



## 半导体材料与器件科学云讲堂

### ——前沿材料科学研究：量子材料篇

主讲人：孙勇

2020/5/29

朱杰昕

——泰克业务拓展经理

——泰克现场应用工程师

# 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！

## 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
- 忆阻器器件测试及Crossbar神经元芯片阵列测试前瞻 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 •

# 议程

- 理论基础部分
  - 吉时利品牌介绍和仪器概述
  - 材料测试中小信号测量精度的瓶颈
  - 材料测试中小电阻Delta Mode测试方法及经典测试案例
- 应用实践部分
  - 量子材料的应用
  - 电输运测试面临的挑战及测试方案

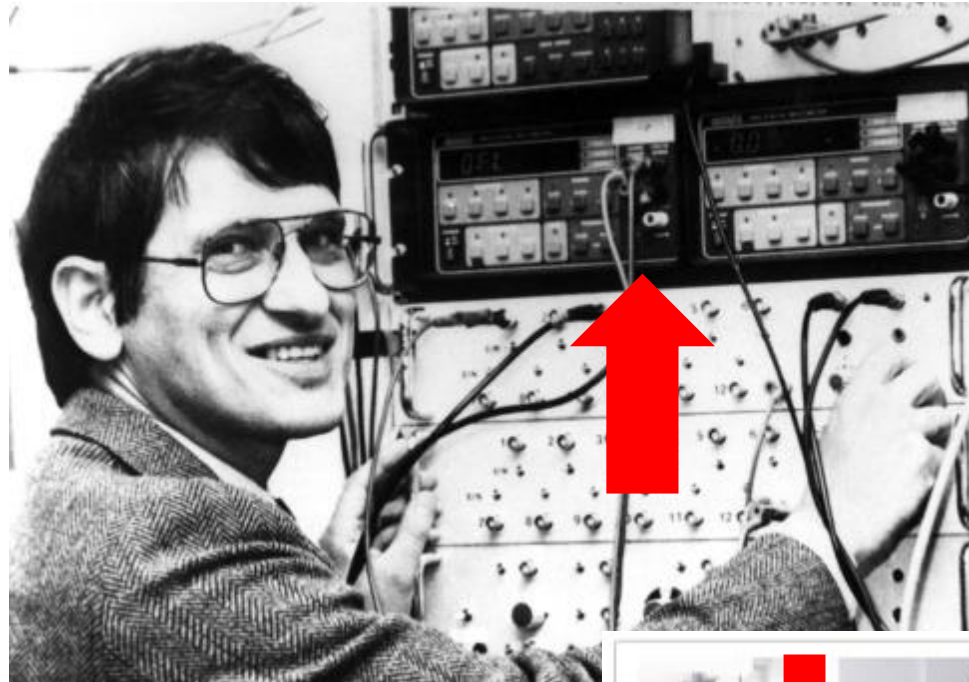
# 测试测量行业先锋

- 领先的测试测量公司，为工程和技术专业人士服务
- 成立于1946年，2007年加入丹纳赫集团
- 总部位于美国俄勒冈州毕佛顿市
- 在多个主要产品和市场中居于领导地位
- 知名品牌，提供优质创新产品、杰出的工程设计及全球服务和支持
- 屡获大奖：
  - 示波器
  - 信号源
  - 逻辑分析仪
  - 频谱分析仪
  - 视频测试



- 吉时利是精密电气测试领域的领导者
- 成立于1946年，2010年被泰克收购
- 总部位于美国俄亥俄州索伦
- 提供各种仪器和系统，满足从纳伏到千伏的任何测量要求
- 21项R&D 100大奖，多次荣获 Semiconductor International、Solid State Technology、Electronic Products、Test & Measurement World杂志颁发的荣誉

# 吉时利是前沿科学家的得力助手



Dr. Klaus von Klitzing  
1985年诺贝尔物理学奖  
量子化霍尔效应

Dr. Konstantin Novoselov  
2010年诺贝尔物理学奖  
石墨烯 (二维材料)



Dr. K. Alexander Muller和  
Dr. J. Georg Bednorz  
1987年诺贝尔物理学奖  
陶瓷材料超导



# 吉时利低电平测量仪器

灵敏测量, 超越DMM



## 吉时利电表

- 高电阻
- 低DC电流
- DC电压
- 电荷



## 吉时利皮安表

- 低DC电流



## 吉时利纳伏表

- 低DC电压
- 低电阻 (使用622X电流源)

Atto - Femto - Pico - **Nano** - Micro - Milli 1 Kilo - Mega - Giga - Tera - Peta  
10<sup>-18</sup> 10<sup>-15</sup> 10<sup>-12</sup> 10<sup>-9</sup> 10<sup>-6</sup> 10<sup>-3</sup> 10<sup>0</sup> 10<sup>3</sup> 10<sup>6</sup> 10<sup>9</sup> 10<sup>12</sup> 10<sup>15</sup>



ONE  
TEAM

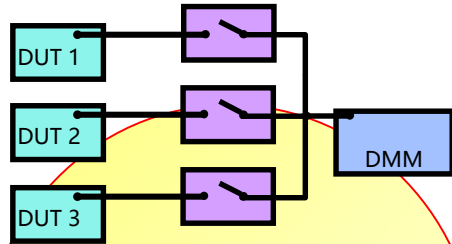
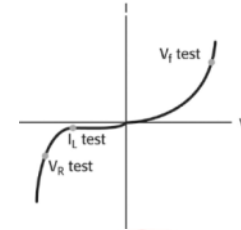
# 吉时利产品主要种类



分辨率  
•5.5 ~ 8.5位

DMM和  
电源

集成  
高灵敏度源  
高灵敏度表



集成的  
数字万用表  
和开关系统

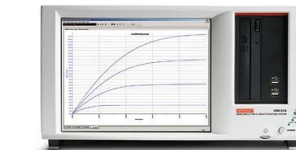


(多通道/  
数据采集器)

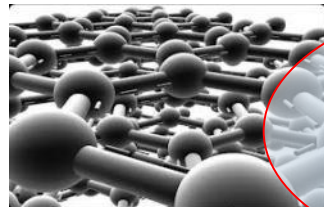


SMU

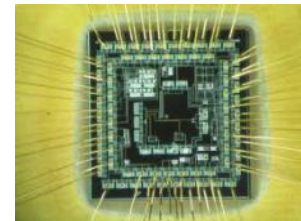
灵敏度  
• $10^{-15}$ A  
• $10^{-9}$ V



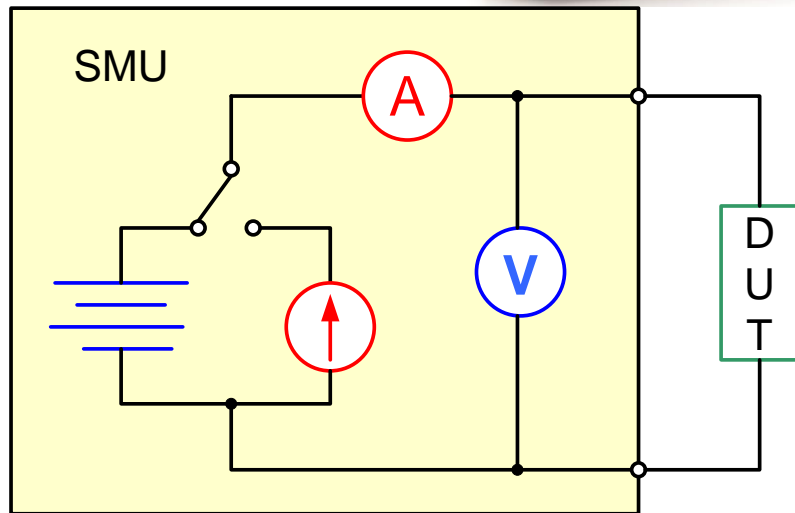
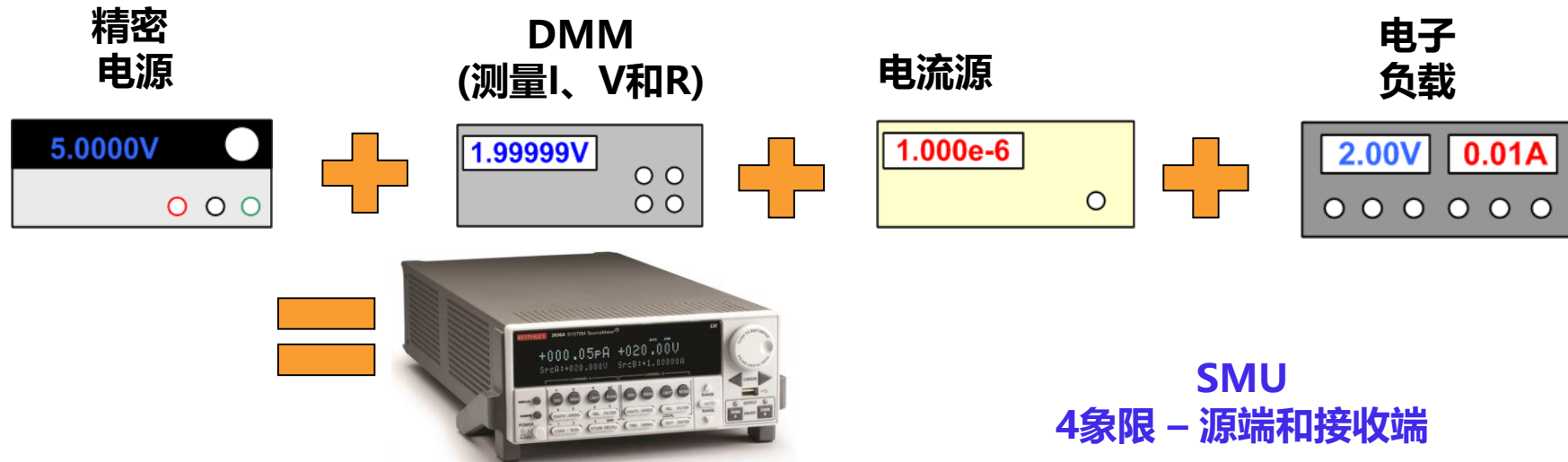
半导体参数分析仪



皮安表  
静电计  
纳伏表  
电流源

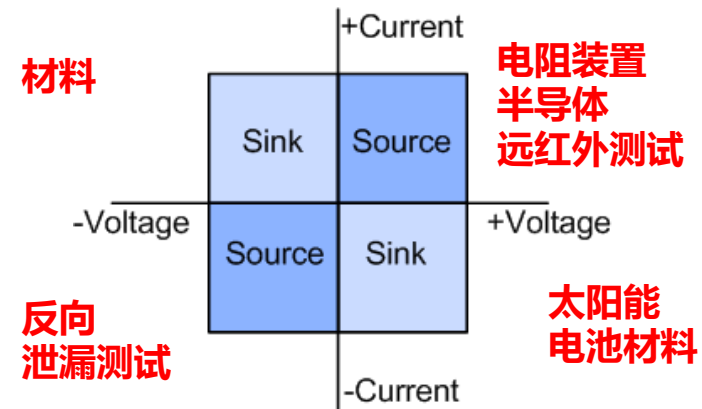


# 源表(SMU): 简化的I-V特性分析和测试



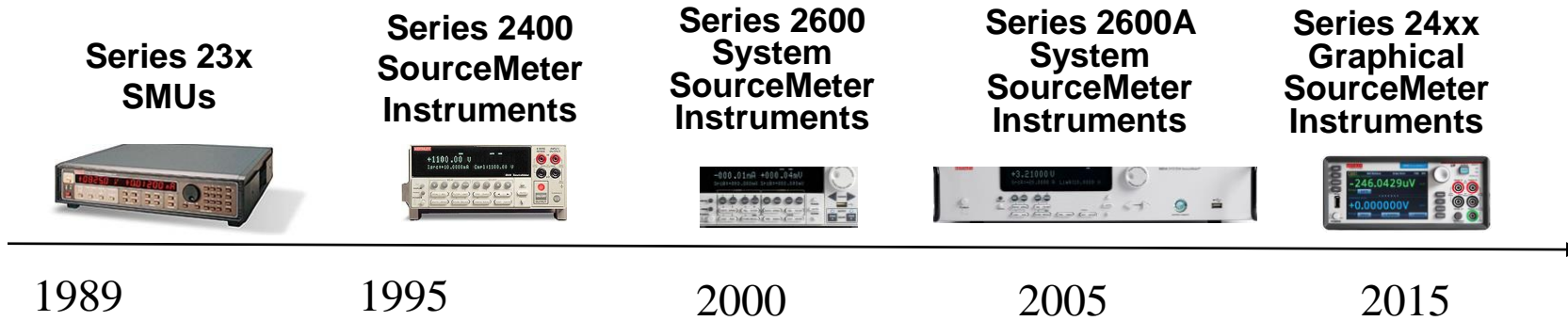
Keithley Model 2636B

## SMU 4象限 - 源端和接收端





# 源表产品深耕数十年



- >20 patents issued for SMU-specific technology
- Numerous industry awards, including *R&D 100*, *T&MW*, and more
- Serving Semiconductor, Electronic Components, Optoelectronics, Automotive, Mil/Aero, Medical, Research & Education, and many more electronics industries



**S500 and S530  
Parametric Test  
Systems**

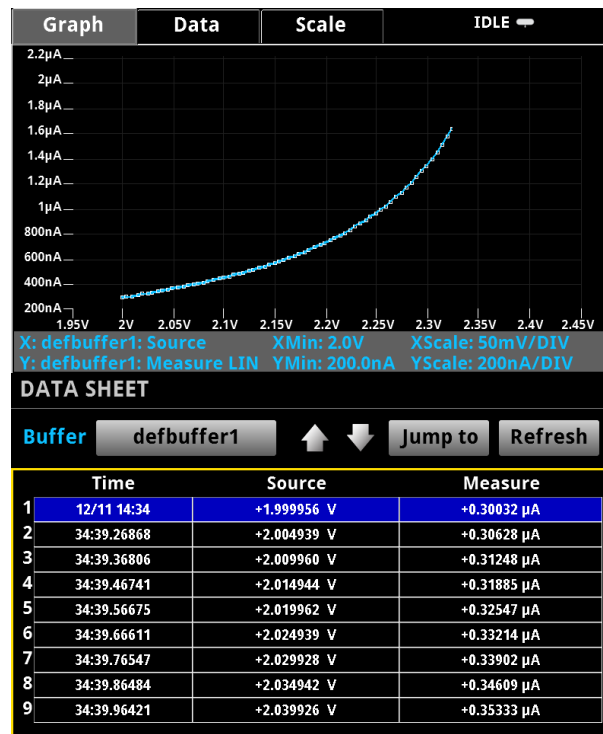
# 源表的演进 —— 触摸屏和图形化操作界面



# 柔性压阻材料测试



更直观的图形显示  
更快的测试速度  
更方便的操作方式



# 材料测试中小信号测量精度的瓶颈

- 时间vs精度
- 电流表在测试回路中的负载效应
- 测量小电阻，两线和四线连接
- 加压测流和加流测压的区别
- 三同轴线缆对测量精度的提升
- 直流vs脉冲
- 热电动势对低压测试的影响

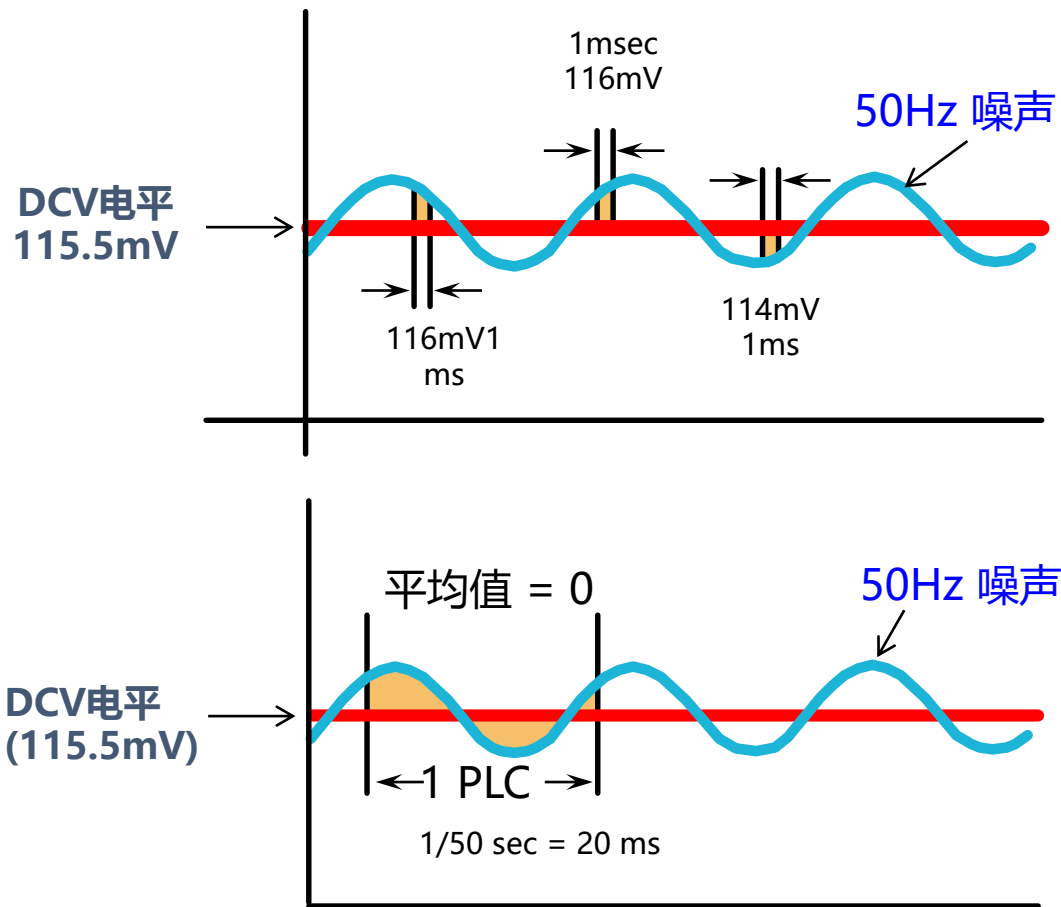
# (一) 时间与精度

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

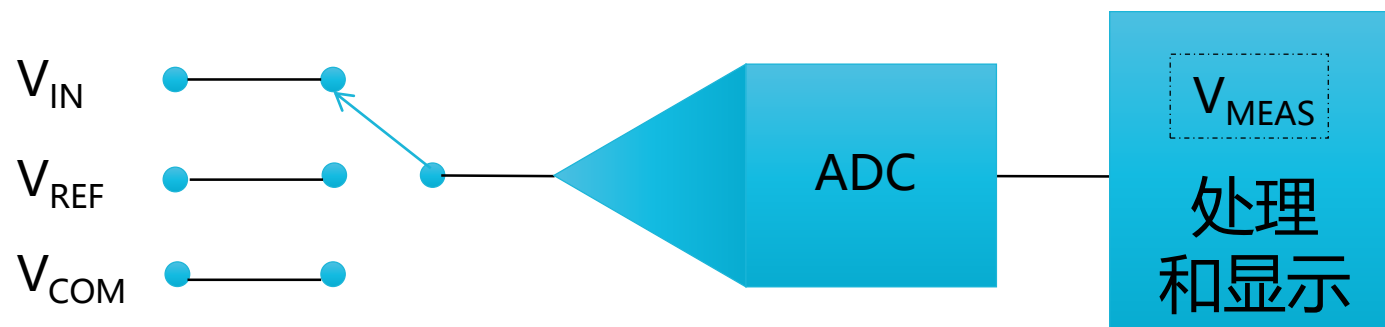


# (一) 时间与精度

- 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

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



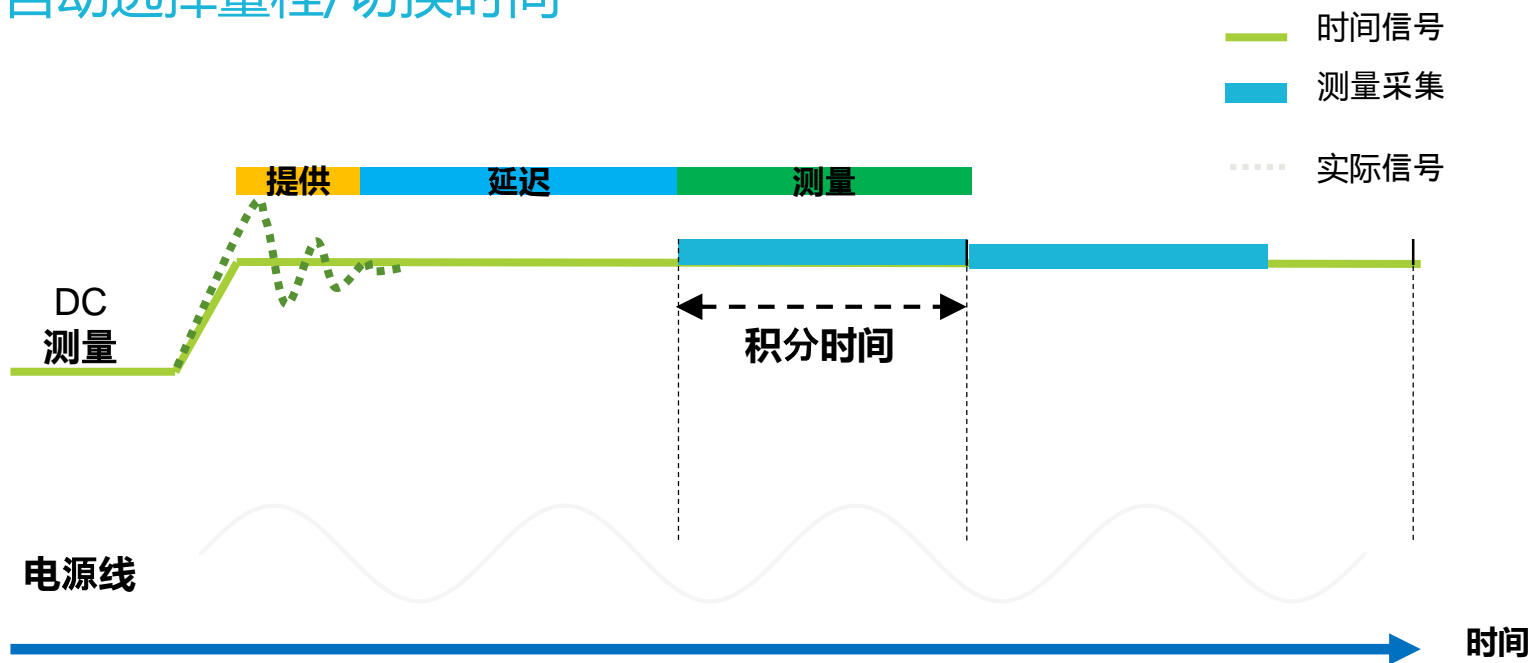
**追求速度:** AUTO ZERO OFF - 只测量 $V_{\text{IN}}$

