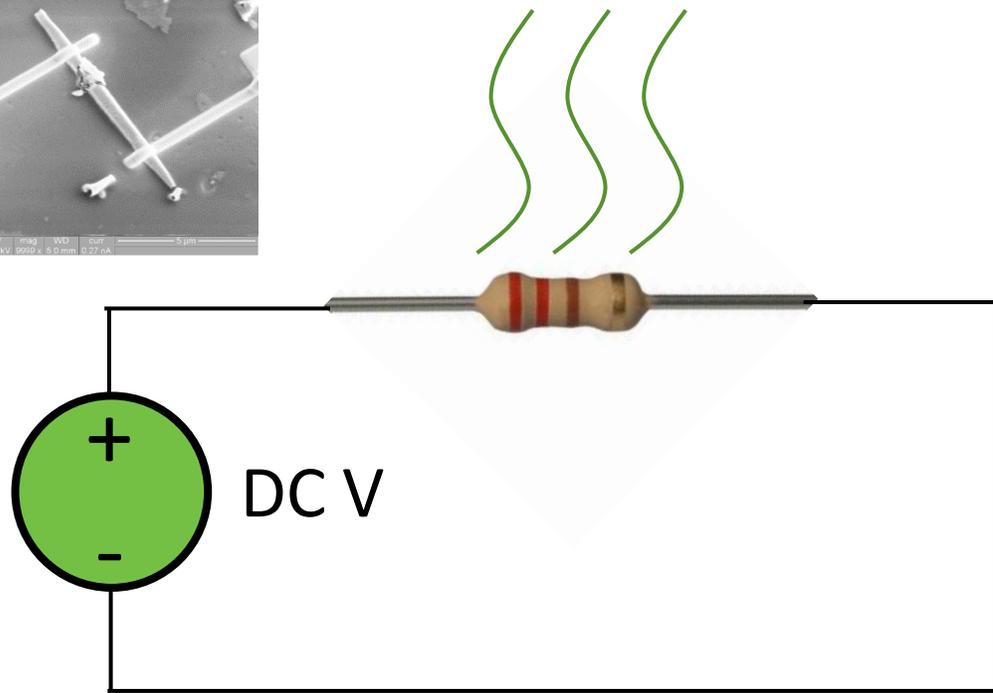
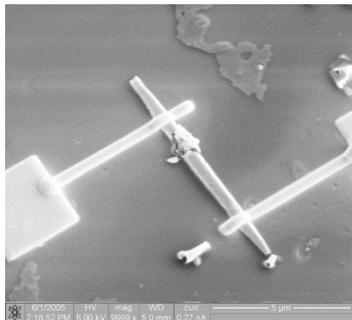


脉冲IV测试噪声和尖峰的产生原因和解决方法



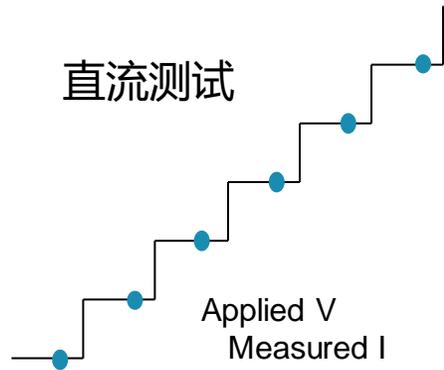
直流与脉冲 (器件自热效应)

- 在DC测试中，器件自热会改变器件电特性。

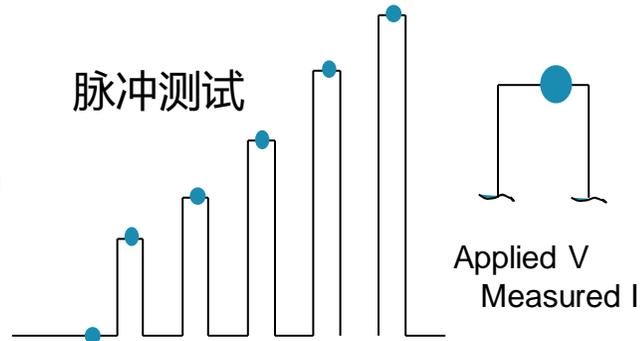


使用脉冲，使自热效应达到最小!

直流与脉冲 (器件自热效应)

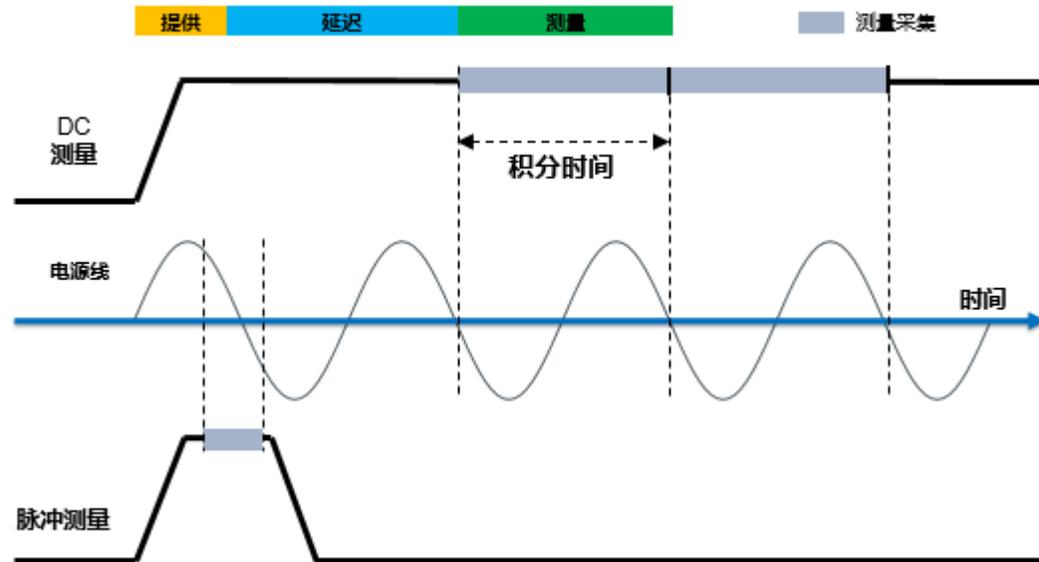


功率器件长时间在直流偏置下,特性开始改变



快速的脉冲测试 (微秒至毫秒级别), 减少功率器件在电压/电流偏置下的stress时间

DC: 稳定时间长; 测量需要时间长; 低噪声;



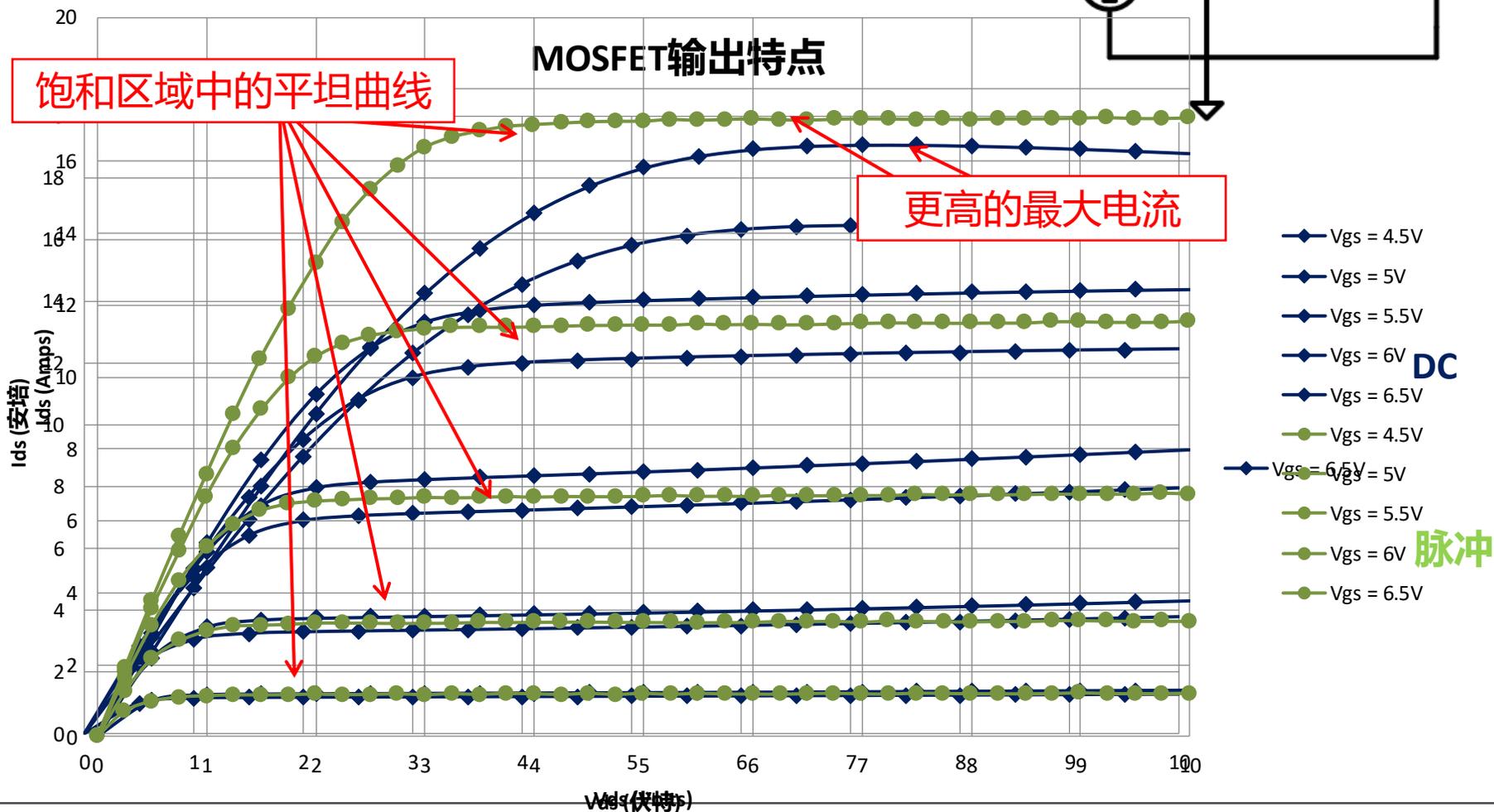
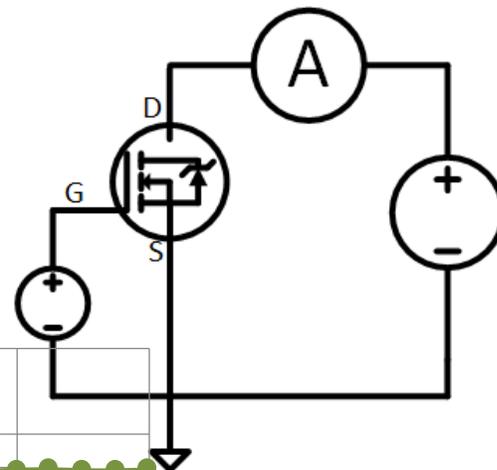
脉冲: 稳定时间短; 快速测量; 噪声高;

