

# 材料科学电学

## 性能研究中 几种特殊应用案例分享

【讲师介绍】

**孙勇**

泰克科技业务拓展经理

直播时间

▶▶▶ 9月17日 (周五) 14:30-15:40

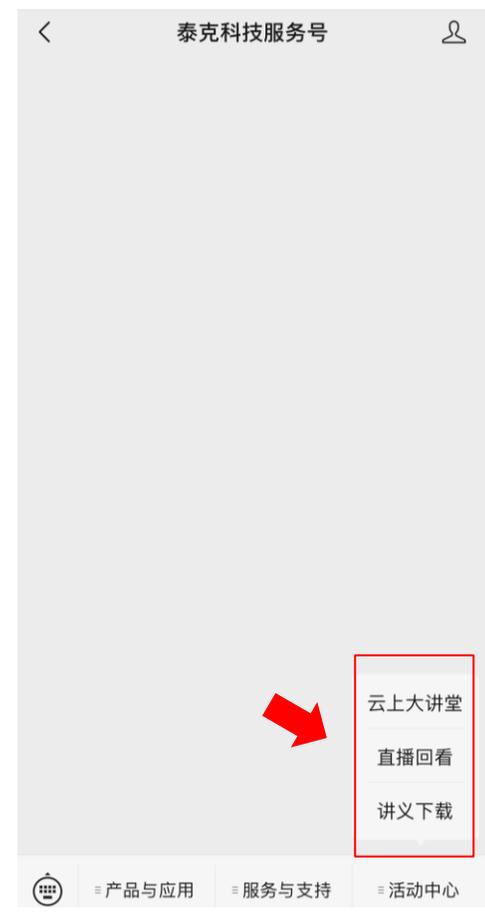


资深工程师在线“营业”，  
与您分享热门主题，共话前沿知识，  
每月两期，与您相约泰克直播间！

主题	时间
泰克和新能源直播的那些事儿	3.5
纳米发电机测试难点及解决方法	3.19
更高速率，更高密度，400G PAM4正出发	4.2
5G CPE芯片及模块应用测试	4.23
最新USB4规范解析及一致性测试	4.28
宽禁带半导体器件静态测试规范解读	4.30
新型计算框架及忆阻器、神经元网络测试	5.14
汽车雷达模块应用与测试挑战	5.28
AI加速卡高速接口测试	7.2
光通信眼图精讲	7.23
基于FET结构的生物传感器的测试	9.3
材料科学电学性能研究中几种特殊应用案例分享	9.17



关注“泰克科技”服务号



# 内容

- 当代材料科学研究概述
- 当代材料科学研究电学特性测试的挑战及测试要点
  - 当代材料科学电学测试挑战
  - SMU 选型考虑的因素
  - 泰克吉时利 SMU 选型指南
- 当代材料科学研究中几种特殊应用案例
  - 凝聚态物理中的电输运特性测试
    - 量子材料/超导材料/半金属材料/自旋特性/异质结构材料.....
  - 绝缘材料电阻测试
  - 薄膜材料的电阻率测试
  - 碳基材料电子器件测试
  - 晶体管生物传感器 (BioFET)
  - 有机场效应晶体管 (OFET) 测试
  - 4200A-SCS 材料测试应用

**Tektronix**

---

# 当代材料科学研究概述

---

# 当代材料科学

• 材料科学是研究材料的成分，组织结构，制备/加工工艺，材料的性能及应用的科学

◦ 基础研究

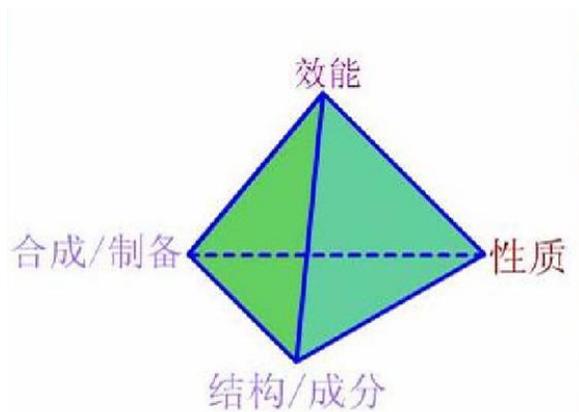
▪ 材料结构

- 晶体/非晶体
- 微观结构

▪ 材料性质

- 化学性质
- 物理性质
- 力学性质

◦ 工程应用



• 材料的分类

◦ 按时间

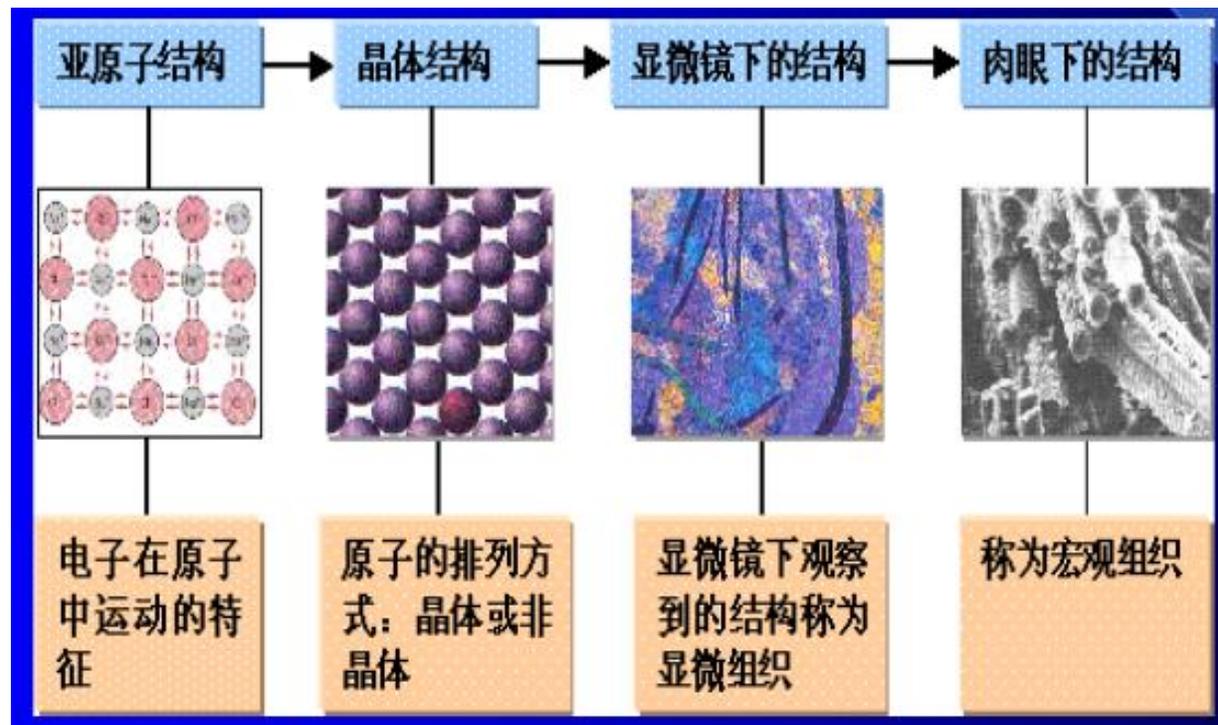
- 石器时代
- 青铜器时代
- 铁器时代
- 水泥时代
- 钢时代
- 硅时代
- 新材料时代

按结构

- 金属材料
- 陶瓷材料
- 高分子材料
- 复合材料

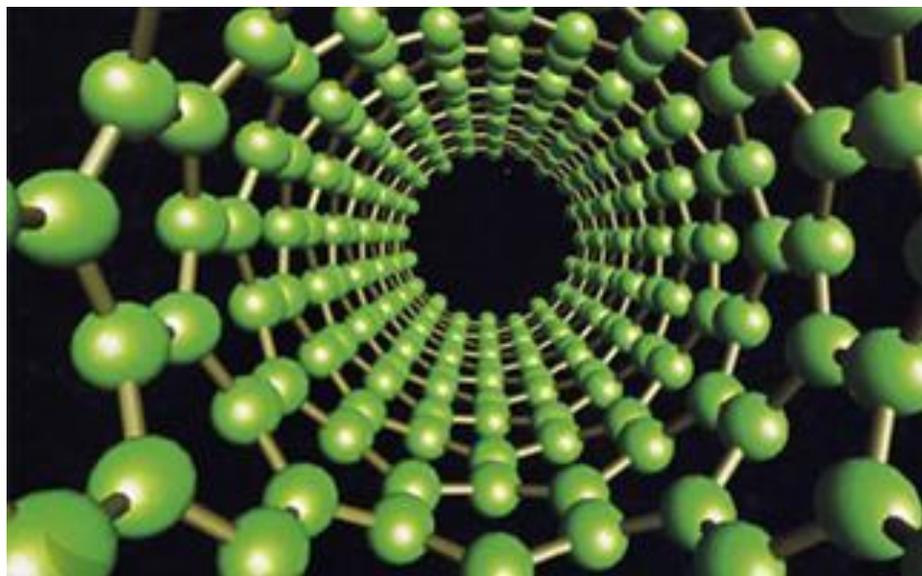
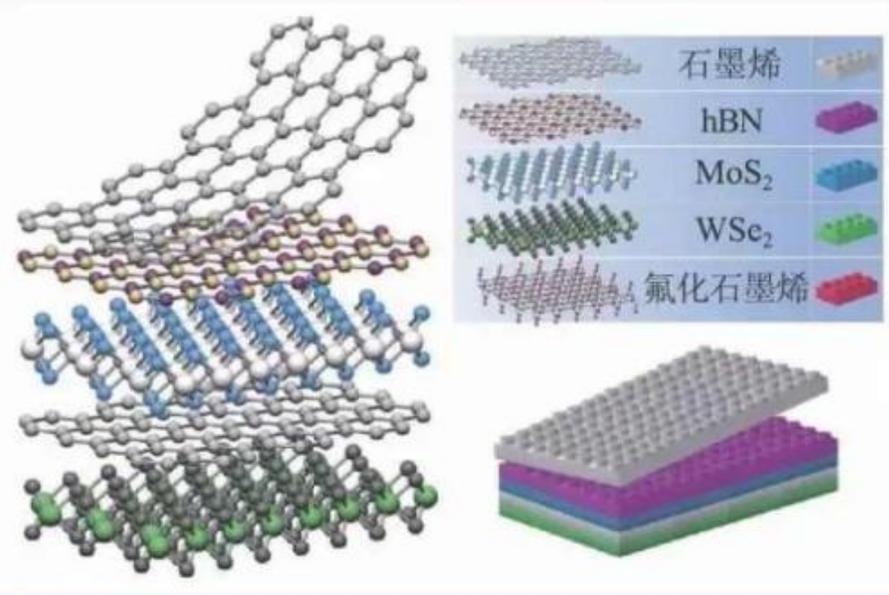
按物理性能

- 声
- 光
- 电
- 磁
- 热



# 新材料时代主要材料种类

- 半导体材料
- 量子材料
- 超导材料
- 纳米材料
  - 低维材料
    - 维数比三小的叫低维材料
      - 二维材料，包括两种材料的界面，或附着在基片上的薄膜。界面的深或膜层的厚度在纳米量级。
        - 石墨烯
      - 一维材料，或称量子线，线的粗细为纳米量级。
      - 零维材料，或称量子点
- 半金属类材料
- 异质结构量子材料
- 超硬材料
- 光电材料
- 其它.....