**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

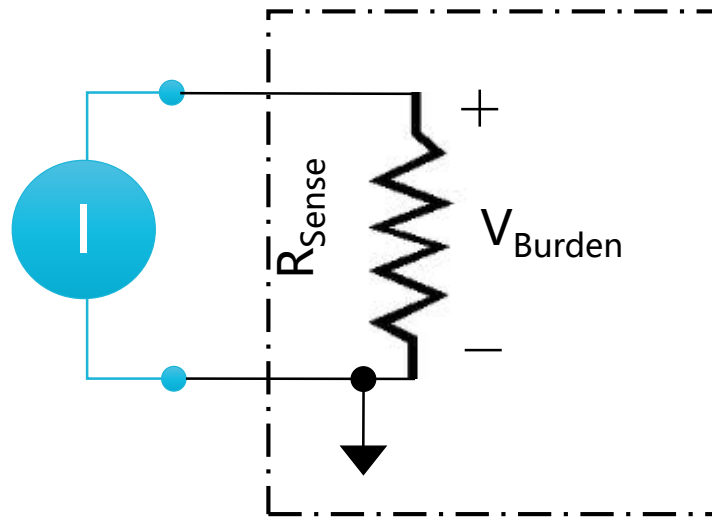
DC 电信号开始施加到样品上时，有可能会需要一定的时间才会稳定，我们希望在信号稳定后再进行测试



## (二) 负载与反馈式设计

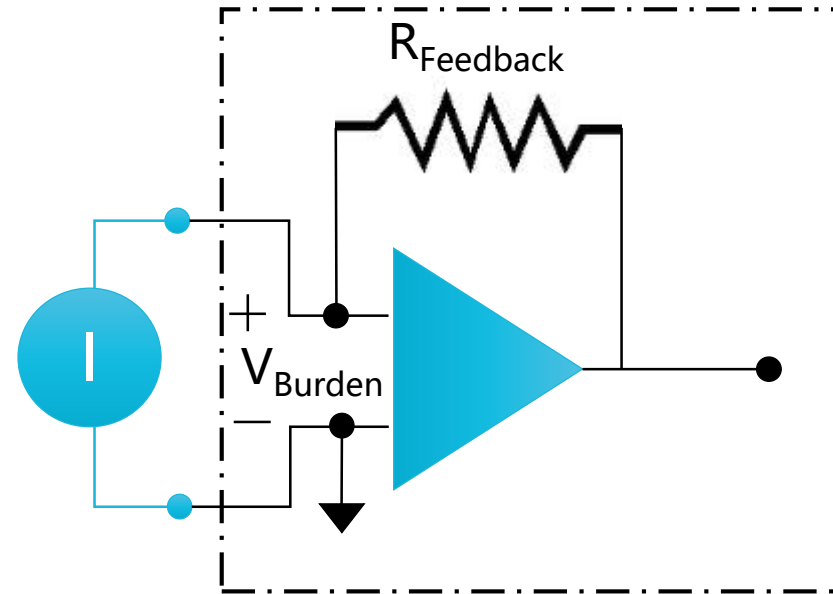
- 选用合适设计的测试设备，对器件微弱电流做精确测量

并联电阻技术



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

反馈电流表技术



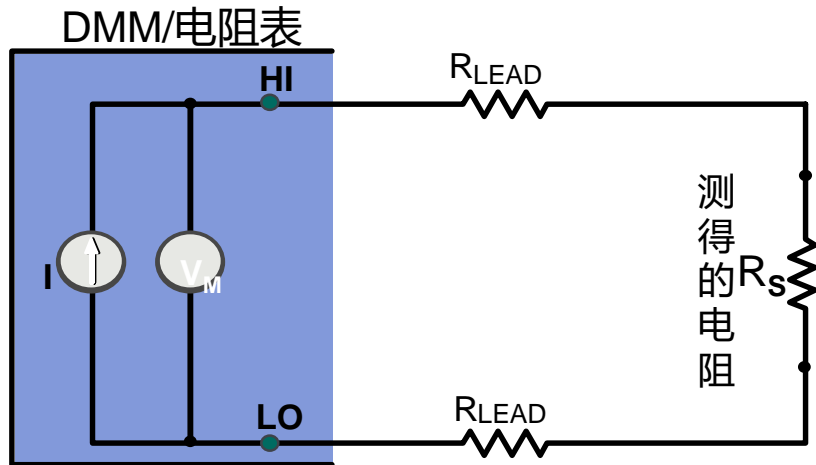
$$V_{BURDEN} < 200 \mu\text{V}$$



### (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

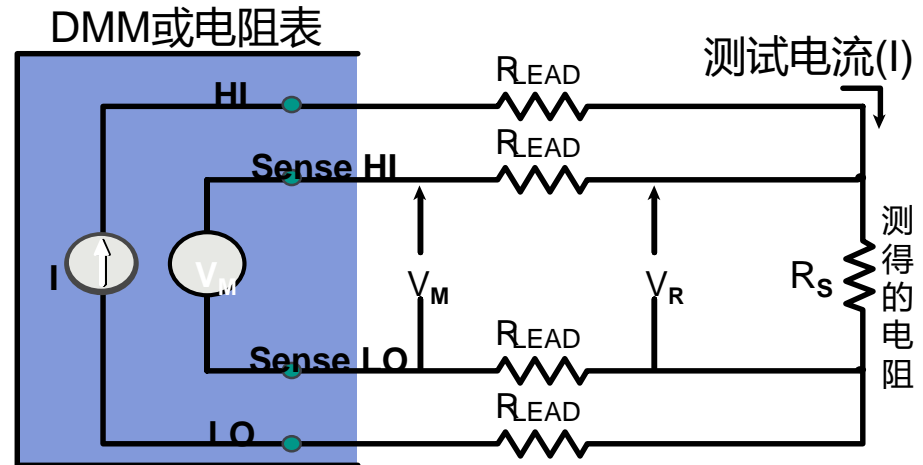
2线电阻测量 (Local sense)



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

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

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,  $V_M = V_R$

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

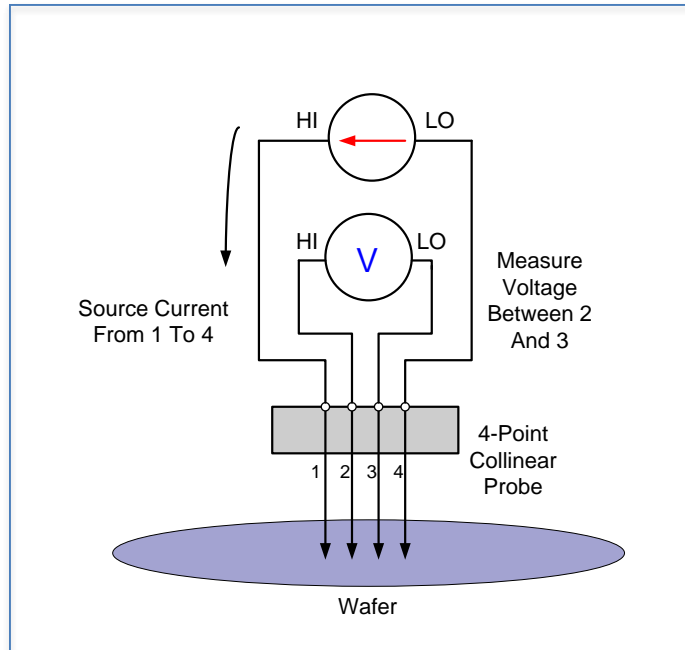
# (四) 加压测流与加流测压 测试方法的选用

- 要看测试是相当于低阻测试还是高阻测试:

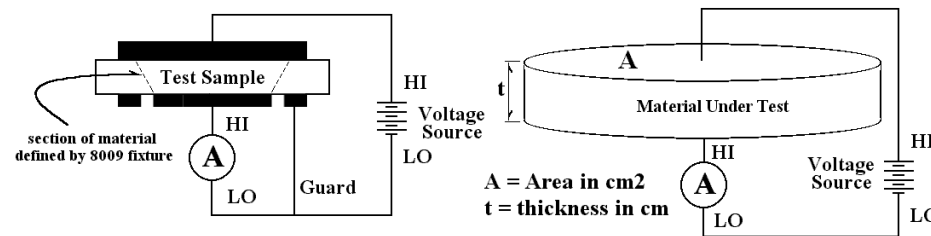
Low Current measurements:  $<10\text{nA}$  ( $10^{-8}\text{A}$ )

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



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

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

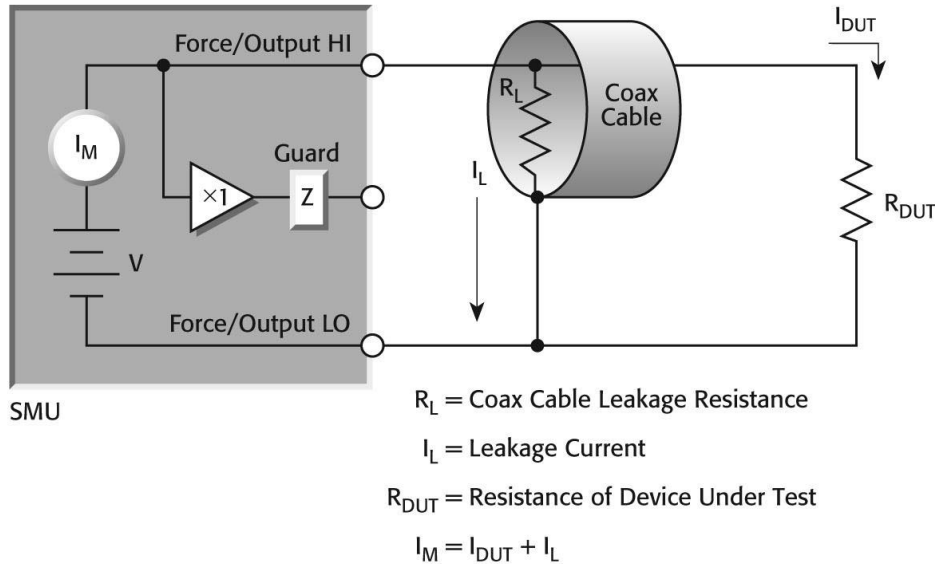
对于低阻测试一般采用加流测压的方式, 典型的应用比如四探针法测导体 / 半导体的电阻率

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

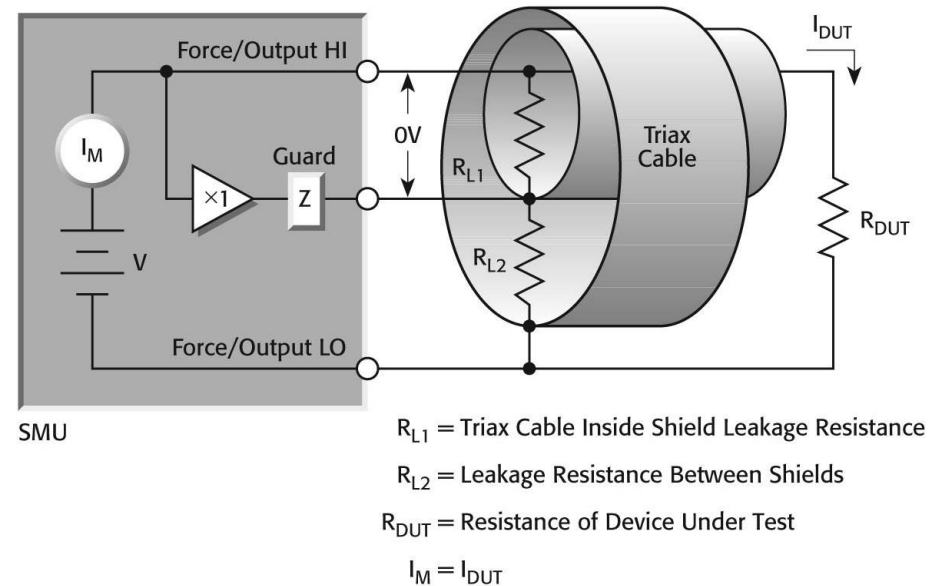
- 在做小电流测试时，选用合适的电缆消除泄漏电流带来的影响

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

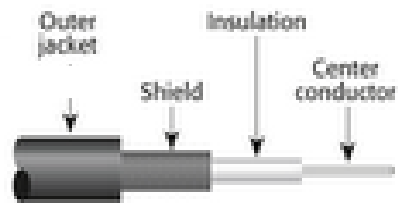
b) Guarded Circuit



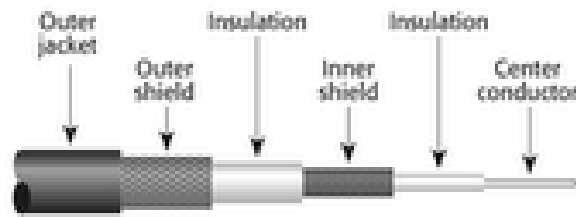
没有泄漏电流：Guard技术  
对内部保护层施加 $V_{OUT}$ 电位，  
因此 $\Delta V = 0V$

# 如何进行准确的低电流测量： 消除泄漏电流使用三同轴电缆

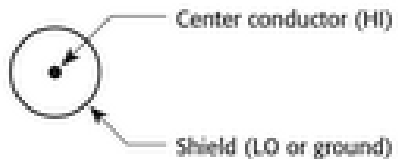
同轴电缆



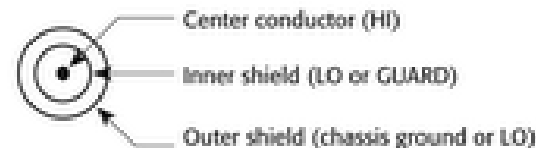
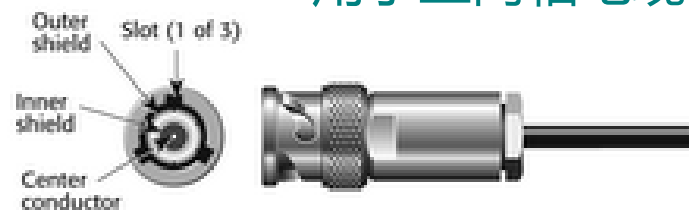
三同轴电缆



