源表、微小信号、高阻器件和材料的精密测量

饶骞

11月26日

通用和电源产品市场经理

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

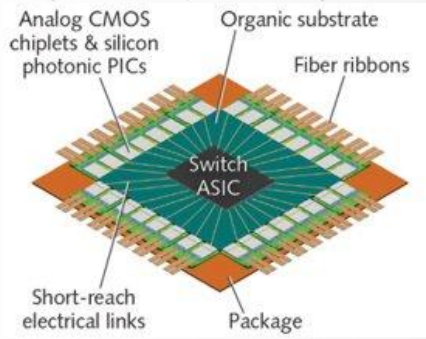
智能设备、新器件和新材料的高速发展

高精度的I-V特性测试迫在眉睫



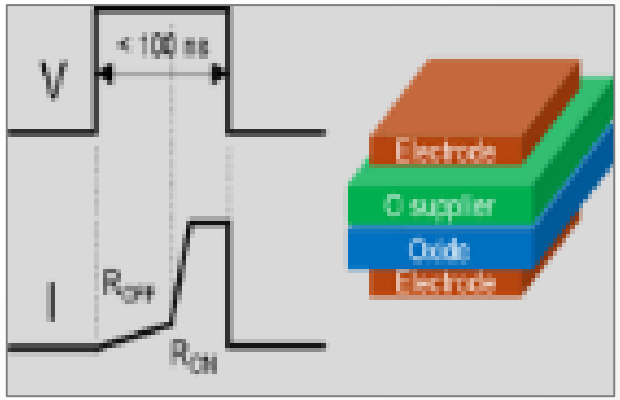








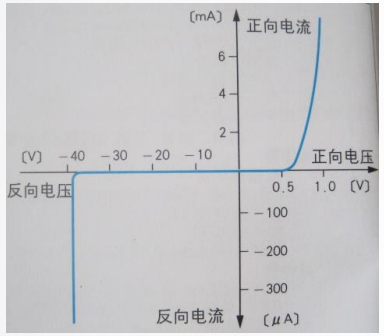


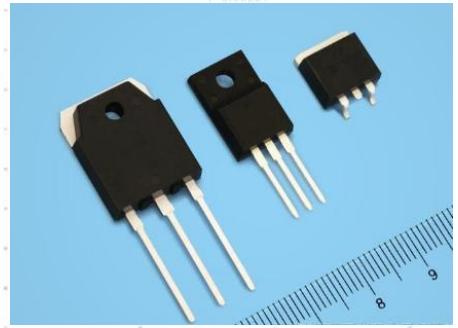


通用的测试手段存在的问题

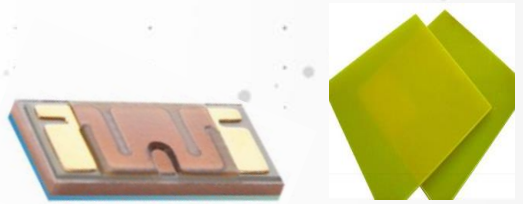
电源+万用表的方案

- 半导体器件的I-V特性测量
  - 不同象限的工作区域
  - 电流测量分辨率
  - 电源噪声
  - 仪器之间的同步
  - …….





- 极限电阻的测试, 万用表是否有足够的量程?
  - R = V / I
  - 绝缘材料， GΩ、TΩ, 甚至PΩ
  - 或者, 大电流取样电阻， R= 100uΩ, 应该加多大的测试电流或电压?

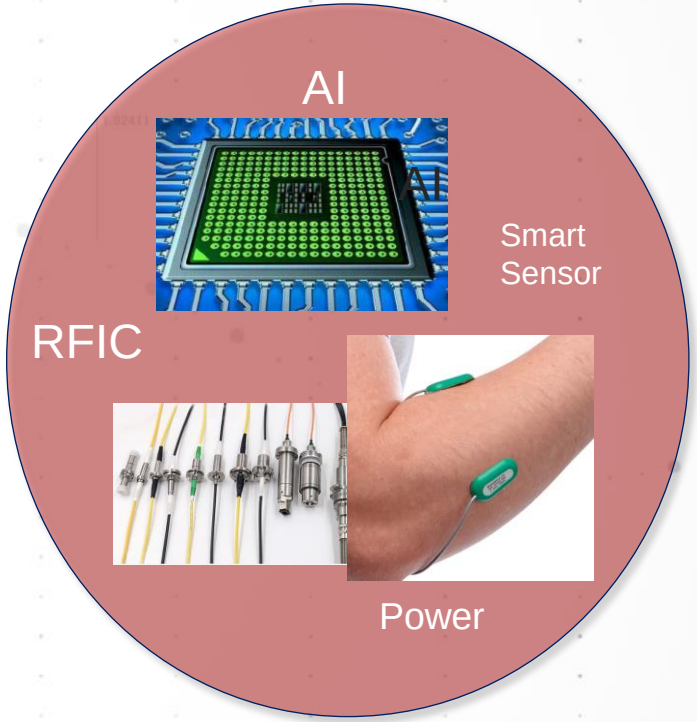






内容安排

- 认识源表和典型应用
- 微小电阻的精密测量
- 高阻和绝缘材料的测试
- 演示



什么是源表?

源表 = 电源+万用表?

- 有源（Source）有表（Meter），简称源表（Source Meter Unit SMU）
- 源：电压源、电流源
- 表：电流表、电压表、电阻表
- 源表：是电压源、电流源、电压表、电流表和电阻表的综合体，是为要求精密电压源并同时进行电流与电压测量的测试应用而设计的
- 比电源输出更精密，比通用万用表测量更宽范

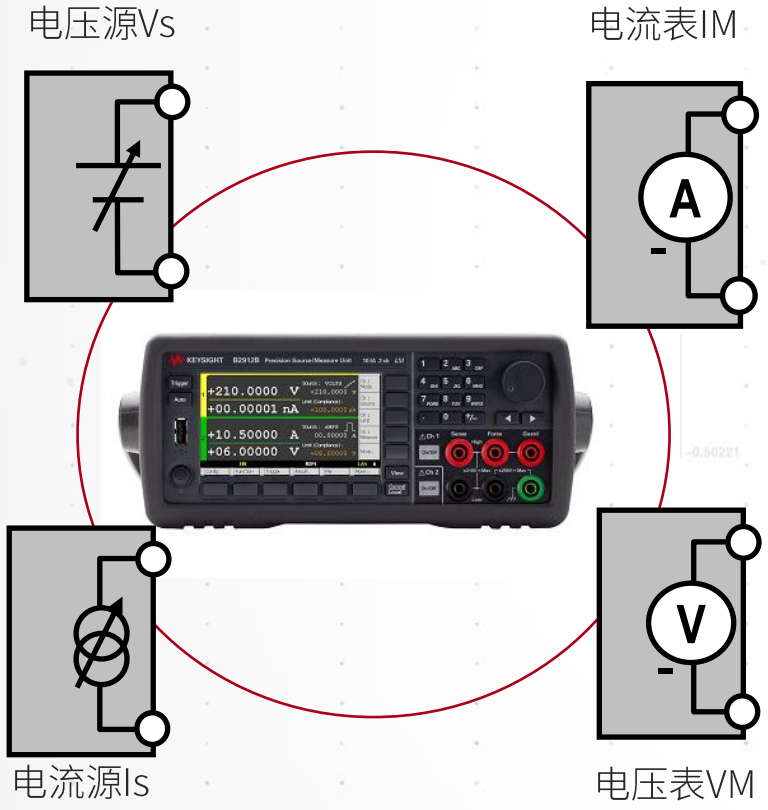
	传统仪表	B2900 系列
更大电流范围	100pA – 10A (34465A)	10fA – 10A (B2912B)
更低电源噪声	200 uVrms (高性能电源)	10 – 100uVrms
更多的工作方式		四象限、扫描、高速采样



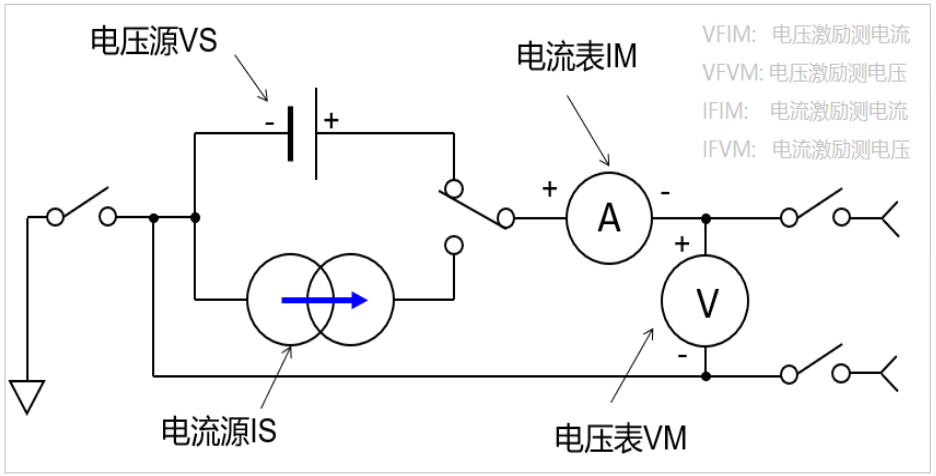


源表SMU的实现原理和主要特性（1）

电源和电表的有机组合

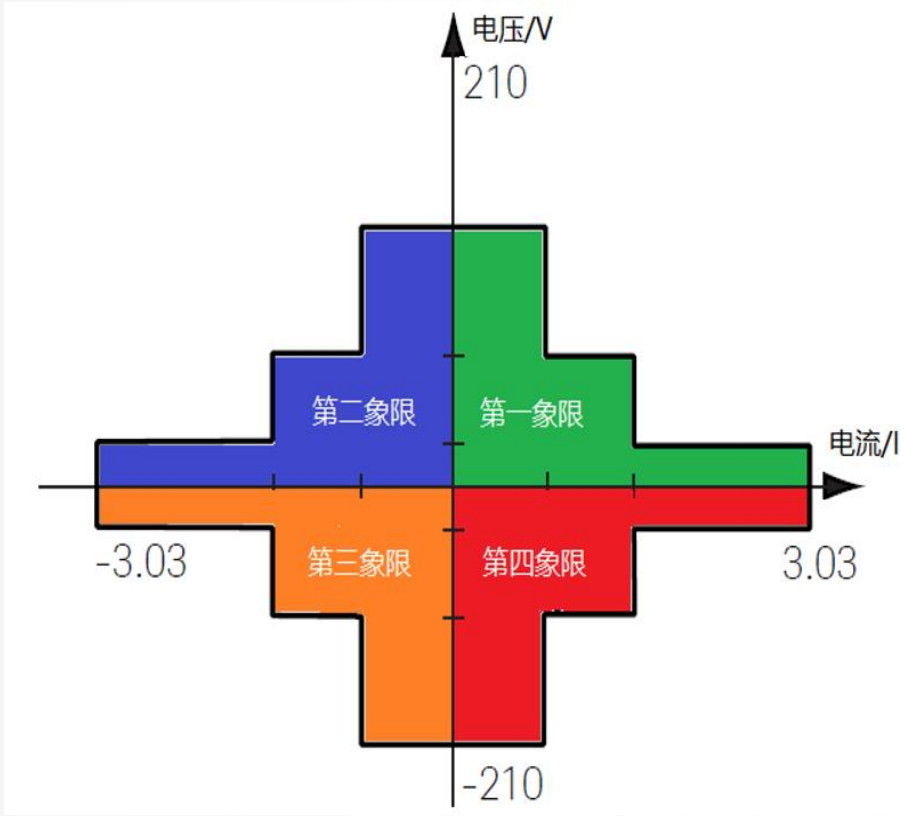


- VFIM： 电压激励测电流
- VFVM： 电压激励测电压
- IFIM： 电流激励测电流
- IFVM： 电流激励测电压
- 双通道型号可以直接测试三端口的器件



源表SMU主要特性（2）

四象限、多量程的工作模式

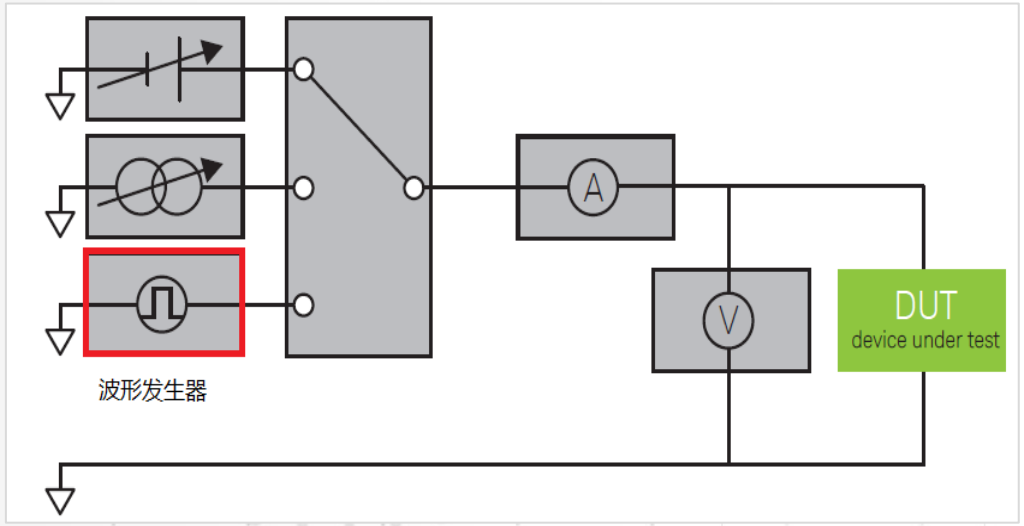


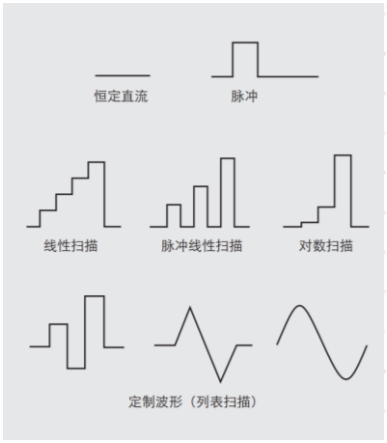
- 精密电压源
- 精密电流源
- 电子负载
- 交流源
- 多输出量程能使在最大功率内， 有更宽的I/V工作范围

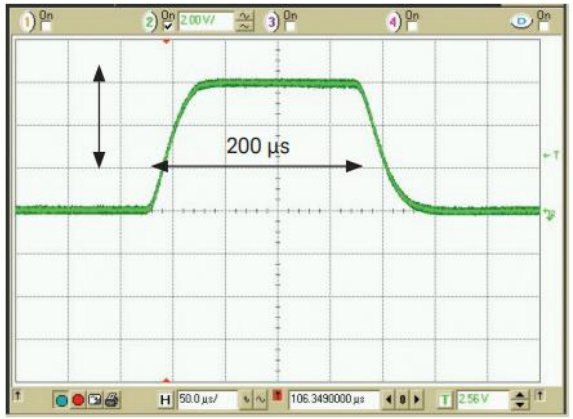


源表SMU主要特性 (3)