# 当代材料科学中的物理特性测试

- 力学性能
  - 材料的宏观性能
    - 弹性性能、塑性性能、硬度、抗冲击性能等
- 热学性能
  - 热力学性质
- 光学性能
  - 光发射性能、光吸收性能、非线性光学特性等
- 磁学性能
  - 磁电阻效应等
- 电学性能
  - 电导、电阻率、介电性能等

示波器

SMU





# 当代材料科学研究电学特性 测试的挑战及测试要点

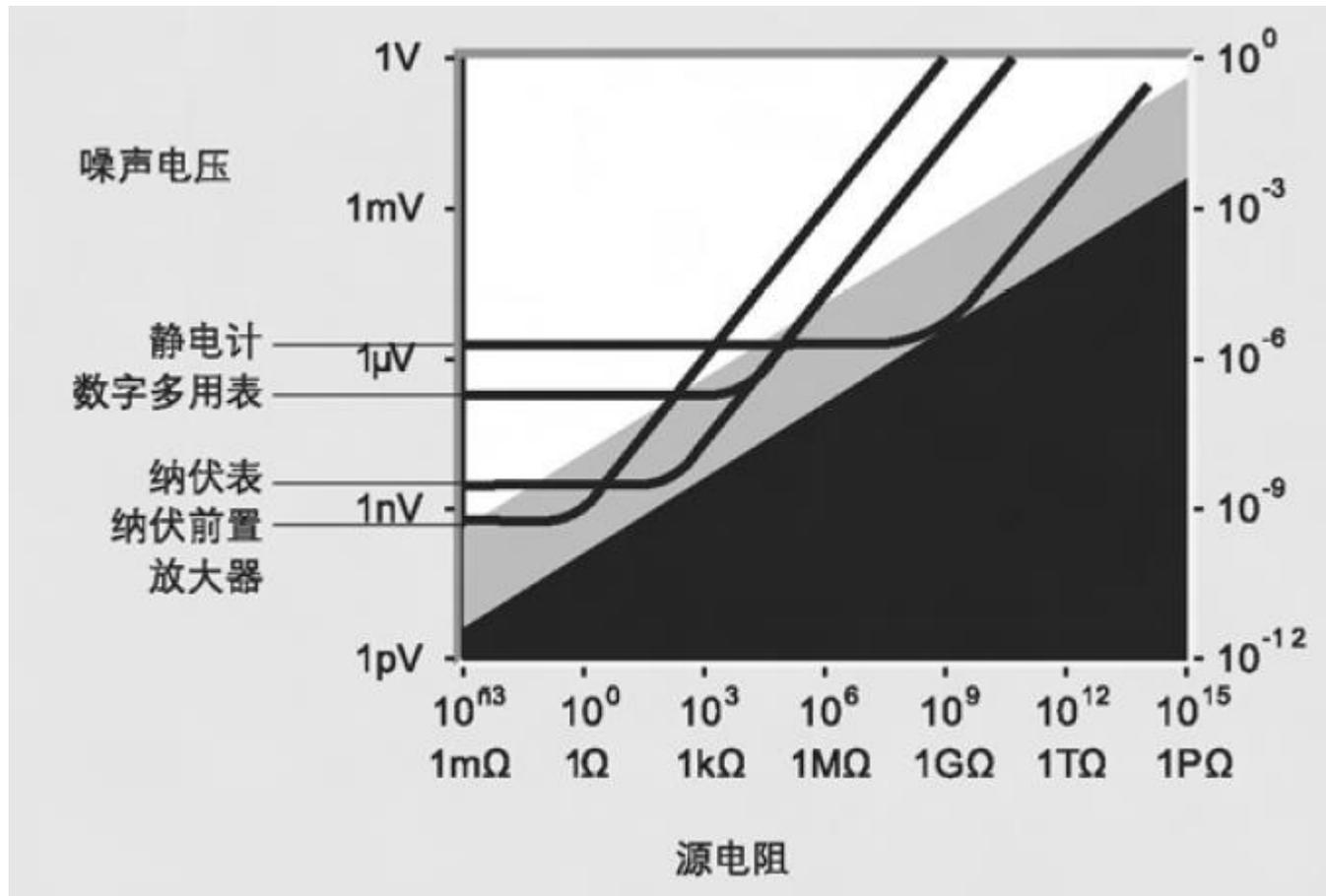
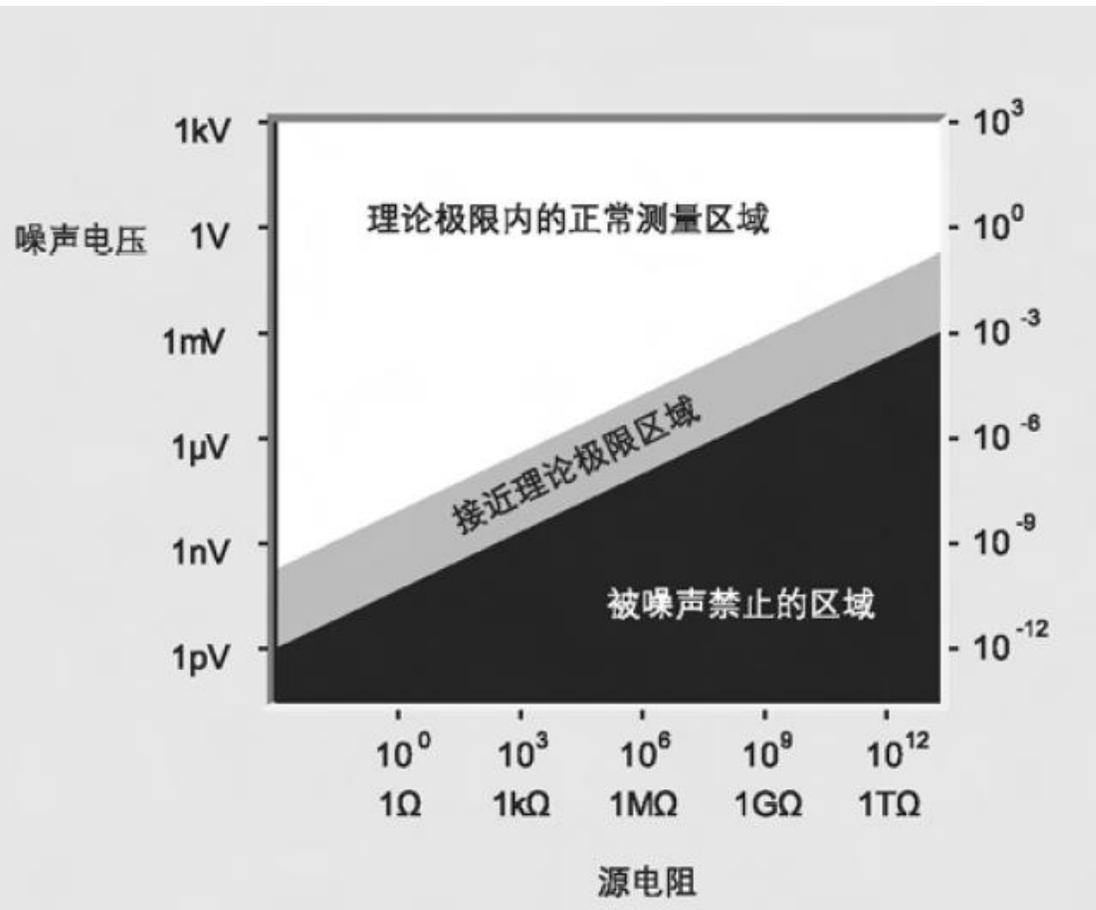


# 当代材料科学研究电学特性测试测试要点

## 直流电学量理论测试极限

- 电压测试理论极限

## 理论极限下适用的测试仪器



# 当代材料科学研究电学及输运特性测试测试要点

## SMU 选型考虑的因素

- 测量功能
  - 电压, 电流, 电阻, 电荷.....
- 量程和灵敏度
- 特殊功能
  - 电池供电, 浮地工作.....
- 编程接口
- 方便性
- 价格
- 兼容性

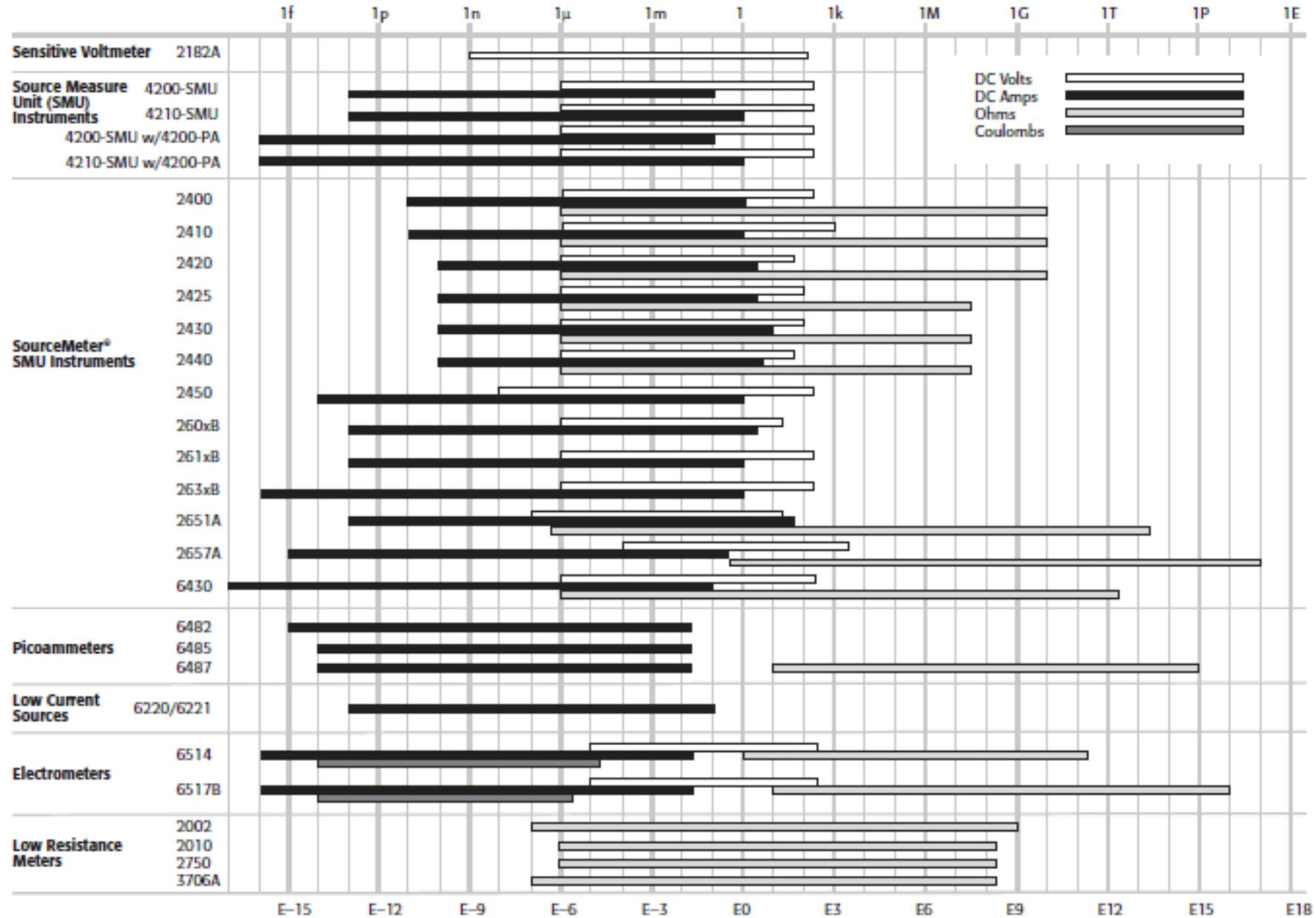


# 当代材料科学研究电学及输运特性测试测试要点

泰克吉时利产品量程及灵敏度



源表选型指南



**Tektronix**

---

# 当代材料科学研究中机制特殊案例

---

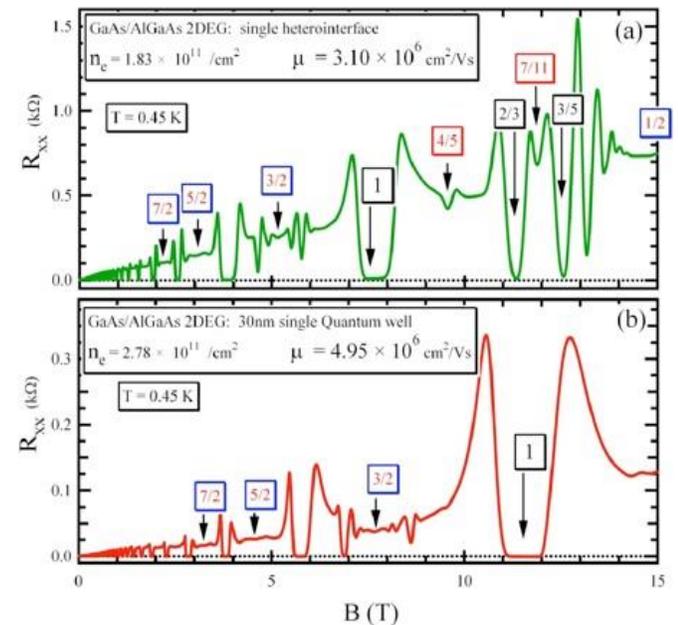
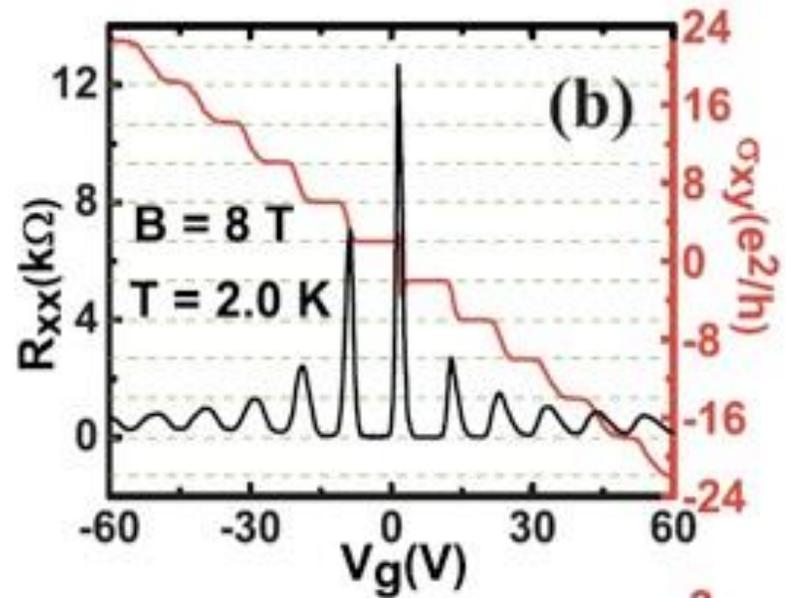
# 凝聚态物理中的电输运特性测试