脉冲的第一种应用场合：自热效应

举个栗子：MOSFET



举个栗子

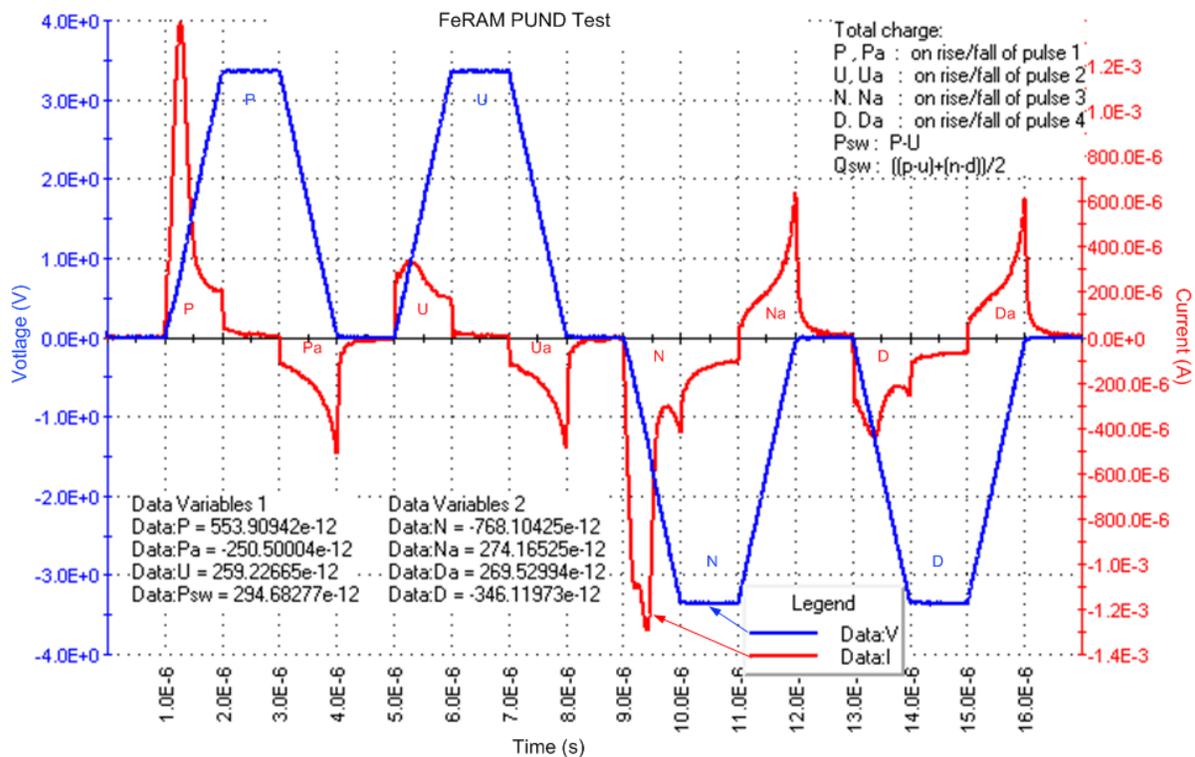


第二种应用：模拟存储器本身的性能

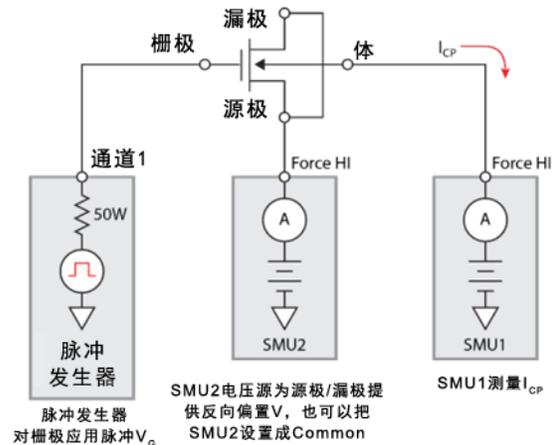
非易失性存储器：使用脉冲编程、读取和擦除NVRAM器件



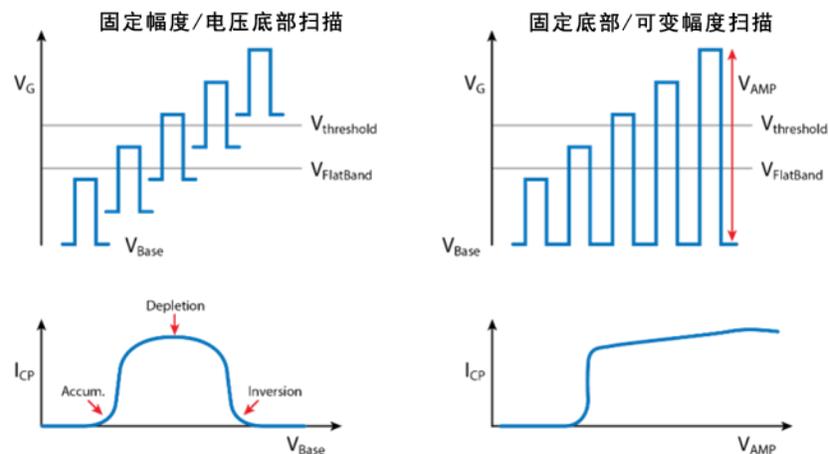
再举个栗子



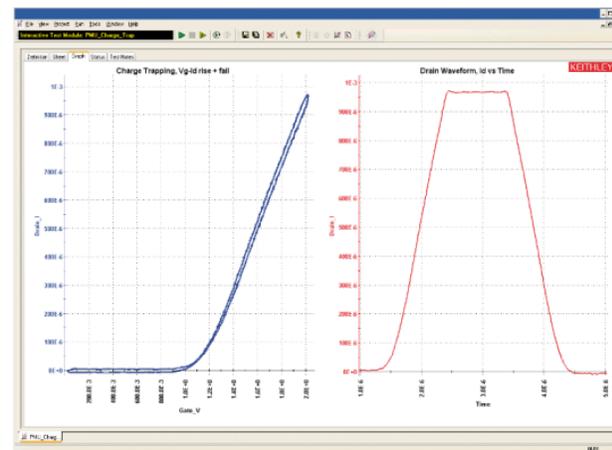
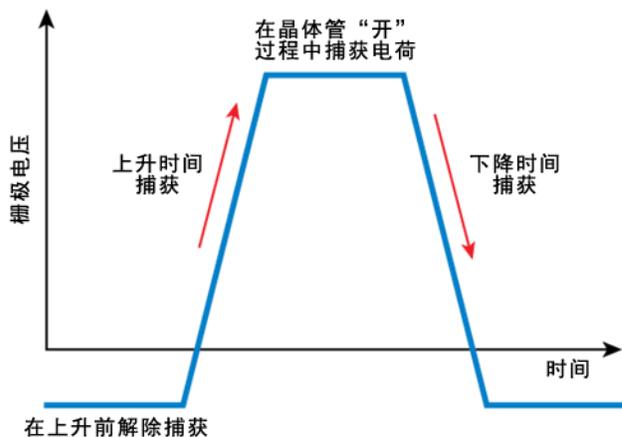
第三种应用场合：特殊应用