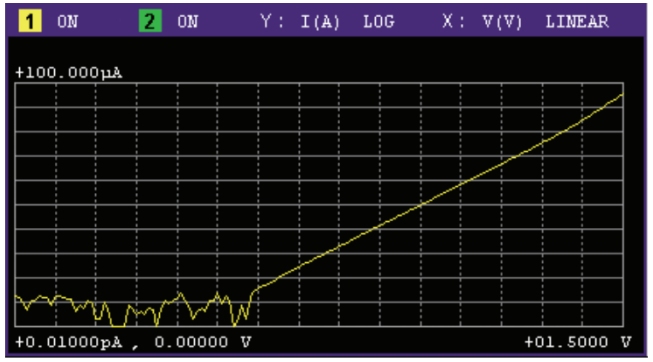
功率任意/脉冲波形发生器、IV扫描仪、高速数字化仪



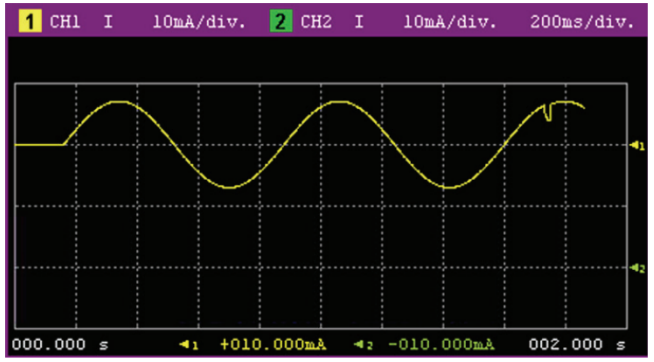




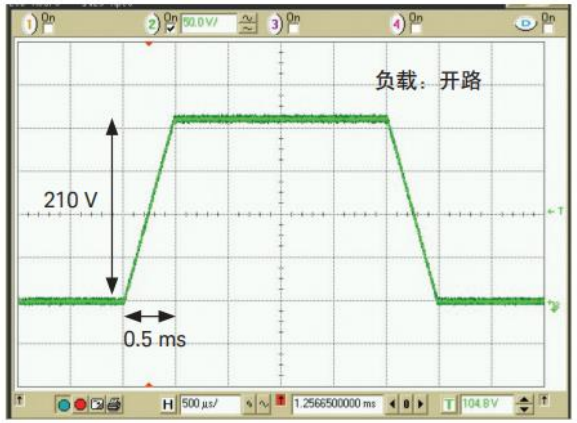
您可以生成高达 10.5 安培的电流脉冲，有助于将器件自热效应降至最低。



您可以直接在 B2900A 前面板上执行并显示精确的低电流测量。



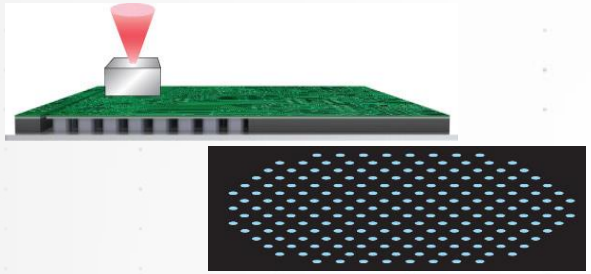
滚动视图模式可使您捕获低频率瞬变现象。



您可在 0.5 毫秒内将电压升至 200 V，这对测量高功率元器件非常有用。

源表SMU主要特性 (3)

SMU PXI的精准、快速的动态激励

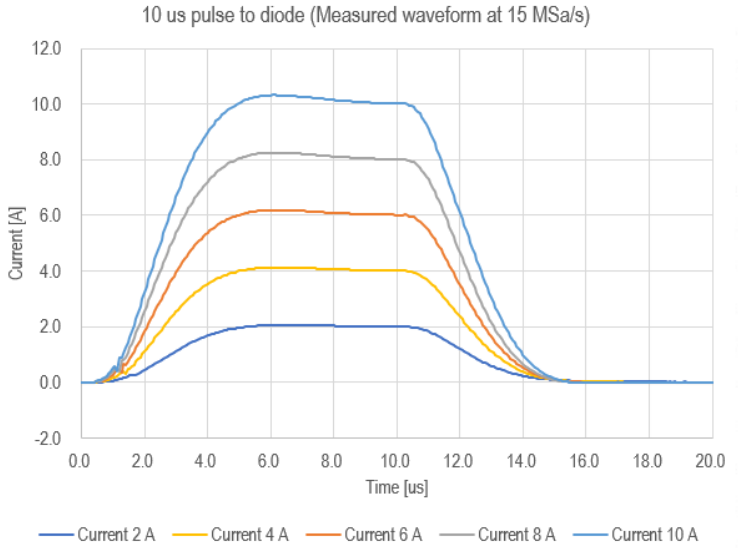


VSCEL



LIDAR





DUT: diode (MUR105G), which is used in the demo kit

M9602A / M9603A 源表PXI模块

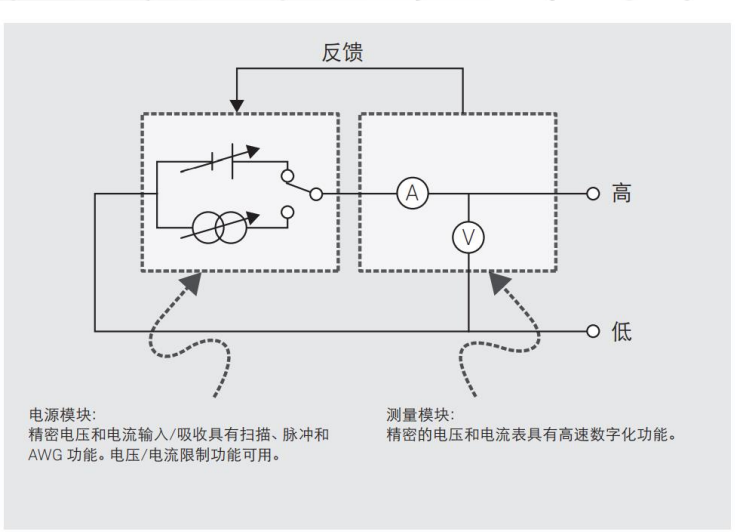
- ✓ 电压范围：60V
- ✓ 电流范围：10.5A（脉冲）
- ✓ 电流分辨率： 100fA
- ✓ 最小脉冲宽度： 10uS
- ✓ 采样速率： 15MSa/s



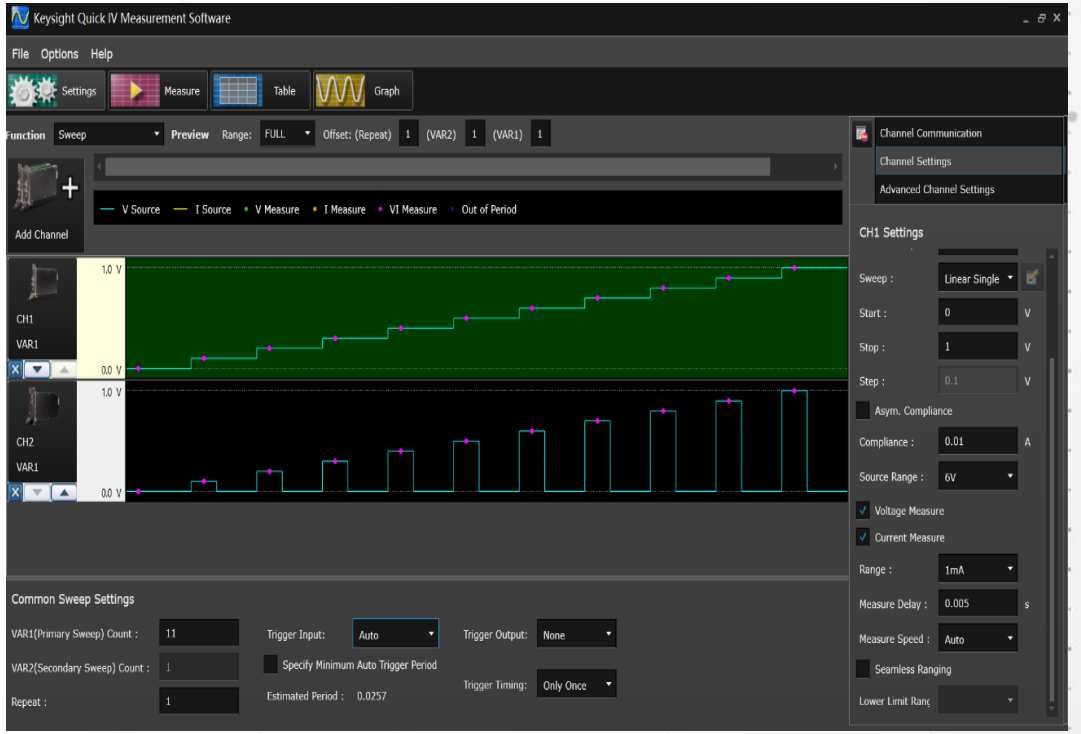
源表SMU主要特性（4）

源和测量引擎的精确时间控制

- 整合了源和测量资源，实现更严格的同步性。
- 非常灵活的触发能力，不依赖输出电流或电压波形独立地定义测量点和测量时间
- 双通道型号，可以同步或独立地运行两个通道
- 在远程控制时，使用一组触发信号能触发同步多台设备

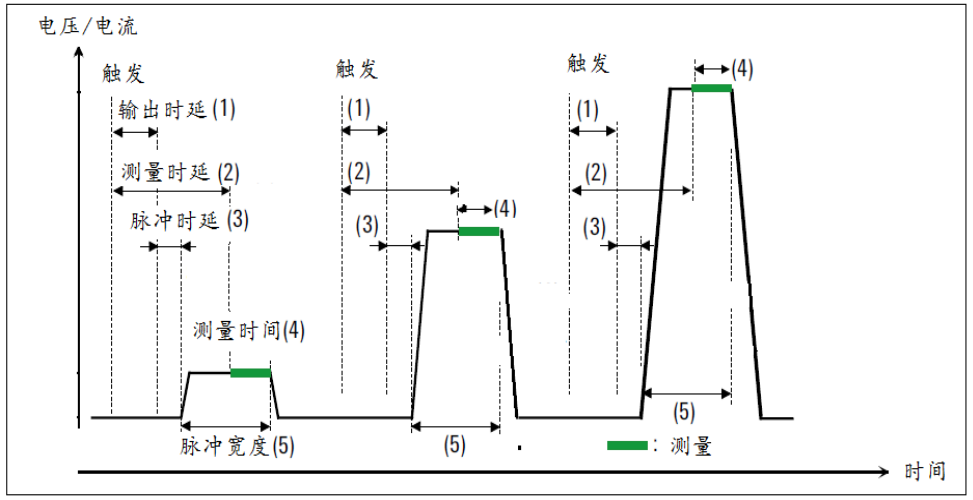


Keysight B2900A 系列的结构简图。

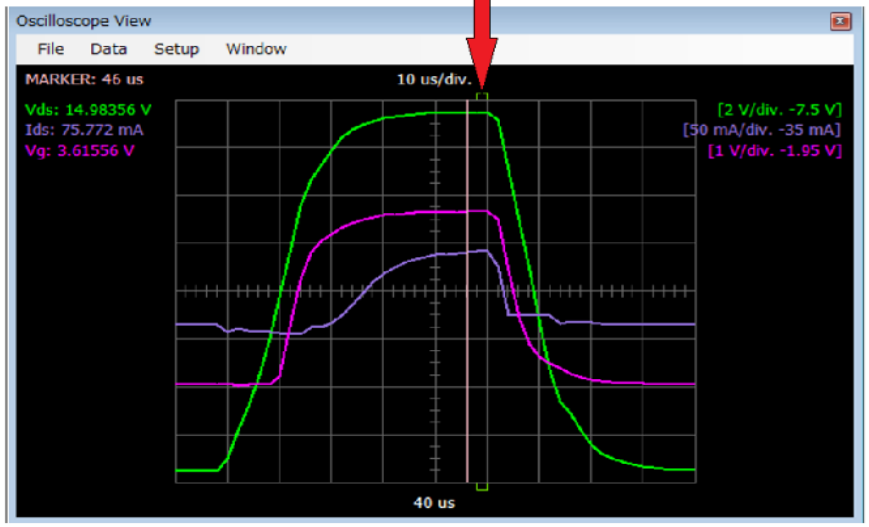


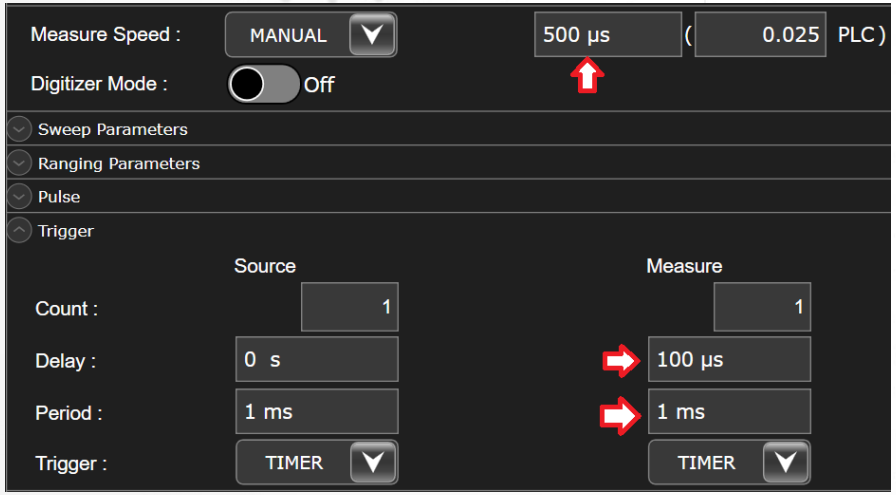
多路电压和电流的同步脉冲测量

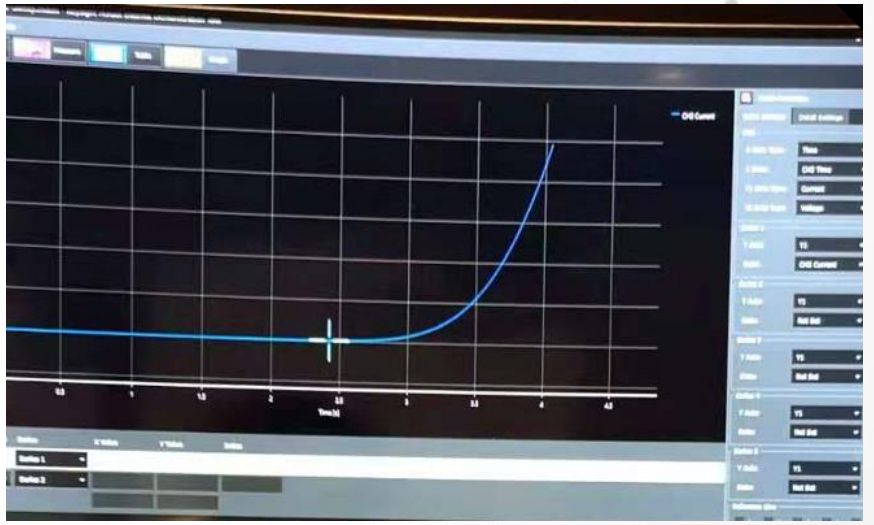
有效减少自热现象带来的误差



实时波形显示，优化测量参数







是德科技源表系列

B2900B/BL精密源表



新产品

低价格 → 高性能

			B2901BL	B2910BL	B2901/02B	B2911/12B
Output	DC	Voltage	21 V	210 V	210 V	210 V
		Current	1.5 A	1.5 A	3 A	3 A
	Pulse		No	No	10.5 A	10.5 A
Resolution	Source		5.5 Digit	5.5 Digit	5.5 Digit	6.5 Digit
	Measurement		6.5 Digit	6.5 Digit	6.5 Digit	6.5 Digit
Current Measurement Resolution			1 pA	10 fA	100 fA	10 fA
Lowest Current Range			1 µA	10 nA	100 nA	10 nA
Digitizing	Min. Interval		200 µs	50 µs	20 µs	10 µs