BNC连接器  
用于同轴电缆

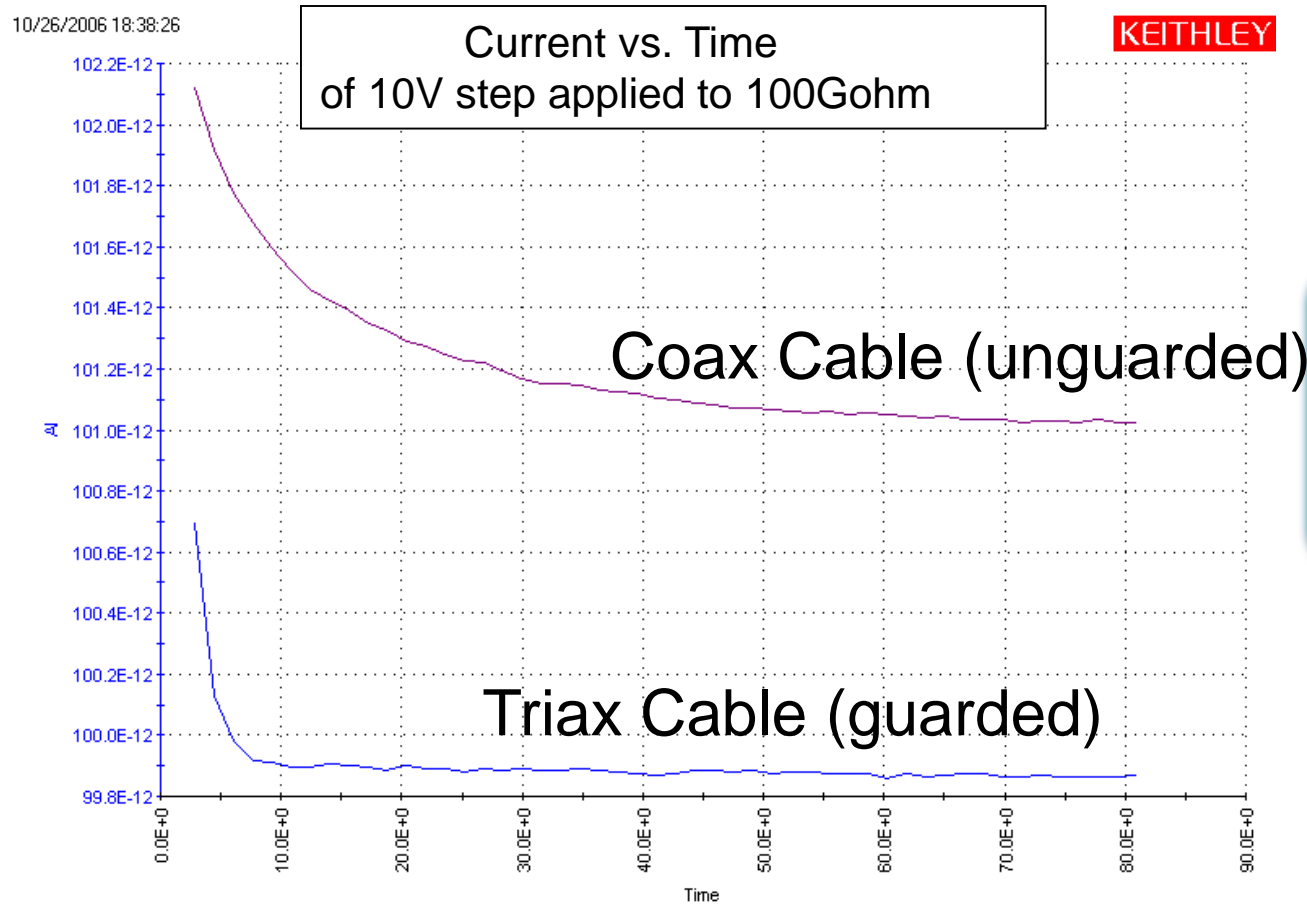


三同轴连接器  
用于三同轴电缆



## (五) 同轴与三轴 电缆的选用

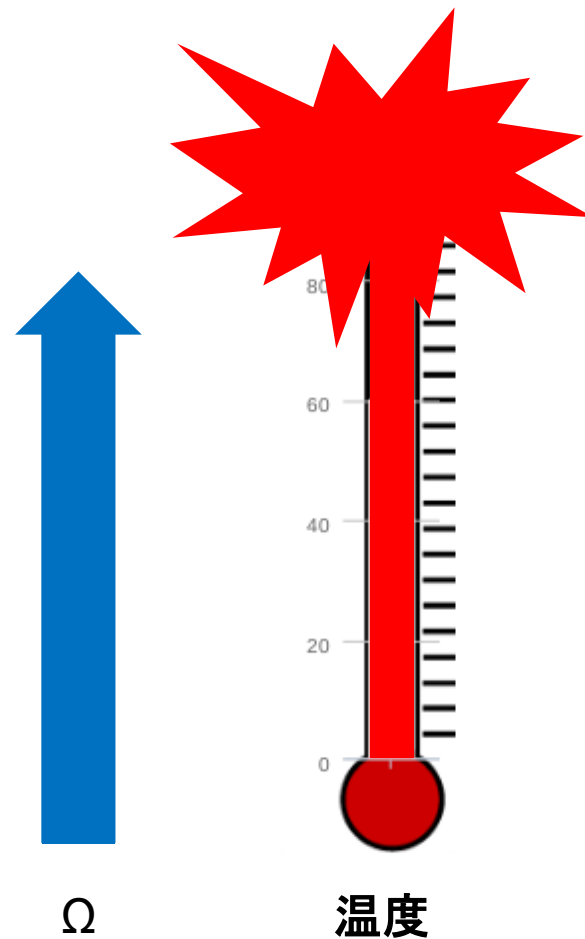
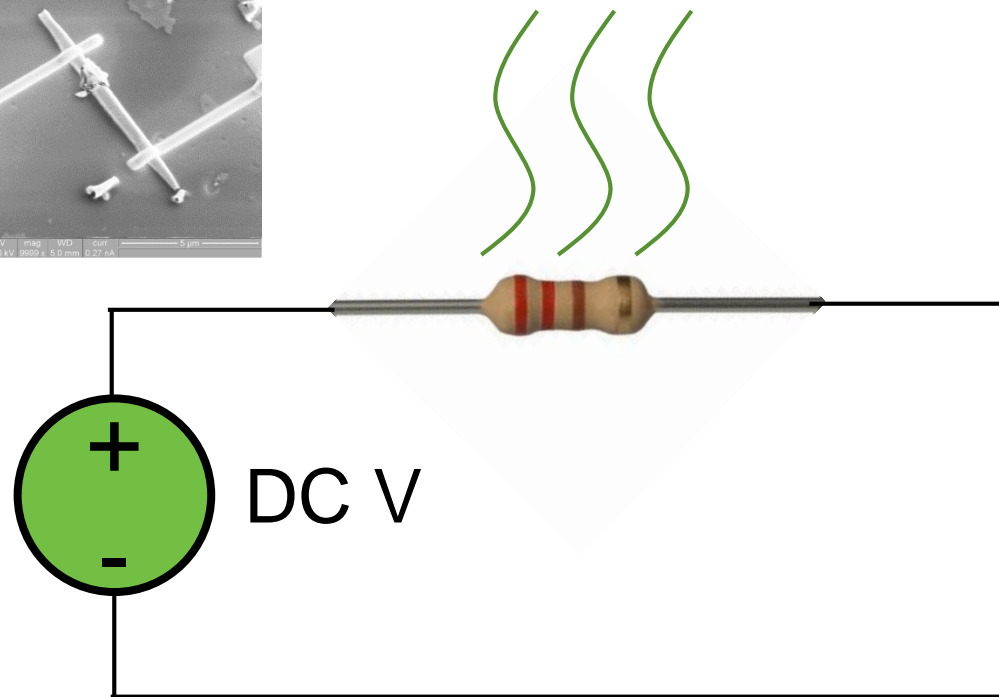
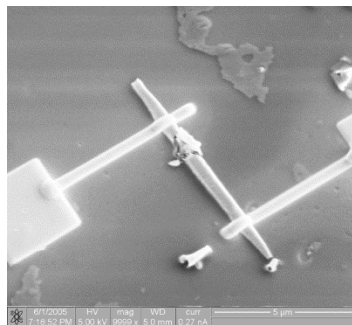
- 在做小电流测试时，选用合适的电缆消除泄漏电流带来的影响



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) 直流与脉冲 (器件自热效应)

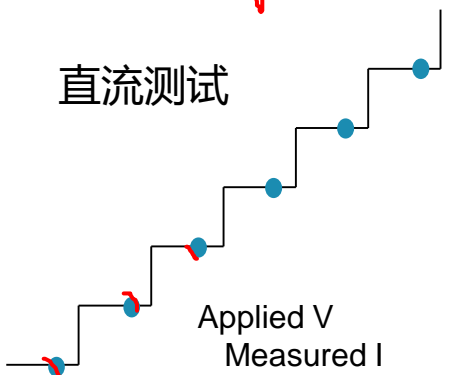
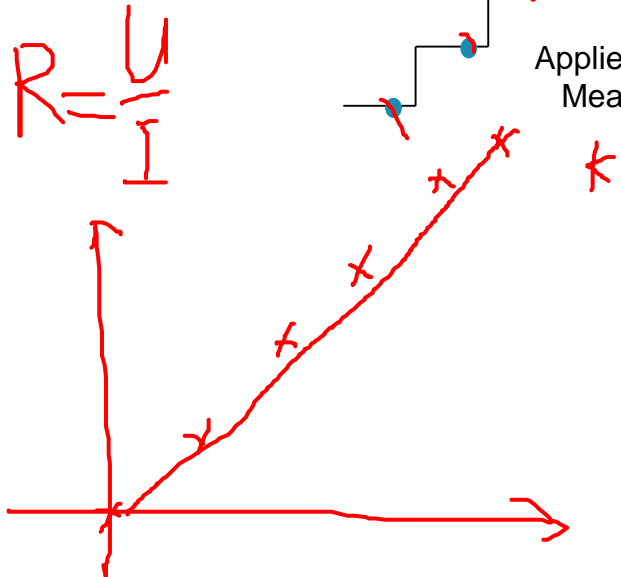
- 在DC测试中，器件自热会改变器件电特性。



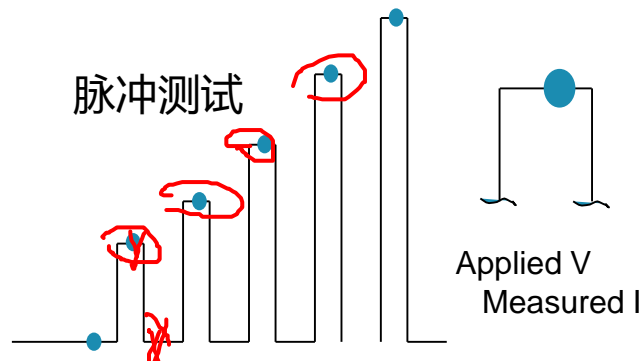
**使用脉冲，使自热效应达到最小!**

# (六) 直流与脉冲 (器件自热效应)

Swing?

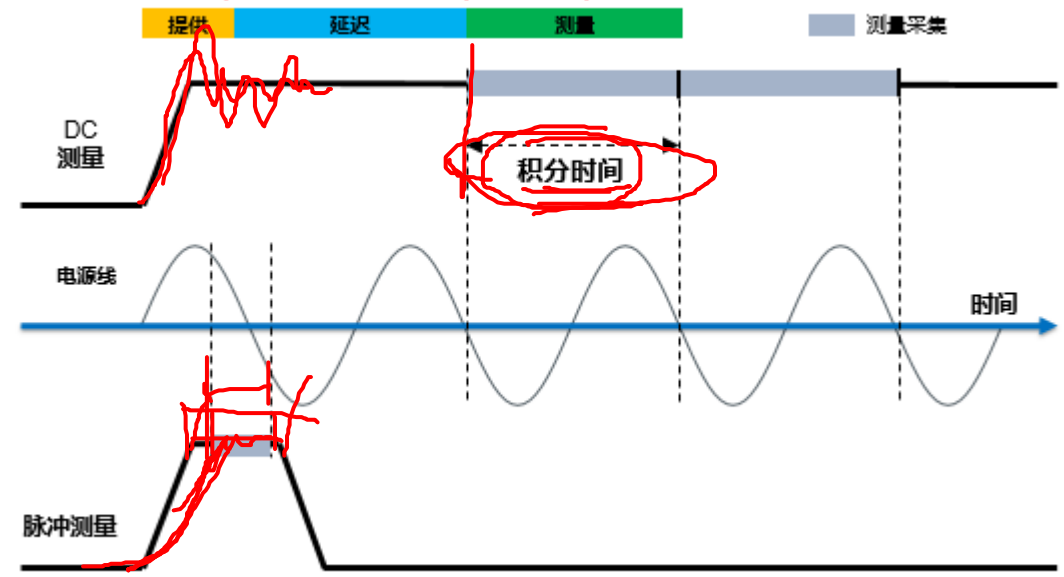


功率器件长时间在直流偏置下, 特性开始改变



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;

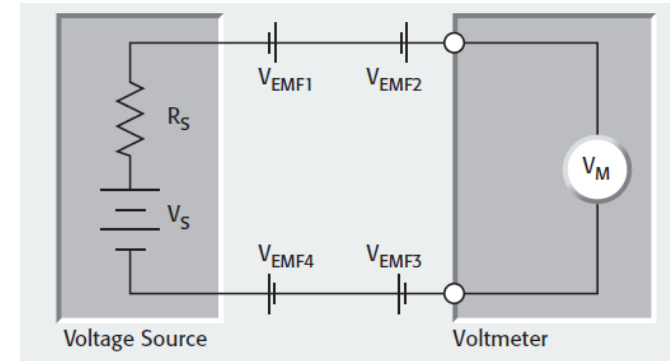


# (七) 消除热电势(EMF)影响

- 热电势是低电压测试中最常见的误差来源

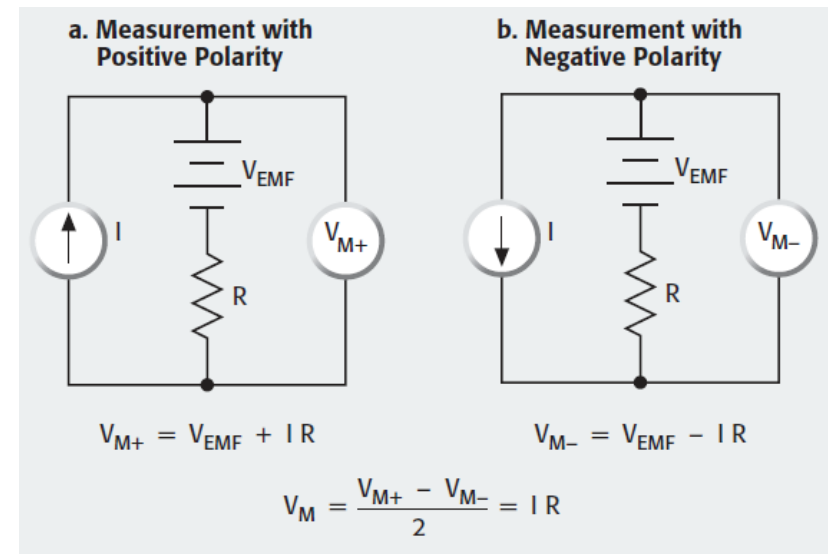
Paired Materials*	Seebeck Coefficient, $Q_{AB}$
Cu - Cu	$\leq 0.2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Ag	$0.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Au	$0.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Pb/Sn	$1-3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Si	$400 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Kovar	$\sim 40-75 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - CuO	$\sim 1000 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

\* Ag = silver   Au = gold   Cu = copper   CuO = copper oxide  
Pb = lead   Si = silicon   Sn = tin



- 针对稳定的热电势误差

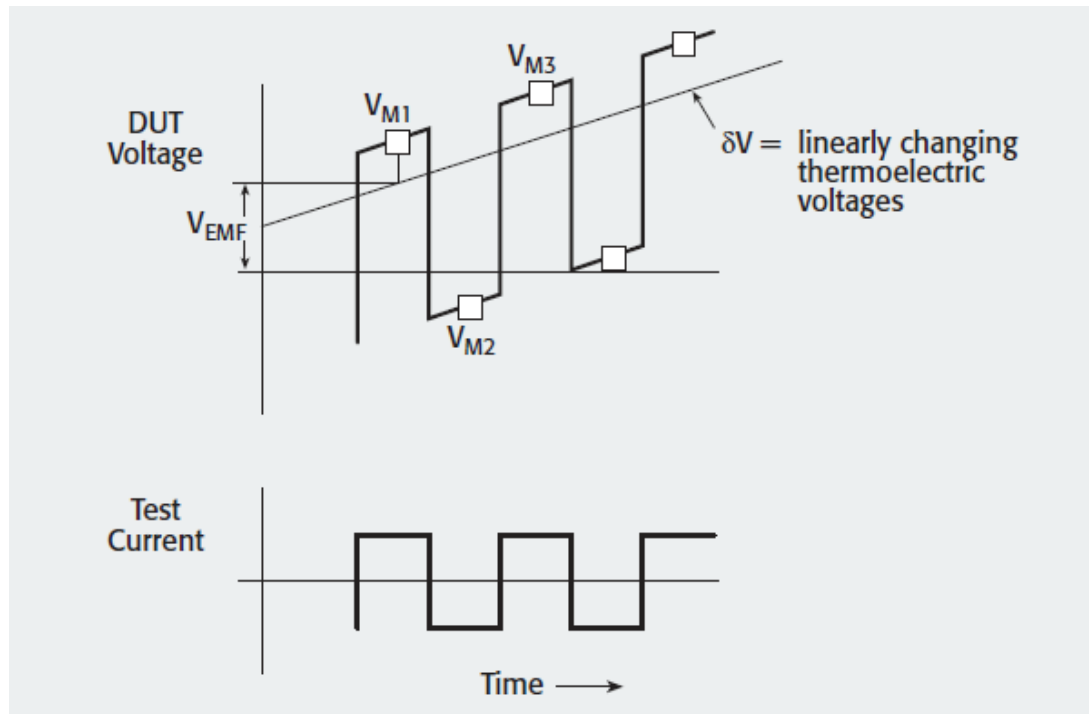
- 解决方法：电流换向法测电压，消除热电势影响





## (七) 消除热电势(EMF)影响

- 针对线性变化的热电势误差：
  - 解决方法：Delta 模式通过连续三次测量计算消除EMF影响



# 材料测试中小电阻Delta Mode 测试方法及经典测试案例

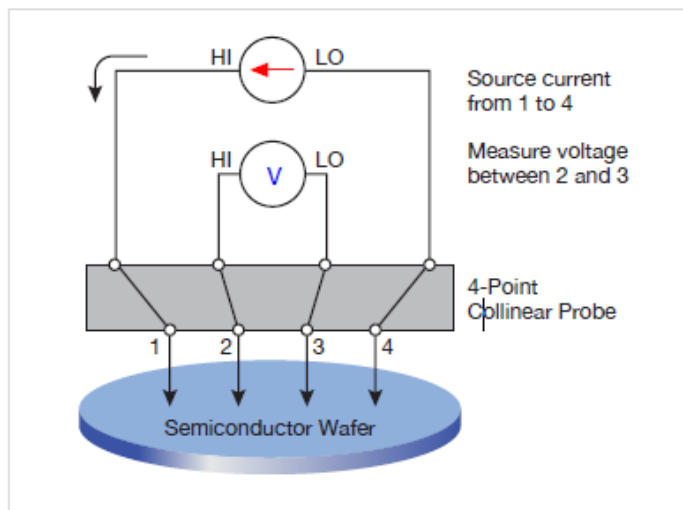
- 薄膜材料电阻率测试
- 霍尔效应测试
- 低阻测试
- 高阻测试

# 源表典型应用：薄膜材料电阻率测试

## 电阻率测试

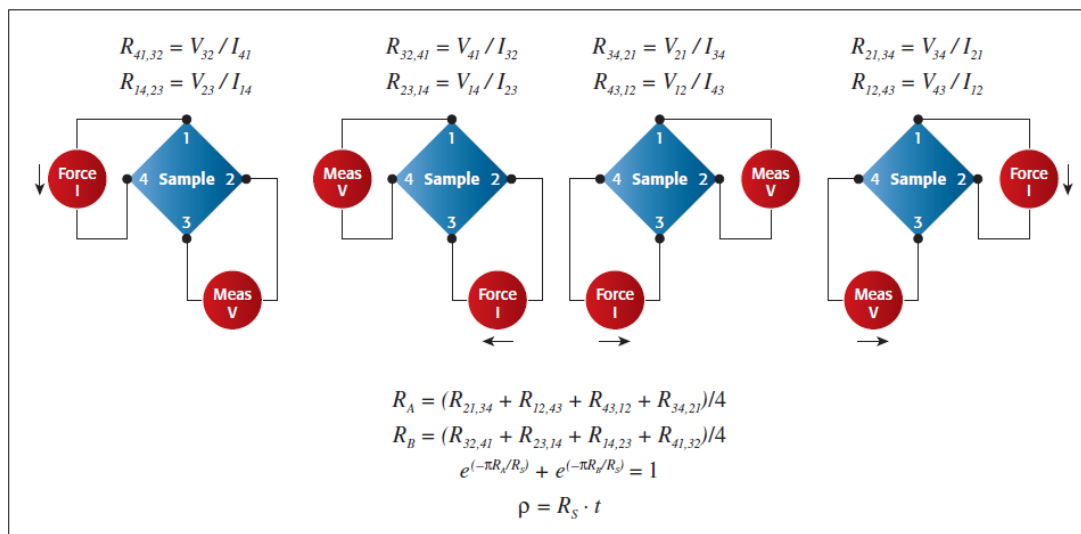
- 四探针法

- The Four-Point Collinear Probe Method



- 范德堡法

- The van der Pauw method



$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V}{I} \times t \times k \quad \sigma = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} k = 4.532 \frac{V}{I} k$$

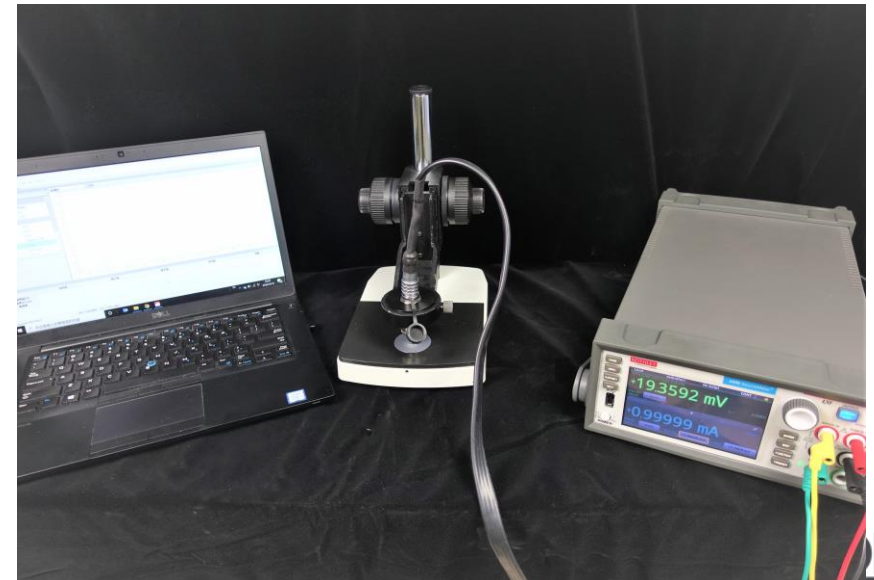
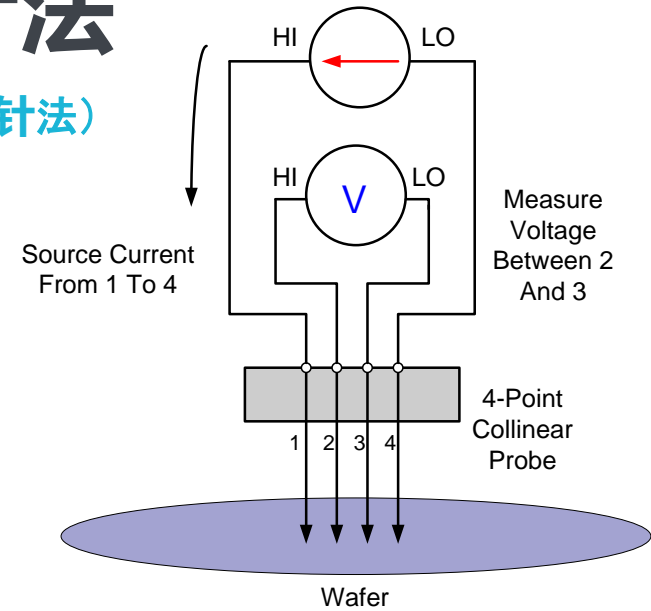
电阻率电导率是评价材料导电性能的基本参数

# 薄膜材料电阻率测试——四探针法

## FOUR-POINT RESISTIVITY MEASUREMENTS (四探针法)

- 对于规则圆形的薄膜材料，电阻率测试比较方便的方法是四探针法
- 要求
  - 四点共线
  - 四根针等间距
  - 材料长度和宽度远大于探针间距

$$\rho = \frac{\pi V}{\ln 2 I} h = 4.532 \frac{V}{I} h$$
$$R_s = \rho / h \quad (\Omega / \square)$$