## - 量子材料及超导材料

# 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)

- PPMS® - 综合物性测量系统 (Physical Property Measurement System )

- 可能用低温探针台

- 磁场 (~16T)

- 其他条件

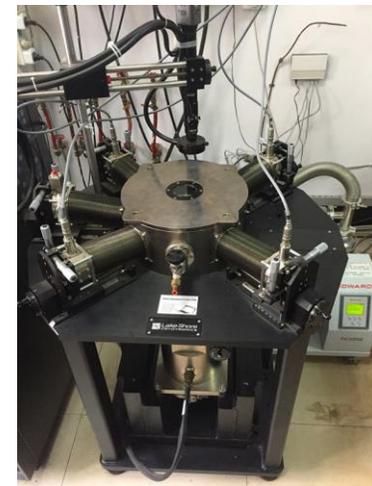
- 核磁
- 压力
- 光
- .....



- 极端条件

- 超导的前提下

- 强磁场 (~100T)
- 超高压 (~100GPa)
- 其它极端条件



# 电输运特性测试仪表配置

- 源表

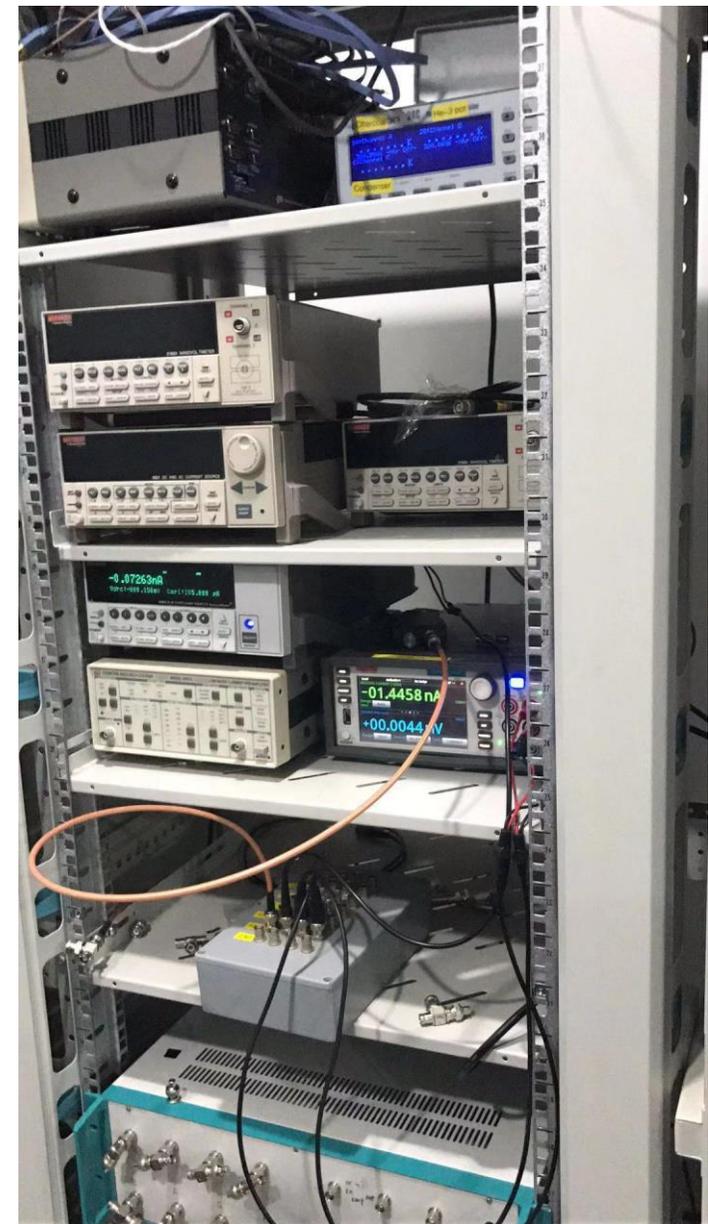
- 6221/2182
- 24XX 或26XX
- 以上至少一套

- 万用表

- 锁相放大器

- 其它

- AFG
- 示波器



# 绝缘材料电阻测试



# 绝缘材料

- 绝缘材料又称电介质，是指在直流电压作用下，不导电或导电极微的物质。
- 绝缘材料的绝缘性能通常用绝缘电阻来表征
  - 通过绝缘电阻，可以推导出绝缘材料介电击穿，散逸因数，水汽含量，机械连续性等参数
  - 利用这些参数，评估诸如轮胎放电的安全性能或打印纸对油墨的吸收扩散性能等。



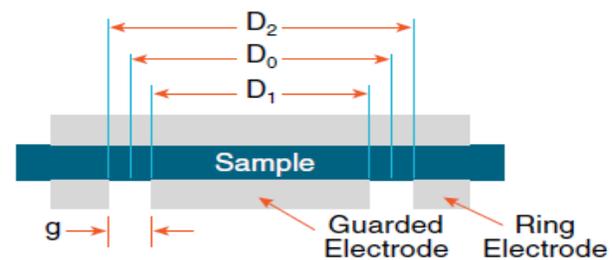
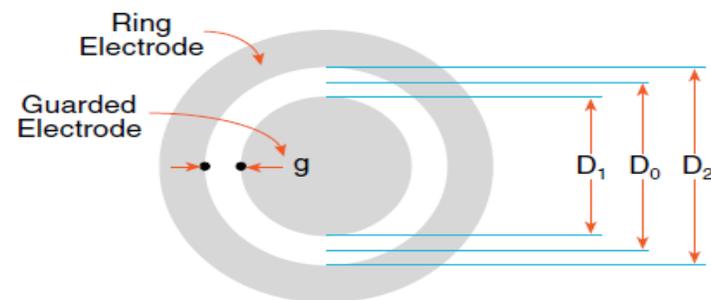
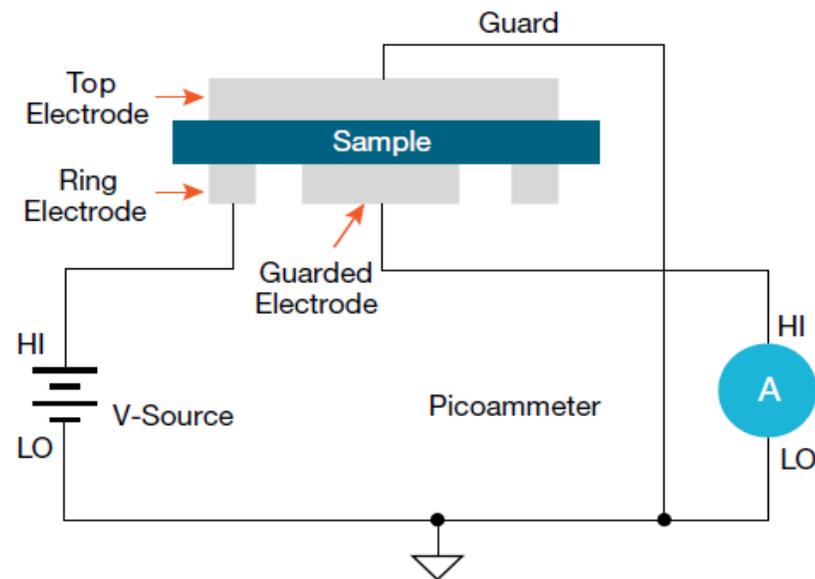
# 绝缘材料测试标准及测试项目

- 美国标准《ASTM-D-257 绝缘材料的直流电阻或电导的试验方法》
- 欧洲标准《IEC 62631-3-1 固体绝缘材料的介电和电阻特性》
- 主要测试项目为体电阻率（单位为ohm-cm）和表面电阻率（单位为ohm / sq）
  - 可以通过对被测样品电阻直接测试
  - 或者通过施加高电压测试漏电流的方法进行间接测试
  - 对体电阻率极高的绝缘材料，只能采用漏电流法。

# 绝缘材料表面电阻率测试

- 表面电阻率  $\rho_S = KSR$

- 式中  $R = V/I$  即测试电阻,  $KS = P/g$
- 其中  $P$  为下图中保护电极的周长  $P = \omega D_0$
- $g$  为保护电极与环电极间距离
- $D_0 = D_1 + g$ ;  $g = (D_2 - D_1) / 2$



# 绝缘材料体电阻率测试

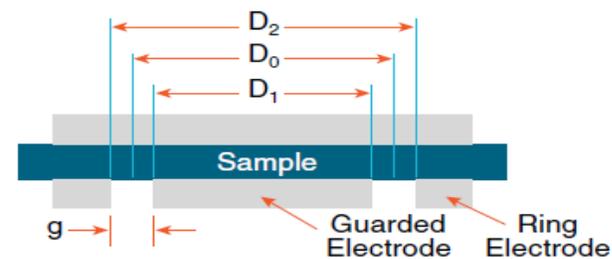
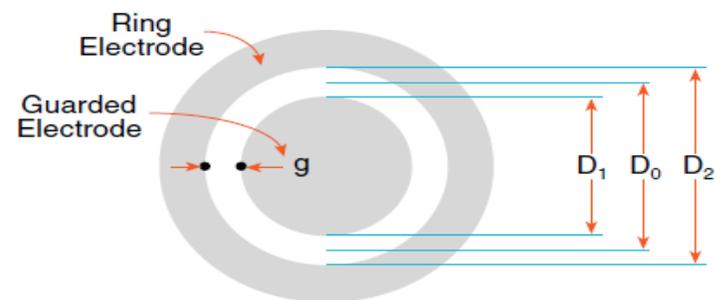
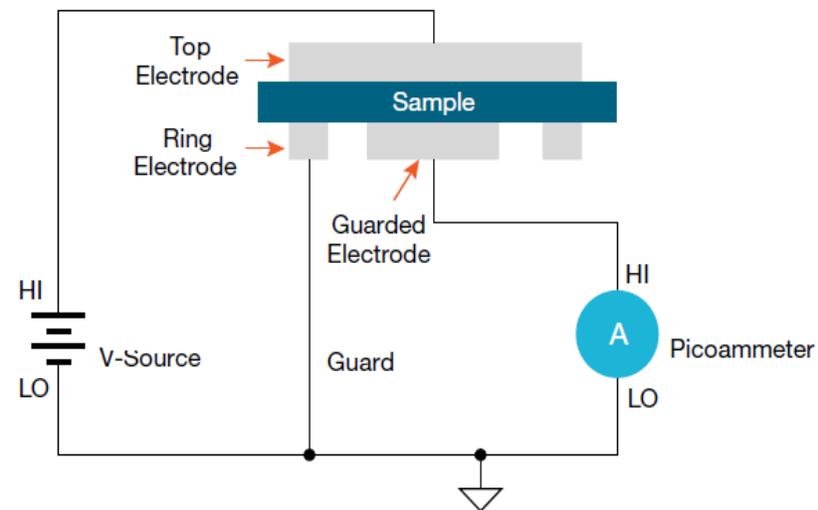
• 体电阻率  $\rho_v = (K_v/\tau) R$