- ✓ 单台仪表覆盖众多应用
  - ➢ 1或2通道
  - ➢ 四象限源/测量功能
  - ➢ 宽泛电压和电流范围：210 V, 3 A；10.5 A(脉冲)
- ✓ 高分辨率和采样率
  - ➢ 6.5 分辨率
  - ➢ 10 fA 电流测量/100 nV电压测量
  - ➢ 10 µs 测量时间
- ✓ 缩减测试时间
  - ➢ 扫描测量速度快
- ✓ 测量和分析功能
  - ➢ 图形操作和显示
  - ➢ BenchVue/Test Flow软件支持
  - ➢ Quick IV 软件支持
  - ➢ Easy Expert/B1500A 软件支持

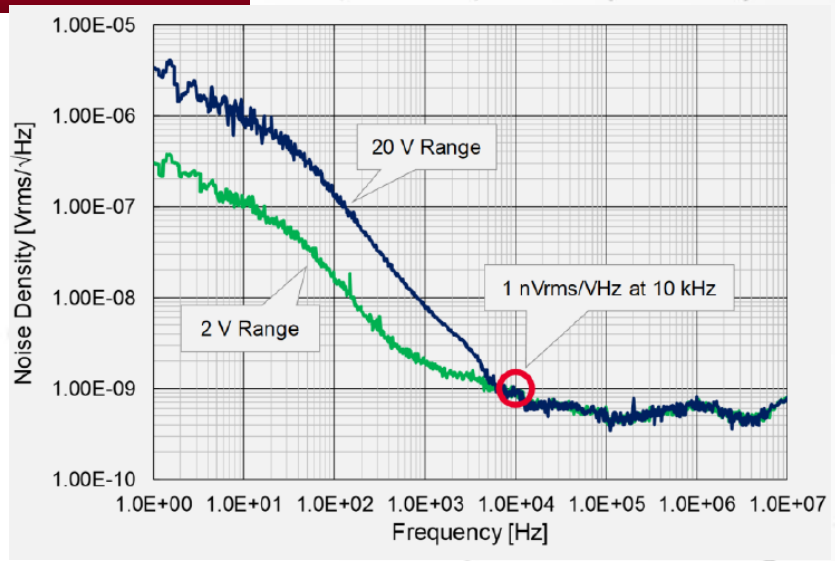
是德科技源表系列

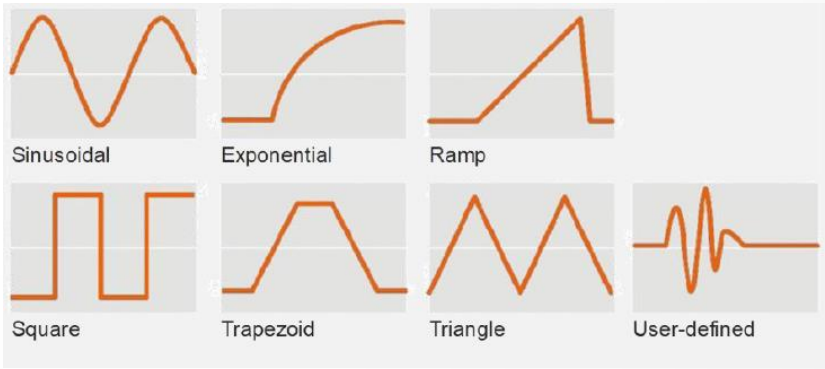
B2960B低噪声纯净电源





Model Number			B2961/62A			
External Filter			HC-ULNF (N1298A)	ULNF (N1298B)	LNF (N1298C)	No Filter
Max. Output	DC	Voltage	21 V	42 V	210 V	210 V
		Current	500 mA	105 mA	3.03 A	3.03 A
	Pulse		500 mA	105 mA	3.03 A	10.5 A
	Power		10.5 W	4.4 W	31.8 W	31.8 W
Resolution	Source		6.5 Digit	6.5 Digit	6.5 Digit	6.5 Digit
	Measurement		4.5 Digit	4.5 Digit	4.5 Digit	4.5 Digit
Current Source Resolution			1 nA	10 pA	10 pA	10 fA
Voltage Source Noise	0.1 to 10 Hz		≤ 5 µVpp	≤ 5 µVpp	≤ 5 µVpp	≤ 5 µVpp
	10 to 20M Hz		10 µVrms	10 µVrms	350 µVrms	3 mVrms





是德科技源表系列

B2980皮安表和高阻表



Model Number		Femto/Picoammeter		Electrometer	
		B2981B	B2983B	B2985B	B2987B
Measurement	Resolution	6.5 digit		6.5 digit	
	Current	0.01 fA to 20 mA		0.01 fA to 20 mA	
	Resistance	N/A		Up to 10 PΩ	
	Voltage	N/A		1 μV to 20 V	
	Input Resistance	N/A		> 200 TΩ	
	Charge	N/A		1 fC to 2 μC	
	Temperature	N/A		Yes	
	Humidity	N/A		Yes	
Voltage Source		N/A		700 μV to 1 kV	
Battery Operation		N/A	Yes	N/A	Yes







是德科技源表系列

M9600 系列PXI SMU模块



新产品



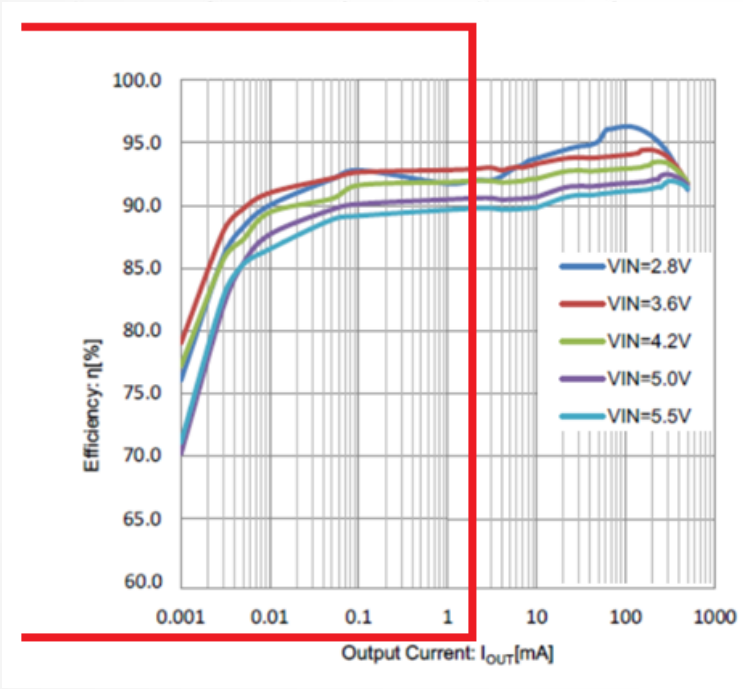
M9601A PXIe Precision SMU	M9614/15A PXIe 5-Ch Precision SMU	M9602/03A PXIe Precision SMU
1.25 MSa/s, 10 fA 210 V, 315 mA	500 kSa/s, 100 pA/10 pA 30 V, 500 mA	15 MSa/s, 1 pA/100 fA 60 V, 3.5 A DC/10.5 A pulse
High performance	High channel density	Medium power and short pulse
		

多通道、低成本方案

- 1至5通道/板卡
- 输出和测量范围：
  210V，10.5A(脉冲)
- 10fA，500nV分辨率
- 15MSa/s采样率
- 20V量程： 3mVrms

源表的典型应用

微功率 DC-DC电源效率测试

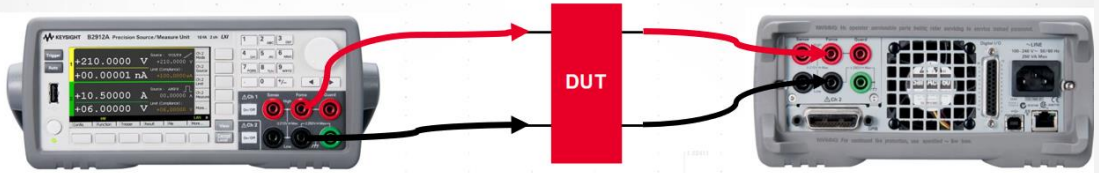


- 上图DC-DC电源、最大500mA，即使0.001mA时，效率高达70%;
- 传统的电子负载无法实现uA级电流精确拉载和测量。



从超低微功率电源效率分析着手来优化物联网终端功耗

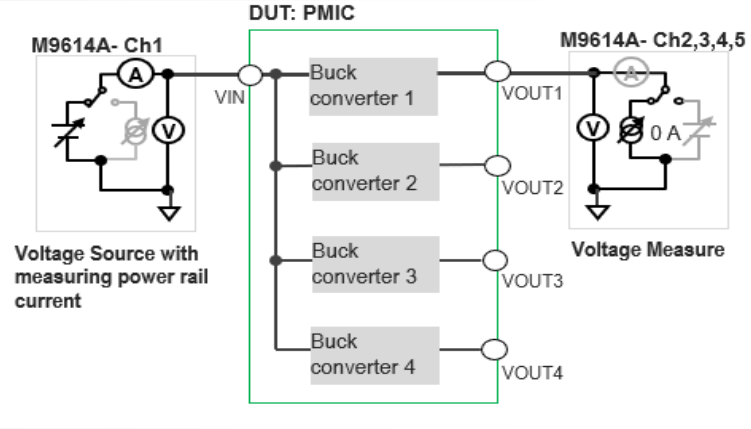
微功率DC-DC测试仪器2 —— B2900 SMU

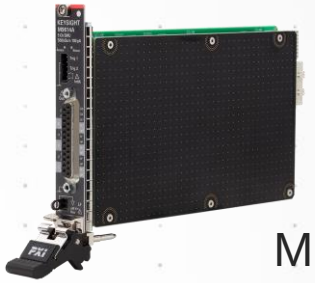


Model	Ch	Set/Measure Range		Setting Resolution			Measurement Resolution			Digitizing Rate (sample/s)	View Mode			
		V	I	Digits	Min. Resolution I	Min. Resolution V	Digits	Min. Resolution I	Min. Resolution V		Single	Dual	Graph	Roll
B2901A	1	±210V	±3A (DC) ±10.5A (Pulse)	5½	1p	1μV	6½	100fA	100nV	50,000 (20usec/point)	✔		✔	
B2902A	2										✔	✔	✔	
B2911A	1			6½	10fA	100nV	6½	10fA	100nV	100,000 (10usec/point)	✔		✔	✔
B2912A	2										✔	✔	✔	✔