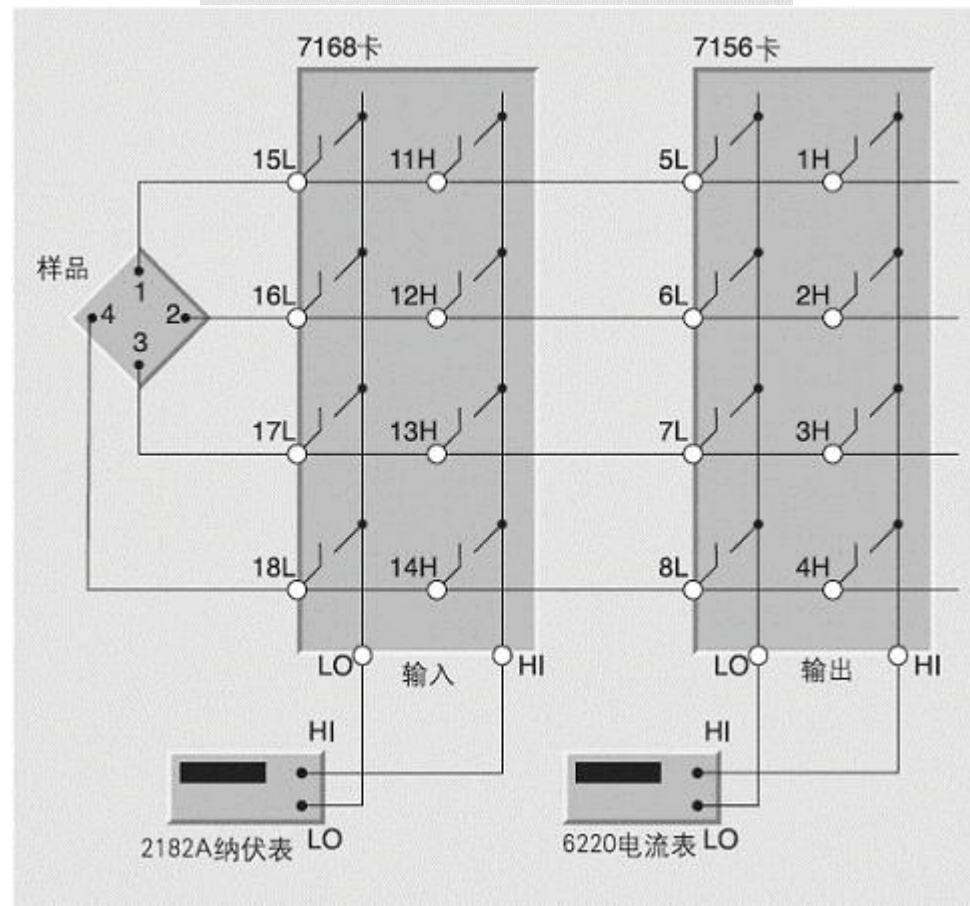
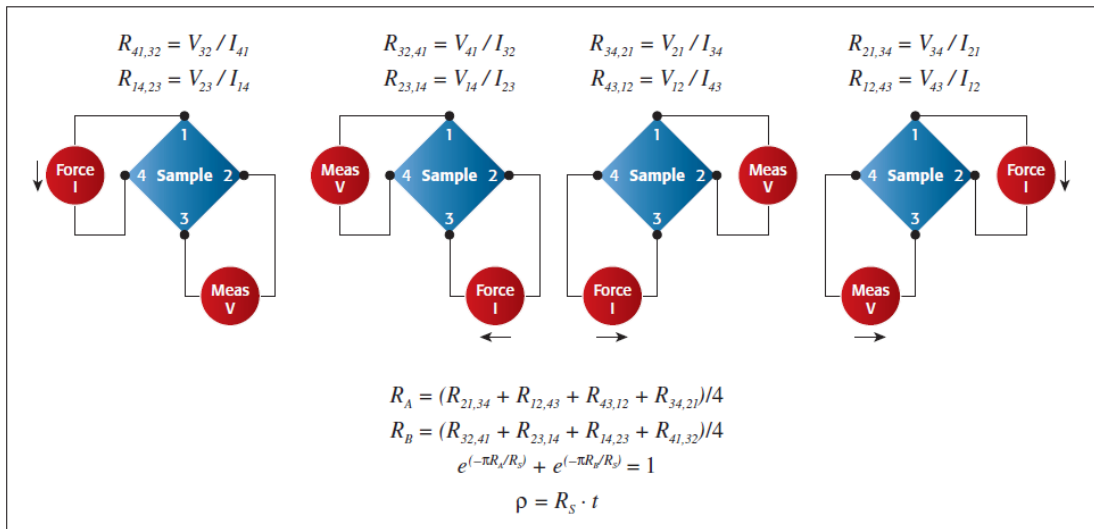
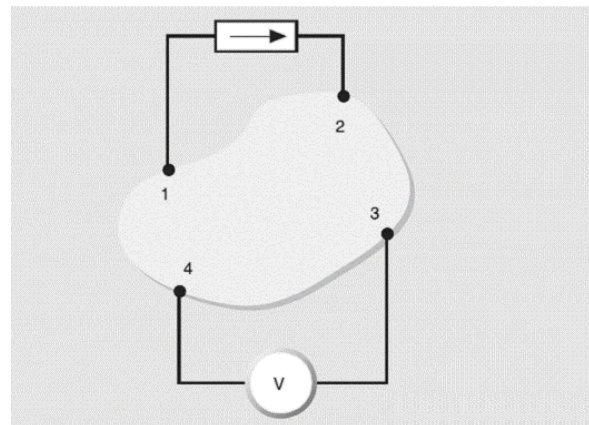


# 范德堡法电阻率测试

## 不规则形状样片的电阻率测试

- 四探针技术要求样品为薄膜样品或块状，范德堡法为更通用的四探针测量技术，对样品形状没有要求，且不需要测量样品所有尺寸，但需满足以下四个条件

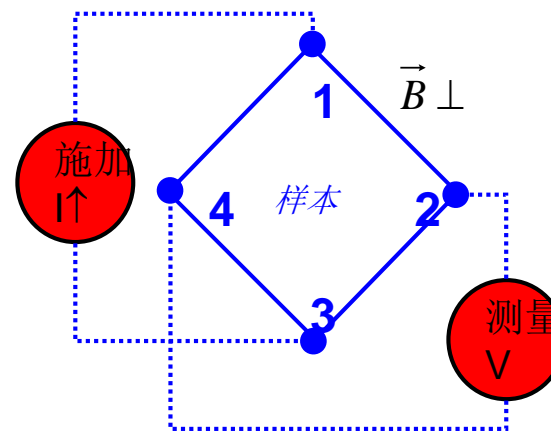
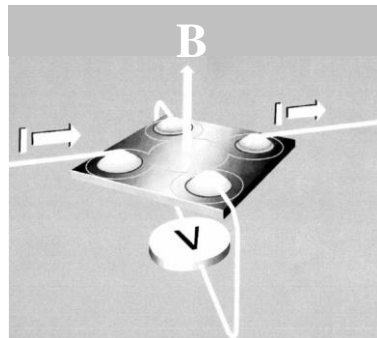
- 1. 样品必须具有均匀厚度的扁平形状。
- 2. 样品不能有任何隔离的孔。
- 3. 样品必须是均质和各向同性的。
- 4. 所有四个触点必须位于样品的边缘。



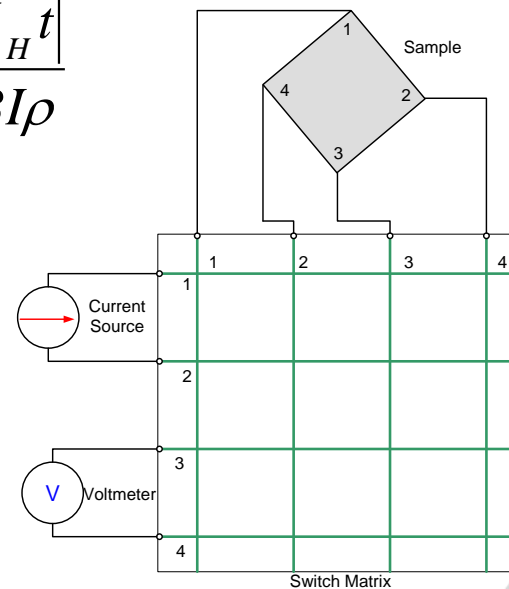
# 霍尔效应测试

## 霍尔迁移率

- 首先测量霍尔电压 $V_H$ 
  - 施加磁场 $B$
  - 提供电流 $I$
  - 测量 $V_H$
  - $t$ 是样本厚度
- 然后测量电阻率 $\rho$ 
  - 使用范德堡技术
- 然后计算霍尔迁移率 $\mu_H$ :
- 自动霍尔测试系统的实现:
  - 使用源表 + 矩阵开关插卡



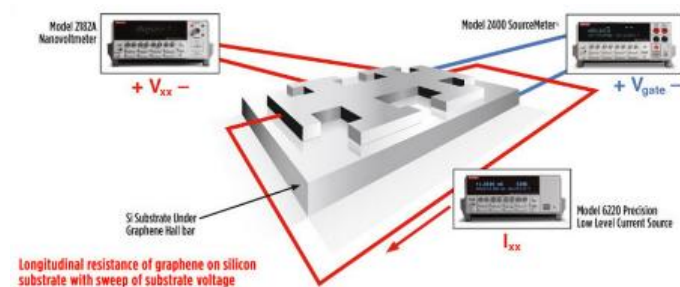
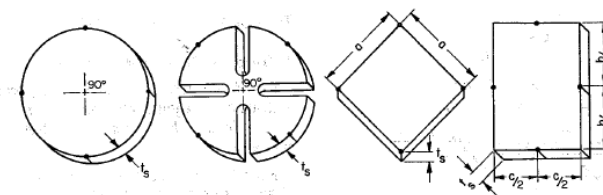
$$\mu_H = \frac{|V_H t|}{BI\rho}$$



# 吉时利半导体材料霍尔效应测试方案

OUR UNIQUE HALL EFFECT SWITCHING CARD FOR TESTING MATERIALS WITH A WIDE RANGES OF RESISTANCES

- ASTM Standard



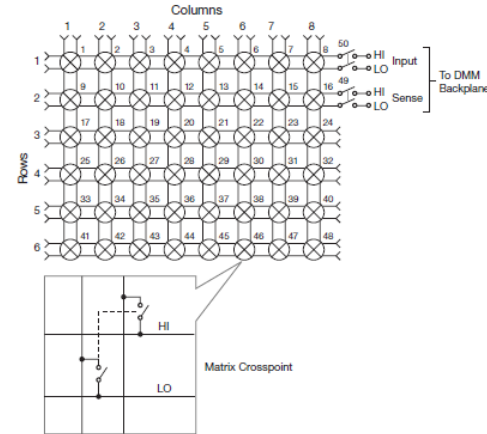
**ONE  
TEAM**

# 矩阵开关插卡选择

## DAQ6510 Switch Mainframe

**7709** 6 x 8 matrix switch card

bias current is less than **100 pA**



## 3706A Switch Mainframe

**3760** 10-channel High Current Multiplexer Card

**3761** 10-channel Low Current Multiplexer Card

**3762** 10-channel High Voltage Multiplexer Card

**3765** Hall Effect Card

bias current is less than **50 fA**

Replacing

## 7001/7002 Switch Mainframe

**7053** High Current Scanner Card, 10Ch

**7158** Low Current Scanner Card, 10Ch

**7154** High Voltage Scanner Card, 10Ch

**7065** Hall Effect Card



低压 Low V、低阻 Low R

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



# 高传导率 (低电阻): 纳伏表和低电流源

Model 2182A纳伏表



- ❑ 1nV灵敏度
- ❑ 双通道
- ❑ Delta模式测量 (反向电流) 模式

Models 6220/21电流源

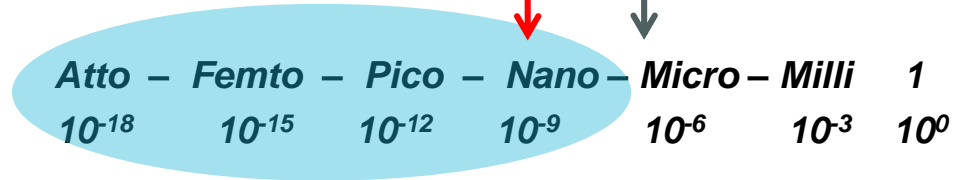


- ❑ 100fA源分辨率
- ❑ AC / 任意波形发生(6221)

电压灵敏度

纳伏表

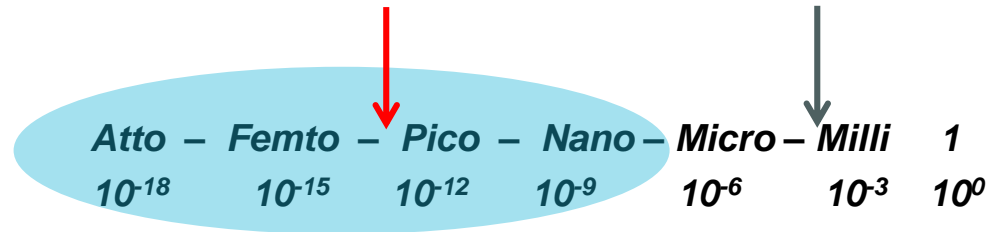
DMM



电流灵敏度

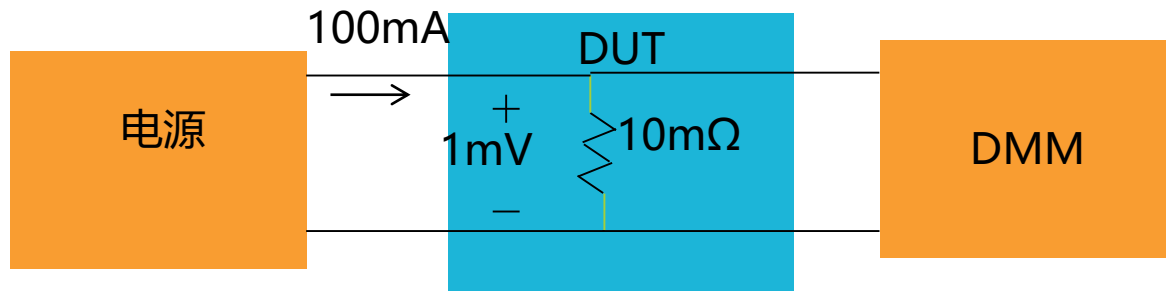
电流源

电源

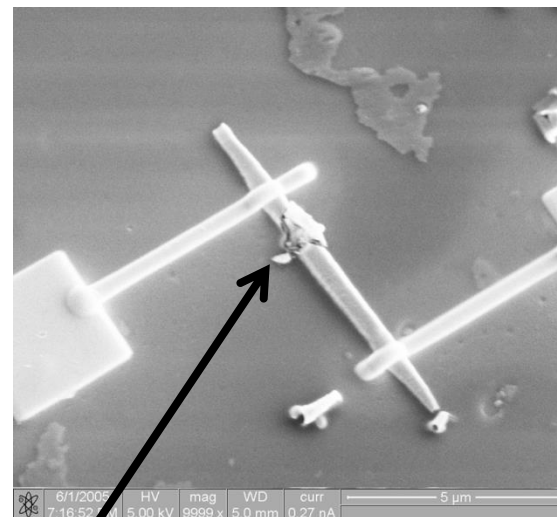
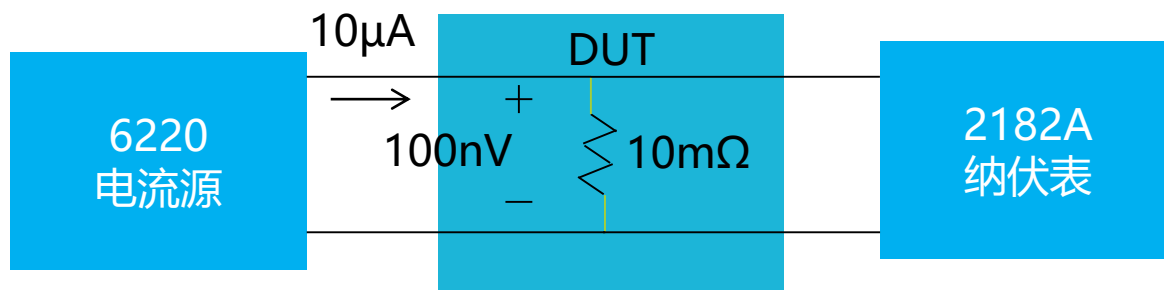


# 如何进行精准测量：消除自热效应

$$\text{功率} = 100\text{mA} \times 1\text{mV} = 100\mu\text{W}$$



$$\text{功率} = 10\mu\text{A} \times 100\text{nV} = 1\text{pW}$$

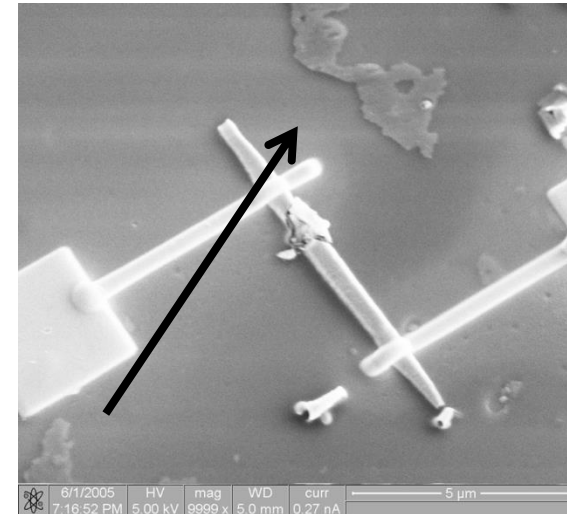
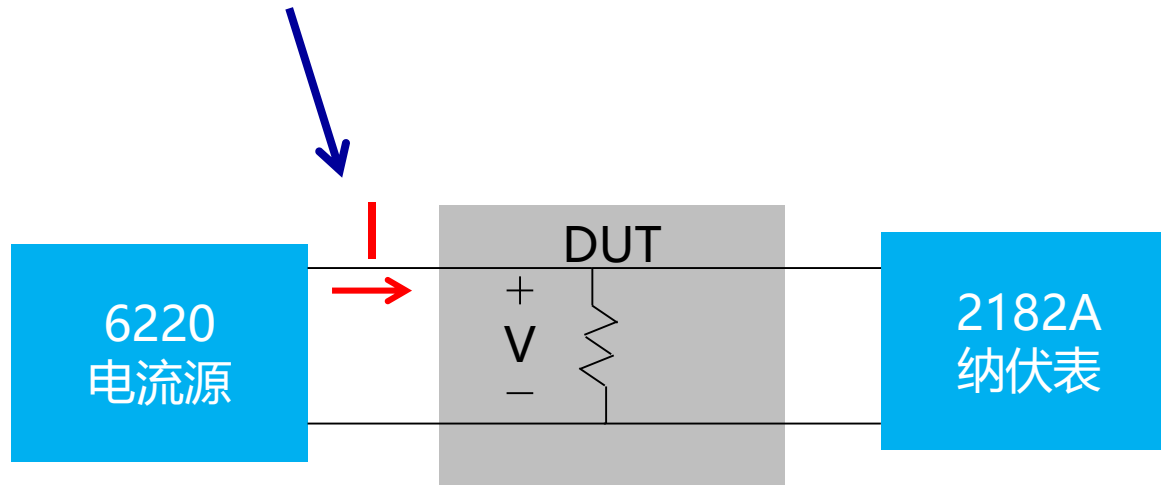


自热导致纳米线熔化

# 最大低电阻测量精度 – 消除自热

我们较其他低电阻测量解决方案的主要优势:

- 只向器件施加非常非常小的电流, 100fA

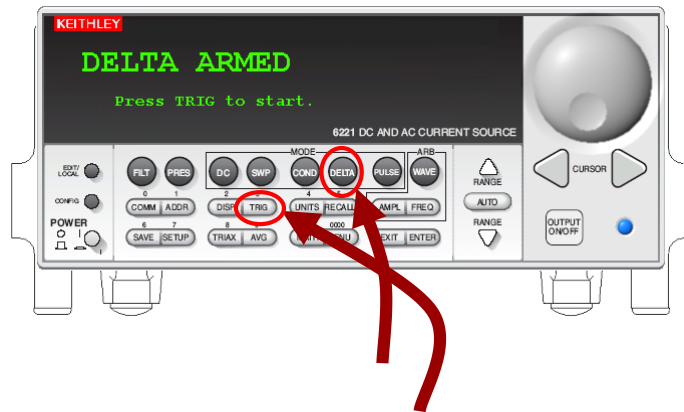


纳米线由于自热熔化的

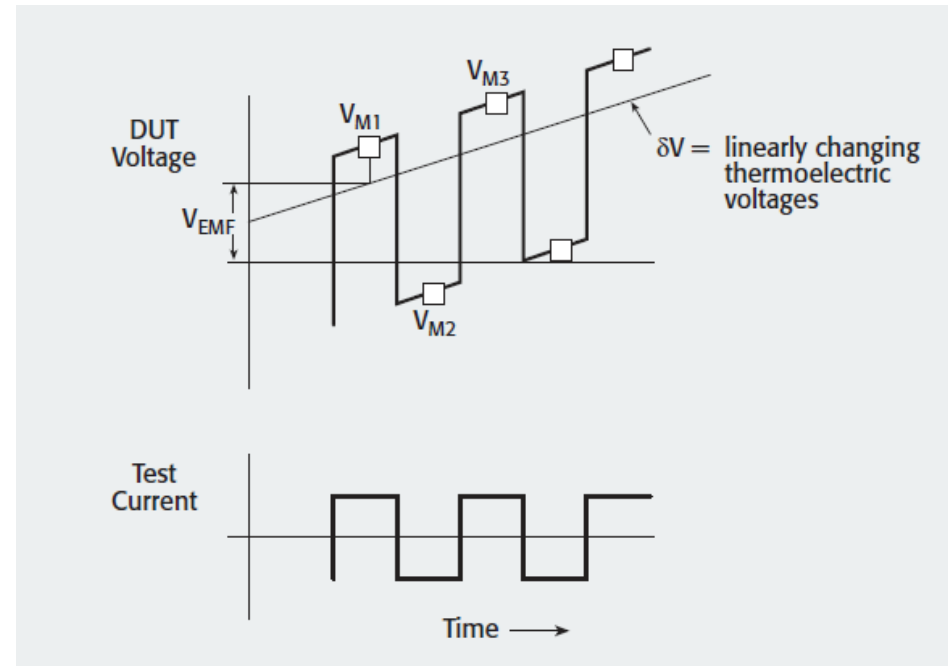
# Improved Delta Mode is EASY to USE!