两种常用的电荷泵方法



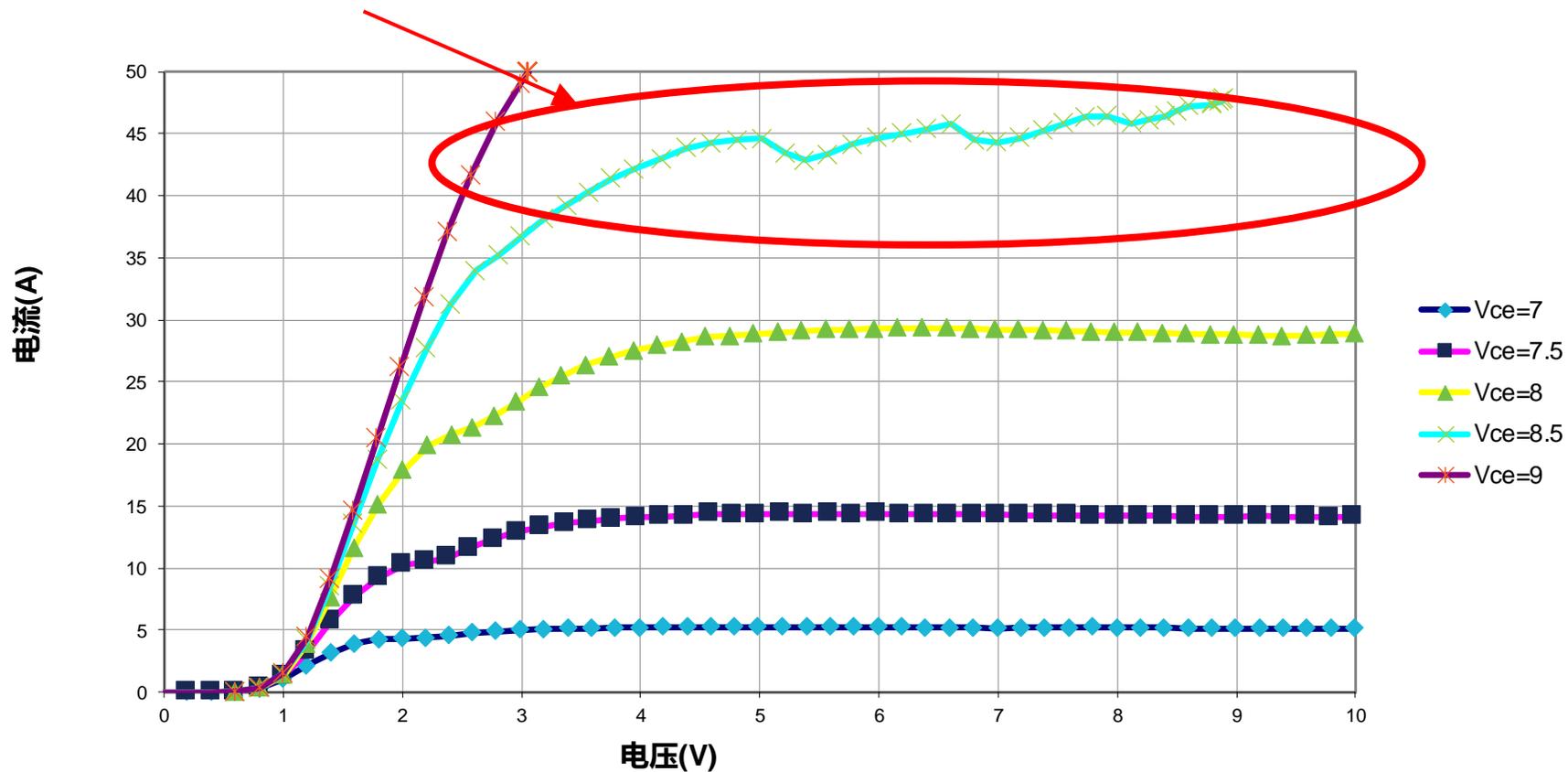
电荷泵



电荷陷阱

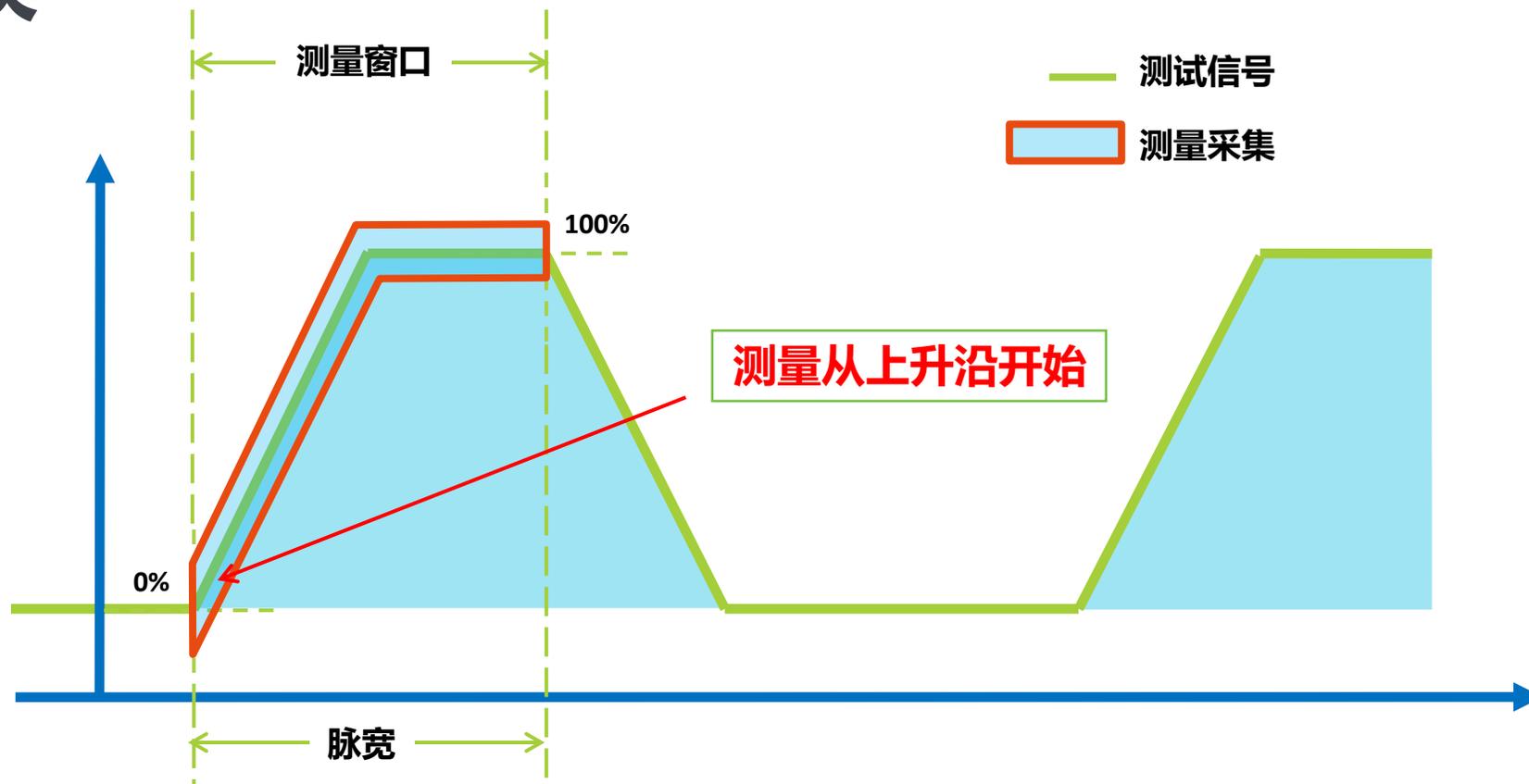
什么时候开始测量

为什么我的读数这么差？！