◦ 式中  $R = V/I$  即测试电阻

$$K_v = \pi \left( \frac{D_1}{2} + B \frac{g}{2} \right)^2$$

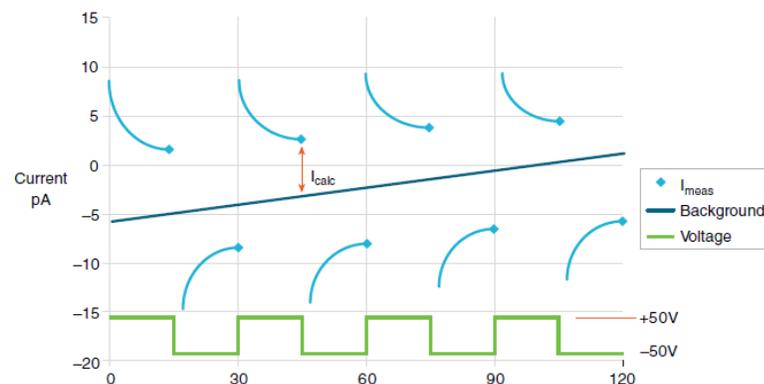
•  $K_v$  为保护电极有效面积

•  $B$  为有效面积系数，体电阻率测试时通常为0



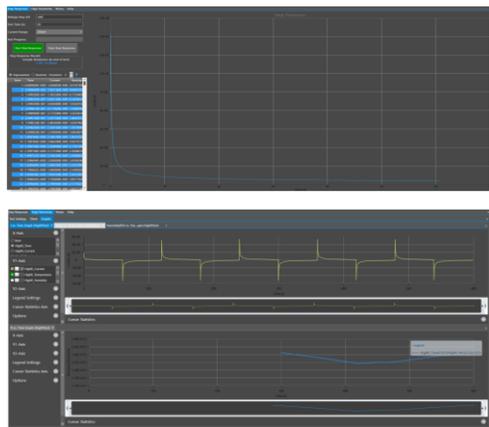
# 绝缘材料电阻测试面临的挑战

- 电阻率极高
  - 如蓝宝石或 Teflon 可高达  $10^{16} \sim 10^{18}$  ohm-cm, 远高于一般电气设备安全绝缘电阻测试标准 ( $10^{12} \sim 10^{16}$ )
  - 必须用静电计施加高电压, 测试漏电流的方法进行测试
- 高电阻测试受环境 (温度, 湿度, 充电时间, 施加电压等) 影响严重, 多次测试时需保持测试条件相同。
  - ASTM 标准规定 500V 充电60S测试 IEC 标准规定100V 60S 充电测试。
  - 电压正反双极性测试可以消除背景电流误差。
- 需施加高直流电压 (500V 以上), 需用安全的测试装置及安全锁, 在测试装置打开时中断电压输出
- 需专业软件自动测试

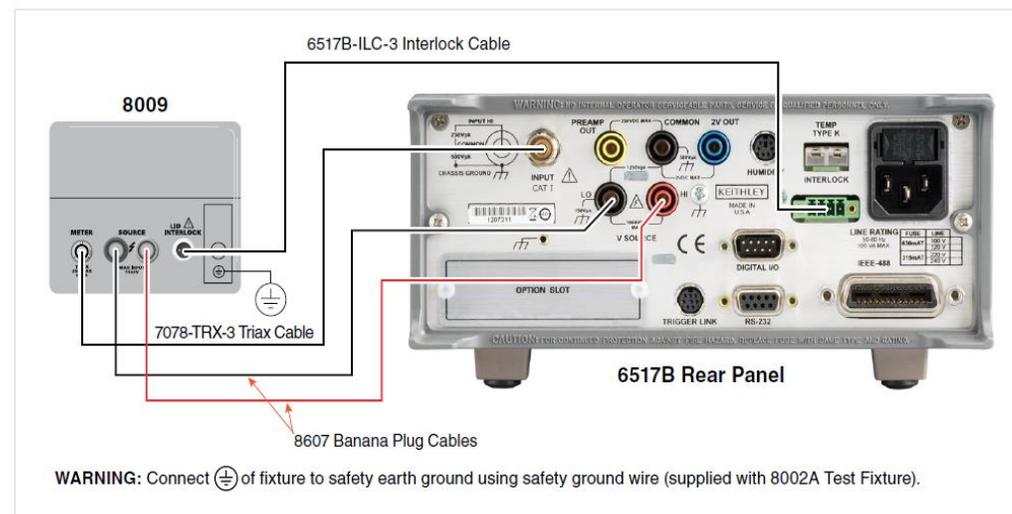


# 泰克绝缘材料电阻测试方案

- 硬件：6517B + 8009
- 软件：KickStar
- 方案优势：



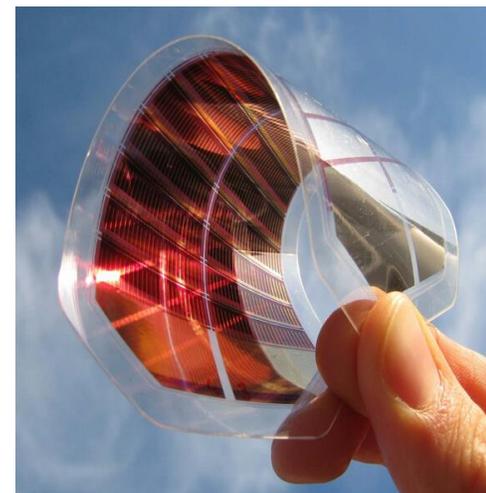
- 满足ASTM-D-257 及IEC 62631-3-1 标准
- 可测试高达  $10^{18} \Omega\text{-cm}$  体电阻率,  $10^{17} \Omega$  表面电阻率
- 可施加  $\pm 1000 \text{ V}$  测试电压
- 10 aA 电流分辨率
- 自动切换体电阻率及表面电阻率测试功能
- 多种安全防护机制
- Kick Start 软件自动进行正反极性测试



# 薄膜材料的电阻率测试

# 薄膜材料

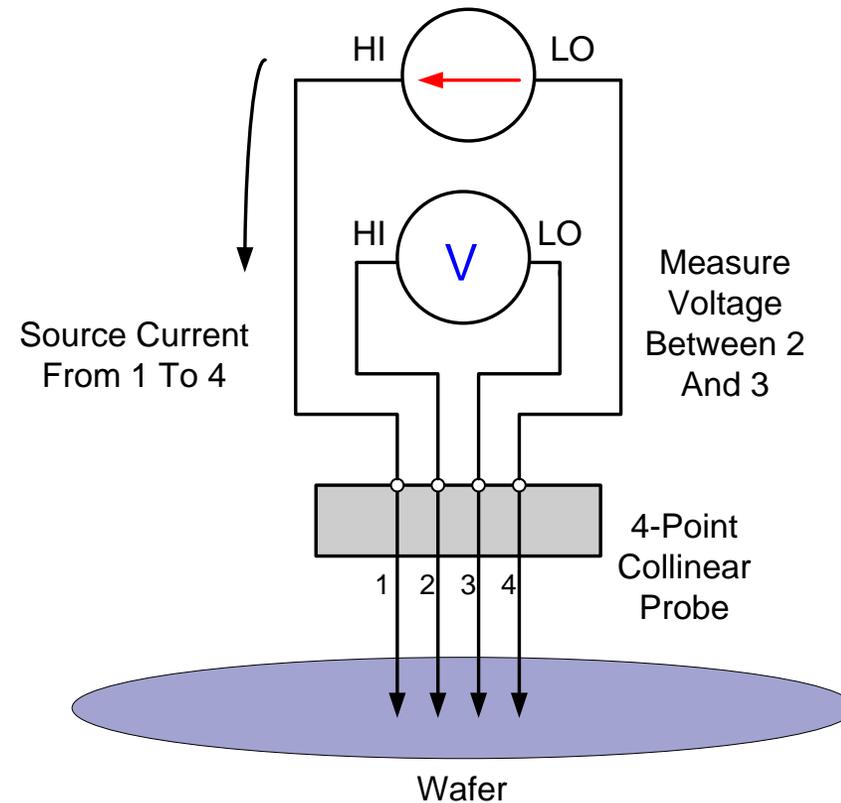
- 某一维线性尺度远远小于它的其他二维尺度的材料称为薄膜材料
  - 厚度介于单原子到几毫米
    - 但由于厚度小于100nm的薄膜已经被称为二维材料，因此薄膜材料通常指厚度介于微米到毫米的薄金属或有机物层。
- 薄膜材料可以分为非电子薄膜材料和电子薄膜材料
  - 非电子薄膜材料不需要对其电学特性进行分析，不是本方案针对的对象。
  - 电子薄膜又可分为导电薄膜，半导体薄膜，介质薄膜，电阻薄膜，磁性薄膜，压电薄膜，光电薄膜，热电薄膜，超导薄膜等
  - 表面电阻率是电子薄膜电学性质的重要参数。



# 电子薄膜材料表面电阻率测试

## 四探针法

Measurements on thin films and semiconducting material

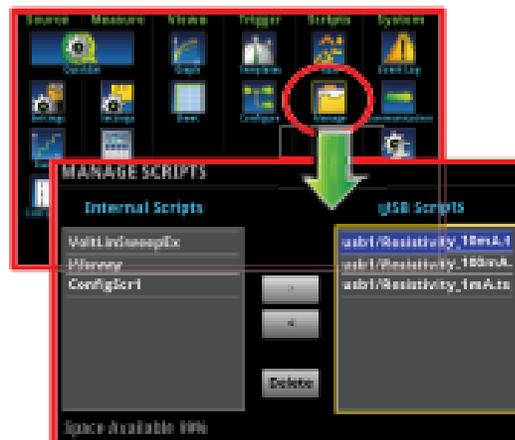
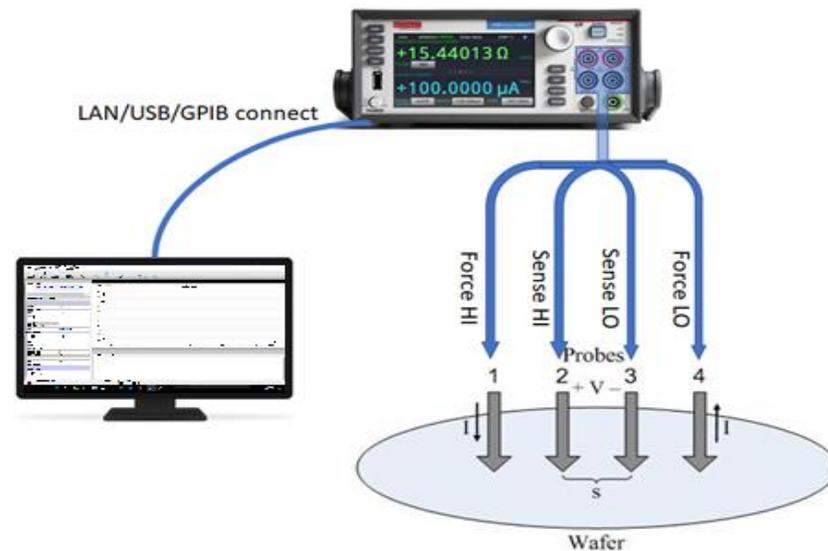