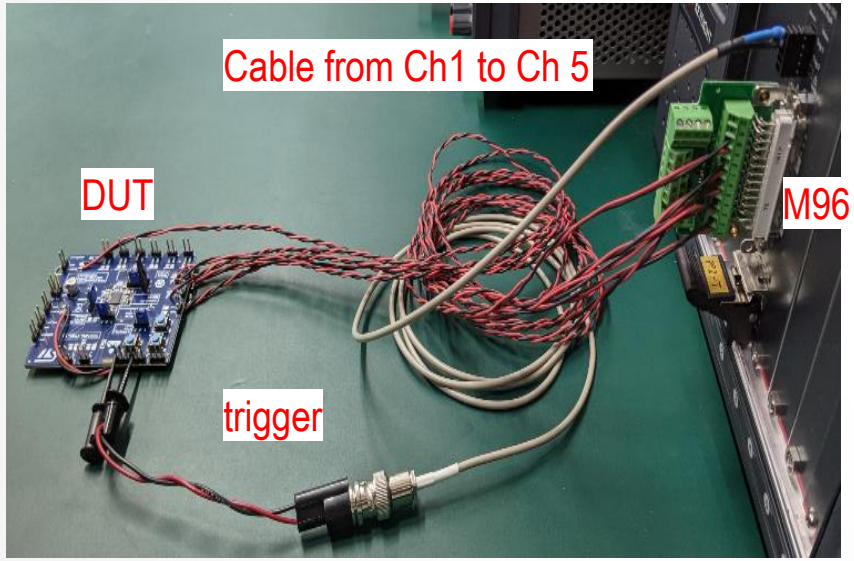
源表的典型应用

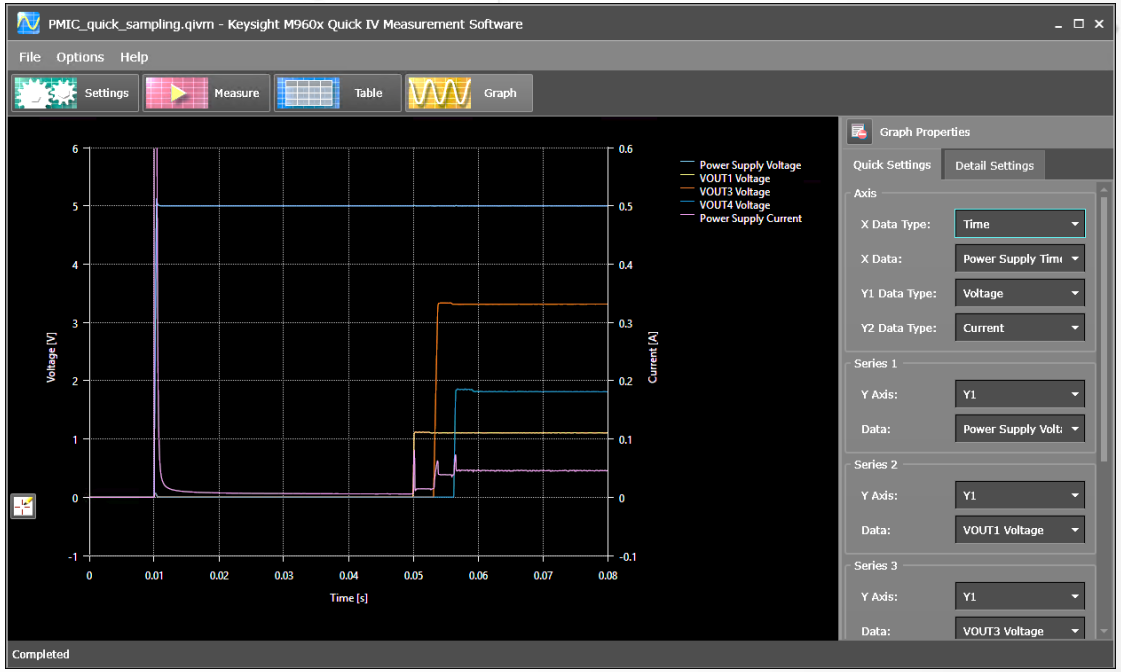
微功耗PMIC 的一体化测试





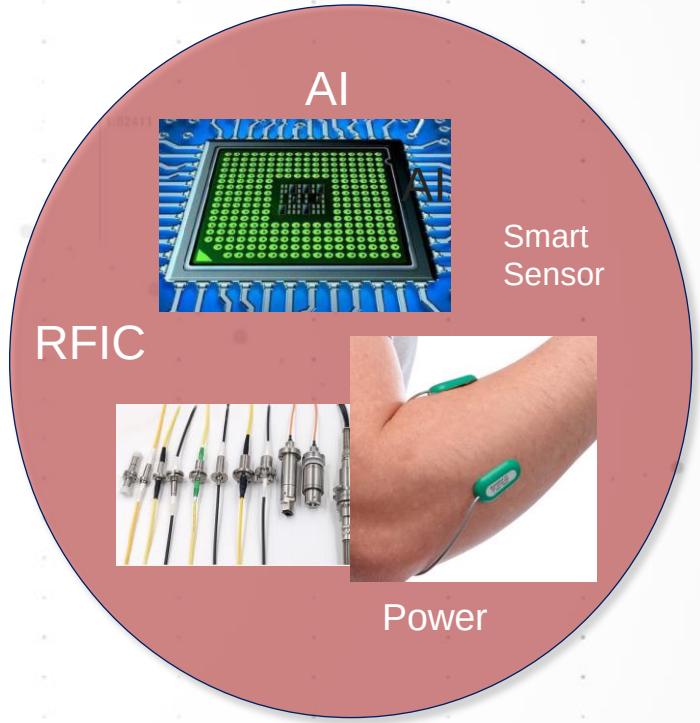
M9614A





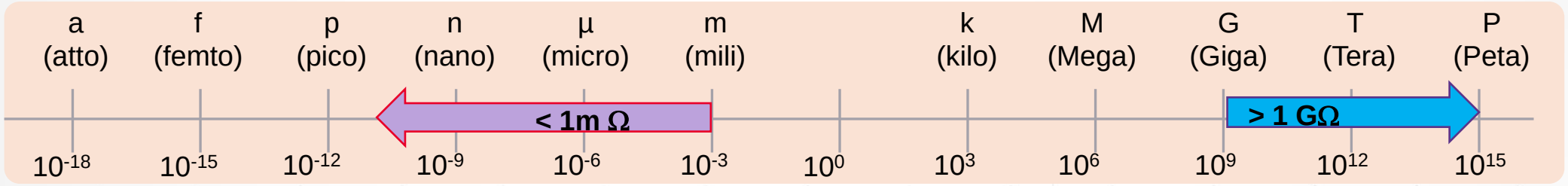
内容安排

- 认识源表和典型应用
- 极限电阻的精密测量
  - 微小电阻的精密测量
  - 高阻和绝缘材料的测试



微小电阻和超高电阻的精密测量

难度超出了您的想象

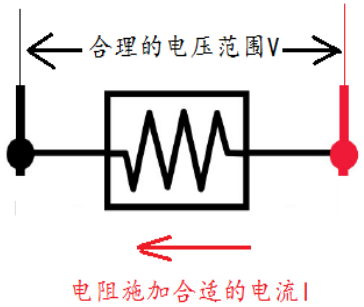


小电阻精确测量，
假设要精确测量1uΩ：

1） 电压测量分辨率和精度越高，激励电流激励就越小；1nV = 1uΩ x 1mA.

2） 电流源激励越大，对电压测量分辨率和精度就越低。1uΩ x 1A = 1uV.

* 大电流会可能导致电阻因温度变化而阻值变化. 或者 电流脉冲。



$$R = \frac{V}{I}$$

高电阻精确测量，

假设要精确测量1TΩ：

电压激励，皮安表进行电流测量；

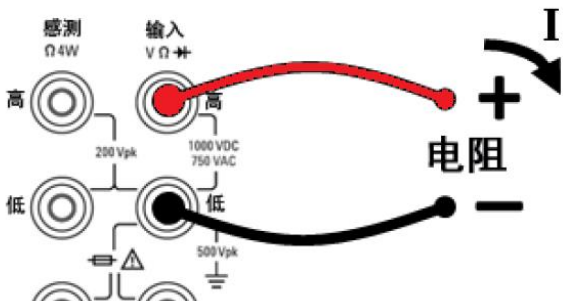
100V /1TΩ = 100pA.

* 被测电阻耐压和皮安电流测量治具等问题。

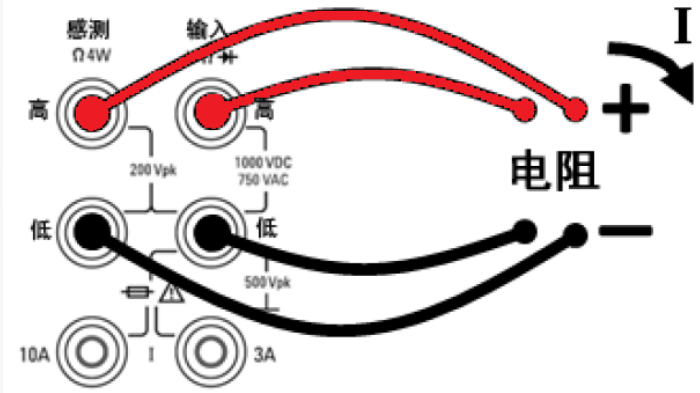
电阻测量：数字万用表

众人皆知的电阻测量方法

2线电阻：



4线电阻：



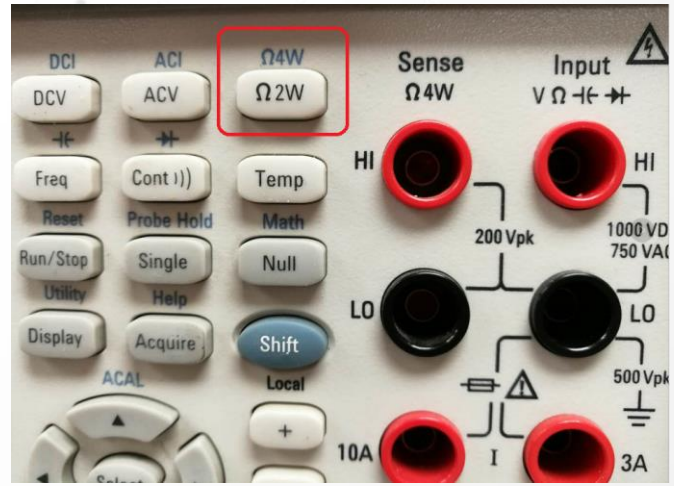










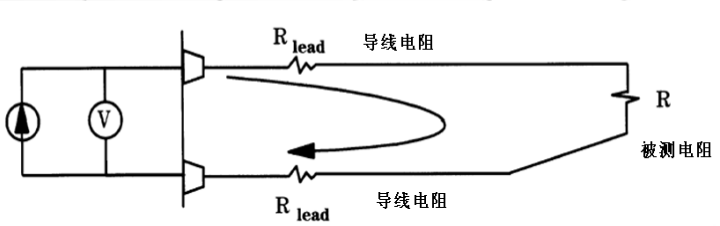


2线和4线电阻测量

提升电阻的测量精度

2线电阻测量:

- 电阻的测量是通过数字万用表加电流测电压，然后按照欧姆定律获得
- 2线法最常用， 但测试结果中包含了测试引线的电阻。当被测电阻较大时，引线电阻可以忽略。
- 但当测试小电阻时，引线电阻甚至超过被测电阻，测试必须采用4线法测量。



被测电阻 R >> Rlead

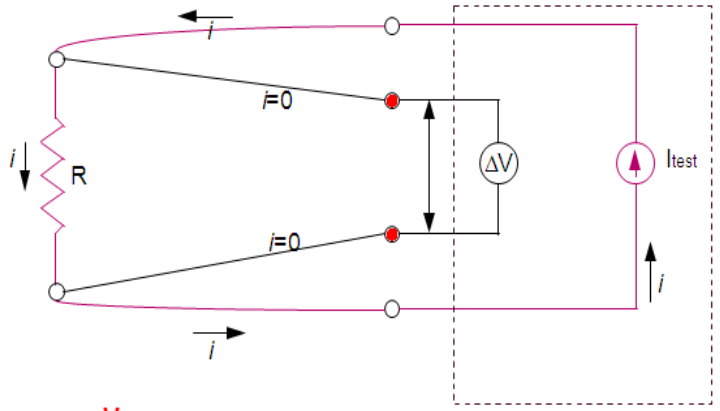
$$\frac{V}{I} = R + (R_{lead} + R_{lead})$$

万用表读数

测量误差

4线电阻测量:

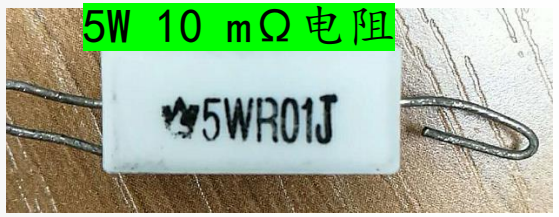
万用表的电压表和电流表分别与被测电阻相连，由于电压表阻抗很大（GΩ 级别），与电压表相连的引线没有电流。因此，电压表测量的电压值就是电阻两端的真实电压。



$$R = \frac{V}{i}$$

10 mΩ小电阻测量的疑惑

测试结果颠覆了想象



相同的被测电阻和测试治具



34465A 6 ½ 万用表，?A，16.5mΩ

Range [2]/frequency		1 year T_{CAL} ± 5 °C
DC voltage		
100 mV		0.0050 + 0.0035
1 V		0.0040 + 0.0007
10 V		0.0035 + 0.0005
100 V		0.0045 + 0.0006
1000 V		0.0045 + 0.0010
Resistance [7]	**Test current**	
100 Ω	1 mA	0.010 + 0.004
1 kΩ	1 mA	0.010 + 0.001
10 kΩ	100 µA	0.010 + 0.001
100 kΩ	10 µA	0.010 + 0.001
1 MΩ	5 µA	0.010 + 0.001
10 MΩ	500 nA	0.040 + 0.001
100 MΩ	500 nA ‖ 10 MΩ	0.800 + 0.010

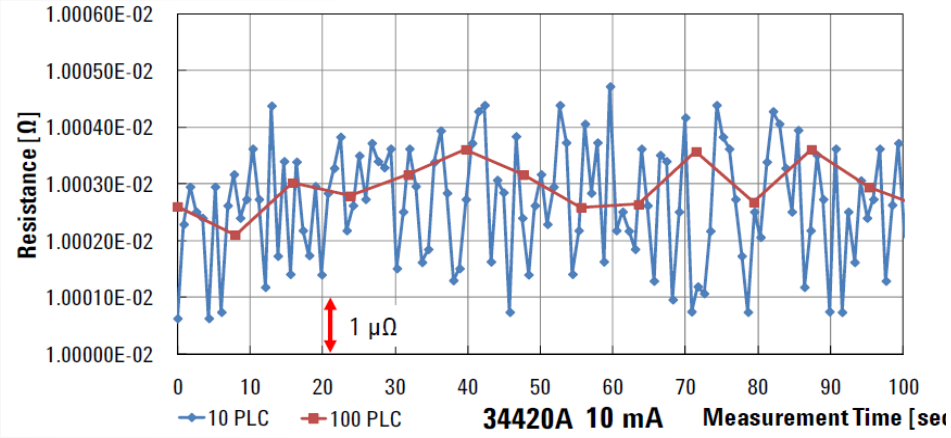
50mΩ x 1mA=50uV .

34420A 纳伏微欧表10mΩ电阻测量数据

传统的小电阻测量手段



34420A，内置10mA电流源，测量孔径10、100PLC



10PLC ，测试结果波动小于4 uΩ

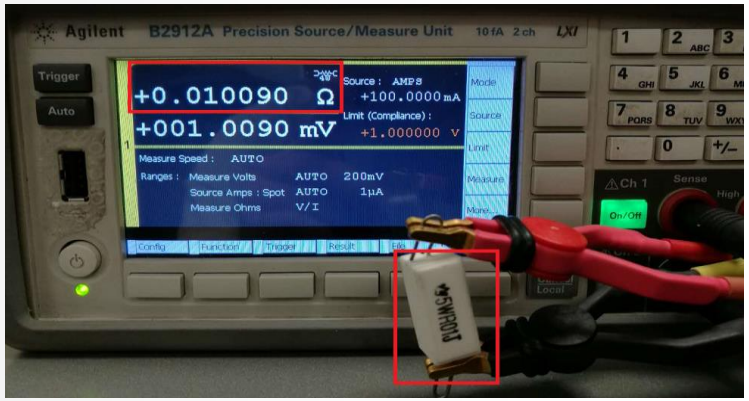
技术指标

精度指标 ±（% 读数 + % 量程）[1]

功能	量程[2]	测试电流	24 小时 23°C ±1°C
dc 电压	1.0000000mV[3]		0.0025+.0020
	10.000000mV[3]		0.0025+.0002
	100.00000mV		0.0015+.0003
	1.0000000V		0.0010+.0003
	10.000000V		0.0002+.0001
	100.00000V		0.0010+.0004
电阻[5]	1.0000000Ω	10mA	0.0015+.0002
	10.000000Ω	10mA	0.0015+.0002
	100.00000Ω	10mA	0.0015+.0002
	1.0000000kΩ	1mA	0.0015+.0002
	10.000000kΩ	100μA	0.0015+.0002
	100.00000kΩ	10μA	0.0015+.0003
	1.0000000MΩ	5μA	0.0020+.0003