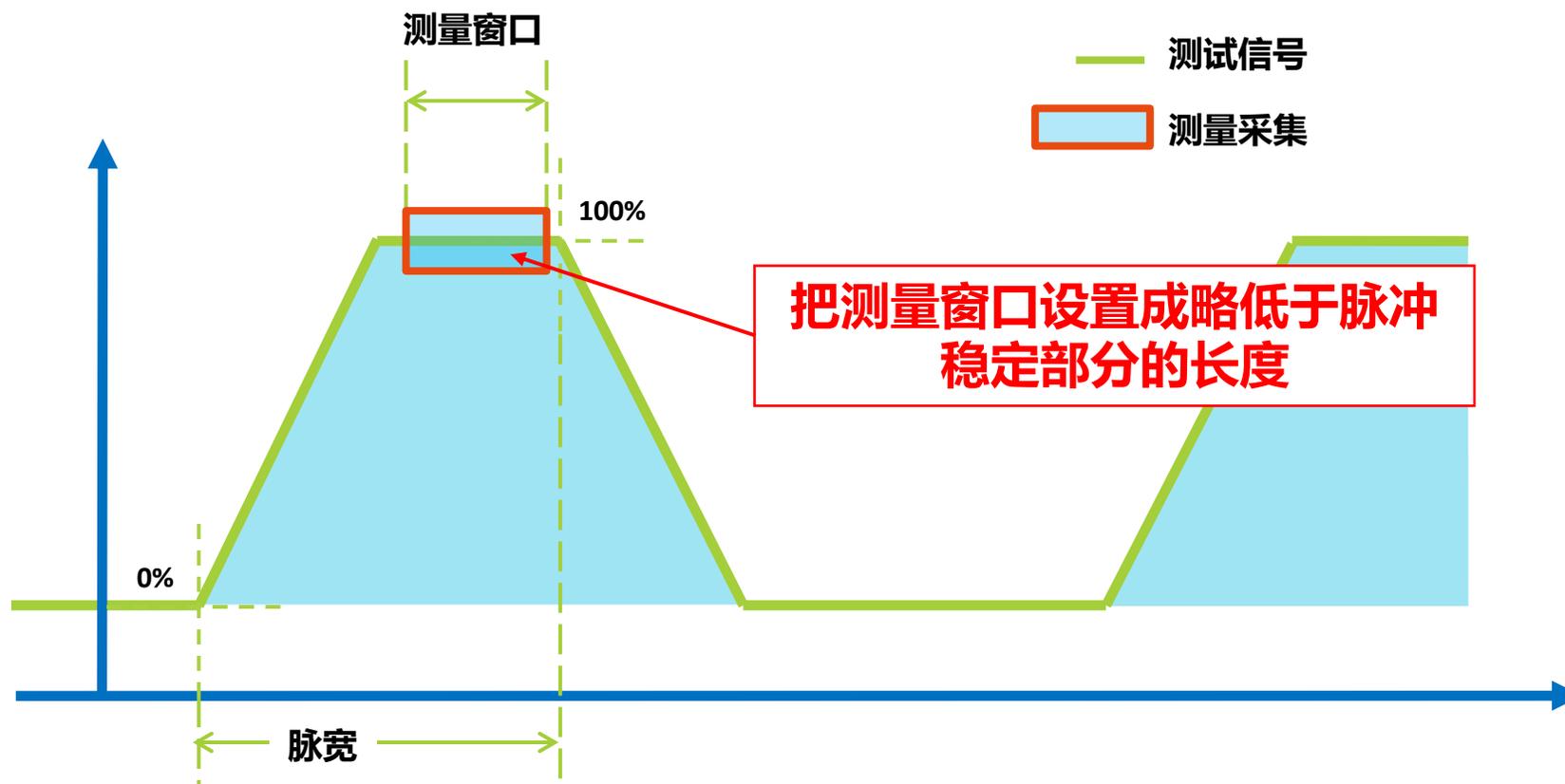
- 获取读数太快的结果

什么时候开始测量： 常见错误



测量窗口=脉宽=差!

测量脉冲的平坦部分



- 脉冲平顶什么时候开始?
- 我怎样知道正确的延迟值?