# 电子薄膜材料表面电阻率测试

2450 + 手动探针台

- 典型配置

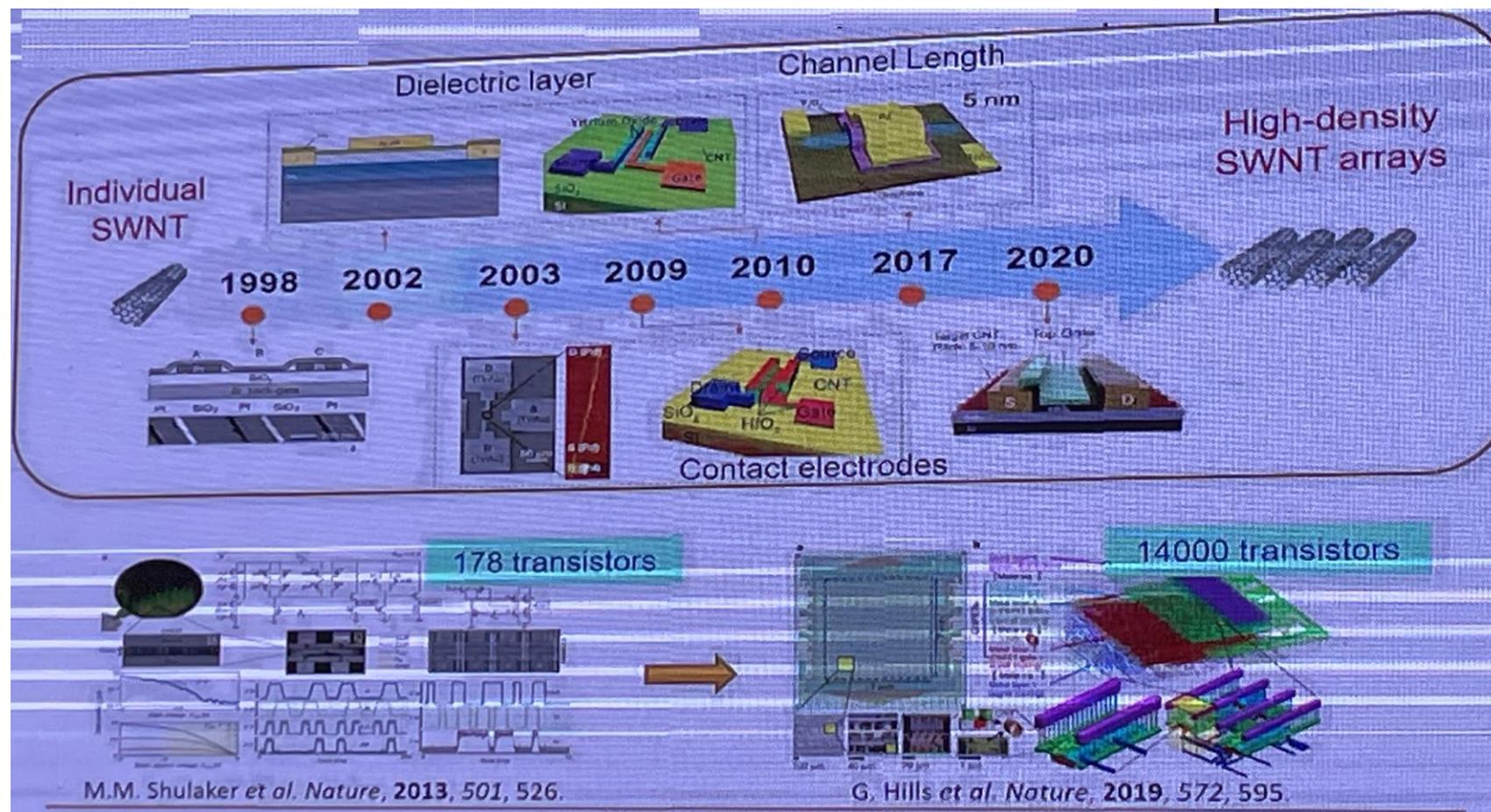
- 2450/2460/2461
- 四探针台（间距1mm）
- 测试软件（第三方）



# 碳基材料电子器件测试

# 碳基材料及碳基电阻器件

- 包括量子点、碳纳米管和石墨烯
- 后摩尔时代重点关注
- 碳基芯片实现弯道超车
- 与传统硅基芯片差距明显



# 纳米材料

- 三维空间尺度至少有一维处于纳米量级(1-100nm)的材料
  - 是由尺寸介于原子、分子和宏观体系之间的纳米粒子所组成的新一代材料。



零维富勒烯

一维碳纳米管

三维石墨烯

## • 纳米材料的分类

### ◦ 按结构

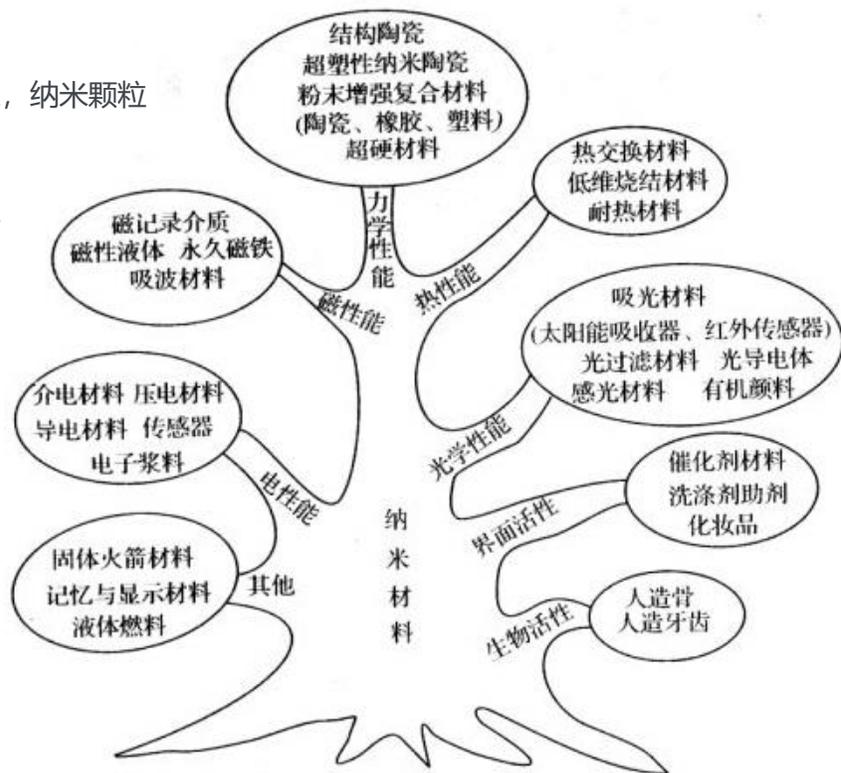
- 零维材料 – 量子点, 纳米粉末, 纳米颗粒
- 一维材料 – 纳米线或纳米管
- 二维材料 – 纳米薄膜, 石墨烯
- 三维测量 - 纳米固体材料

### ◦ 按组成

- 金属纳米材料
- 半导体纳米材料
- 有机高分子纳米材料
- 复合纳米材料

### ◦ 按物理性质

- 见右图



类别 \ 系列	第1系列	第2系列	第3系列	第4系列
多层状				
杆状				
等轴晶状				

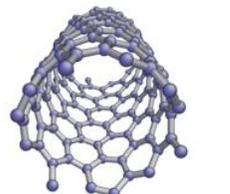
图 1-4 纳米材料的分类

(图中第1系列和第2系列较薄的层状和黑色部分表明晶界；第3系列的黑点表明晶界的不同成分；第4系列较黑线组成部分表明分散在基体中不同成分的晶体)

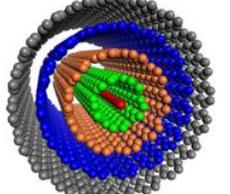
# 碳纳米管

• 又名巴基管，碳的同素异形体，是一种具有特殊结构的一维量子材料。

按石墨层数分类

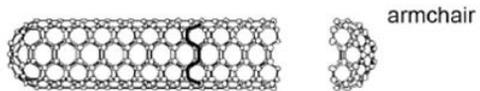


Single walled nanotube(SWCNT)

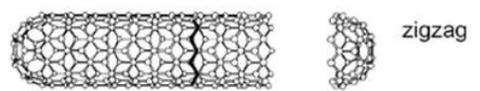


Multi-walled nanotube(MWCNT)

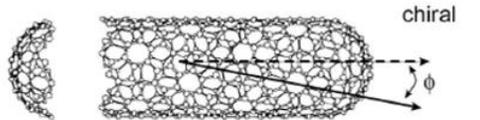
按手性分类(single walled)



armchair

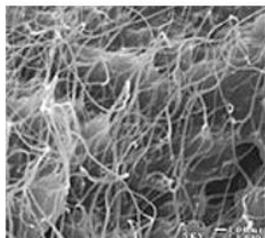


zigzag

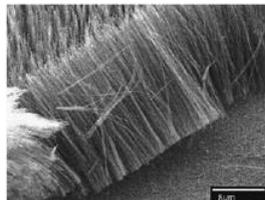


chiral

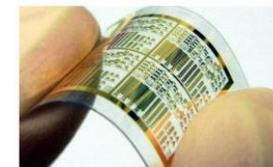
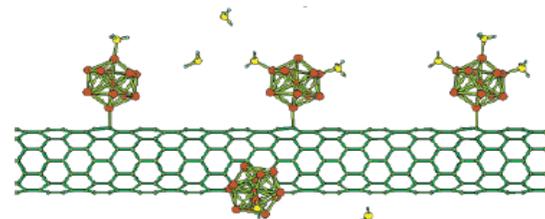
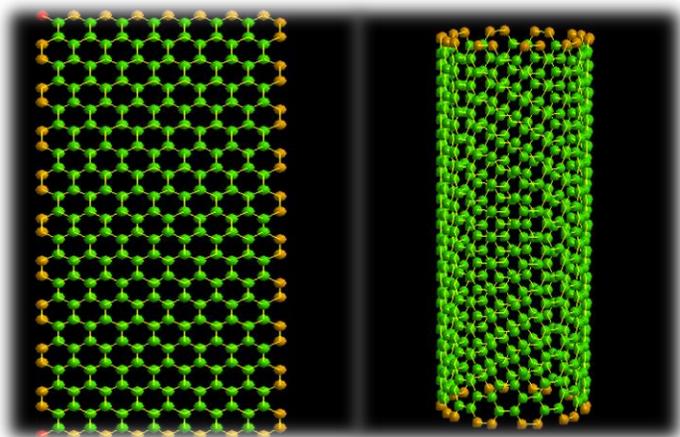
按排列状况分类



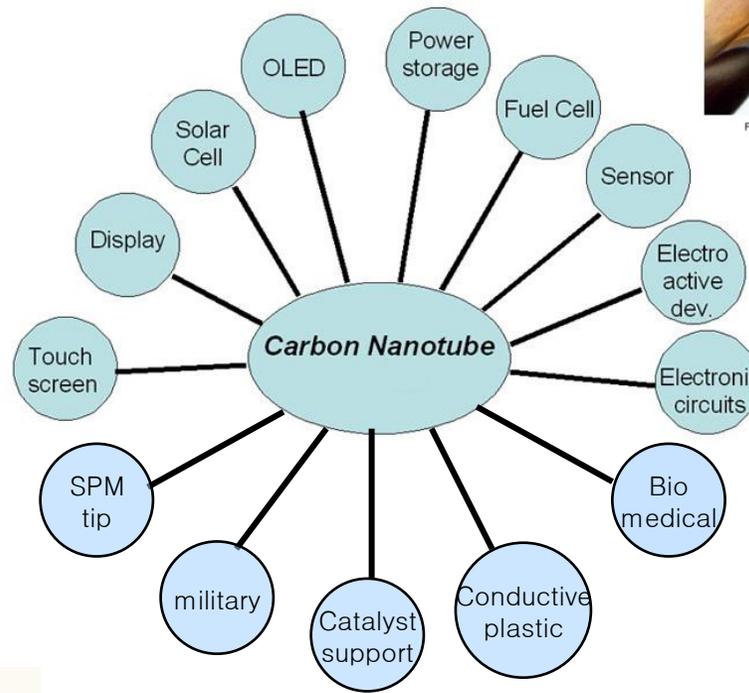
无序碳纳米管 (SEM)



定向碳纳米管 (SEM)