## 改进的Delta模式非常易于使用!

6220 or 6221 & 2182A



- First Press DELTA to arm
- Then Press TRIG to execute
- 6220 or 6221 & 2182A also can be used with free software

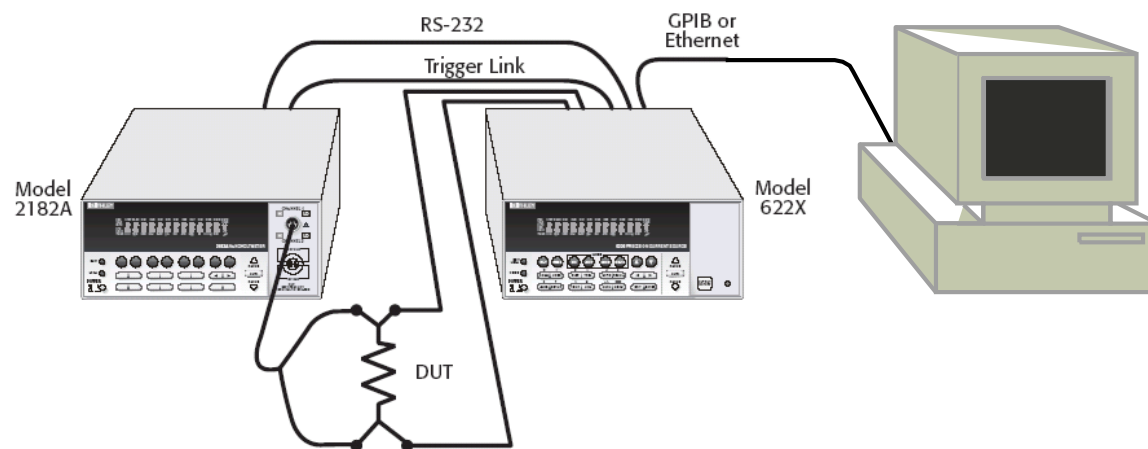


delta mode 测试原理

# The BEST Low Resistance Solution EVER!

## 目前为止最好的低阻测试解决方案!

6220 or 6221/ 2182A Delta Mode



无需编程：622X（电流源）与2182A（纳伏表）相互触发，自动完成 Delta 模式测试

高阻Hi R、低流 Low I

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



# 高电阻或低电流测量应用

常见应用	测量
纳米材料研究 电化学测量	绝缘电阻 表面电阻系数 体积电阻系数
纸、橡胶制品、塑料的电阻系数	表面电阻系数 体积电阻系数
继电器、电缆或连接器的绝缘电阻	绝缘电阻 电压系数
材料特性分析	波束电流 霍尔效应
半导体特性分析	泄漏电流 暗电流 击穿电压





# 吉时利灵敏仪器旗舰产品：静电计

## 测量超高电阻和超低电流



Model 6517B静电计/高电阻仪表

多功能(电压, 电流, 电阻)

- 测量超高电阻 –  $10^{14}\Omega$
- 体电阻率最高 –  $10^{18}\Omega\text{-CM}$
- 超低电流分辨率 – 10aA  
( $10 \times 10^{-18}\text{A}$ ) 分辨率
- DC电压及超高输入阻抗  
>  $200\text{T}\Omega$
- $\pm 1000\text{V}$ 源 (仅6517B)
- 测量电荷

电流灵敏度

最大电阻

电表

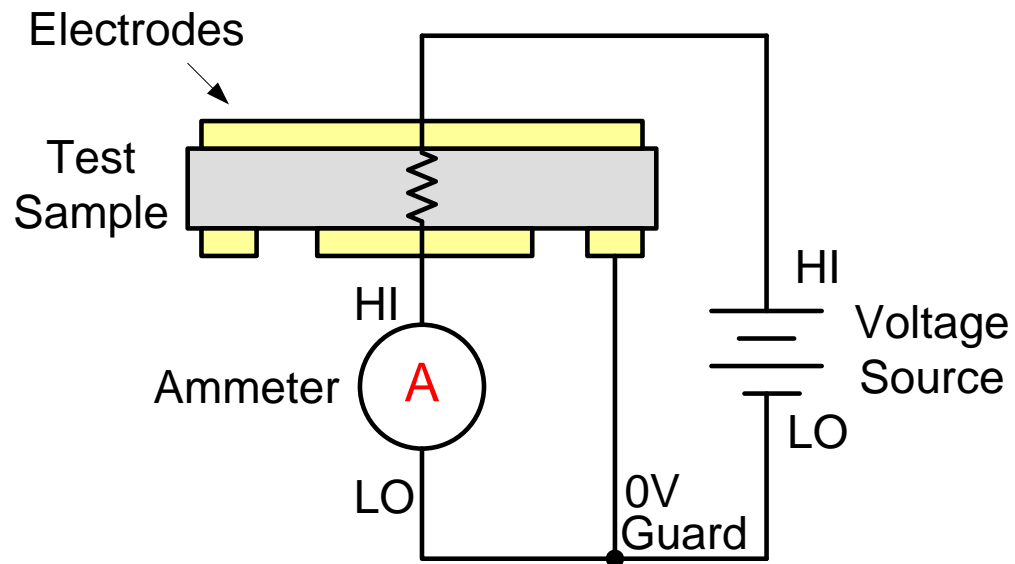
DMM

DMM

电表

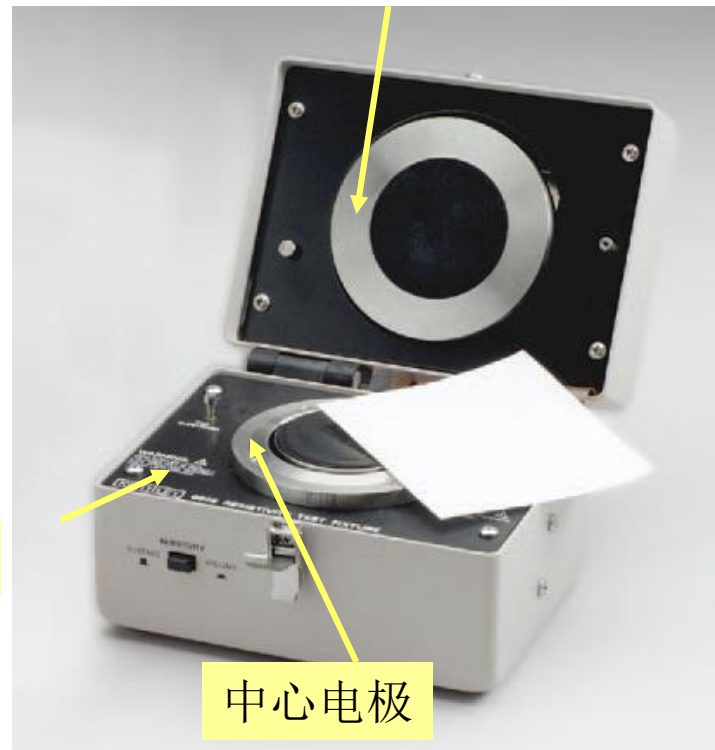


# 使用Model 8009电阻系数测试夹具 测量体积或表面电阻



体积电阻系数用来衡量经过材料的泄漏电流。

顶部电极



环

中心电极

**Model 8009**  
夹具盒

# Tektronix

---

## 应用实践部分

---



# 凝聚态物理中的电输运特性测试

—

# 凝聚态物理

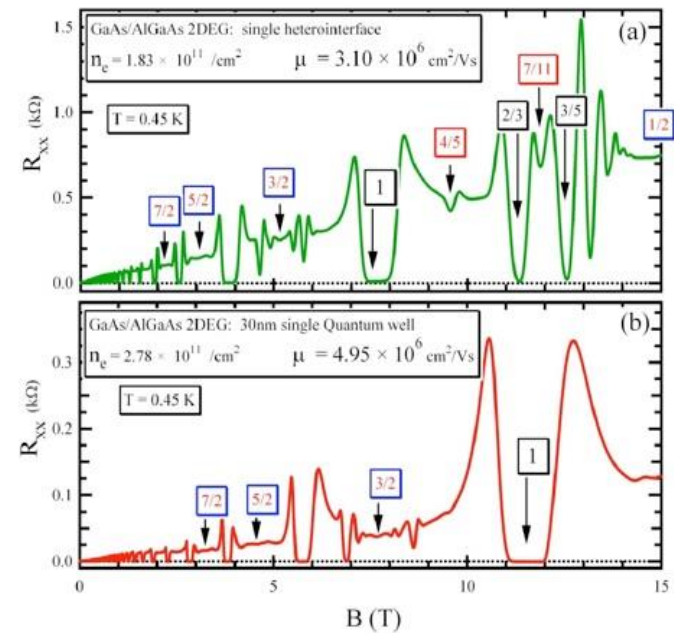
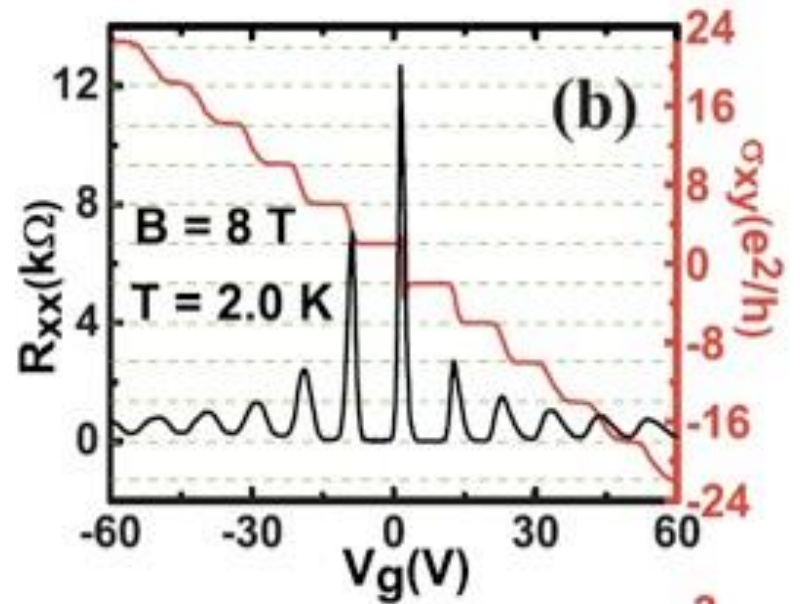
- 所谓“凝聚态”，指的是由大量粒子组成，并且粒子间有很强相互作用的系统。
  - 低温下的超流态，超导态
  - 玻色-爱因斯坦凝聚态
  - 磁介质中的铁磁态，反铁磁态等
- 当代物理学把固态物质和液态物质统称为凝聚态物质
  - 晶体、非晶体与准晶体等固体物质
  - 稠密气体、液体
  - 介于液体与固体之间的各种凝聚态物质
- 凝聚态物理的研究方向
  - 半导体物理
  - 超导物理
  - 强关联体系的基本电子性质
  - 拓扑量子态和铁基高温超导电性的研究
  - 纳米材料科学的研究
    - 低维自旋和电荷系统、纳米功能材料的基本电子性质研究
  - 自旋电子学材料基本性质
    - 如反常霍尔效应、量子霍尔效应、自旋霍尔效应等



# 凝聚态物理中的重要测试

## 电输运测试

- **电输运**性质是材料的最基本最重要的物理属性之一
  - 与电荷相关的基本物理行为
    - 如电阻、Hall电阻,
      - 典型阻值在  $k\Omega$ , 极端情况下可能  $M\Omega$ 甚至  $G\Omega$
    - 测试材料电压、电流、电阻率 vs 磁场、温度、压力.....
      - 通常在超高阻抗及超导环境下测试
  - 相关的物理效应
    - Shubnikov-de Haas量子振荡、量子霍尔效应等
  - 多种材料的基础研究
    - 量子材料/超导材料/半金属材料/自旋特性/异质结构材料.....



# 电输运特性测试条件

- 常规条件

- 超导 (0.1mK~)

- 稀释制冷机 (Dilution Refrigerator)

- Quantum Design; Oxford; Janis

- 主流用制冷机 Quantum Design PPMS® - 综合物性测量系统 (Physical Property Measurement System )

- 牛津有干式制冷机

- 可能用低温探针台

- Lekshore、懿宏

- 磁场 (~16T)

- 其他条件

- 核磁

- 压力

- 光

- .....

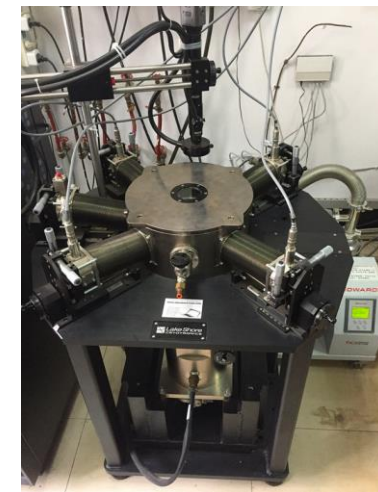
- 极端条件

- 超导的前提下

- 强磁场 (~100T)

- 超高压 (~100GPA)

- 其它极端条件



# 电输运特性测试系统

- 综合物性测试系统 (PPMS)

- 已经设计好了全自动的测量软件, 和具有标准测量功能的硬件

- 电输运测试

- 电阻率、微分电阻、霍尔系数、伏安特性、临界电流、

- 磁学测试

- 交流磁化率、磁滞回线, 磁阻、

- 热学测试

- 比热、热磁曲线、热电效应、塞贝克系数、热导率

- 光学测试

- 压力测试

- 形貌表征

- .....

- 电输运测试指标可以满足多数应用场合

- 6221/2182 + 锁相放大器满足更高精度需求

- 静电计满足介电常数测试需求



## Electrical Transport (ETO) Specifications (for zero-field) (Values refer to the standard 4-probe configuration unless otherwise noted)

### Resistance [R]

Excitation Mode:	AC
Range:	10 $\mu\Omega$ to 10 M $\Omega$ 2 M $\Omega$ to 5 G $\Omega$ (high-impedance 2-probe)
Accuracy*:	$\pm 0.1\%$ typical, $\pm 0.2\%$ maximum; R < 200 k $\Omega$ $\pm 0.2\%$ typical; R $\approx$ 1 M $\Omega$ $\pm 2.0\%$ typical; R < 1 G $\Omega$ (high-impedance $\pm$ 5.0% typical; R = 5 G $\Omega$ (high-impedance 2-probe)
Sensitivity:	10 n $\Omega$ RMS typical

### Drive Parameters

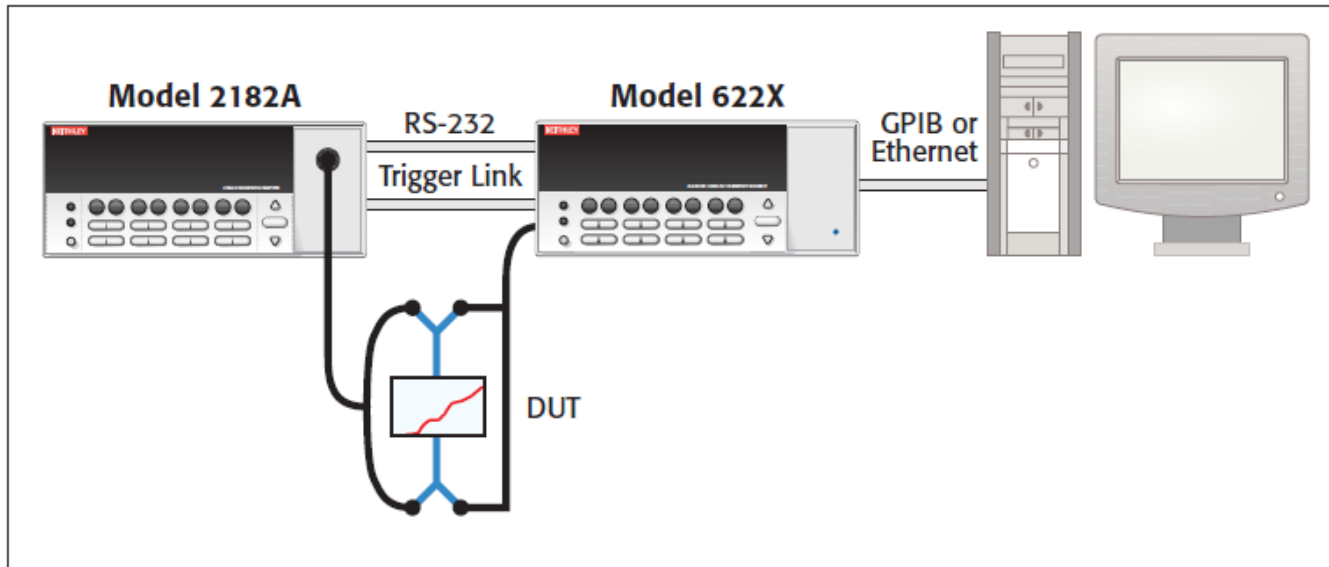
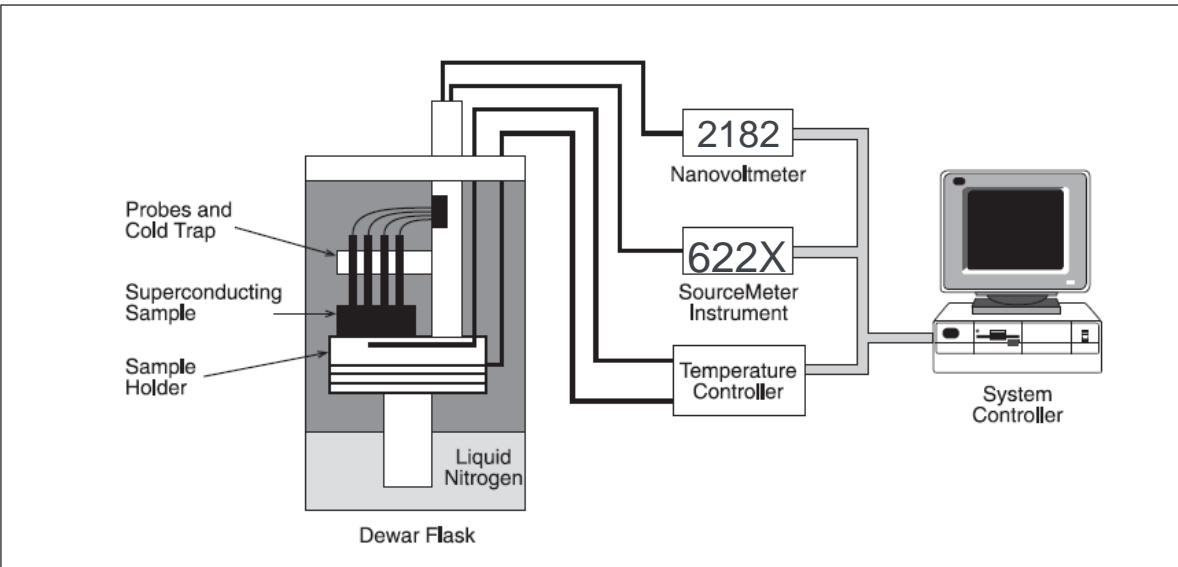
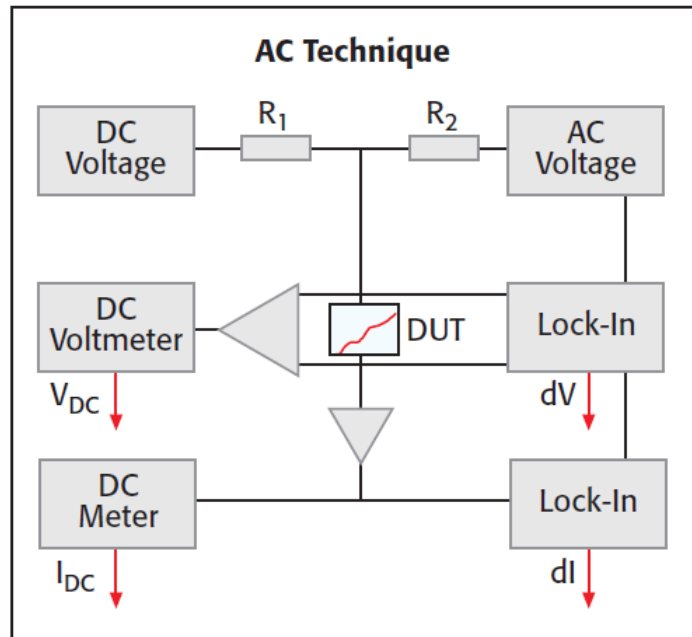
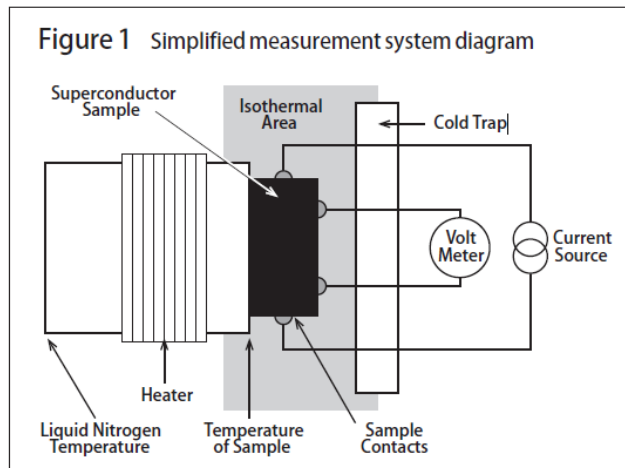
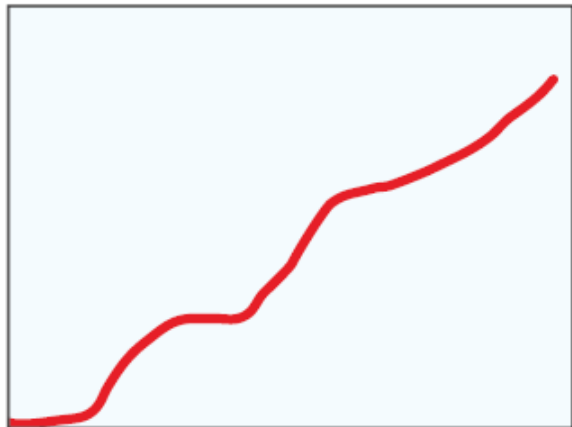
Frequency Range:	0.1 to 200 Hz (nominal)
Current Amplitude Range**:	10 nA to 100 mA
Current Amplitude Accuracy:	$\pm 0.4\%$ , 100 nA drive; improves for larger amplitudes
Voltage Amplitude Range:	10 mV to 10 V (high-impedance 2-probe)