使用4225-PMU进行波形捕获的实例

Test Settings Terminal Settings Help

Custom Test3#1 Advanced

— Pulse Settings —

Test Mode

Measure Mode

Number of Pulses

— Timing Parameters —

Period s

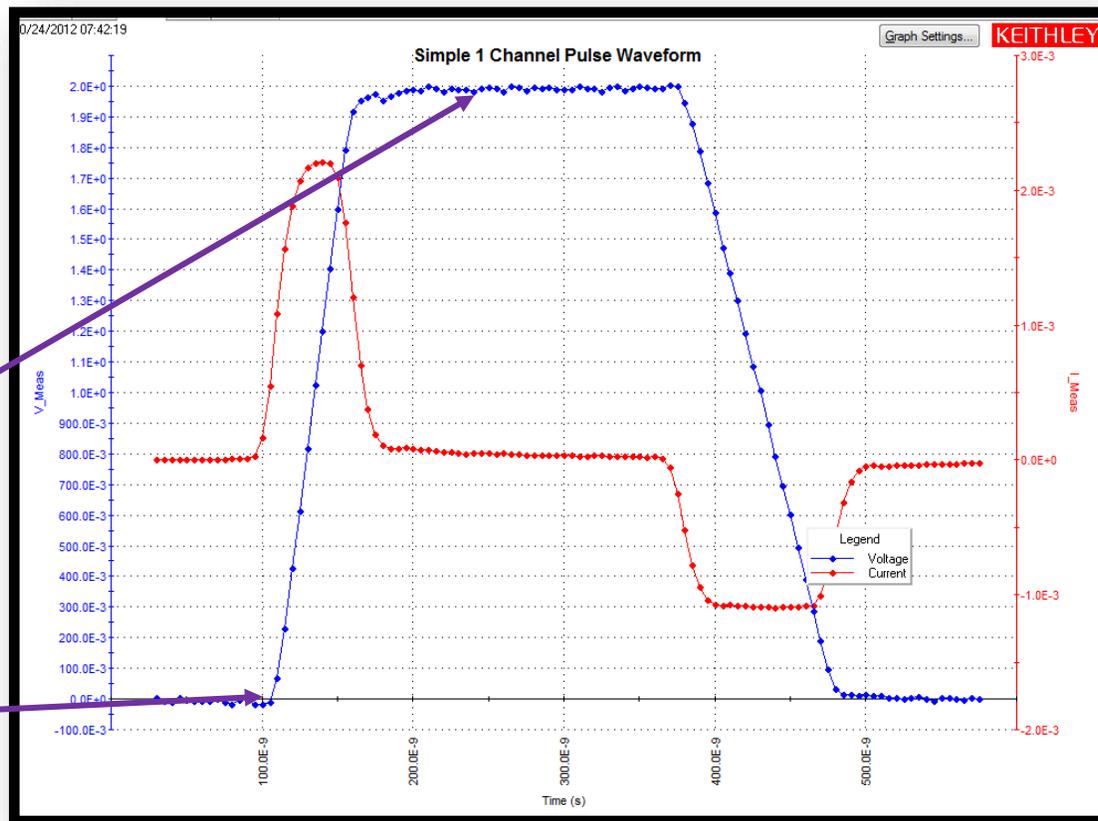
Width s

Rise Time s

Fall Time s

Delay s

Formulator Output Values



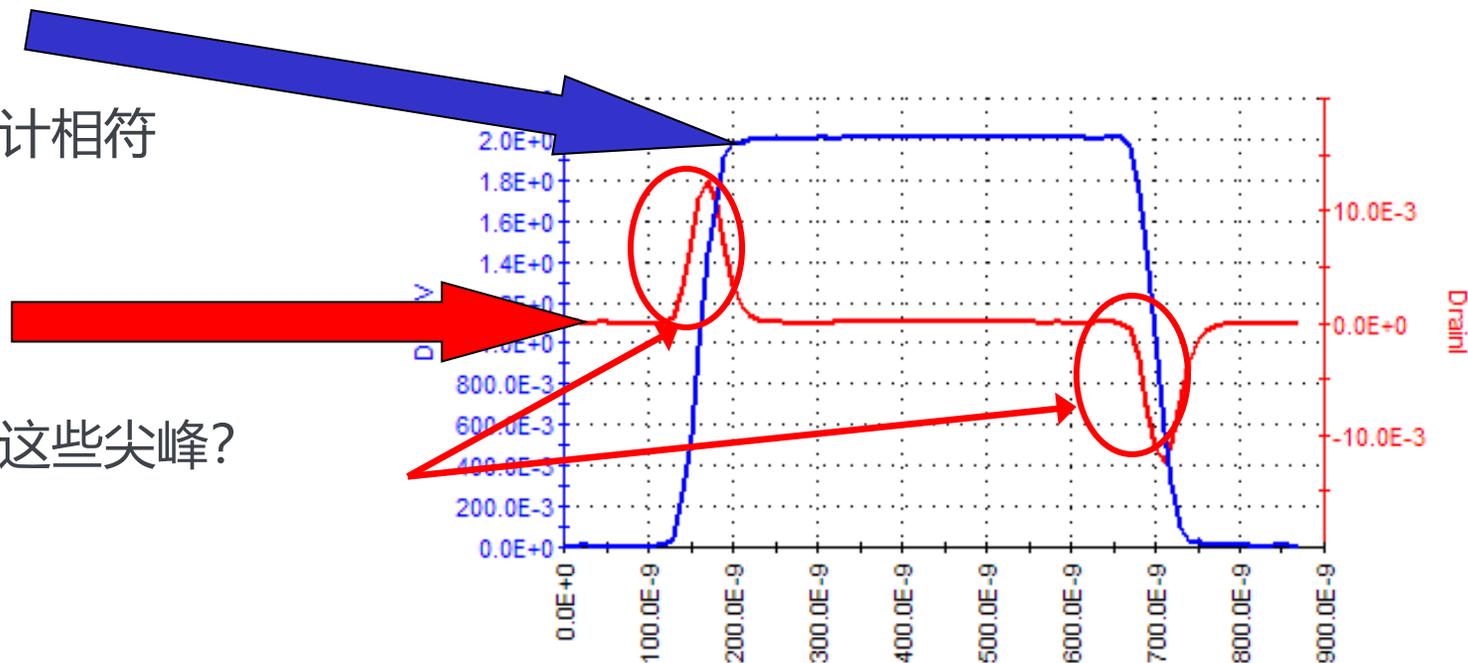
瞬态脉冲测量的电流波形中的尖峰

- **电压**

- 波形与预计相符

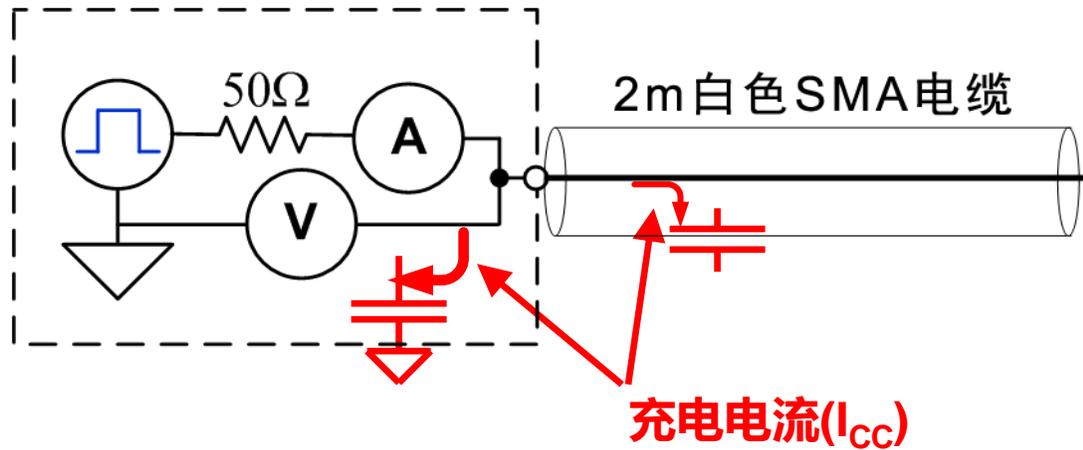
- **电流**

- 为什么有这些尖峰?



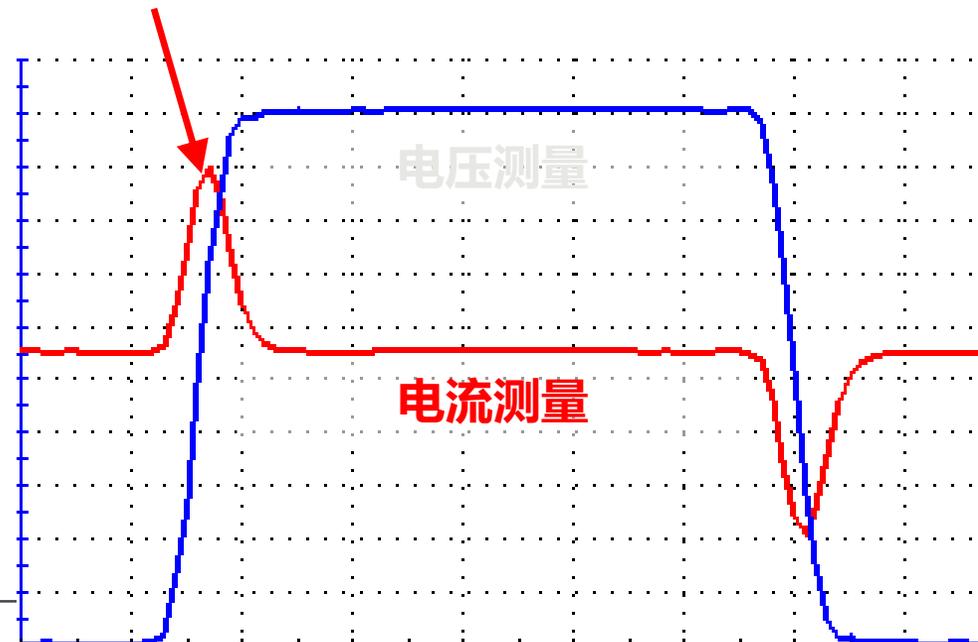
是什么引起这种效应?