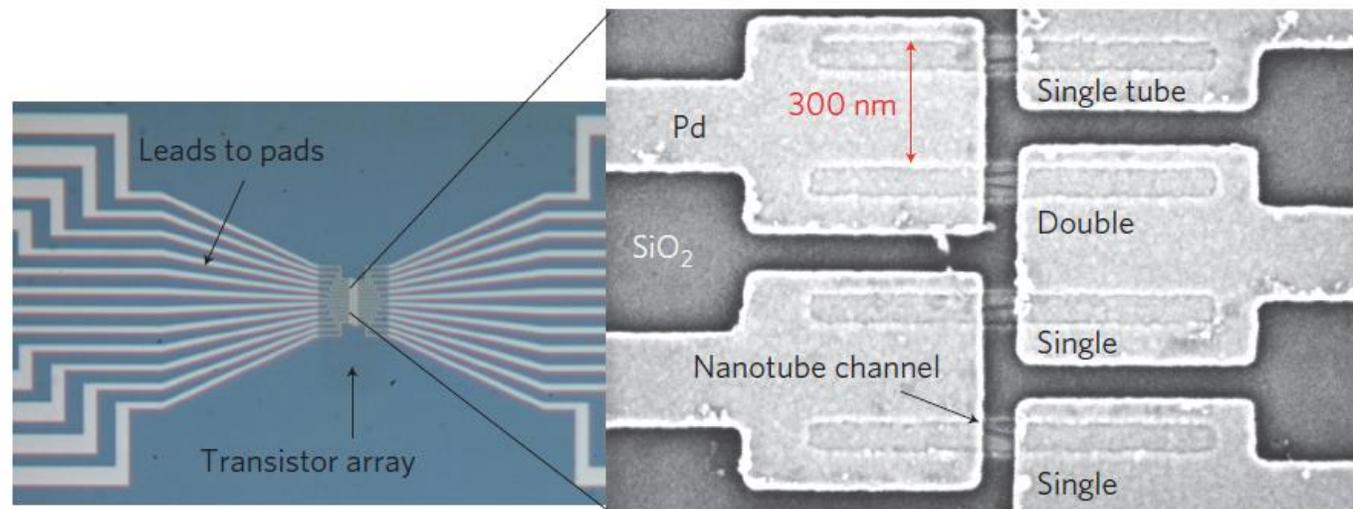
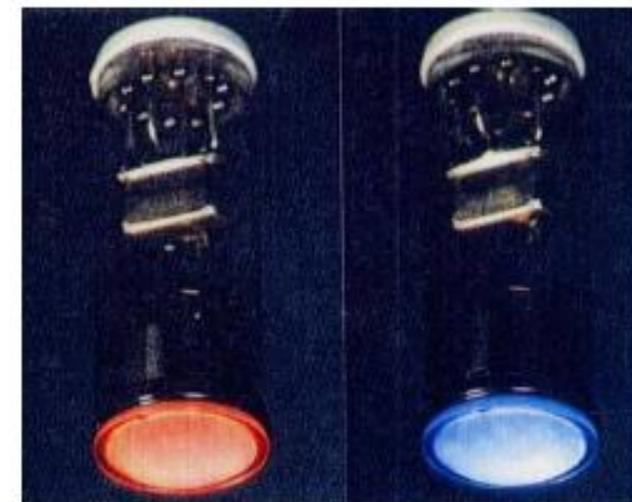
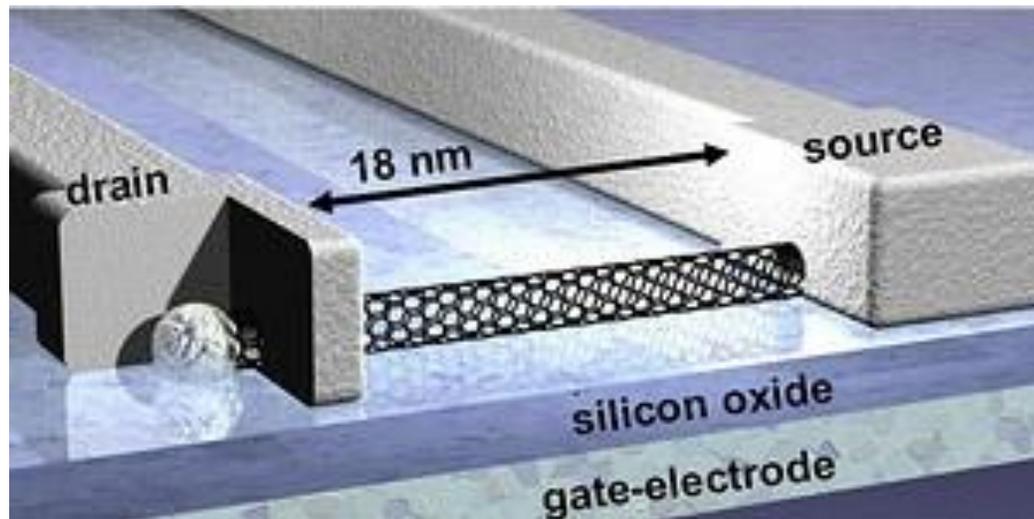
Flexible carbon nanotube integrated circuits



# 碳纳米管及其构建的多种器件

## • 碳纳米管电子器件

- 碳纳米管场发射器
- 碳纳米管 FET
- 单电子晶体管
- 碳纳米管传感器
- 碳纳米管存储器
- 碳纳米管开关
- 碳纳米管集成电路
- 碳纳米管计算机



# 二维材料

## • 二维材料 (Two dimensional material)

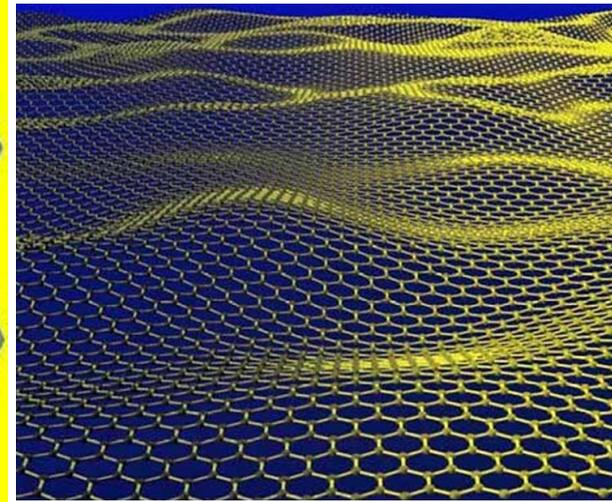
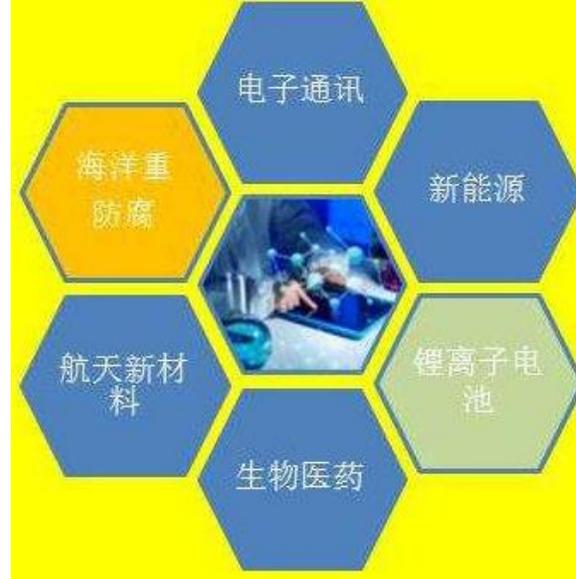
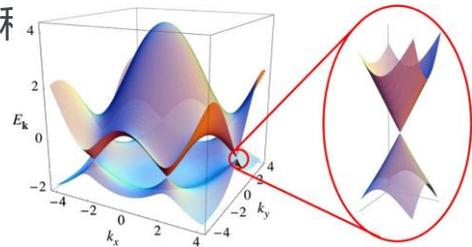
◦ 指电子仅可在两个维度的非纳米尺度 (1-100nm) 上自由运动 (平面运动) 的材料

- 纳米薄膜、超晶格、量子阱
- 属于纳米材料的范畴

## • 石墨烯 (Graphene)

◦ 由碳原子以sp<sup>2</sup>杂化轨道组成六角型呈蜂巢晶格的平面薄膜，只有一个碳原子厚度的二维材料。

- 厚度仅有0.335纳米，是构建其他维数碳质材料的基本单元
- 特点1：柔性，适合做可穿戴柔性电子设备；
- 特点2：导电性强，载流子迁移率高，功耗低
- ……
- ※ 特点n：易改性