# 电输运特性测试系统面临的挑战

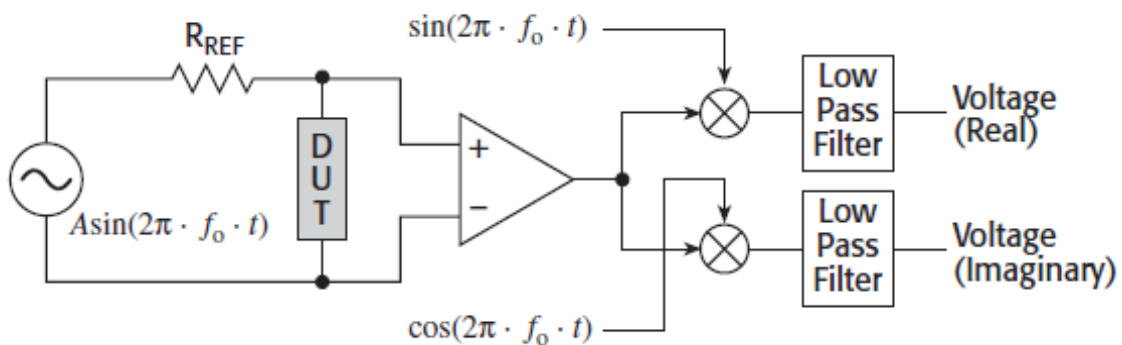
## 超导条件下的测试

- 极小电阻条件下测试
  - 弱电压
- 微纳器件测试
  - 微分电导测试
    - Delta 模式
    - AC 模式

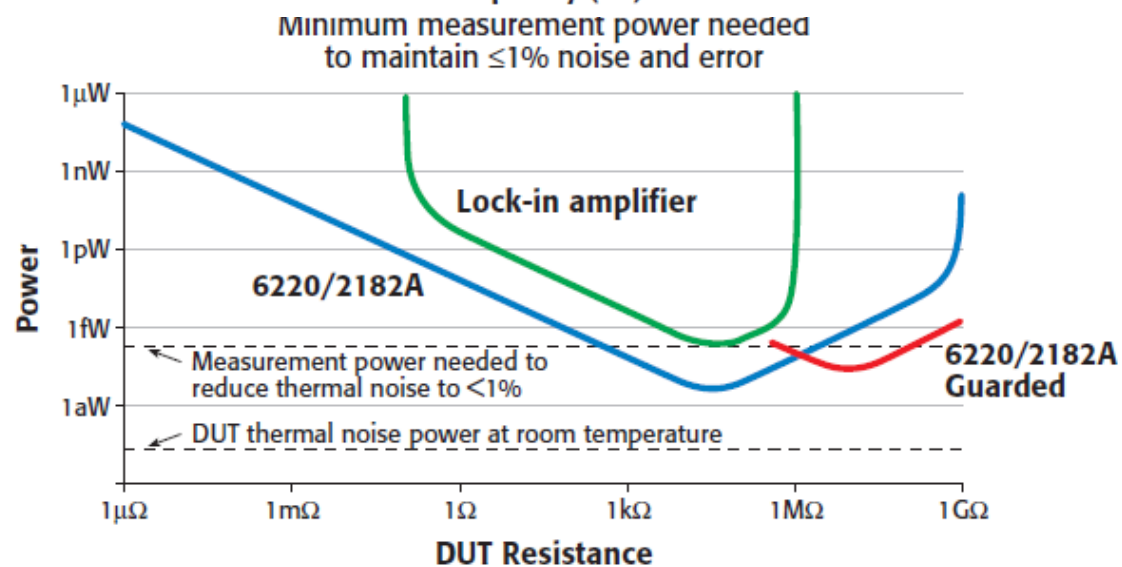
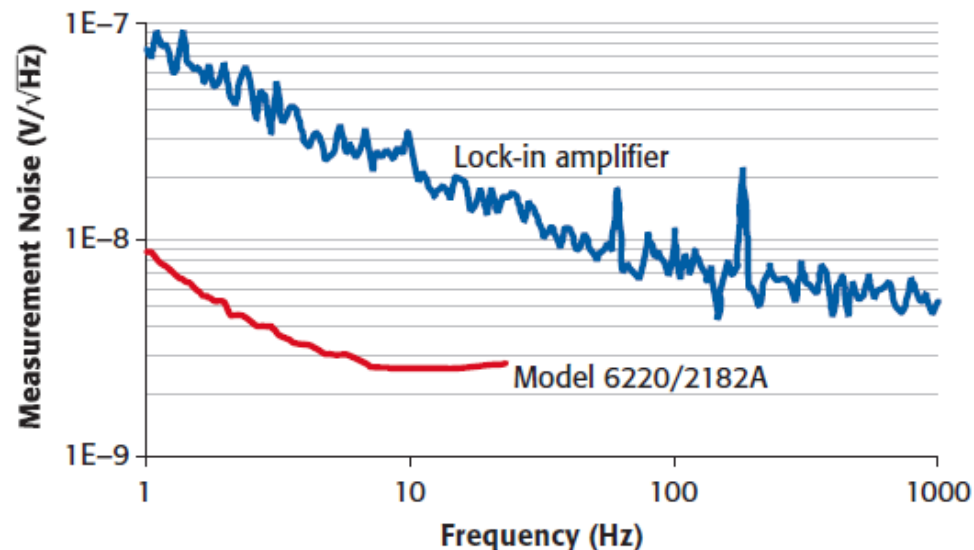


# 电输运特性测试系统面临的挑战

## AC 与 DC 法对比与应用

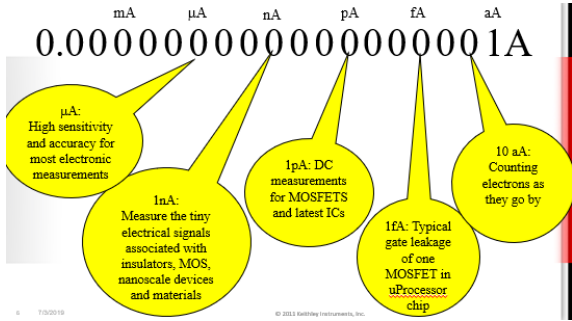


- 锁放较适合  $100\text{m}\Omega \sim 1\text{M}\Omega$  范围的测试
- 锁放可在更高频率应用
  - 如脉冲测试
- Delta 模式更适合低于  $100\text{m}\Omega$  的测试及大于  $1\text{M}\Omega$  测试
- Delta 模式可测试更低电平的信号
- 通常在电输运测试时，两种方式相辅相成

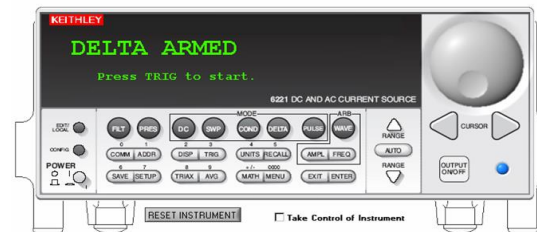
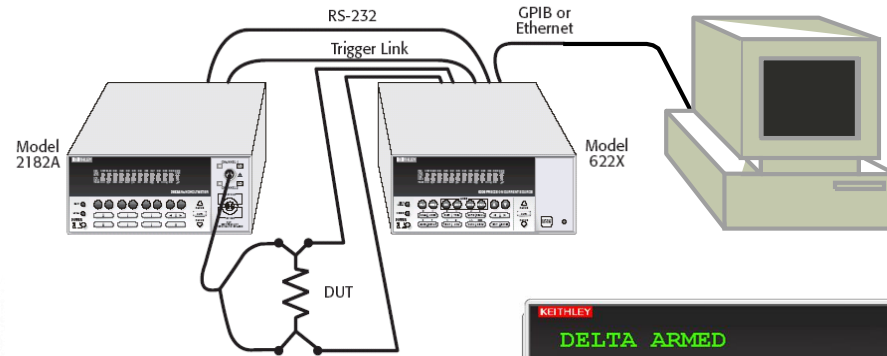


# 泰克与量子材料及电输运测试

## 吉时利源表及小信号测试仪器的用武之地



Patent	Patent #	Product(s) Where Implemented
Source Measure Unit Current Preamplifier	6,069,484	6430
Low Leakage Solid State Switch	5,994,947	6430
Glitchless SMU Range Changing using Secondary Feedback (Source Measure Unit Having Secondary Feedback for Eliminating Transient During Range Changing)	6,262,670	2400, 2410, 6430
Automatic Ranging Current Shunt (Self Config Current Sense)	7,276,893	26xxA, 26xxB (all of them)
Source Measure Circuit (Impedance Hider)	7,202,676	26xxA, 26xxB (all of them)
Output Leakage Compensation and Method	8,055,468	2636B
Dielectric Absorption Compensation for a Measurement Instrument	8,903,687	Circuit in 26xxA/26xxB
Test Instrument Network (Dynamic TSP-Link Network Subdivision (DTNS))	7,680,621	All TSPLink products: 3706, 3706A, all 26xxA (incl 2651A/2657A), all 26xxB (minus 26x4B), 707B/708B, 2450, 2460, 2461, 7510, 6500, 6510, 2470, 7512, (** Also on S530's and 588x's that include any of these instruments.) Possible future use on 4200A.
"Measurement Device Display Screen with a Graphical User Interface" Next Previous Channel Widget (Design)	D0840424	6510, 6500



# 电输运特性测试仪表配置

- 源表

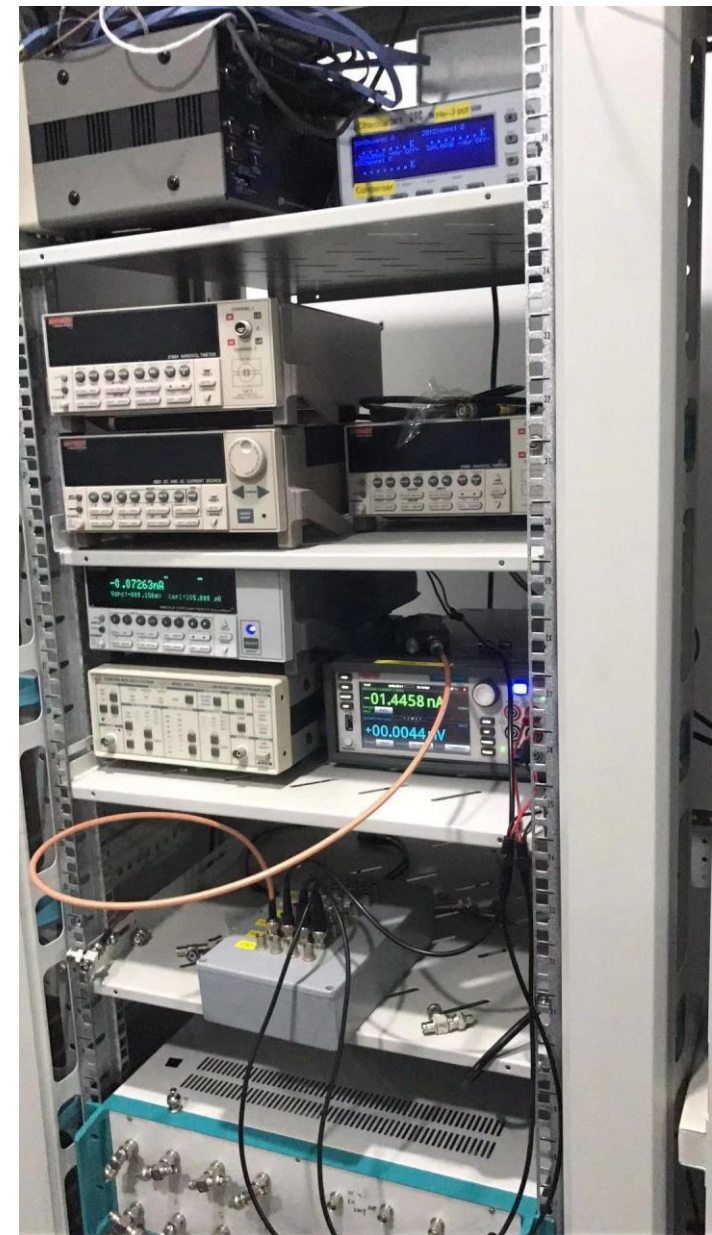
- 6221/2182
- 24XX 或26XX
- 以上至少一套

- 锁相放大器

- 斯坦福或 NF
- NI 数采采集数据
- 或泰克14bit 示波器采集

- 其它

- 万用表
- AFG
- 示波器



# 泰克电输运测试方案配置

- 每台制冷机(He3 0.4K, He3/He4 50mK)如果需要同时测试多个样品
  - Quantum Design PPMS 共12 根线, 每四根连一套源表, 每八根线连一套6221/2182
    - 共配4套源表, 4套8位半万用表及2套小信号
  - Oxford 有更多的线 (51~200)
  - **测比热与磁阻时, 同一过程无法用轮回方式**
- 如果不需要同时测试多个样品
  - 一套 6221/2182+24XX(26XX)
  - 泰克开关阵列 (参阅《泰克开关选型指南》)
- 通常加一台备用 (可能是高压等特殊配置)
- AFG30K 用于交流激励
- 可选配4200 测试系统用于更复杂的半导体特性分析

Keithley 6221/2182A	微弱电流源+纳伏表	8
Keithley 6514	飞安表, 静电计	4
Keithley 6430	超高精度源表, 高输入阻抗	2
Keithley 2636B	双通道高精度源表, 高输入阻抗	2
Keithley 2400	源表, 200V	16
Keithley 2410	高压源表, 1100V	2
Keithley 2604B	双通道源表 40V	8
Keithley DMM6500	数字万用表	16
Keithley 2002	高精度数字万用表	8
Keithley 4200A-SCS	半导体测量仪主机	1
Keithley 4200-SMU	IV模块	3
Keithley 4200-PA	前置放大器	3
Keithley 4200A-CVIV	I-V/C-V 多开关模块	1
Keithley 4200-CVU	CV模块	1
Keithley 8101-PIV	夹具盒	1
AFG31102	信号发生器, 100MHz, 2通道	4
AFG31152	信号发生器, 150MHz, 2通道	4

北京量子院配置

# 高频输运特性

- 在低频输运配置基础上，增加高频特性测试

- 低频输运

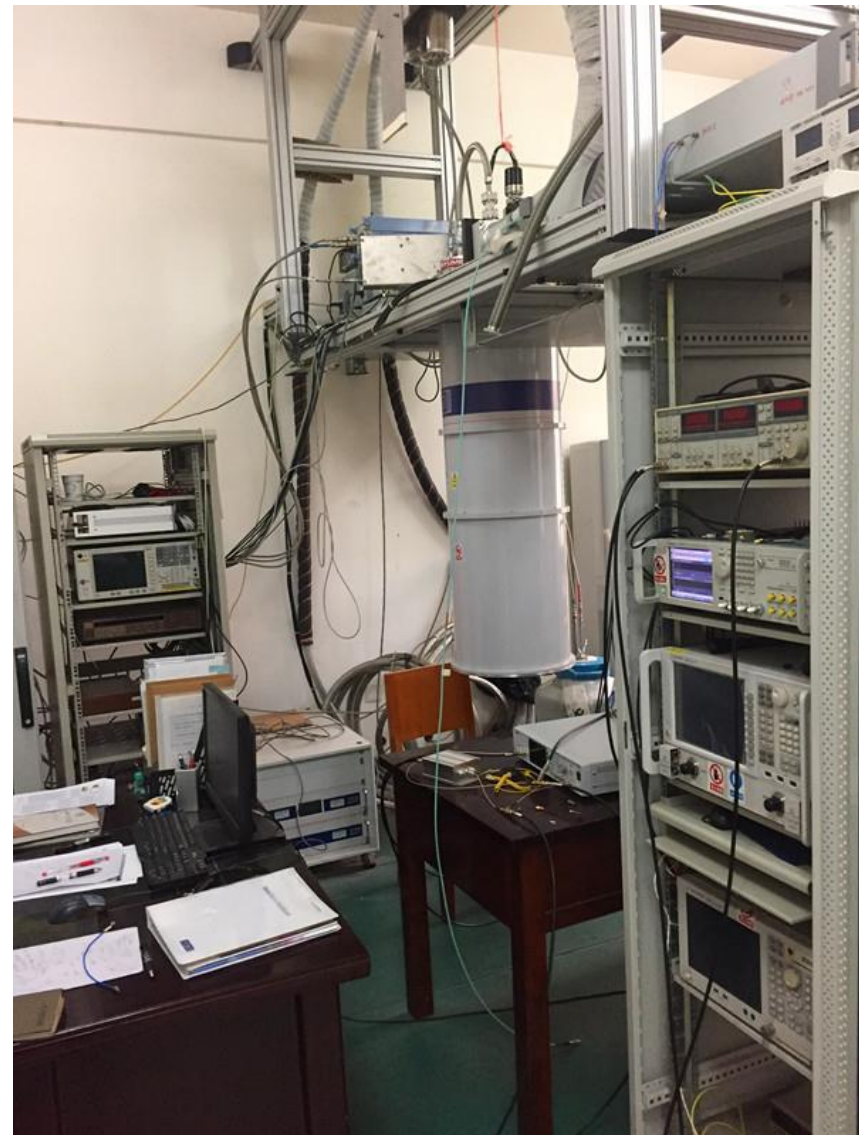
- 6221/2182
- 24XX 或 26XX
- 锁相放大器



- 高频输运

- 主要应用于存储相关的研究
- 任意波形发生器
  - 泰克AWG70K 系列
  - AWG5200 系列
- VNA
- 频谱仪

- 10 Gsamples/s sample rate**
- 16 bit vertical resolution**
- 2 GHz (-3 db) bandwidth, usable to 8 GHz**
- 2 GSamples/channel memory**
- 70 dBc SFDR (In-band, 10 GS/s, DC-1.25 GHz)**
- 1.5 Vp-p Diff @ 2 GHz**
- 85 to +10 dBm @ 10 MHz to 2 GHz**