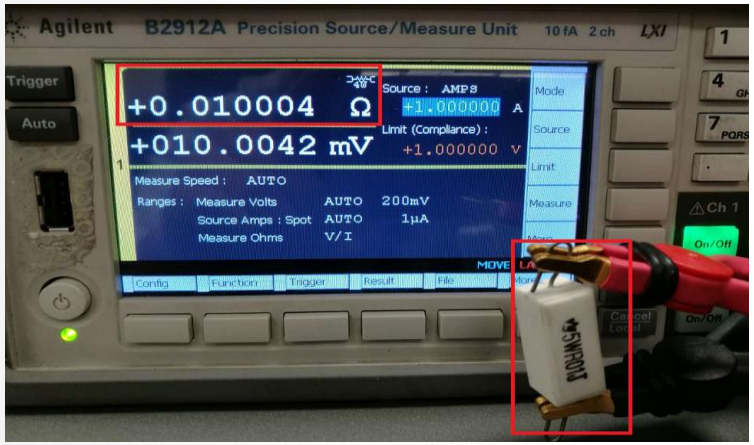
小电阻测量需要更大的电流源

B2900电流源可输出 3A连续、10A高精度脉冲电流



100mA 激励电流
10.0090 mΩ





1A 激励电流
10.0004 mΩ

电压测量技术指标

量程	测量分辨率 B2911A/B2912A	精度（读数百分比+偏置）
±200 mV	100 nV	±(0.015 %+225 µV)
±2 V	1 µV	±(0.02 %+350 µV)
±20 V	10 µV	±(0.015 %+5 mV)
±200 V	100 µV	±(0.015 %+50 mV)

自动电阻测量的典型性能(4线)，2V量程

量程	分辨率	测试电流	总误差（读数百分比+偏置）
2 Ω	1 uΩ	1 A	0.%+0.00035 Ω
20 Ω	10 uΩ	100 mA	0.06%+0.0035 Ω
200 Ω	100 uΩ	10 mA	0.065%+0.035 Ω
2 kΩ	1 mΩ	1 mA	0.06%+0.35 Ω
20 kΩ	10 mΩ	100 µA	0.065%+3.5 Ω
200 kΩ	100 mΩ	10 µA	0.06%+35 Ω
2 MΩ	1 Ω	1 µA	0.095%+350 Ω
20 MΩ	10 Ω	100 nA	0.18%+3.5 kΩ
200 MΩ	100 Ω	10 nA	1.08%+35 kΩ

大电流分流器实际工作场景测试

精确标定在不同环境中的阻值

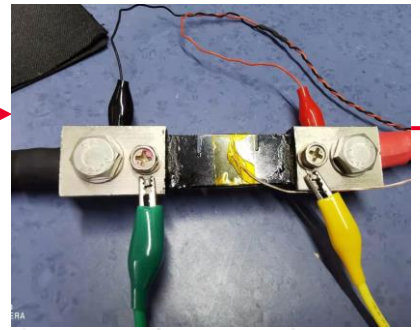




RP79 APS先进电源系统

- 最大单机电流： 800A
- 电流编程和测量精度： 0.03%
- 电压编程和策略精度： 0.02%

Specification	RP7931A/ RP7941A	RP7932A/ RP7942A	RP7933A / RP7943A
DC ratings			
Voltage source	0 to 20 V	0 to 80 V	0 to 20 V
Current source and sink	0 to ± 400 A	0 to± 125 A	0 to ± 800 A
Power	0 to ± 5 kW	0 to ± 5 kW	0 to ±10 kW
Output ripple and noise			
CV peak-to-peak [1]	30 mV	80 mV	30 mV
CV rms [2]	3 mV	8 mV	3 mV
Load regulation			
Voltage	1 mV	3 mV	1 mV
Current	25 mA	13 mA	50 mA
Voltage programming and measurement accuracy [3]			
	0.02% + 2 mV	0.02% + 8 mV	0.02% + 2 mV
Current programming and measurement accuracy [3]			
	0.04% + 45 mA	0.03% + 13 mA	0.04% + 90 mA





电压和温度连续记录

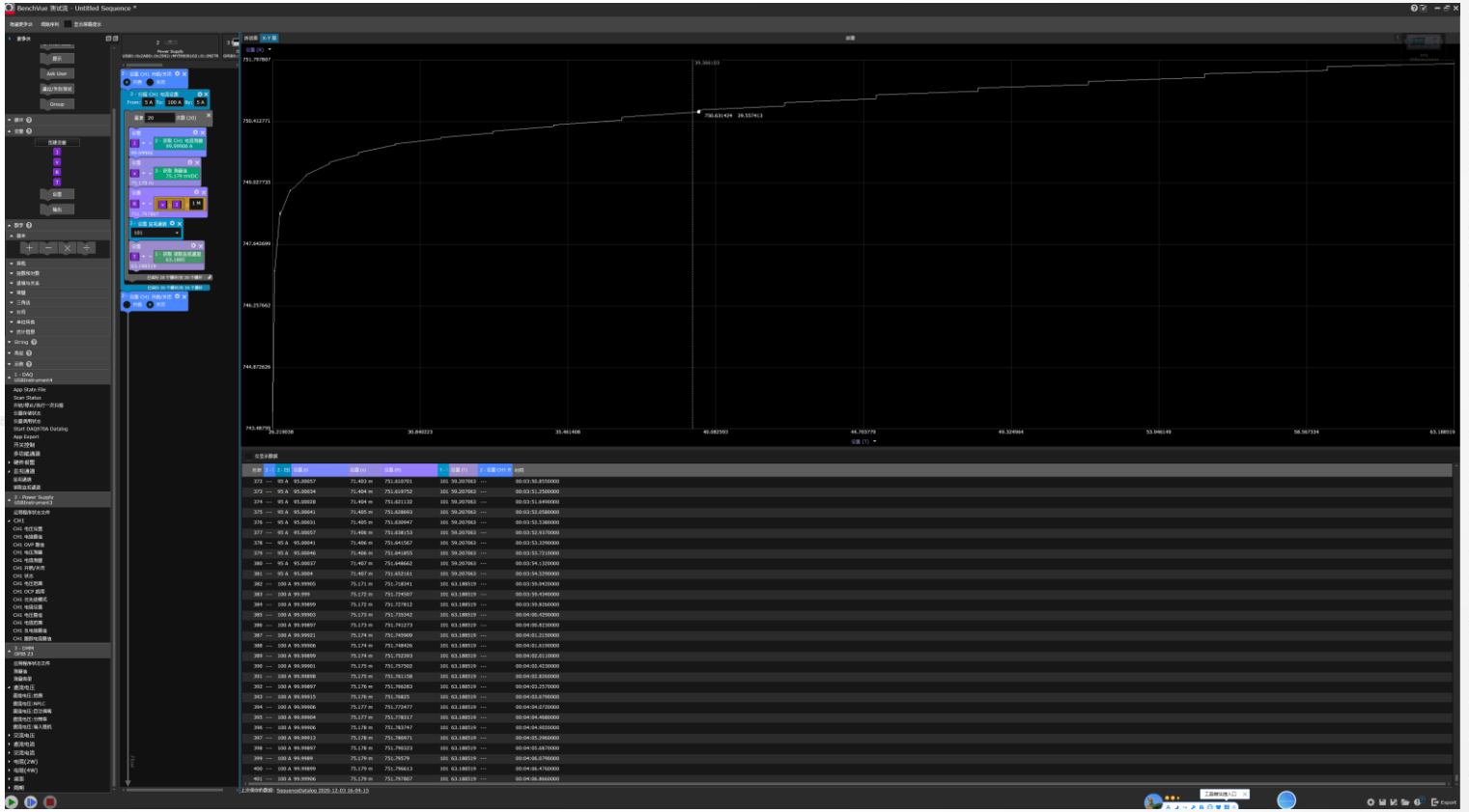
- 电压测量： 34401A
- 温度测量： DAQ970A + DAQM901A 模块



Bench Vue 软件控制下的全自动测试

工作电流 VS. 电阻值

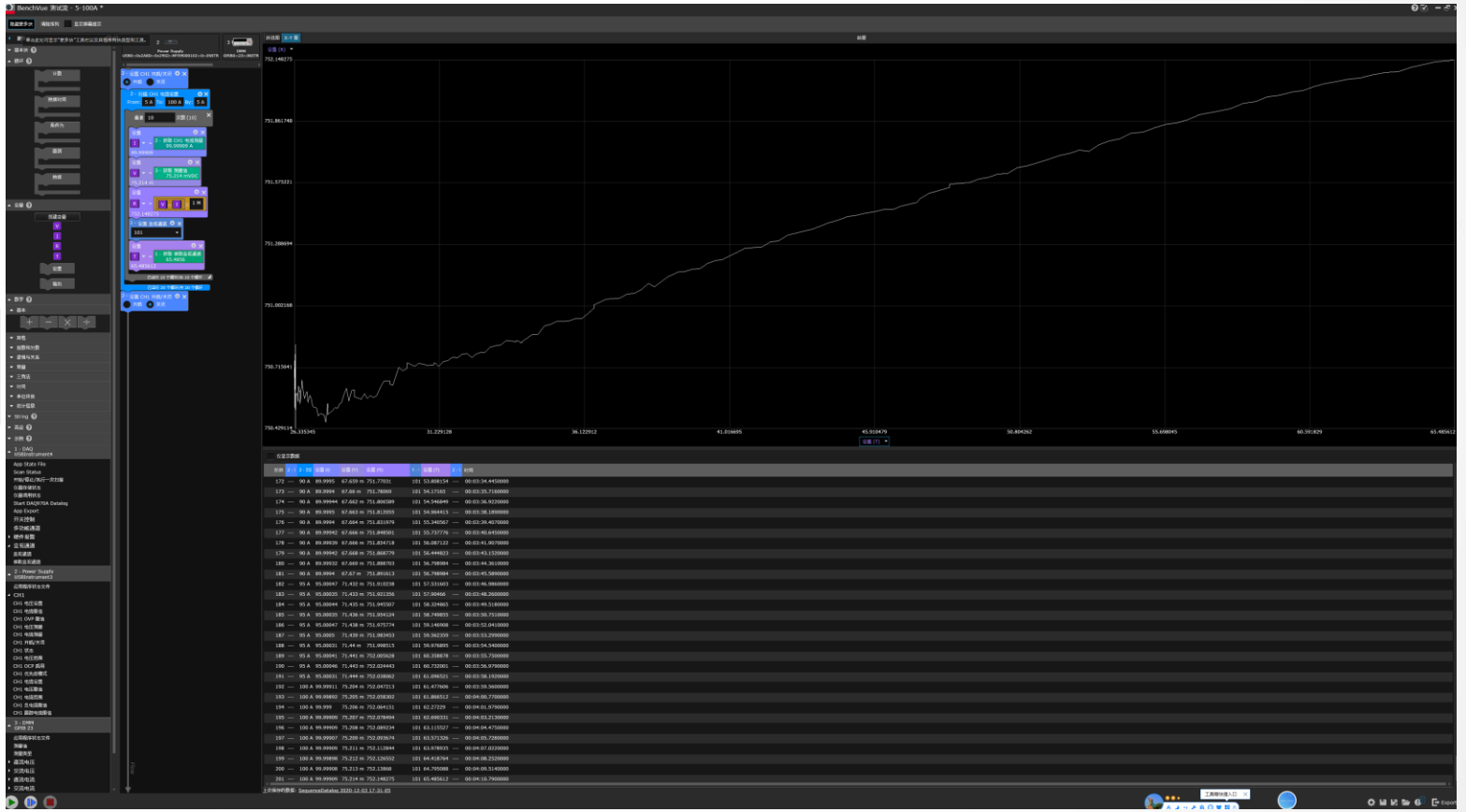




Bench Vue 软件控制下的全自动测试

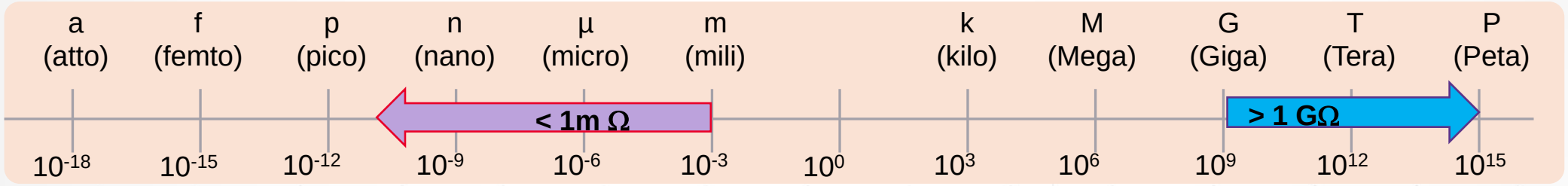
温度 VS. 电阻值





微小电阻和超高电阻的精密测量

难度超出了您的想象

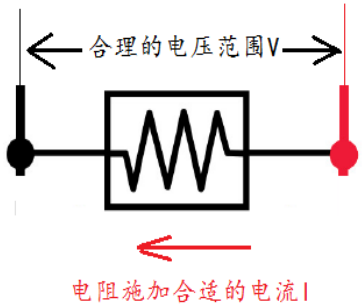


小电阻精确测量，
假设要精确测量1uΩ：

1） 电压测量分辨率和精度越高，激励电流激励就越小；1nV = 1uΩ x 1mA.

2） 电流源激励越大，对电压测量分辨率和精度就越低。1uΩ x 1A = 1uV.