4225-PMU 通道



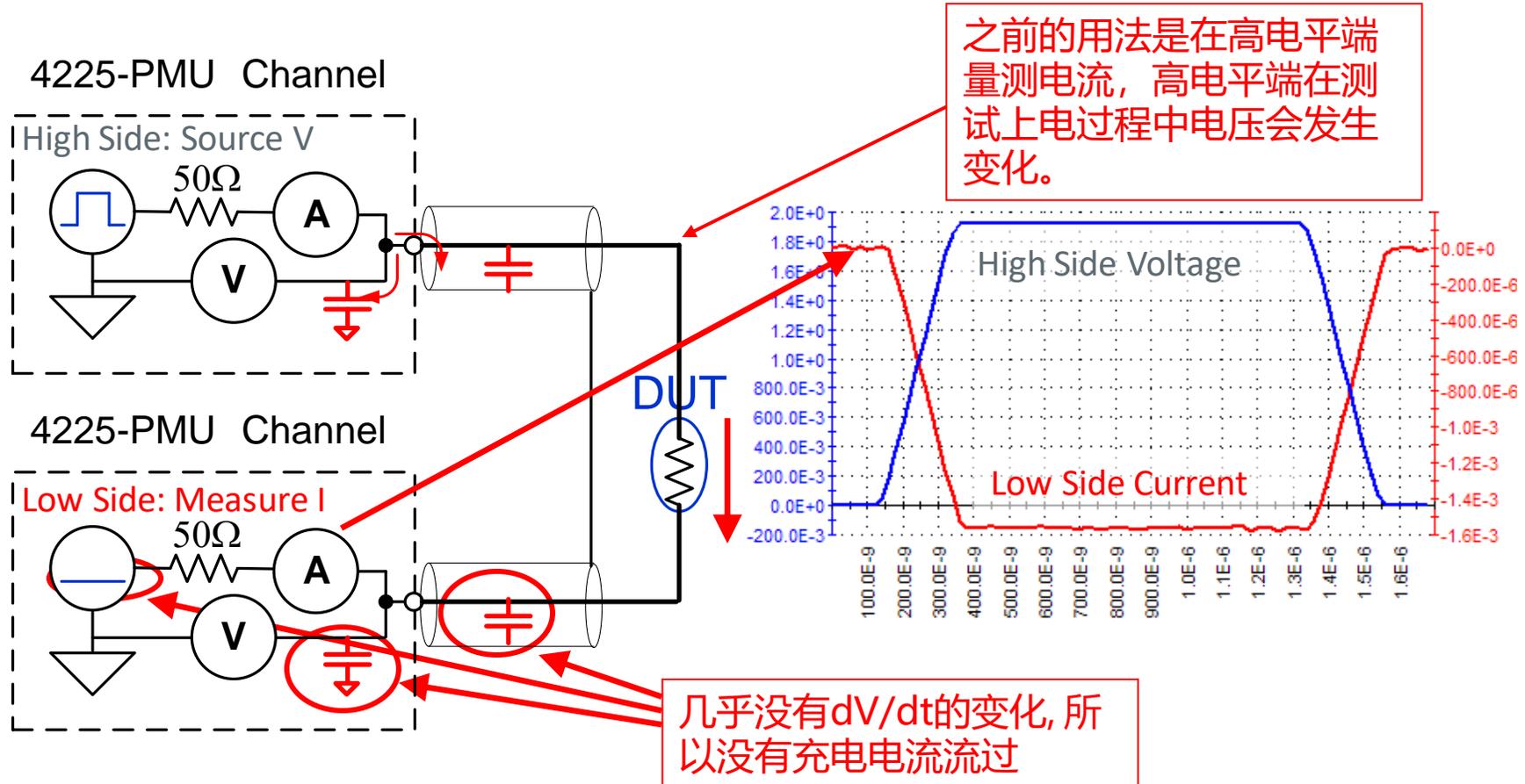
■ 寄生电容

- 在脉冲电压上升时流入寄生电容的电流
- 在电压返回0V的反向放电效应



如何用第二台测试仪器消除尖峰

- 两端器件，两个 PMU 通道

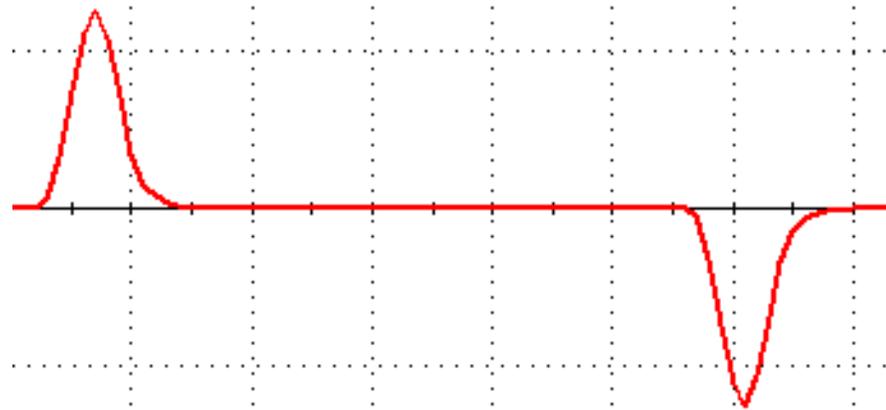


降低寄生电容

- 寄生电容越低，尖峰幅度越小。

- 寄生电容的三个主要来源

- 仪器
- 线缆
- 被测器件



- 不能改变仪器或被测器件的电容，但可以改变线缆！

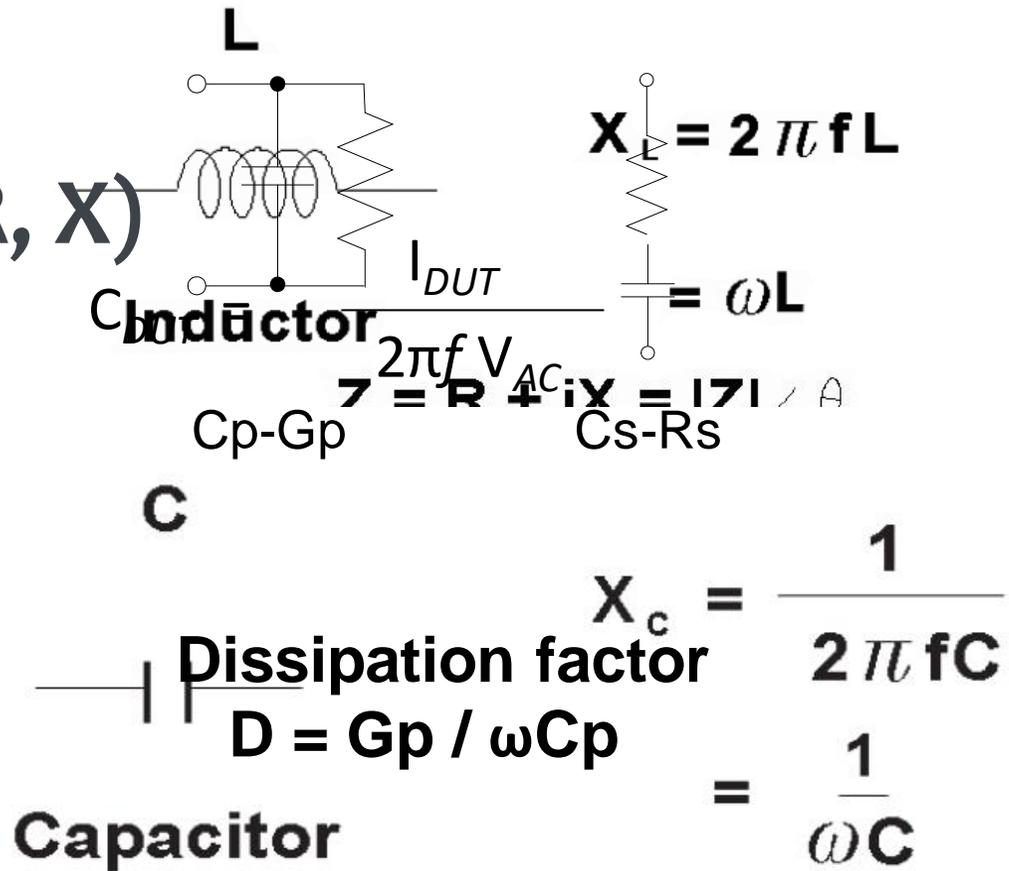
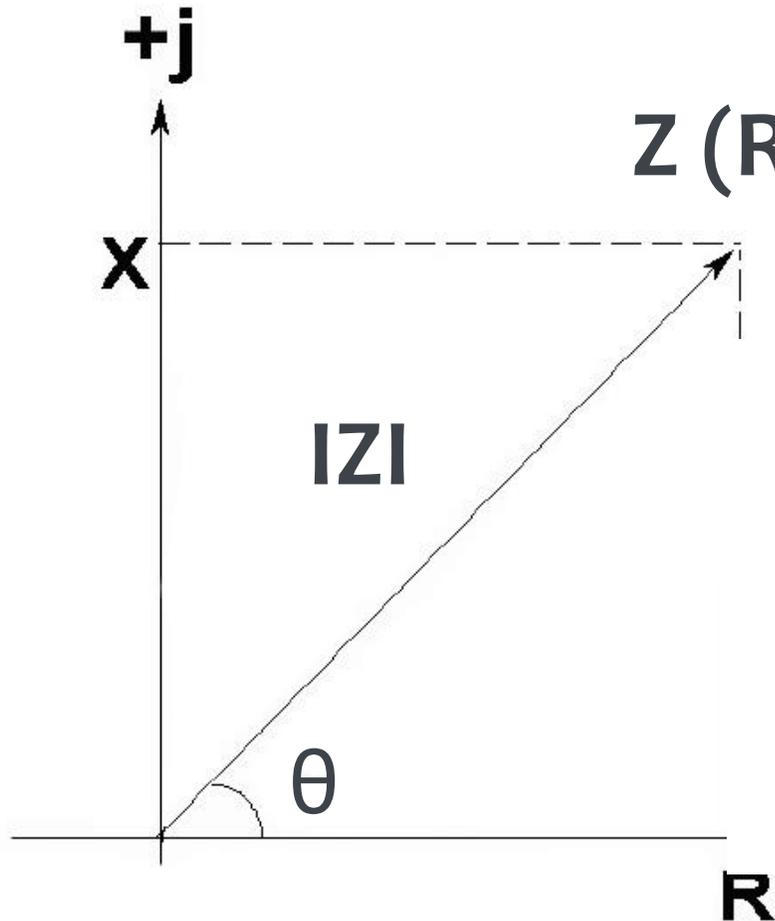
- 缩短电缆长度，降低电容。