\* 量子點具發光成像

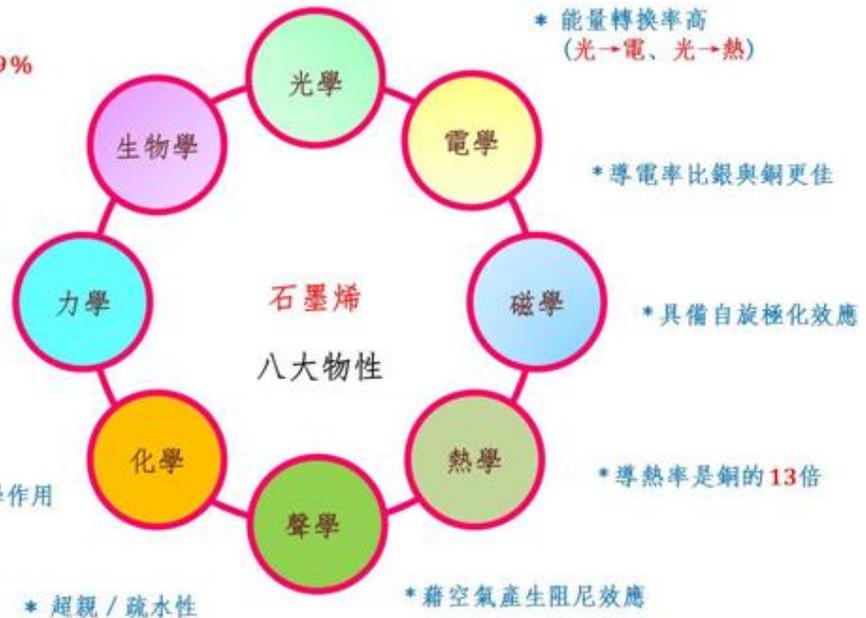
\* 透光度僅 2.3%

\* 抗菌性高達 99.9%

\* 強度是鋼鐵的 200 倍

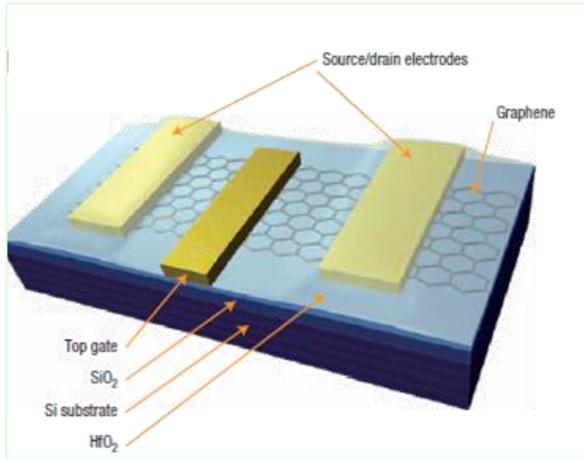
\* 比表面積 2630m<sup>2</sup>/g

\* 不與酸鹼起化學作用

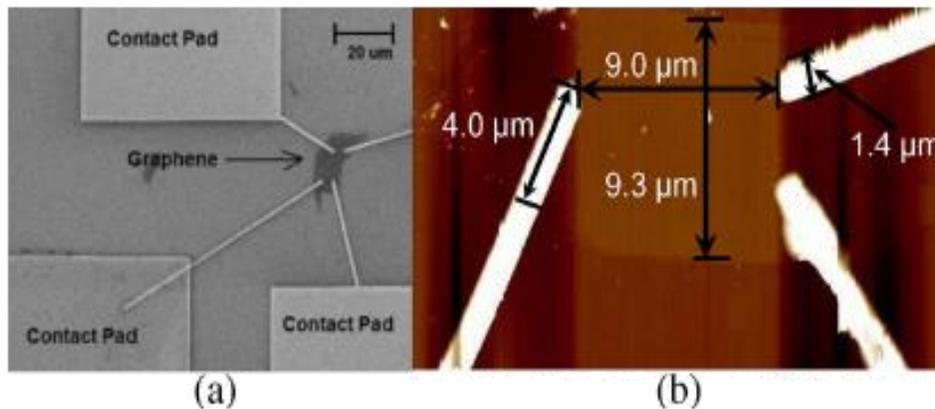


# 石墨烯电子器件

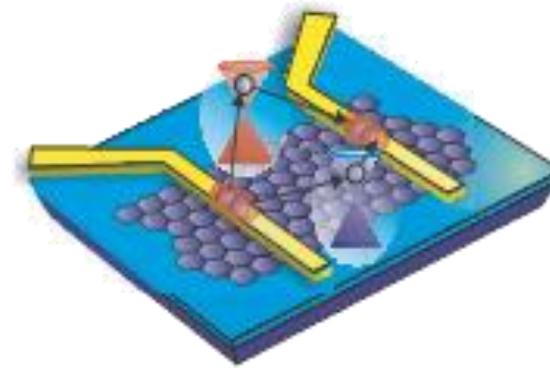
- 零带隙、顶栅石墨烯场效应管



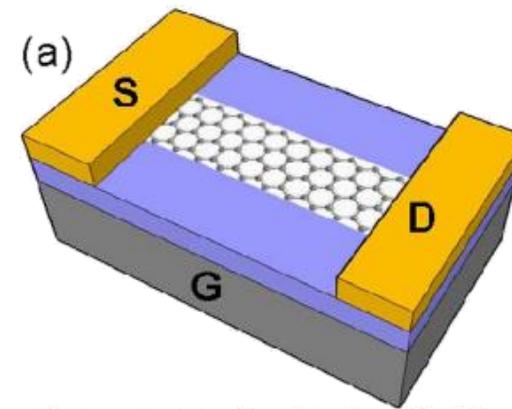
- 双层石墨烯晶体管



- 双极超导石墨烯晶体管



- 石墨烯纳米带场效应管



# 纳米材料/纳米电子器件电学测试面临的挑战及应对

- 纳米级尺寸

- 性能异于宏尺寸材料与器件
- 状态变化快
  - 对测试仪器响应速度有要求

- 对测试夹具要求高

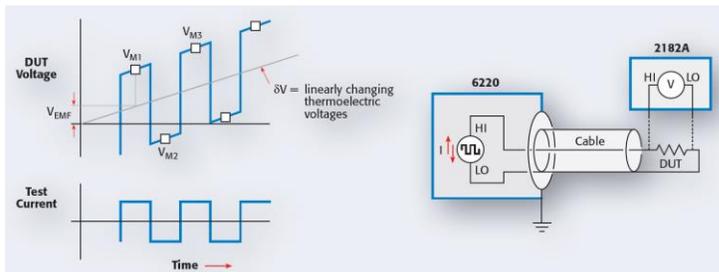
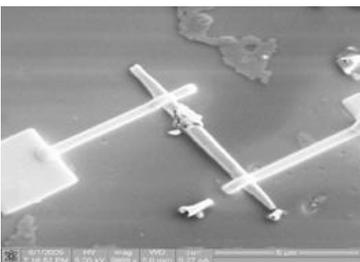
- 纳米探针台

- 对测试仪器要求高

- 承受即测试电流超小 (达 fA 级)
- 承受及测试电压超低 (达 nV 级)
- 选择与被测纳米材料和器件电性能相适应的 SMU

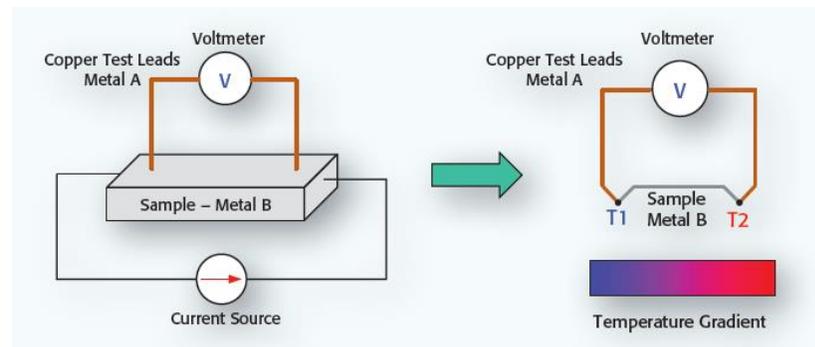
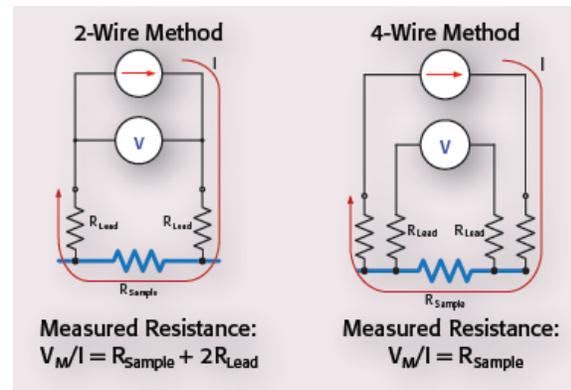
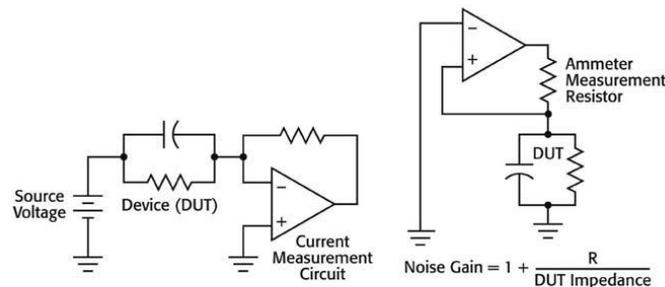
- 必须防自热

- 需有脉冲模式的 SMU



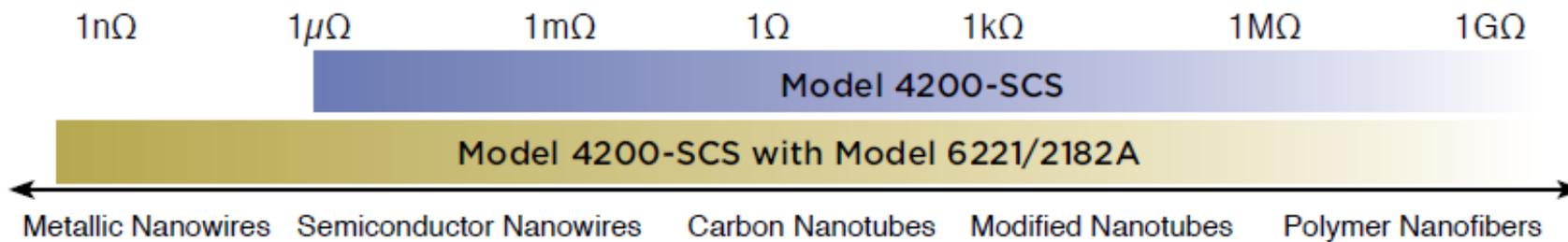
- 需多种降低误差与噪声的手段

- 适当的工作方式
  - 加流测压或加压测流
- 适当的连接方式
- 降低外部噪声的影响
  - 屏蔽与滤波
  - 移除一切可产生噪声的设备
  - 测试直流时, 设置积分时间为供电周期的整数倍
- 降低热电噪声
  - 用相同材质处理连接
  - 降低被测器件温度梯度
  - 测试仪器完全预热
  - 选用 Delta 模式

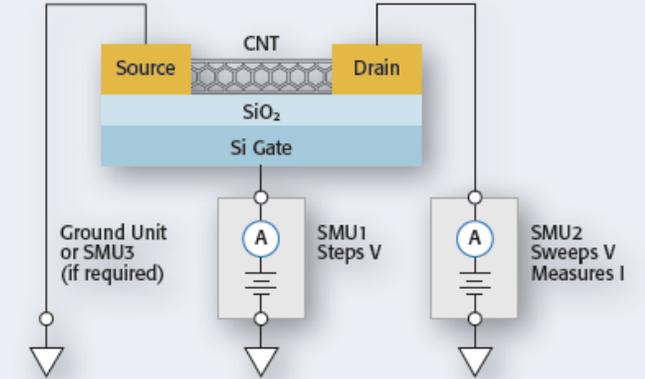


# 碳纳米管及其构建的多种器件电性能测试

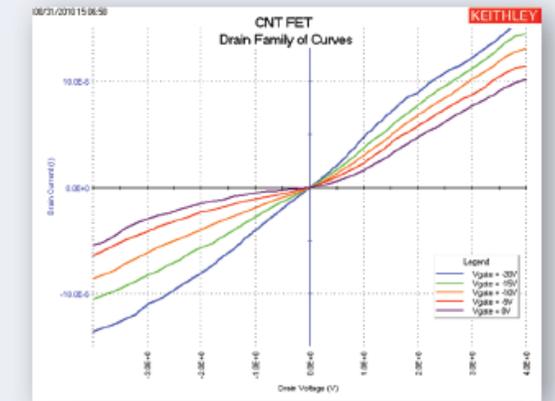
- I-V 测试是最基本的电性能测试
  - SMU 是基本测试仪器
  - 不同种类的碳纳米管需不同的 SMU 进行测试
    - 选择依据
      - 电阻范围, 电流范围, 电压范围
      - 通道数
      - 脉冲需求
      - 电容测试需求
- 碳纳米管电子器件测试 SMU 选型表见下页



## Circuit to Measure Drain Family of Curves on a Carbon Nanotube



## Current vs. Voltage Characteristics of Carbon Nanotube FET



# Which Keithley nanotechnology solution is best for your sourcing or measurement application?

Keithley instrumentation is being used in a growing list of nanotechnology research and production test settings. The applications shown here are only a sampling of the nanotechnology test and measurement tasks for which our instruments and systems are suitable. If your tests require sourcing or measuring low level signals, Keithley instrumentation can help you perform them more accurately and cost-effectively.

**Want low current measurements without the high price tag?**

With  $<200\mu\text{V}$  burden voltage, the cost-effective **Model 6485 Picoammeter** ensures accurate low current measurements, even in circuits with very low source voltages. The **Model 6487 Picoammeter/Voltage Source** adds a 500V bias source for high resistance and resistivity measurements. The **Model 6482 Dual-Channel Picoammeter/Voltage Source** gives you two channels in one instrument to save rack space.

**Trying to characterize high resistance nanomaterials?**

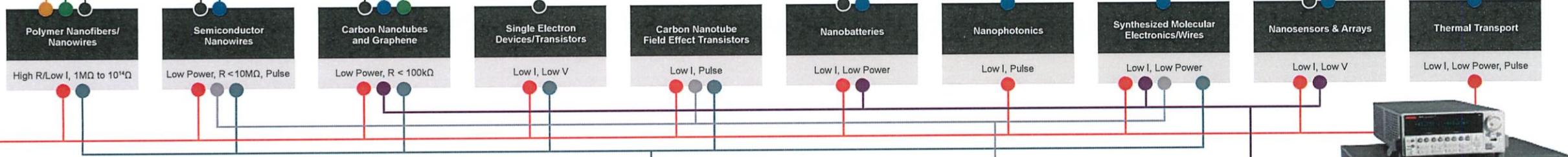
The **Model 6517B Electrometer/High Resistance Meter's** built-in 1kV source, 200T $\Omega$  input resistance, and low current sensitivity make it an ideal solution.

**Want seamless control over current pulse sourcing and measurement?**

When linked together, the **Model 6221 AC+DC Current Source** and **Model 2182A Nanovoltmeter** are designed to operate like a single instrument to make high speed pulse mode measurements.

**Studying highly resistive nanowires?**

The **Model 6430 Sub-Femtoamp Remote SourceMeter®** instrument's low noise and drift performance make it ideal. It measures currents with 400aA ( $400 \times 10^{-18}\text{A}$ ) sensitivity.



**Want multiple channels of sourcing and measurement?**

The fully integrated **Model 4200 Semiconductor Characterization System** brings together all three core measurement types, DC-IV, AC impedance and transient I-V, in one easy-to-operate package. It's used in many phases of nano research, development, characterization, and production.

**Need to characterize mobility, carrier density, and device speed?**

The **Model 4210-CVU Option** takes the guesswork out of obtaining valid capacitance-voltage (C-V) measurements quickly and easily, with intuitive point-and-click setup, complete cabling, and built-in element models.

**Troubled by overheating problems?**

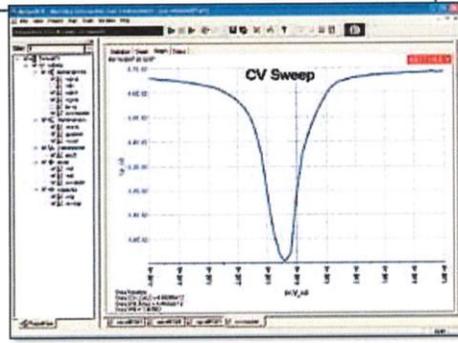
The **Model 4225-PMU** option for the Model 4200-SCS performs pulsed I-V testing on a variety of devices for many different purposes, including preventing device self-heating by using narrow pulses and/or low duty cycle pulses rather than DC signals.

**Testing lots of devices?**

**Series 2600B System SourceMeter® instruments** let you make precision DC, pulse, and low frequency AC source-measure tests quickly, easily, and economically. They offer virtually unlimited flexibility to scale the system's channel count up or down to match changing application needs.