* 大电流会可能导致电阻因温度变化而阻值变化. 或者 电流脉冲。



$$R = \frac{V}{I}$$

高电阻精确测量，

假设要精确测量1TΩ：



B2985/7A 皮安计和高阻计

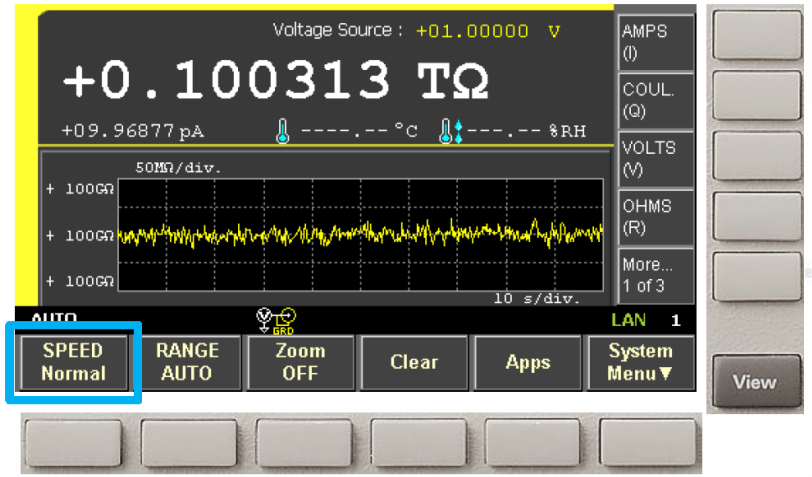
- 0.01fA 电流分辨率
- 输入阻抗 >200TΩ

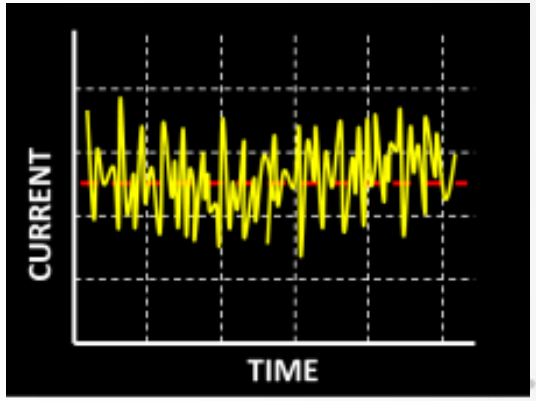
超高电阻测量：高电压、极微小电流

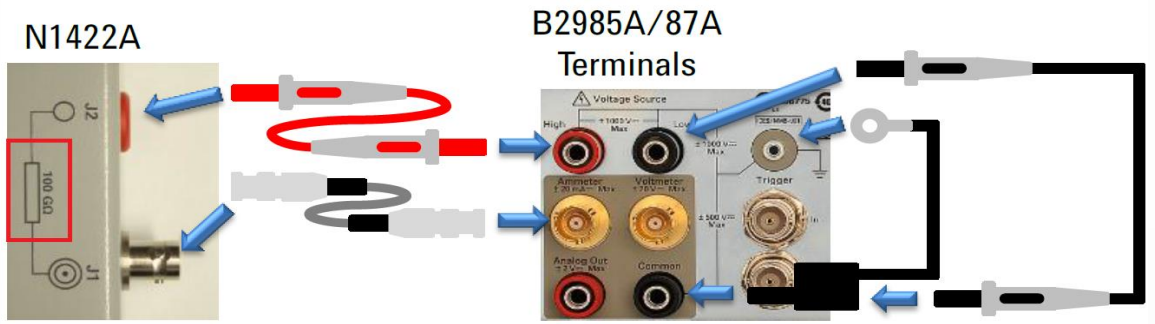
对测试环境提出更高的要求

经常看到的现象

- ✓ 测试结果比预估值偏差大?
- ✓ 测试数据较大波动?
- ✓ 高噪声
- ✓ 电阻测量值是负值?
- ✓ ……





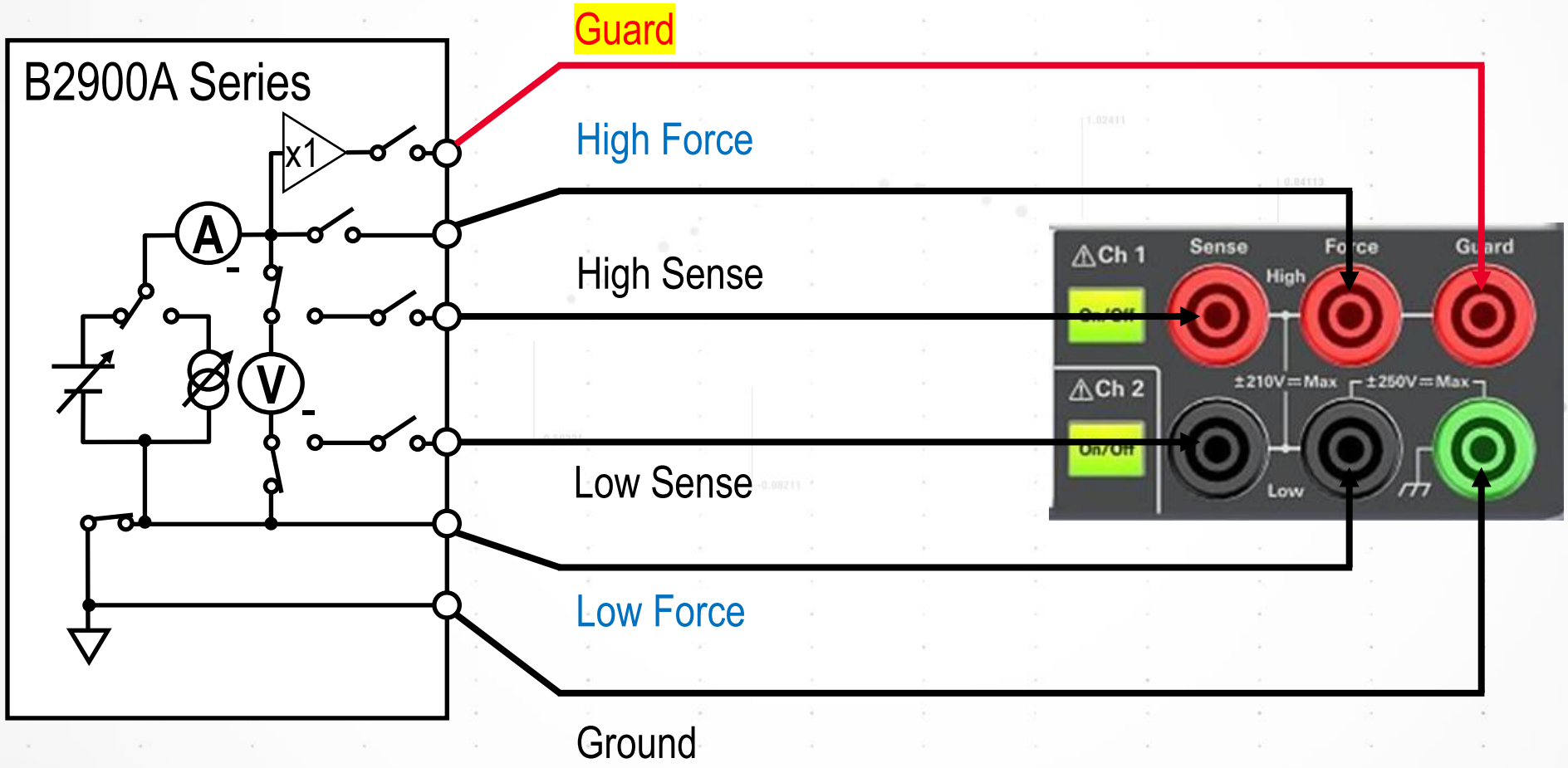


1V / 10pA = 100 GΩ

电流仅仅10pA

微小电流测量抑制干扰

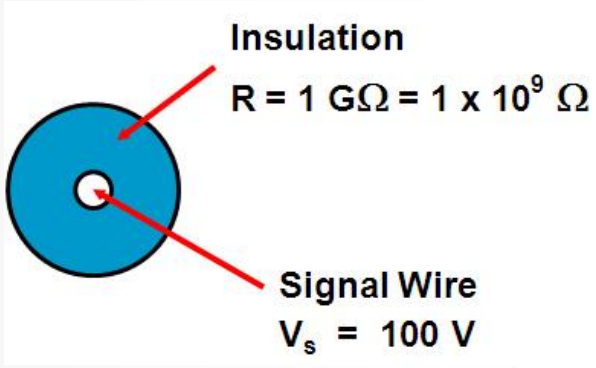
三同轴连接



微小电流测量抑制干扰

三同轴（TRIAXIAL）VS. 同轴电缆

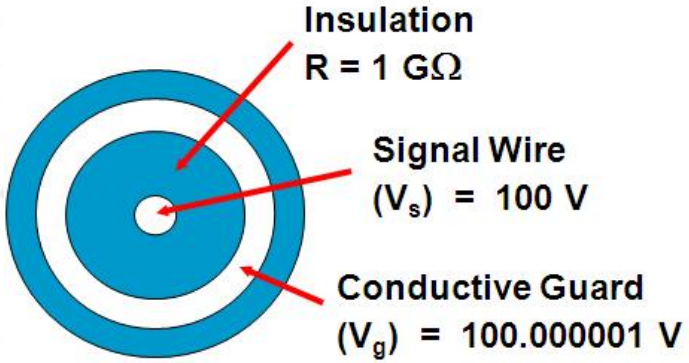
BNC (Coaxial) Cable:



同轴接线时漏电流为：

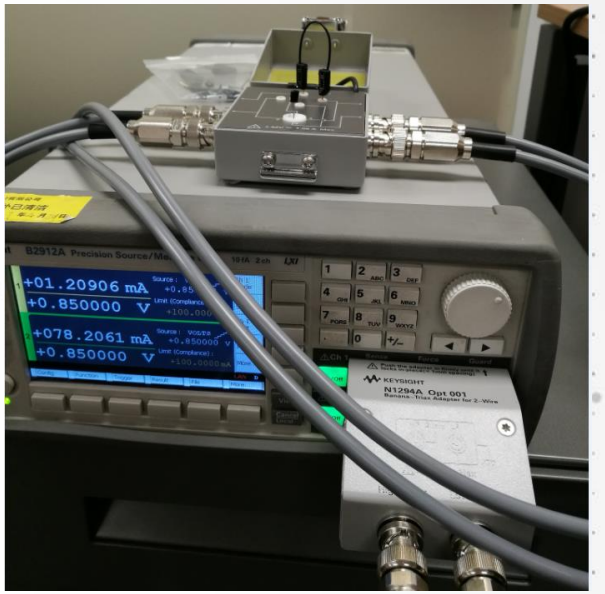
$$\frac{100\ V}{1\times10^{9}\Omega}=100\ nA$$

Triaxial Cable:



三同轴接线时漏电流为：

$$\frac{(100.000001\ V-100\ V)}{1\times10^{9}\Omega}=1\ fA$$





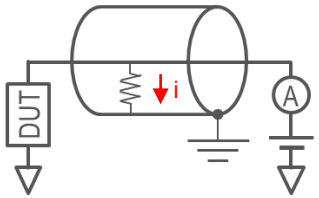
N1294A-001
香蕉头 – 三同轴适配器

三同轴接线与普通BNC相比，　漏电流相差100,000,000

三同轴（Triaxial）vs. 同轴电缆

漏电流实测： 采用GUARD与未采用GUARD对比

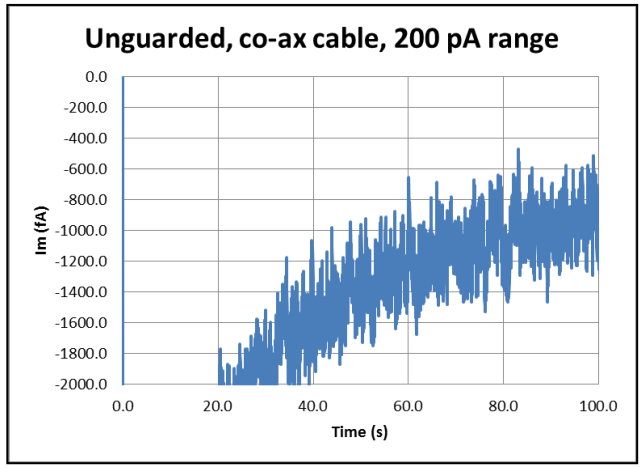
Unguarded measurement with coaxial cable



Electrometer

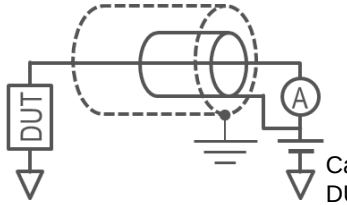


Cable: 16493B Coaxial cable (1.5m)
(with N1254A-106 Triaxial to BNC adapter)
DUT: Open