CV拖尾等问题的解决方法



阻抗与电容

Imaginary axis

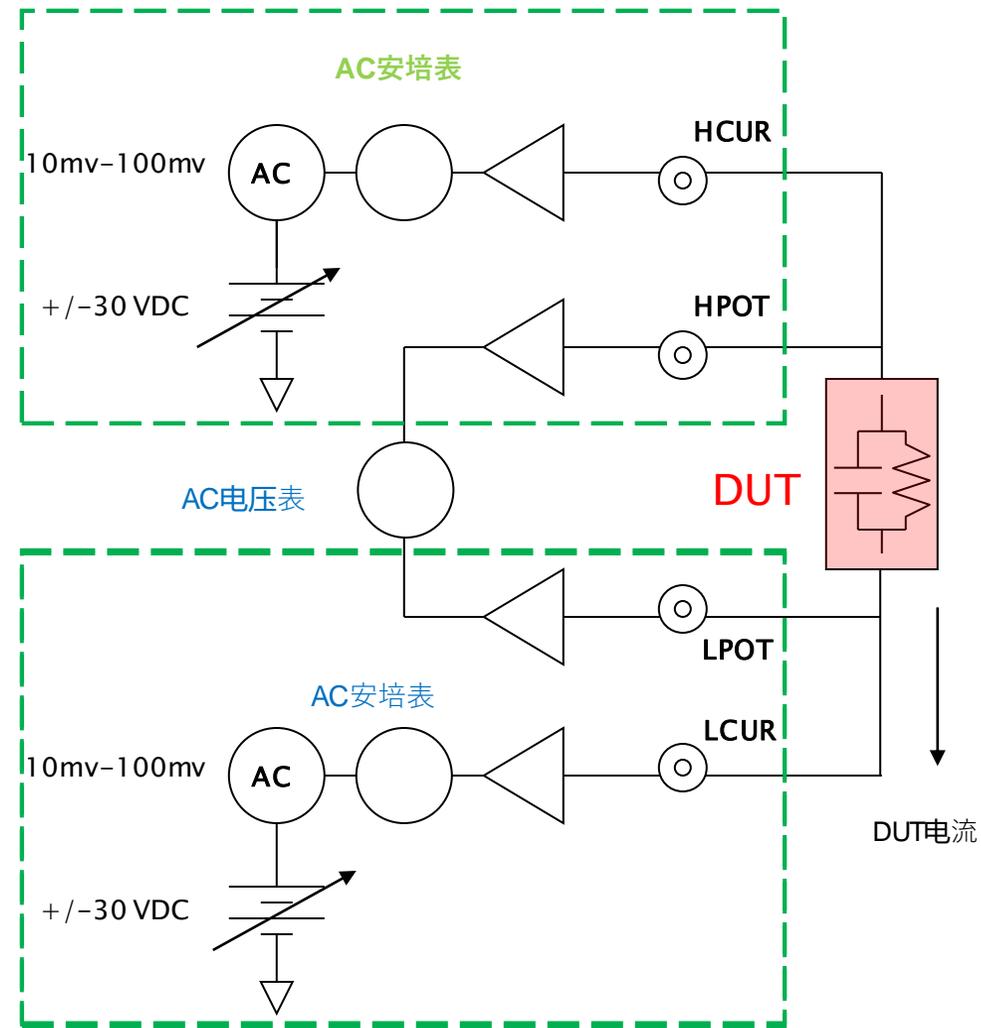


使用CVU做多频信号下的电容测量

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



吉时利利用对称电路改善CV测试



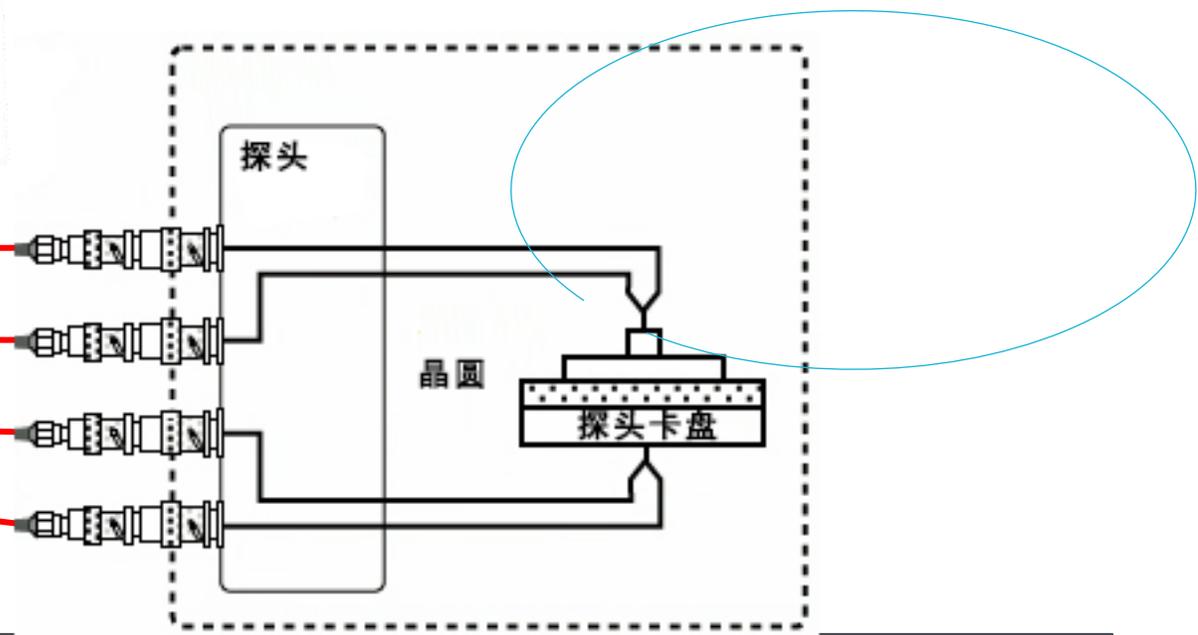
如何提高测量精确度



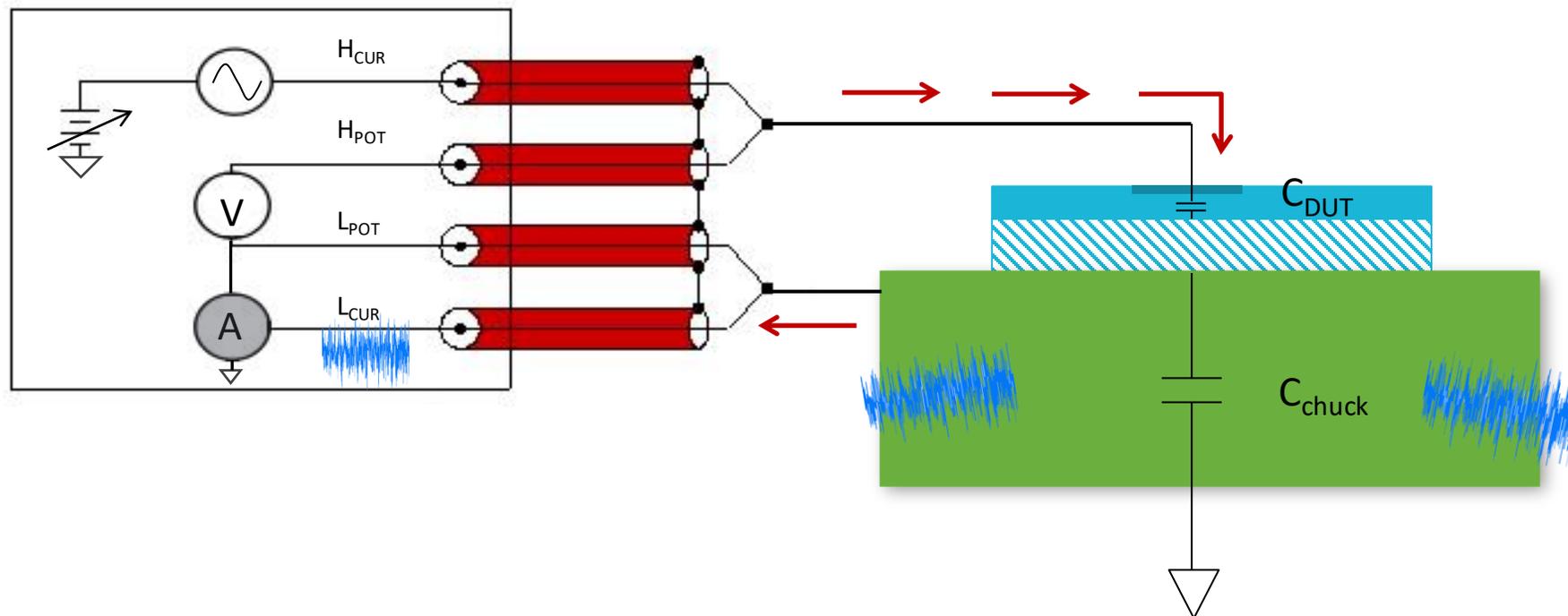
校准后的测量平面



补偿



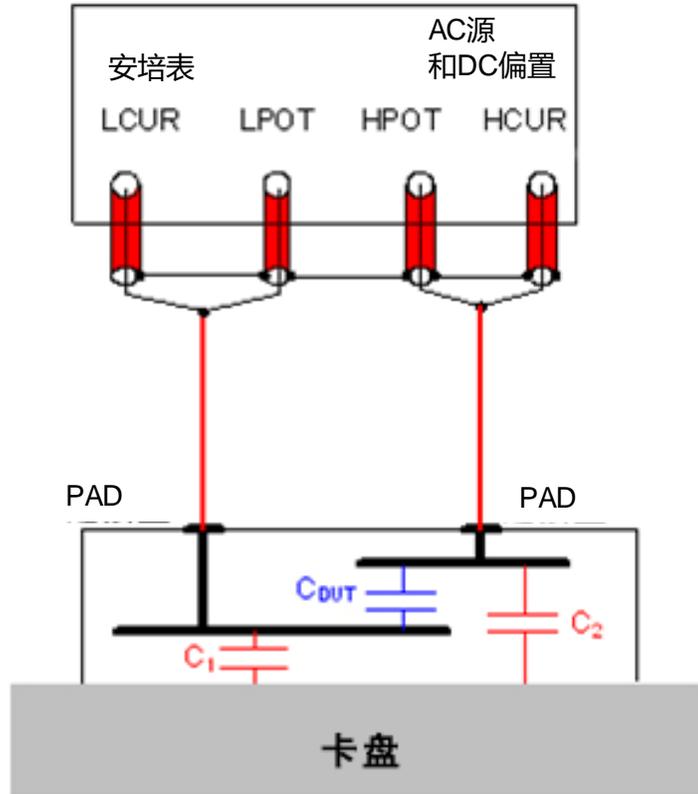
电容测试时可能会遇到的问题



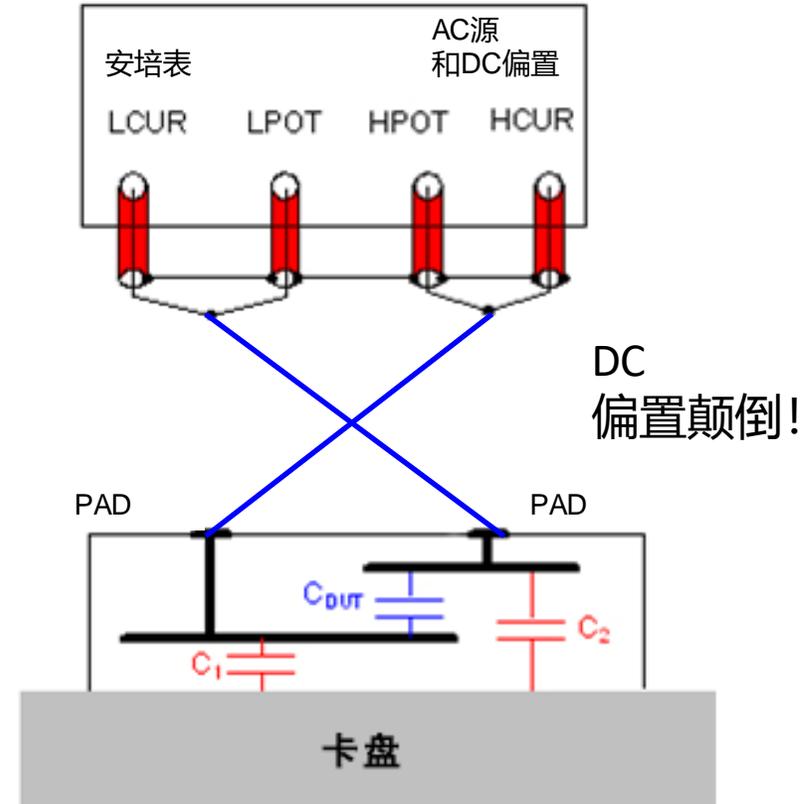
在晶圆和探针台上测量电容

交换High 和 Low端连线

有噪声的测量连接方式



交换过连线的连接



轻松点击鼠标，切换安培表

CVU Advanced Terminal Settings – B Terminal: CVH1 – Model KICVU4210 – Sweeping Mode

Force

Voltage Linear Sweep | Single Freq

Presoak 0 VDC | Frequency 1MHz

Start -1 V | AC Drive Signal 30 mV RMS

Stop 1 V

Step 0.1 V

Points 21 | Dual Sweep

Measure

Parameters Cp-Gp | Report Test Conditions

Param 1 Column Name Cp_BA | DCV Column Name DCV_BA

Param 2 Column Name Gp_BA | Freq Column Name F_BA

Report Status

Compensation

Open Short Load | Cable Length 1.5m

Advanced

AC Source V CVH1

AC Measure I Range (CVL1) Auto

DC Source V CVH1

DC Offset (CVL1) 0 V

Capacitance Range Estimator

C Max 1.59mF

I Max (Range) 1mA

Frequency 1MHz