# Tektronix

---

## 电输运特性的应用

---



# 量子信息技术的应用



利用微观粒子的量子态或量子纠缠效应等进行密钥或信息传递，基于量子力学原理提供无法被窃听的安全性保证。



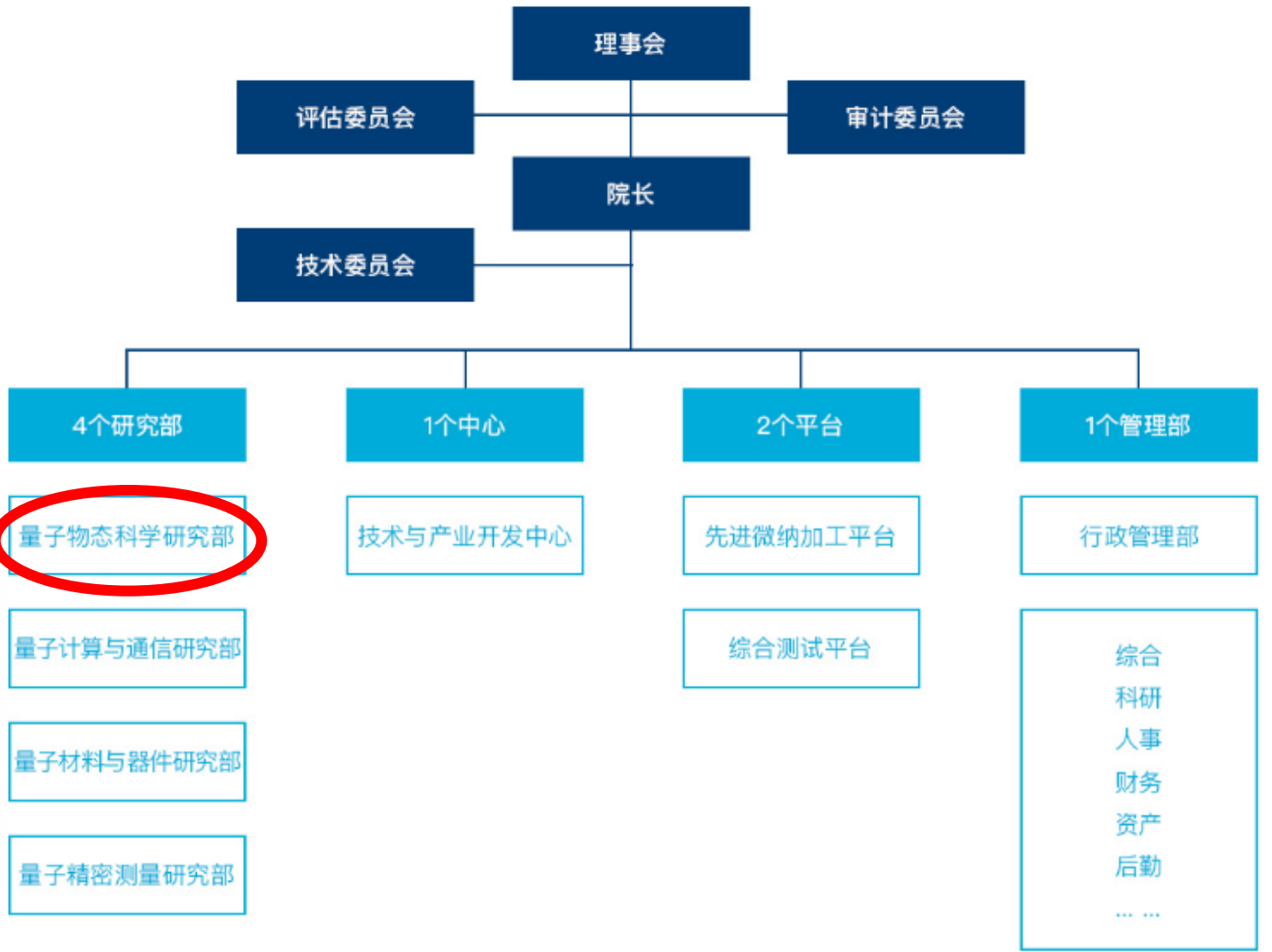
以量子比特为基本单元，通过量子态受控演化实现信息编码和计算存储，具有巨大信息携带量和超强并行计算能力。



基于量子态测量，对被测系统的各种物理量执行变换和信息输出的精密测量技术，测量精度、灵敏度和稳定性优势明显。

**基础研究 - 量子材料、量子光学**

量子理论与算法

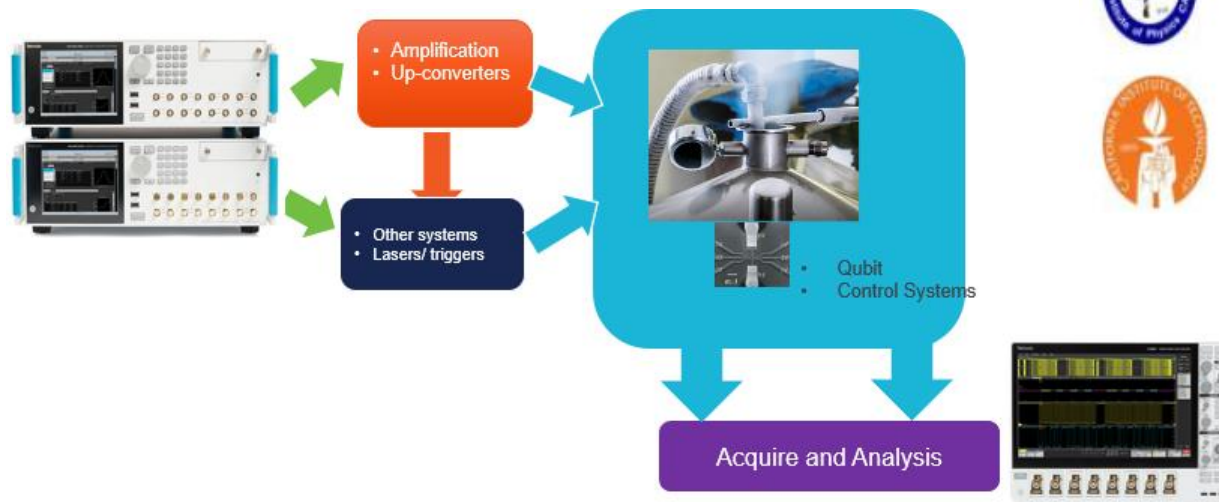




# 泰克与量子计算

• 国内外量子计算用户几乎都购买了泰克测试系统

- 超导
- 离子阱
- 金刚石
- 核磁



University of Colorado  
Boulder | Colorado Springs | Denver | Anschutz Medical Campus



CENTER for QUANTUM COHERENT SCIENCE



TU Delft

南京大学

阶段分步	该阶段的描述	所需要的仪器	AWG在该阶段中的作用	该阶段对AWG的要求
1.初始化	量子的状态设置	AWG, 高精度电压源	需要产生窄脉冲或者正弦波做为状态跃迁的触发,	AWG的精度和幅度
2.操控	量子的状态跃迁	AWG	需要产生窄脉冲或者正弦波做为状态跃迁的触发,	
3.读取	跃迁后的状态采集和分析	高采样和高精度示波器	用示波器进行采集信号的相位信息	关注脉冲的瞬态响应, 关注边沿的上升时间和过冲, 尤其是过冲指标越小越好。要求高采样率和精度。

# 泰克与量子通信

- AWG52+70K+O/E转换及探头+DSA8300+RTSA



Tektronix

前沿科技方案

## 典型的量子通信和超导量子计算测试系统配置

Tektronix 作为国际领先的测试测量仪器提供商保证了测试仪器的精度和技术, 提供国际领先的, 基于可扩展的仪器设备的量子通信、量子计算模拟及测试系统整体解决方案, 提高了量子实验测试效率; 同时可自定义的测试软件, 用户还可以基于现有的应用开发环境开发自定义的应用, 从而进一步扩展量子信息测试系统的工具箱。

### 系统特性:

- 充分缩短量子实验测试时间
- 自定义测试软件界面和自动化校准系统
- 灵活可配置的多通道控制系统
- 可扩展的系统架构, 可满足量子计算、量子通信等实验测试要求

### 主要组成单元:

#### 多通道任意高速波形发生器

高达 16 位垂直分辨率, 最高 10GS/s 采样率, 8 通道可编程信号通道, 可实现多台同步, 提供更多通道选择, 满足量子比特的精确控制。

#### 数字采样单元

超低噪声示波器, 垂直分辨率最高可达 12 位 ADC, 带宽支持从 1GHz 到 70GHz 实时带宽, 支持从 4 通道到 8 通道。采样率从 25GS/s 到 200GS/s。

#### 高精度电源

独立可编程电源精密电源, 提供  $\pm 5V$ , 误差不超过 1 个 PPM。

#### 主控电脑

安装有综合控制及分析软件, 主控电脑 PC 可以控制所有的系统单元仪器, 同时实现数据的自动采集, 处理以及图形化测试结果。



[www.tek.com.cn](http://www.tek.com.cn)

泰克中国客户服务中心

全国热线: 400-820-5835



**Tektronix**

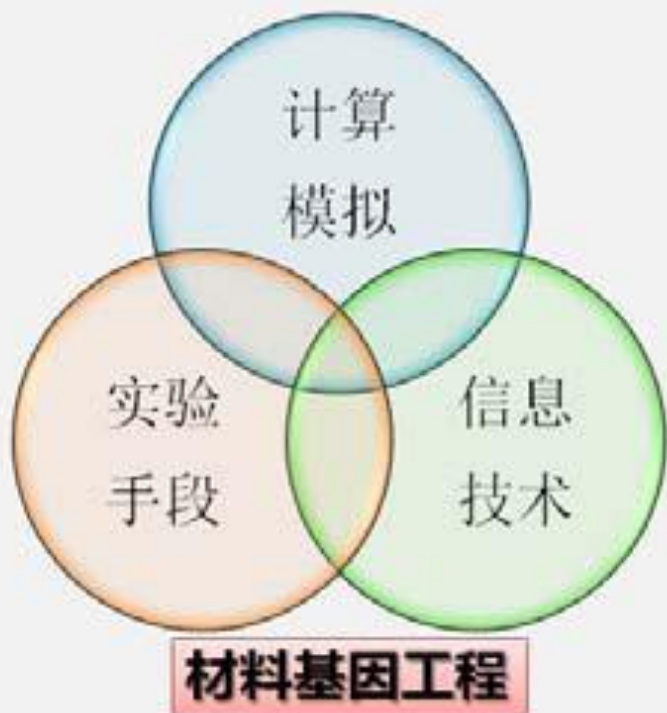
---

料基因组运输测试

---

# 材料基因组研究

- 材料基因工程是借鉴生物学上的基因工程技术，探究材料结构（或配方、工艺）与材料性质（性能）变化的关系，并通过调整材料的原子或配方、改变材料的堆积方式或搭配，结合不同的工艺制备，得到具有特定性能的新材料。
  - 制备与表征涉及到测试

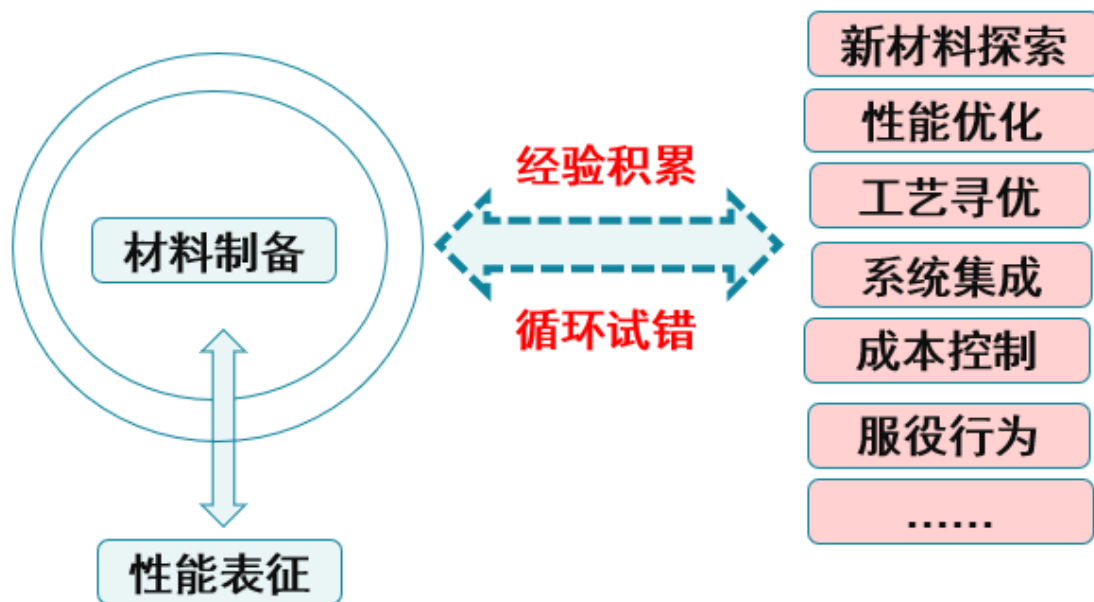


# 材料基因组研究

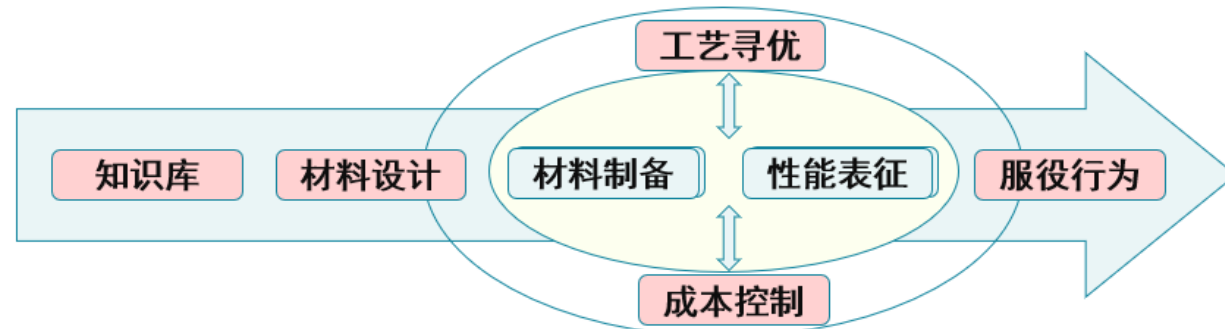
## 传统材料科学与材料基因研究方法对比

- 传统材料科学研究方法

- 以大量的材料制备为中心，强调经验积累
- 被动的性能表征



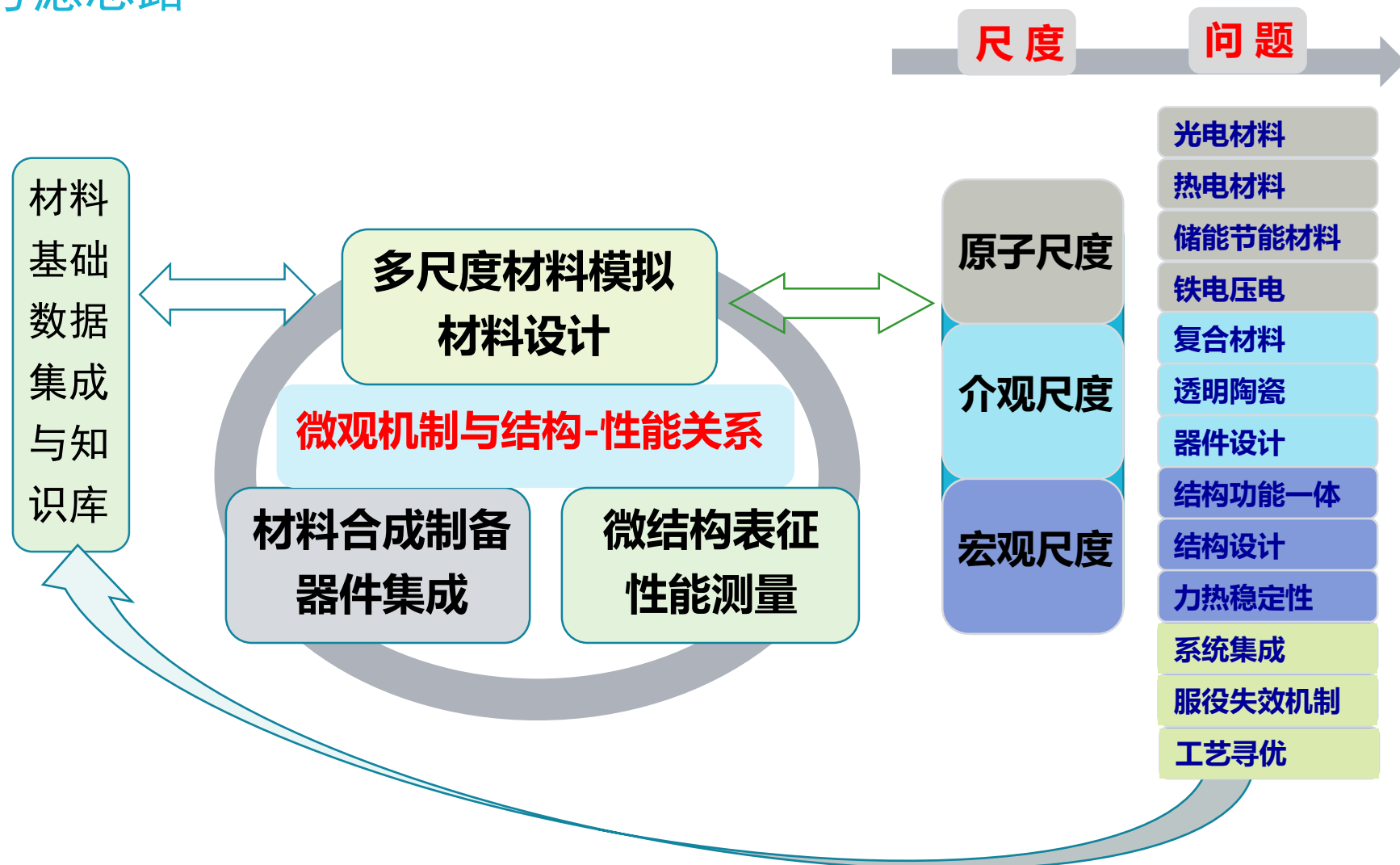
- 集成计算材料工程ICME的主要思路



- 构建“集成计算材料工程”研究平台，形成完整研究链，实现从“实验寻优”向“系统寻优”转变。

# 材料基因组研究

## ICME的考虑思路



# 材料基因组研究

## 与电学测试相关的高通量表征

- 材料基因高通量制备与表征与测试相关

- 结构分析
- 化学性质
- 力学性质
- 物理性质
  - 光学, 热学, 磁学.....
    - 可能用到多通道示波器及信号源
  - 电输运特性
    - 源表

- 北京怀柔科学城材料基因平台

子平台	子系统
计算与数据处理子平台	材料计算与数据处理子平台
高通量材料制备与快速检测子平台	单晶薄膜实验站
	合金材料实验站
	单晶块实验站
高通量技术支撑与研发子平台	高通量技术支撑与研发子平台

- 高通量材料制备与快速检测及技术支撑平台与电学测试有关



- 高通量测试的关键在于夹具装置的制备!