100pA 级

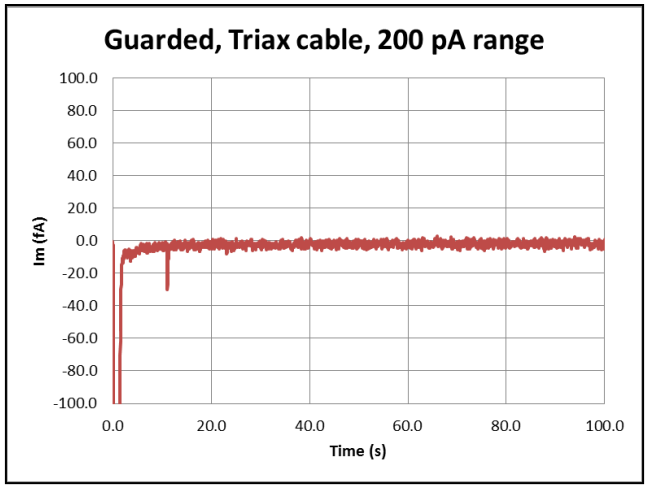
Guarded measurement with triaxial cable



Electrometer



Cable: 16494A Triaxial cable(1.5m)
DUT: Open

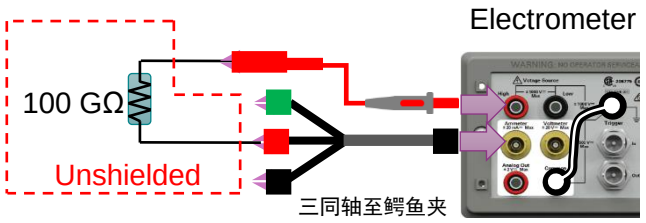


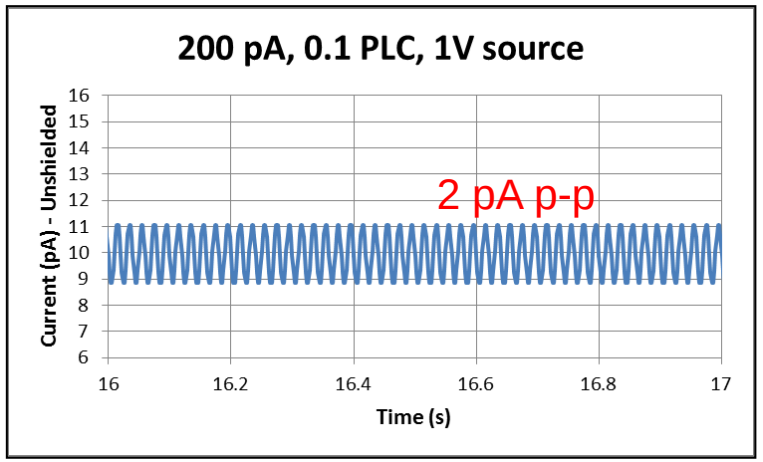
fA 级

微小电流测量抑制干扰

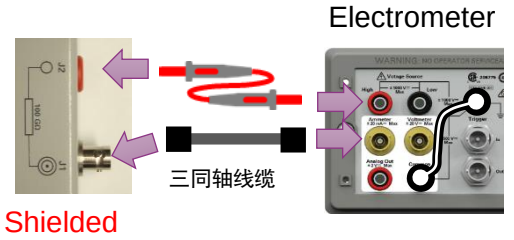
屏蔽对小电流测试的影响

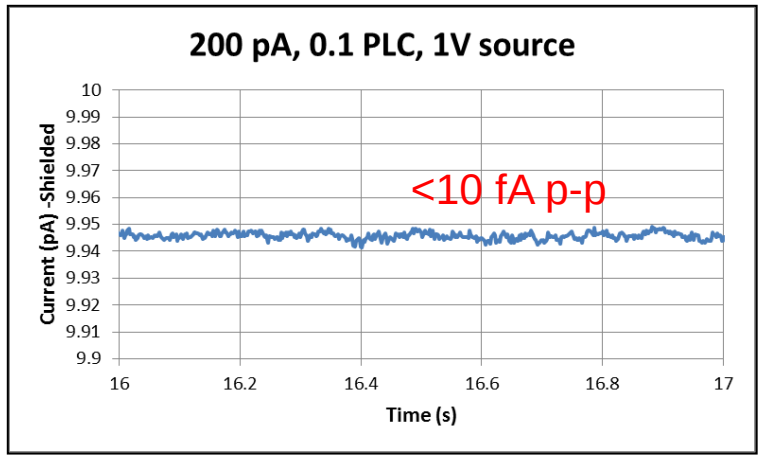
100 GΩ 待测DUT未屏蔽





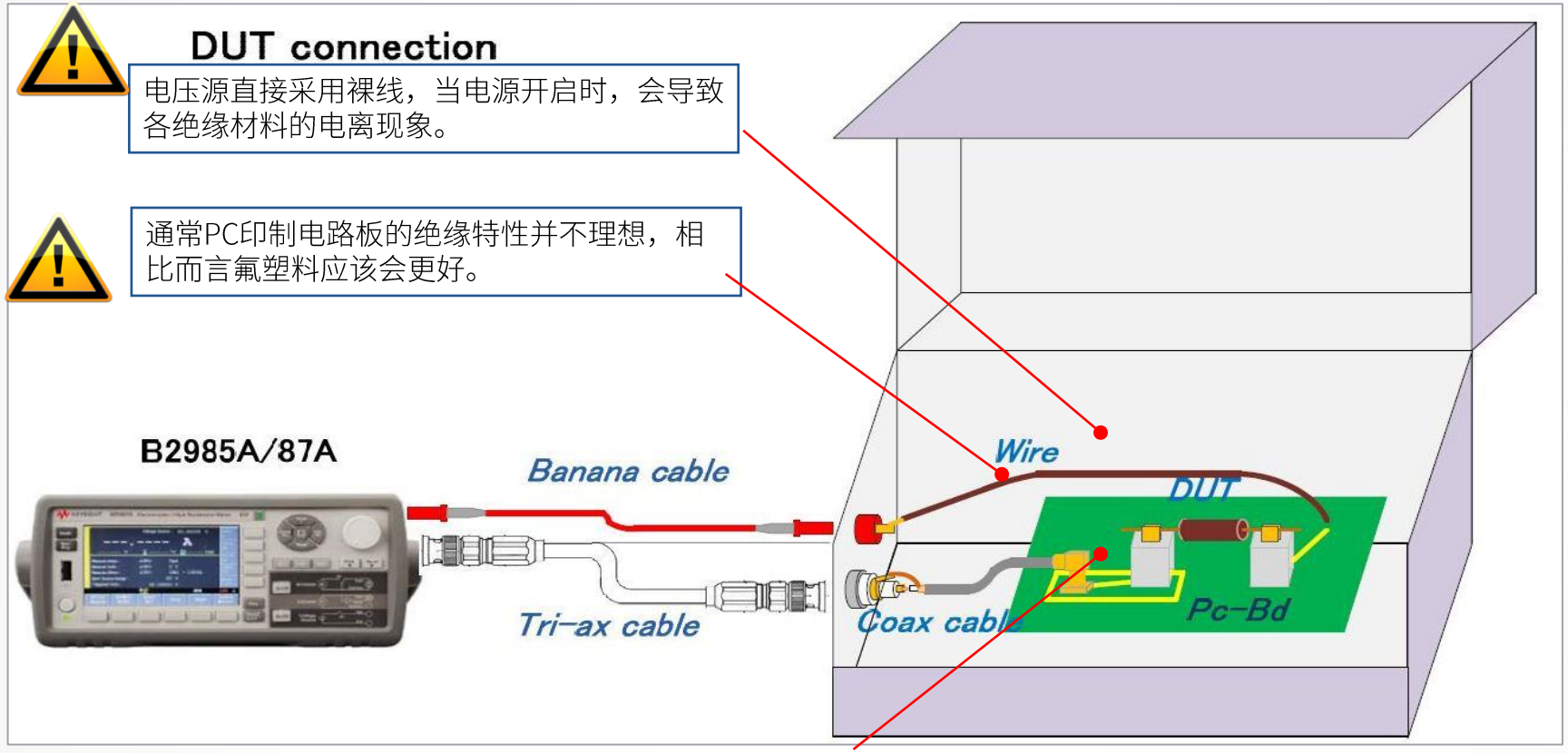
屏蔽的100 GΩ 待测DUT





导线和治具

系统潜在的测量误差分析



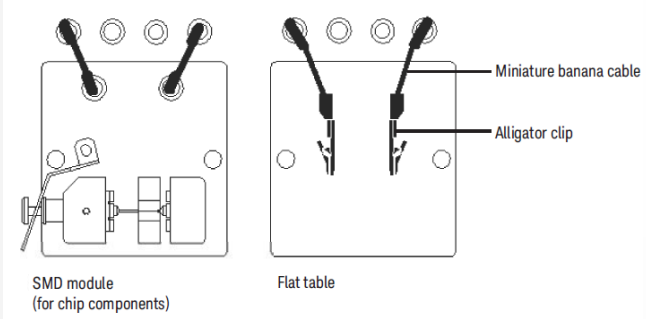
短印制导线可以减小表面漏电流，但潜在与印制板绝缘材料的漏电流。

导线和治具

系统连接的改善建议



N1428A测试夹具

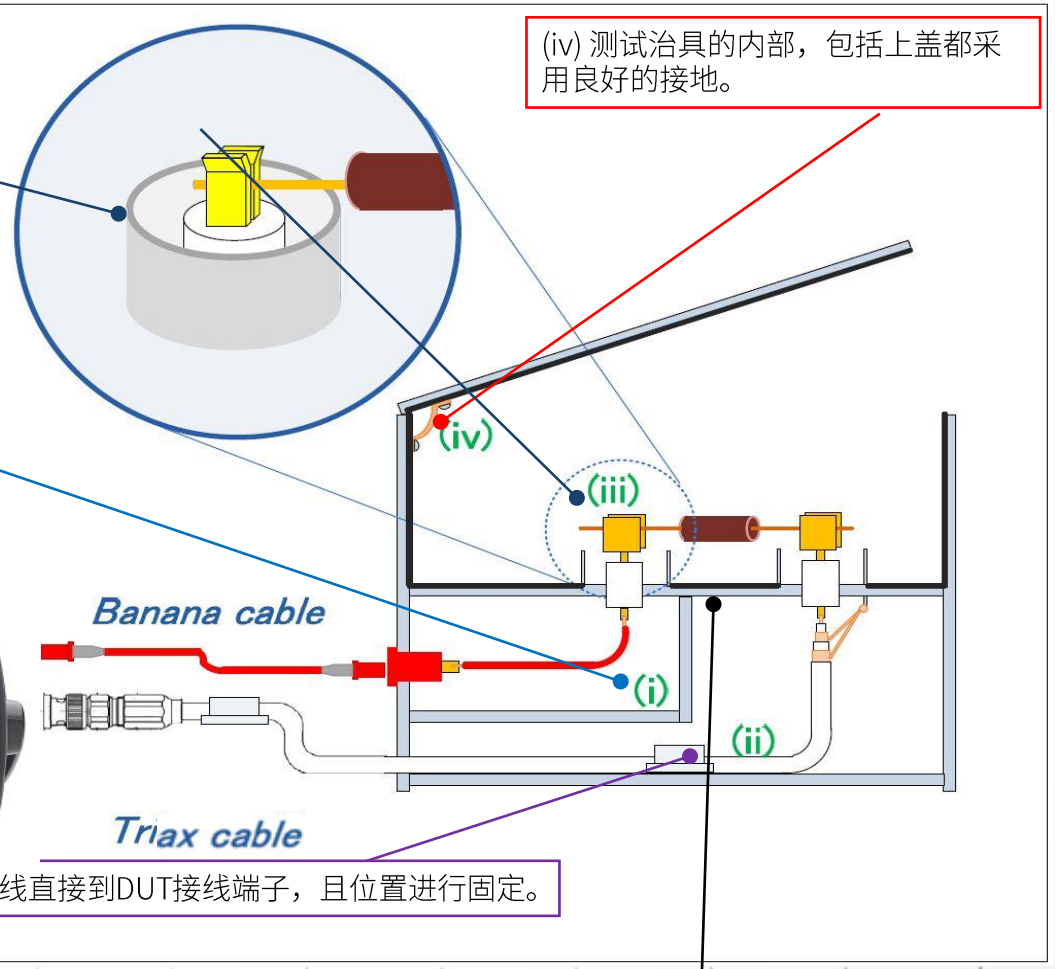


(iii) 采用金属套环，将DUT的端子屏蔽，防止电压源及外界的电离影响。

(iv) 测试治具的内部，包括上盖都采用良好的接地。

(i) 将电压源导线使用金属隔板进行隔离。



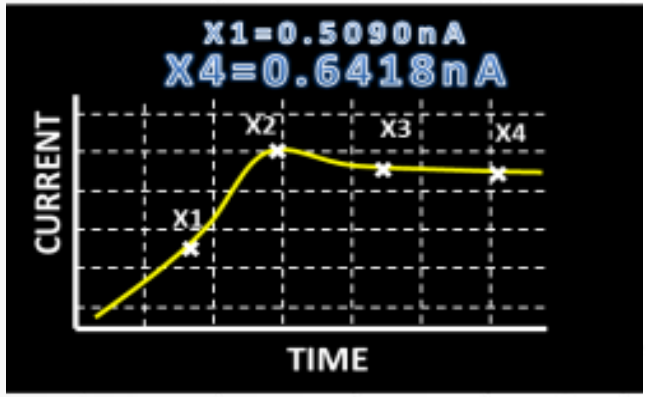


(ii) 安培表采用三同轴导线直接到DUT接线端子，且位置进行固定。

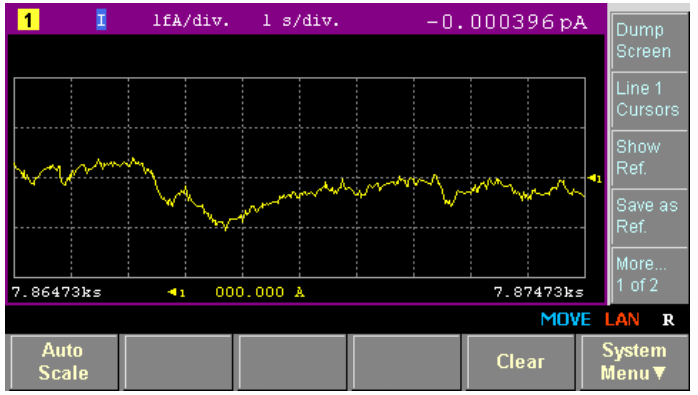
测试平台： 不采用PC印制板及印制导线。 而是PTFE材料， *聚四氟乙烯*， 俗称"塑料王"

小电流测量时域/统计分析的重要性

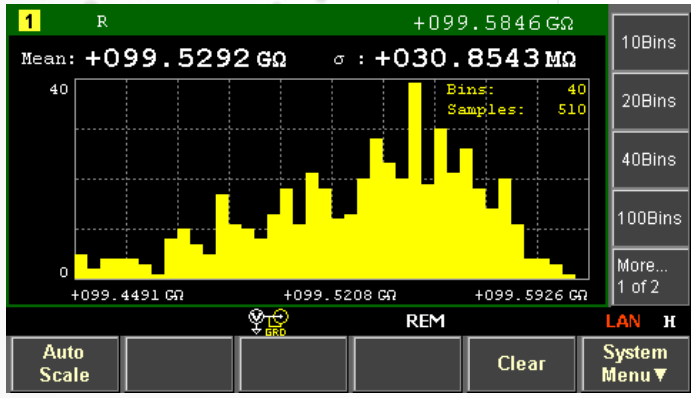
B2900的时域及统计功能，查看测试数据的变化趋势及分布

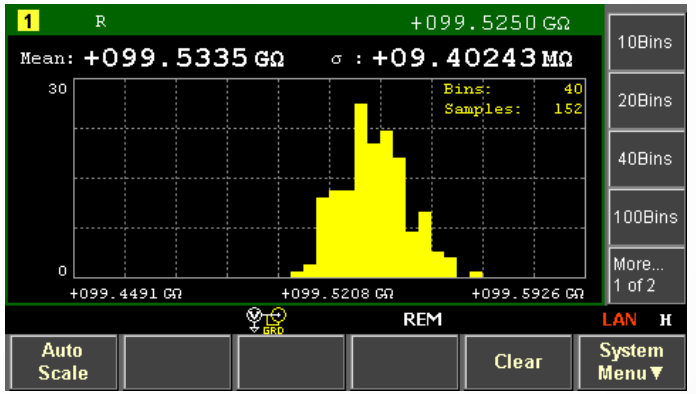


测试所需的稳定时间



测试的重复性及稳定性





直方图-测试数据的统计特性

绝缘材料的测量

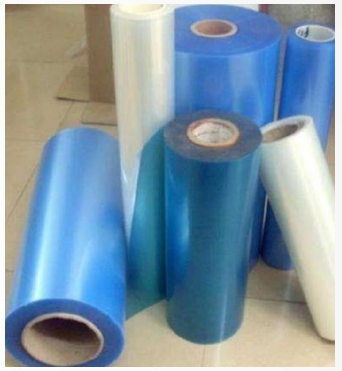
体电阻和表面电阻

体电阻：
根据ESD DS11.12“静电释放平面材料的体电阻测量”中的定义，体电阻是指材料两端之间的直流电压与通过电流的比值，它的单位也是欧姆。

体电阻系数/Volume Resistivity：
某材料单位厚度上的直流压降与单位面积上通过的电流之比。体电阻系数是材料的基本参数之一，表示其导电性能，单位为欧姆/厘米。