AC Drive Voltage 30mV RMS

$$C_{Max} \approx \frac{I_{Max}}{2\pi f V_{ac}}$$

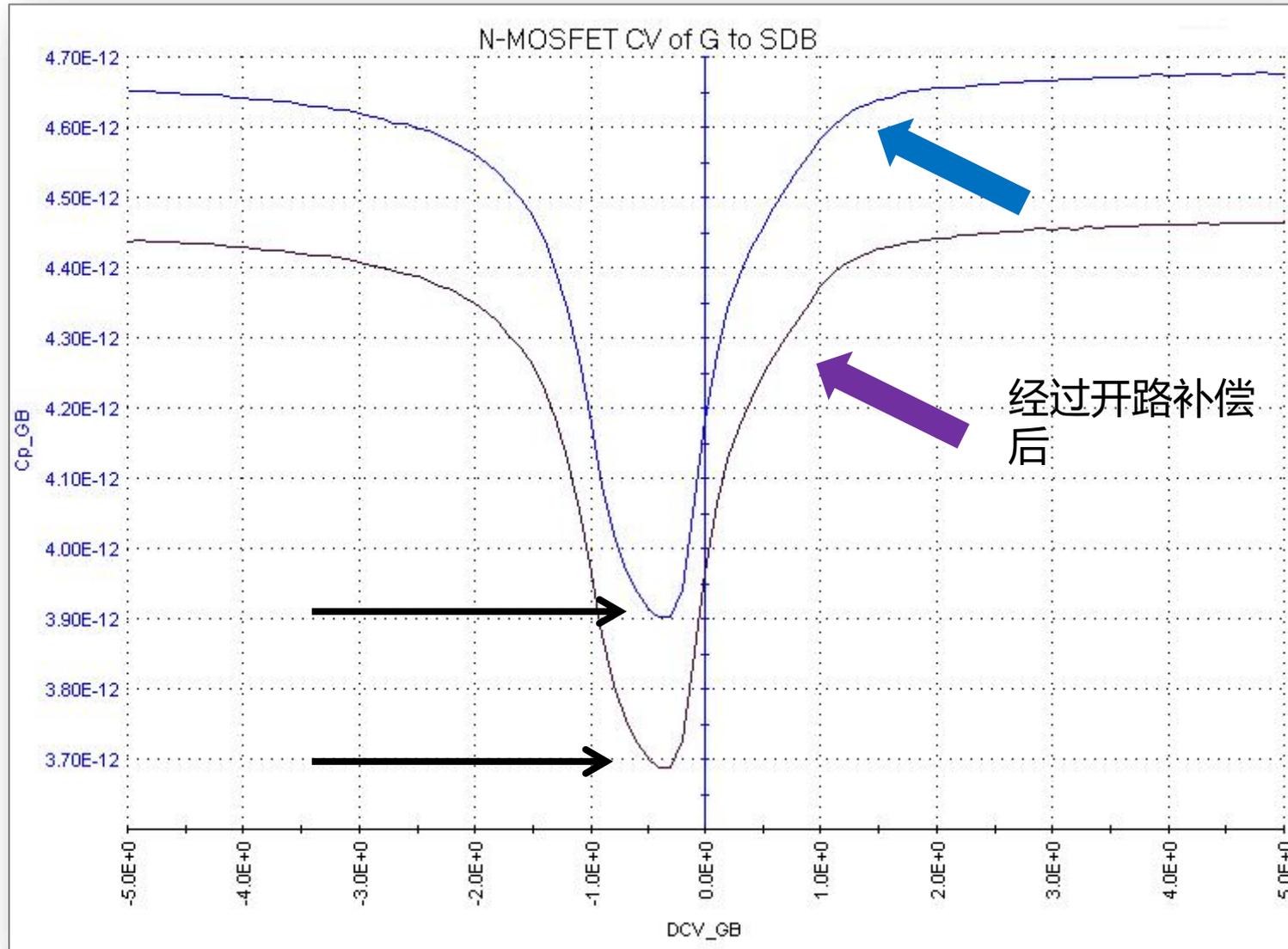
Note:
Calculated results represent a direct connection to the test device. Stray capacitance due to cabling may reduce the actual current measured. You may need to increase Sweep Delay for capacitances over 1µF.

OK Cancel

Terminal Settings | Advanced

CVU测试需要校准

MOSFET的CV曲线



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**

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

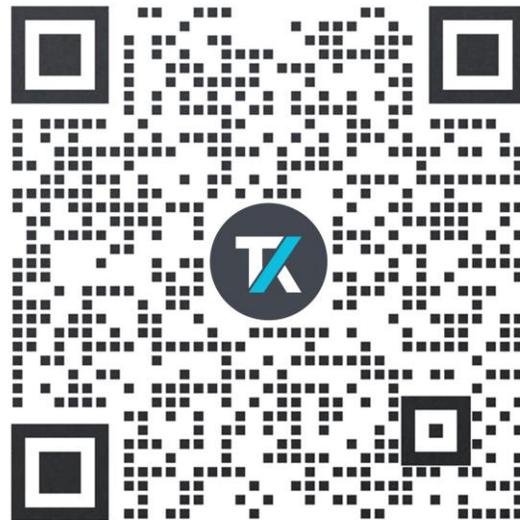
错误表现	可能原因	最大限度地减少错误或避免错误的建议
测得电容值太低	器件没有处于平衡状态	1.提高延迟时间
	器件接触不良或没有接触	1. 使用置信度检查, 检验连接 2. 可能需要改善晶圆和卡盘之间的接触
	DUT开路	1. 试试另一个DUT, 检验问题是由DUT引起的还是其他地方引起的 2. 使用confidence check
	没有连接同轴电缆屏蔽	1. 在DUT附近连接屏蔽 2. 降低测试频率。

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

加入“泰克半导体直播讨论群”

只要你问，只要我有



由泰克工程师小助手邀请入群~
(将于本场直播结束后统一邀请)

泰克云上大讲堂 & 高速接口发展与技术论坛



关注“泰克科技”服务号
查看产品资料&往期回放~



往期主题回顾

- PCIe链路问题分析和实际仿真
- 如何测试纳米材料及纳米电子器件的IV和CV性能?
- 纳米发电机测试难点及解决方法
- 光通信眼图精讲
- 5G CPE芯片及模块应用测试
- 最新USB4规范解析及一致性测试
- 宽禁带半导体器件静态测试规范解读
- 新型计算框架及忆阻器、神经网络测试
- 汽车雷达模块应用与测试挑战
- 零基础学仪器编程 (3月28日即将上线!)**