# 材料基因组研究

## 怀柔材料基因 PLD 项目 (PULSE LD)

### Combinatorial laser molecular beam epitaxy system integrated with specialized low-temperature scanning tunneling microscopy

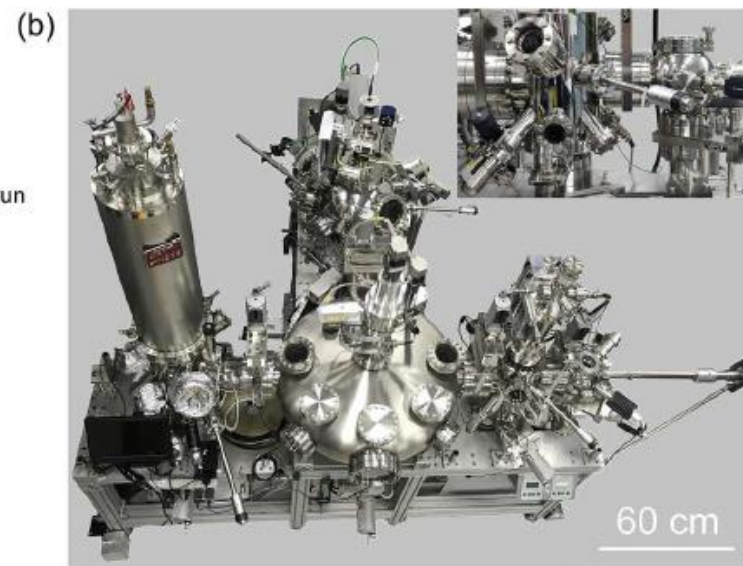
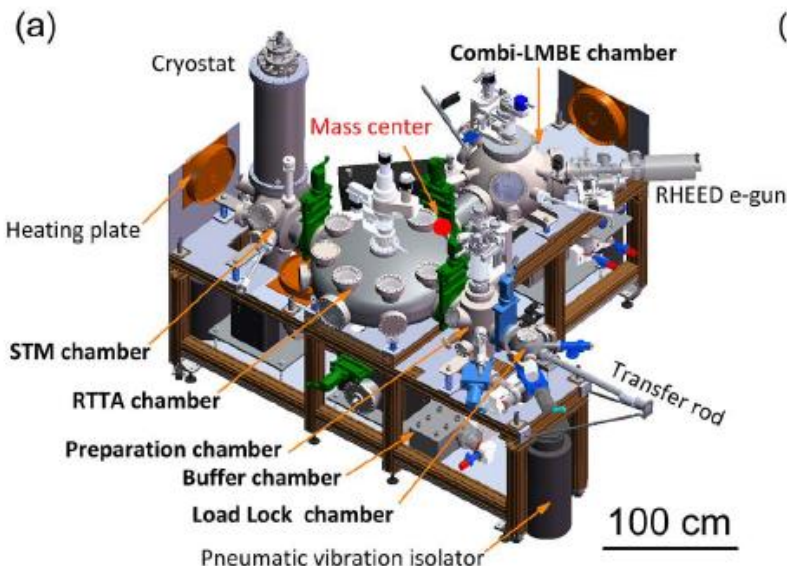
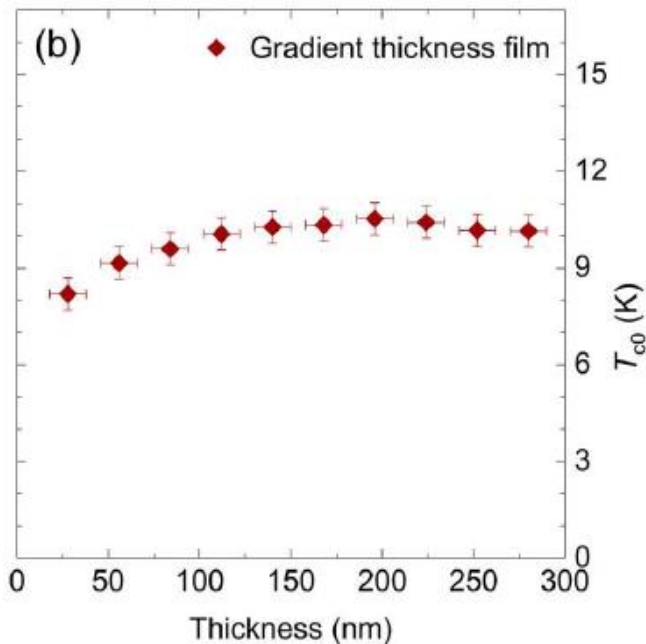
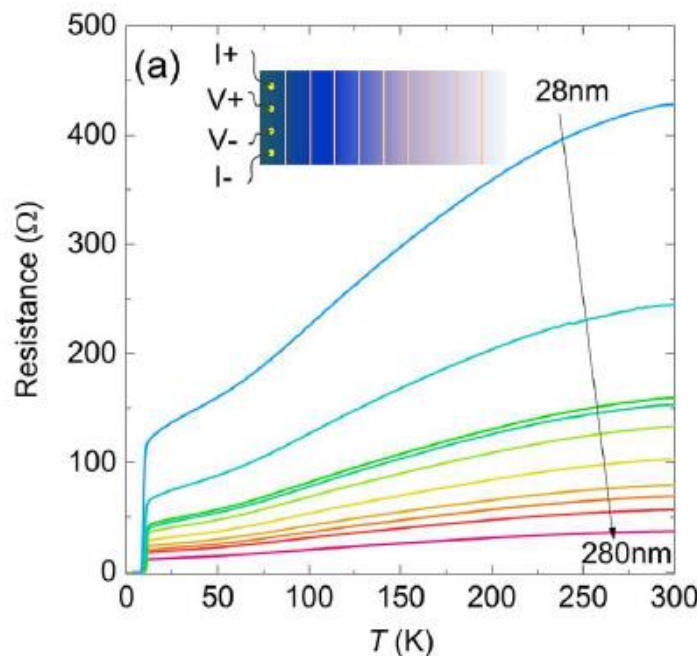
Cite as: Rev. Sci. Instrum. 91, 013904 (2020); <https://doi.org/10.1063/1.5119686>  
Submitted: 11 July 2019 . Accepted: 19 December 2019 . Published Online: 09 January 2020

Ce He , Zhongxu Wei, Zhongpei Feng, Xiaodong Yu, Beiyi Zhu, Li Liu, Kui Jin , Jie Yuan, and Qing Huan

#### 新一代高通量薄膜制备及原位表征技术研发获进展

材料对于推动生产力发展和社会进步起着举足轻重的作用。关键材料的研发周期更是直接决定了相关领域的发展进程。随着科技发展，对材料的功能和性能要求越来越高。传统材料研发手段也越来越难以满足现代社会生产发展的需求。以高温超导材料为例，超导转变温度高的材料往往组分结构十分复杂。随着组分增多，获得精确的组分依赖的相图的工作量呈几何级数增长。另外，采用传统的实验很难精确合成并重复获得某个特定的组分，而这往往是研究量子相变，破解高温超导机理的关键。

材料基因组技术的出现为快速构建精确的材料相图，缩短材料的研发周期带来了希望。组合薄膜制备技术作为材料基因组核心技术之一经历了三个发展阶段，即共磁控溅射技术、阵列掩膜板技术和激光分子束外延技术。目前，组合薄膜生长往往采用往复平行位移掩膜板的方式，这样不可避免造成累积误差，直接影响到薄膜制备过程中组分控制的精度。此外线性掩膜板反复变向及加减速操作也会加剧机械部分磨损，降低系统稳定性。另一方面，目前对组合薄膜高通量快速表征技术也存在不足，很多方法无法直接用于组合薄膜表征。以扫描隧道显微镜 (STM) 为例，其对样品表面清洁度具有很高要求，通常需要原位解理或制备样品；此外，有限的样品移动范围和不具备精确定位功能限制了STM组合薄膜表征上的应用；大多数商业化STM样品移动范围一般仅为数毫米且不具备定位功能。对于组合薄膜性质的研究来说，实际的测量位置与样品组分是一一对应的，失去了位置坐标就失去了组分信息。因此，发展更加精确的高通量薄膜制备和原位表征手段十分重要，并对包括超导材料在内的前沿研究领域具有重要意义。

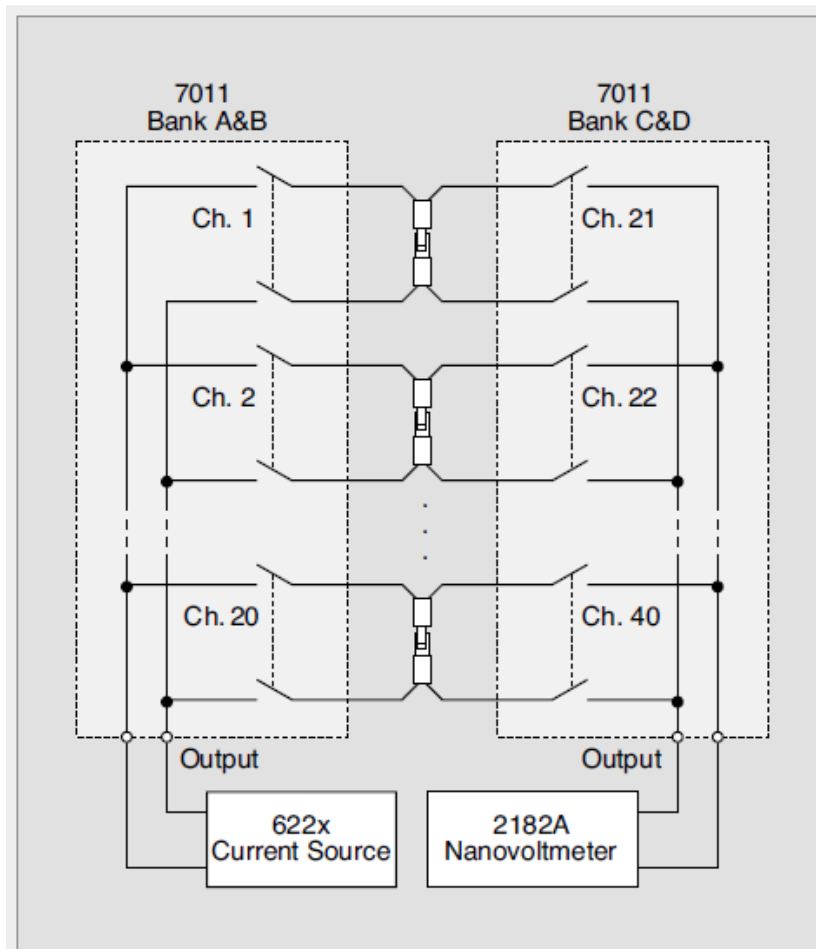
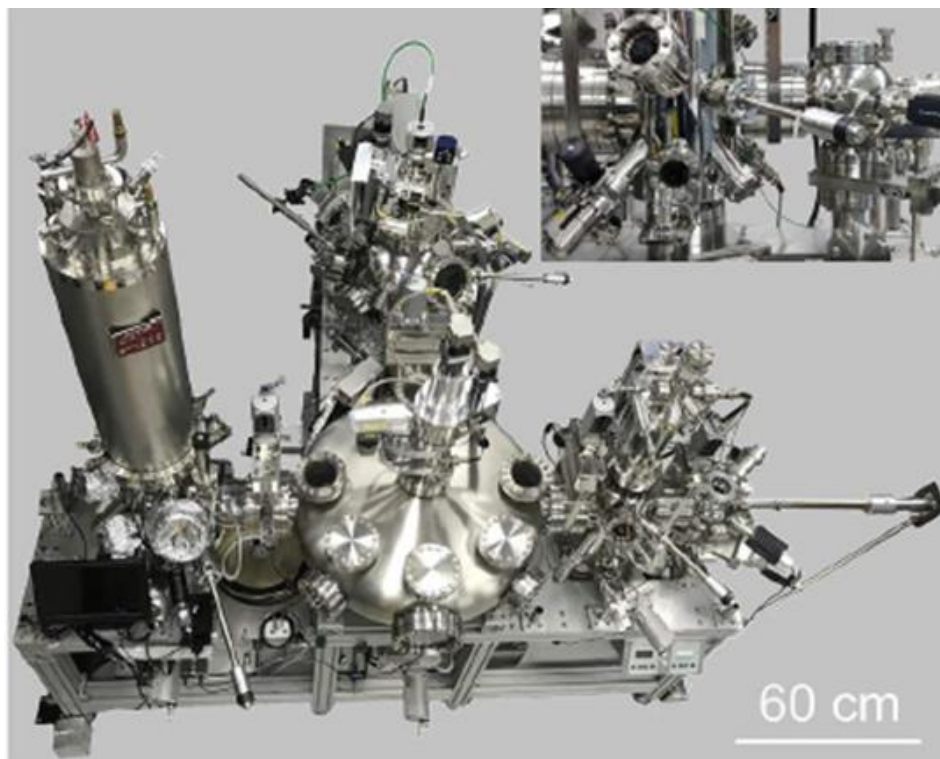




# 材料基因组研究

## 怀柔材料基因 PLD 项目 (PULSE LD)

- 每台稀释制冷机中共12根线，每四根连一组（三个）被测样品，共四组 12个被测样品
- 一套 6221/2182 + 7001 + 7011开关卡



# 材料基因组研究

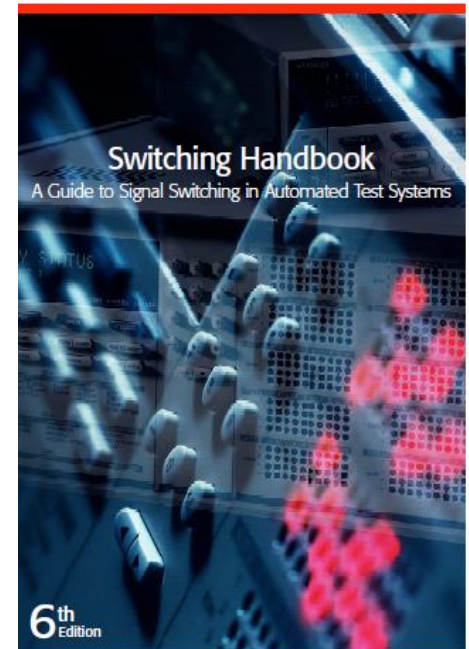
## 高通量电学测试方法

- 测试仪器 + 开关阵列
  - 适用于通道同时测试需求不高的情况
    - 开关轮询时间与通道数成正比
  - 测试仪器种类少但通道需求多
    - 可降低成本

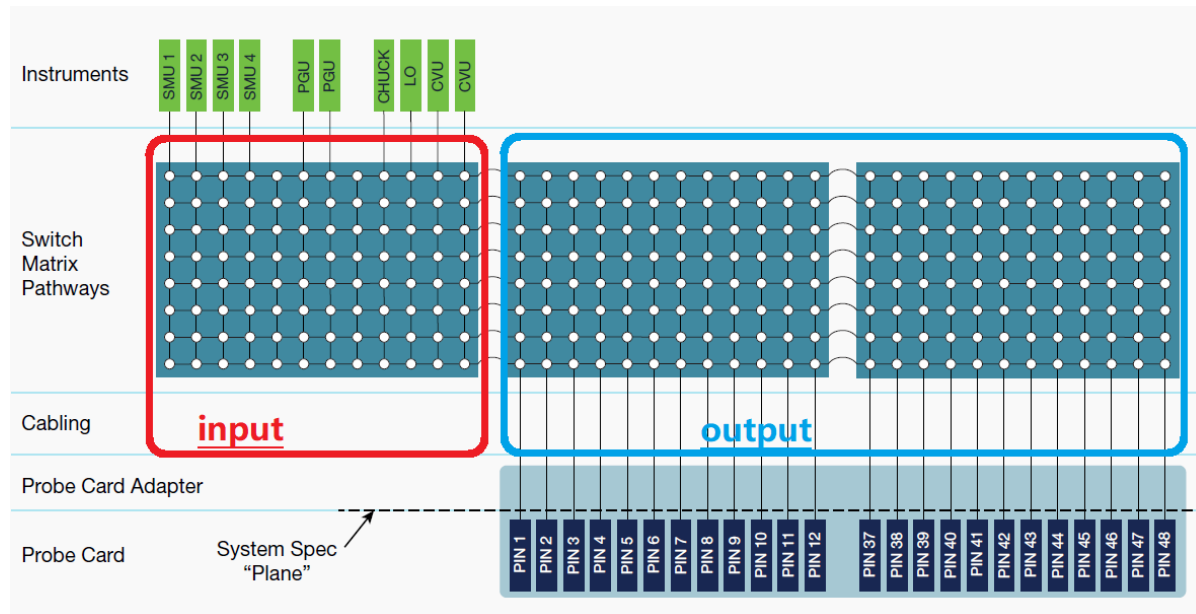
- 多通道同时测试
  - 适用于多通道同时测试需求高的情况
  - 通常也需要与开关矩阵配合以提高通道数
    - 轮询时间降低
  - 成本高

### 吉时利开关系列

- 直流开关阵列
  - 适用于 SMU , DMM
- S46 微波开关
  - 18/26.5/40GHz
  - 40 通道
  - 适用于示波器, 频谱仪, RF 信号源

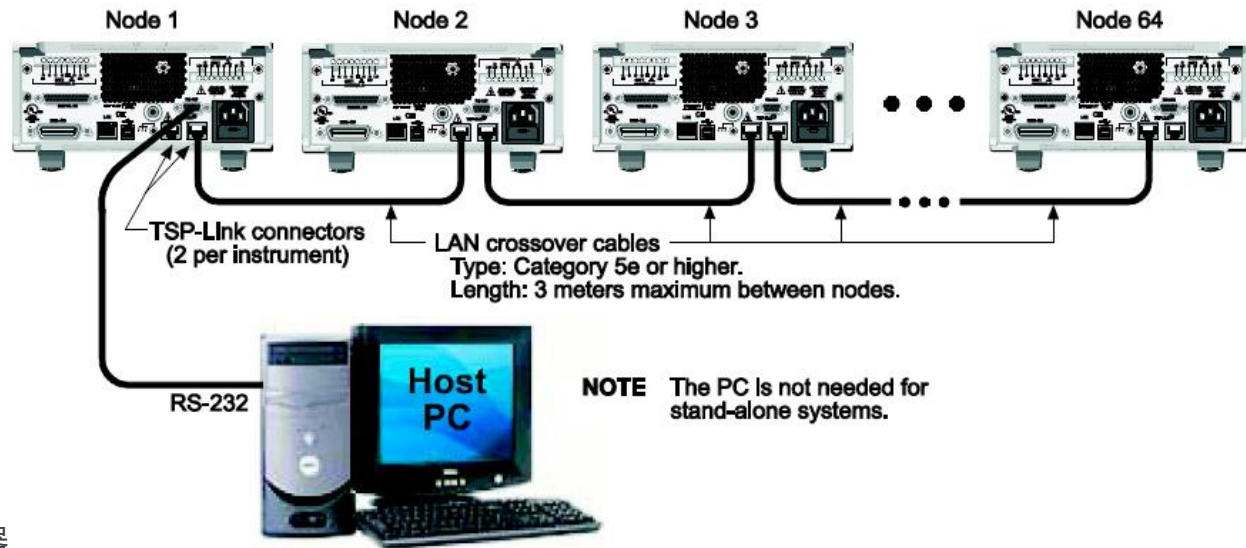
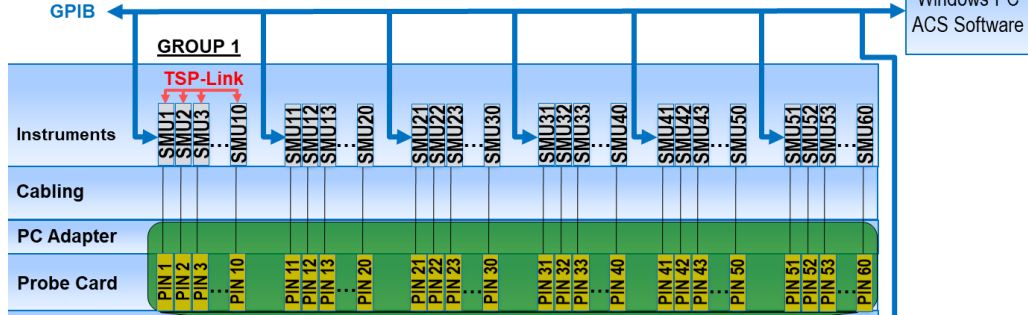


KEITHLEY  
A Tektronix Company



# 材料基因组研究

## 高速高通量直流测试 – TSP LINK®



### • 泰克专利的TSP (Embedded Test Script Processor)

- 高速 (100+ Mb/s) 串行总线，最多可连接 32 台 TSP-Link 仪器，操作如单台仪器
  - TSP-Link 网络中每台仪器被指定一个特定的介电号
  - 所有 TSP-Link 节点通过 TSP-Link 主节点控制
  - 系统中远端节点为从节点
  - 吉时利多数 SMU、DMM、开关都是 TSP 仪器 ( smart instruments) 、
    - 可以同时连接到 TSP-Link 网络中
- 用户可以建立 TSP-Link 分组，每组可同时运行相同或不同的测试序列
  - 每组可以包含多个 TSP-Link 节点，各节点由“组长”控制
- TSP-Link 网络主节点控制全部节点
- 每台 TSP-Link 仪器都有内部 FIFO Data Queue.
  - Data Queue 可以与 TSP-Link 组实时通信，并行运行
- 可灵活触发

### • 优势

- 可连接多种直流仪器，通过分组，组成复杂的测试网络
- 无需开关阵列，速度快