表面电阻率/ Surface Resistivity：
平行于通过材料表面上电流方向的电位梯度与表面单位宽度上的电流之比，用欧姆表示。

绝缘材料：
指表面电阻系数在1×10^{12}欧姆;
或体电阻系数在1×10^{11}欧姆/厘米以上的材料。

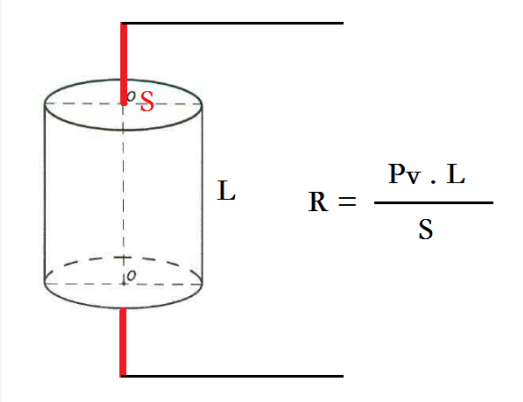




N1424A　　B2985A

绝缘材料测量

体电阻率测量模型

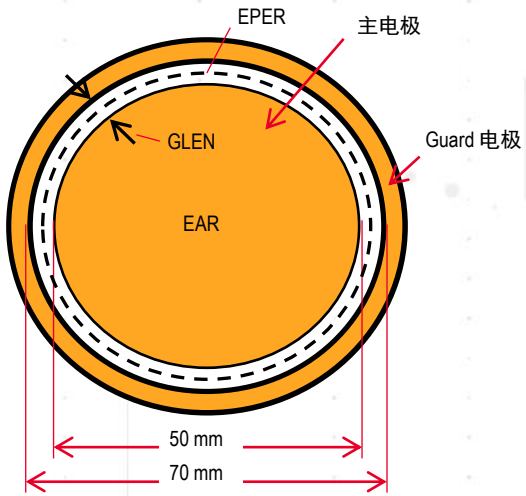


体电阻Rv：

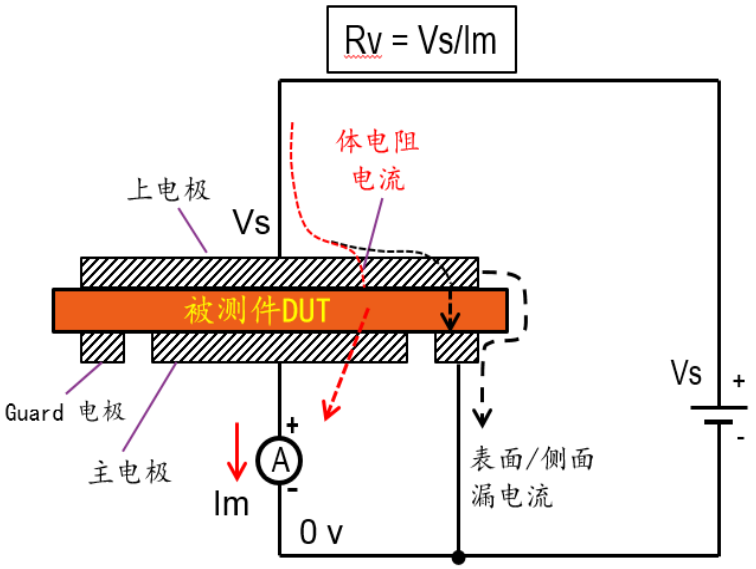
- ✓ 与 电阻率Pv成正比
- ✓ 与 长度L成正比
- ✓ 与 面积S成反比

体电阻率: $\rho v(\Omega \cdot cm) = \frac{EAR}{STH} \times Rv \times \frac{1}{10}$

以50mm/70mm电极为例

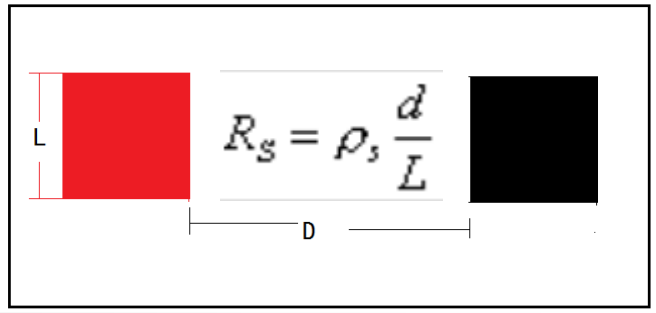


- EPER 等效周长: Effective Perimeter (mm)
  π x (50+70)/2 = 188.5 mm
- GLEN间距 : Gap length (mm)
  (70-50)/2=10 mm
- EAR等效面积 : Effective area (mm^2)
  (π x (50+10)^2) /4=2827.4 mm^2
- STH样品厚度 : Sample thickness (mm)
  0.02 mm (20 μm)

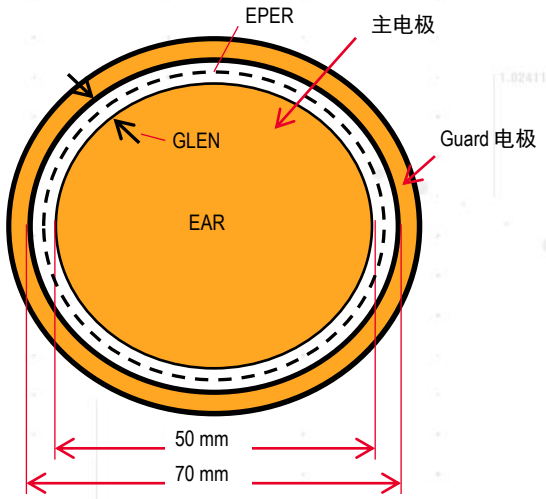


绝缘材料测量

表面电阻率测量模型



以50mm/70mm电极为例

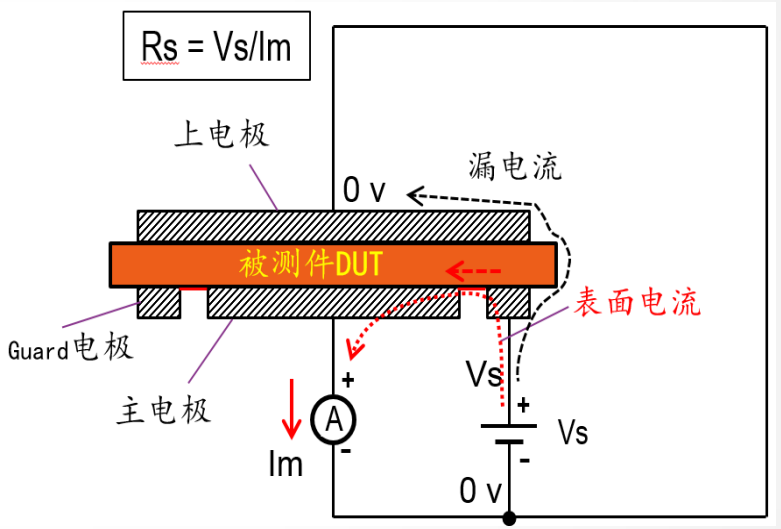


表面电阻Rs:

- ✓ 与 电阻率Ps成正比
- ✓ 与 d成正比
- ✓ 与 L成反比

表面电阻率: $\rho s\Omega = \frac{EPER}{GLEN} \times Rs$

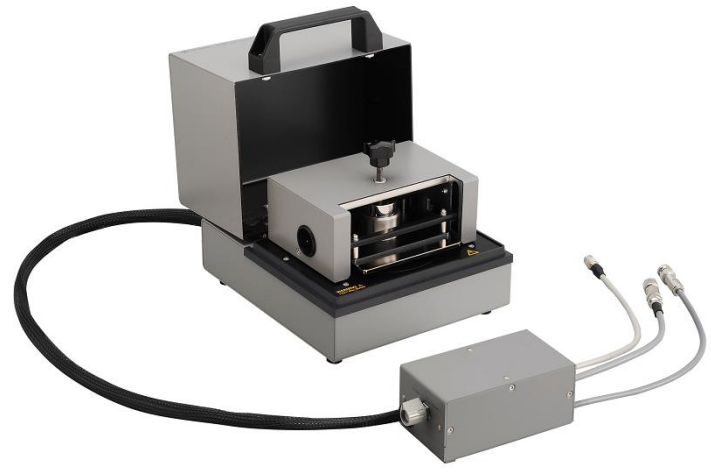
- EPER 等效边长: Effective Perimeter (mm)
  π x (50+70)/2 = 188.5 mm
- GLEN 间距 : Gap length (mm)
  (70-50)/2=10 mm
- EAR等效面积 : Effective area (mm^2)
  (π x (50+10)^2) /4=2827.4 mm^2
- STH样品厚度 : Sample thickness (mm)
  0.02 mm (20 μm)



绝缘材料测量

B2980A高阻计电阻率测量治具N1424A/B/C

- ✓ 支持多种绝缘材料测量规范，如ASTM D-257.
- ✓ 支持多种型号的电极 (26mm/50mm/76mm)





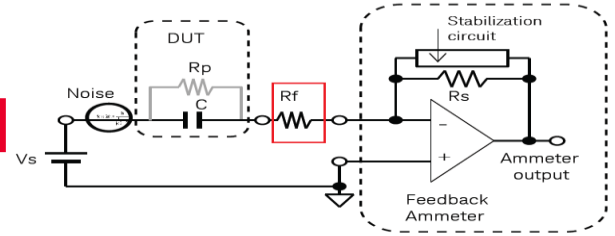
Furnished accessories	Qty.		
	N1424A	N1424B	N1424C
Upper electrode assembly	1	1	1
Acrylic plate	1	1	1
Φ26 mm main electrode	N/A	1	1
Φ38 mm guard electrode	N/A	1	1
Φ50 mm main electrode	1	1	1
Φ70 mm guard electrode	1	1	1
Φ76 mm main electrode	N/A	N/A	1
Φ88 mm guard electrode	N/A	N/A	1
Spare screw	N/A	3	3
Carrying case	N/A	1	1

＊ 需要配合N1413A 适配器

高阻计的应用

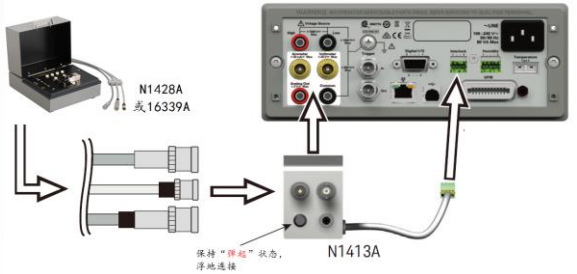
电容器的漏电流或电阻测量

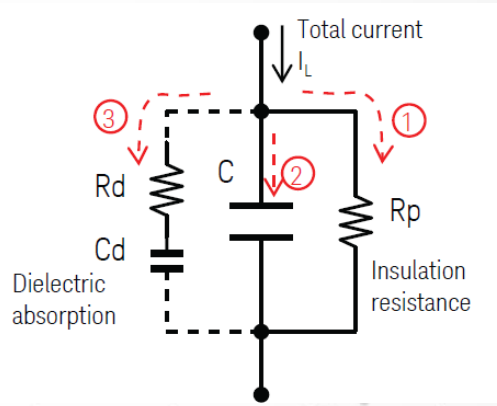
电流量程	20 V 量程	设定值20V 电阻范围	1,000 V 量程	设定值200V 电阻范围	1,000 V (+20MΩ)	设定值200V 电阻范围
< 20 pA	10 nF	>1000GΩ	---		---	
200 pA	10 nF	100GΩ	---		1 µF	1000GΩ
2 nA	10 nF	10GΩ	---		1 µF	100GΩ
20 nA	10 nF	1GΩ	---		1 µF	10GΩ
200 nA	1 µF	100MΩ	---		1 µF	1GΩ
2 µA	1 µF	10MΩ	10 nF	100MΩ	1 µF	100MΩ
20 µA	1 µF	1MΩ	1 µF	10MΩ	1 µF	10MΩ
> 200 µA	1 µF	<100KΩ	1 µF	1MΩ	1 µF	1MΩ

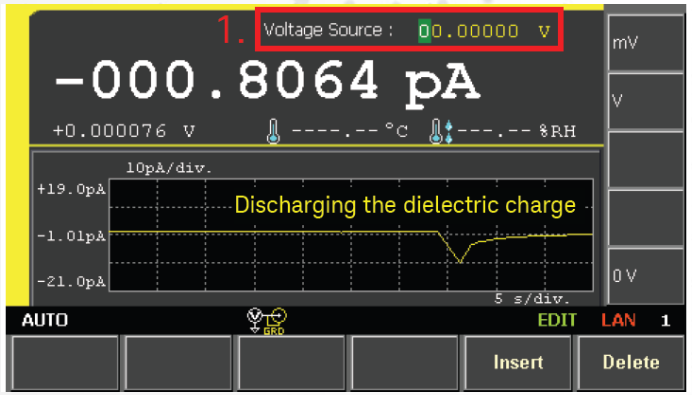


$$\text{Noise Gain} = \frac{Rs}{\frac{1}{j\omega C} + Rf} = \frac{Rs}{Rf} \quad (@\ \omega >> 1/C/Rf)$$

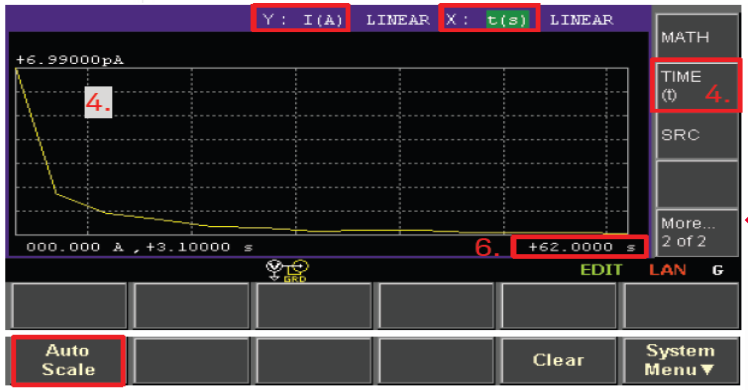
串联电阻Rf，增加对噪声的抑制
扩展高容值测试范围



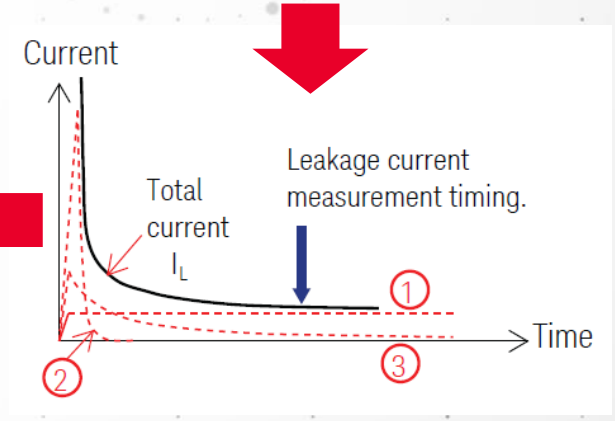




测试完成后，将电压设为0V，
并等待电容放电完毕。



需要等待足够的时间，消除2，3项的影响。



演示



总结

微弱信号、极限电阻和绝缘材料的精确测量

B2961B/62B 纯净电源

New







N1298A/B/C
低噪声滤波器

- 输出和测量范围宽：±210V，±10A(脉冲)
- 10fA, 100nA分辨率
- 100Ksa/s采样速率
- 21bit 比特分辨率/ 5uV RMS
- 非常适合与高分辨率ADC的测量

B2910B 系列源表



- 输出和测量范围宽：±210V，±10A(脉冲)
- 10fA, 100nA分辨率
- 100Ksa/s采样速率
- 20V量程：最高 3mVp-p

M9600 系列源表PXI模块



- 1至5通道/板卡
- 输出和测量范围：210V，10.5A(脉冲)
- 10fA，500nV分辨率
- 15MSa/s采样率
- 20V量程： 3mVrms

B2985 静电计、高阻计



- 单路输出 9V/200A
- 0.04% 电流测量精度
- 输入阻抗： 200TΩ