**Looking for just a single channel?**

Each **Series 2400 SourceMeter instrument** is a complete, single-channel DC parametric tester. Choose from a variety of ranges and functions to suit specific application needs. The Model 2430 can be programmed to produce individual pulses or pulse trains up to 5ms wide.



Ask Us Your Application Or Product Question.

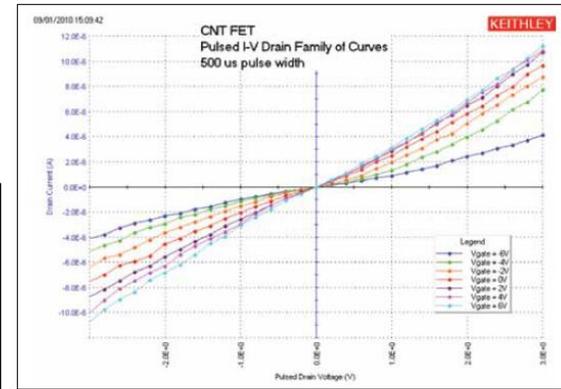
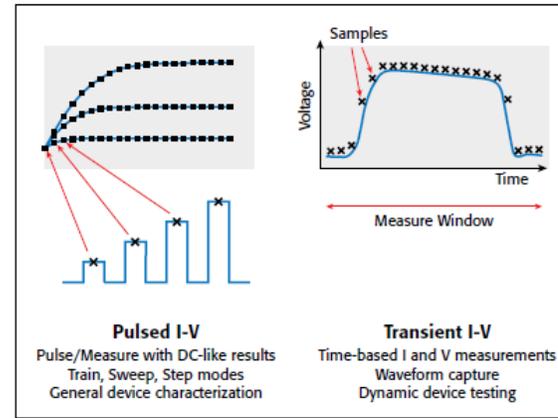
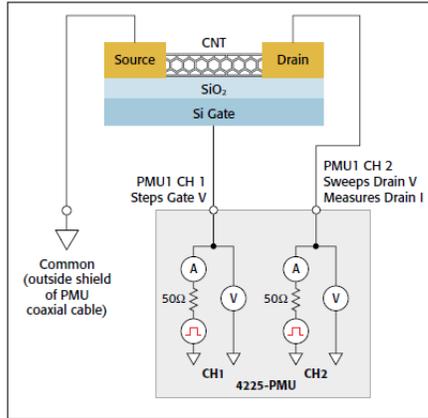
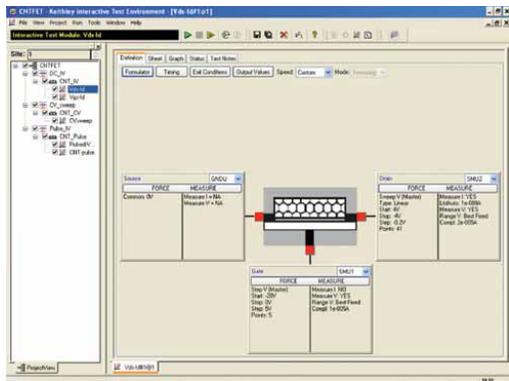
# 碳纳米管电子器件电性能综合测试

## • 硬件:

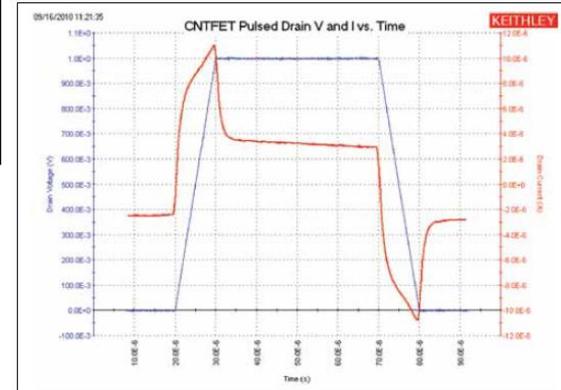
- 4200A – SCS + 纳米探针台 (第三方)
  - 多插槽, 根据测试项目灵活配置
    - 4210 CVU, 4225 PMU 等

## • 软件: Clarius

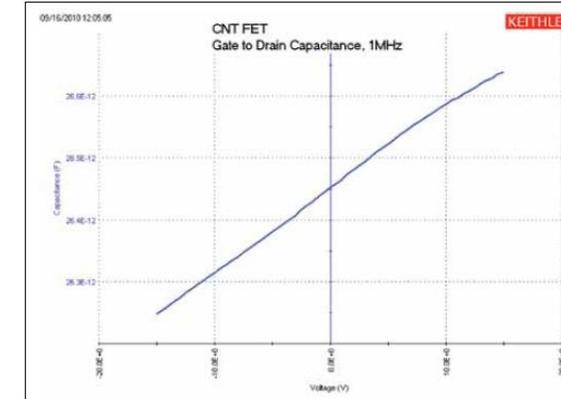
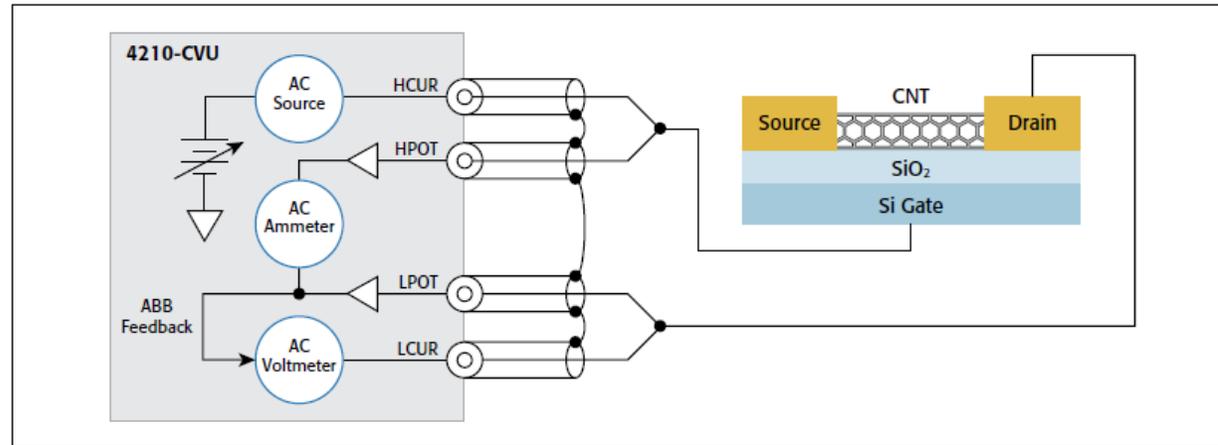
- 内置多种纳米材料测试模式



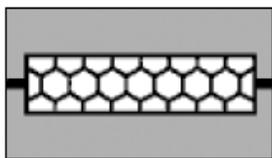
Pulsed I-V drain family of curves of CNT FET



Waveform of single drain voltage pulse and resulting drain current of CNT FET



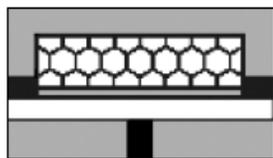
C-V sweep of gate-to-drain capacitance



Carbon Nanotube



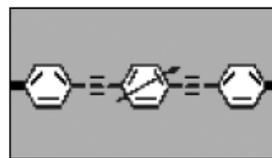
BioComponent



Carbon Nanotube FET



Nanowire



Molecular Wire



Molecular Transistor

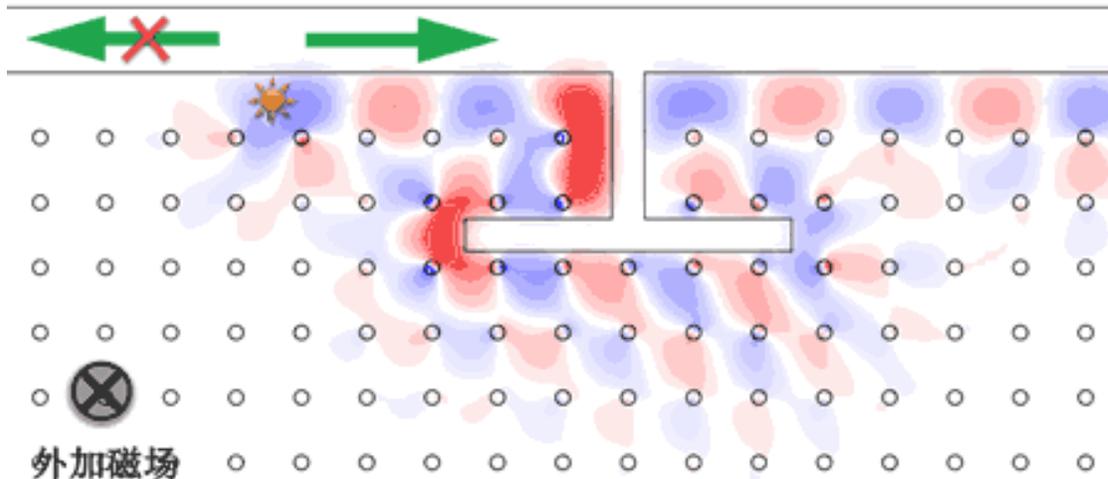
# 二维石墨烯材料电性能测试

- 测试项目

- 方块电阻, 表面电阻率
- 载流子浓度
- 载流子迁移率

- 测试方法

- 电阻率
  - 四探针法, 范德堡法
- 载流子浓度与载流子迁移率
  - 霍尔效应



$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{\frac{\rho L}{A}} = \frac{VA}{\rho L} = \frac{qn\mu VA}{L} \quad \mu_H = \frac{|V_H t|}{BI\rho}$$

I = Current (A)

V = Voltage (V)

R = Resistance of sample ( $\Omega$ )

$\rho$  = Resistivity of sample ( $\Omega\text{-cm}$ )

L = Length of sample (cm)

A = Cross sectional area of sample ( $\text{cm}^2$ )

For a doped semiconductor:

$$\rho = \frac{1}{qn\mu}$$

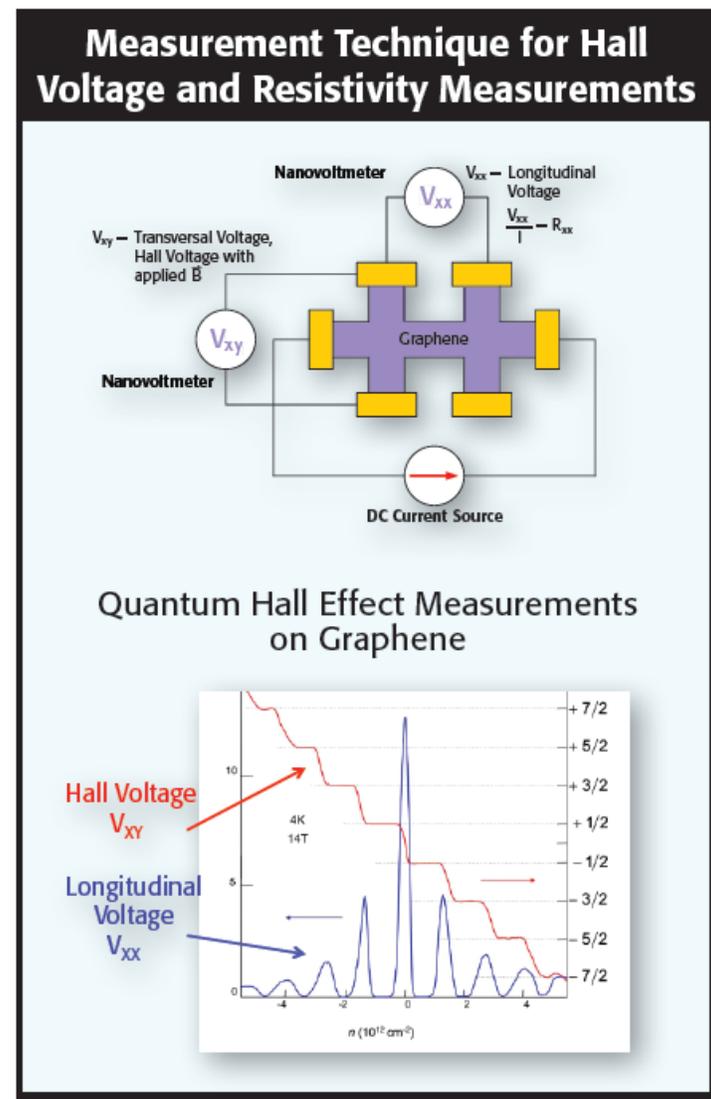
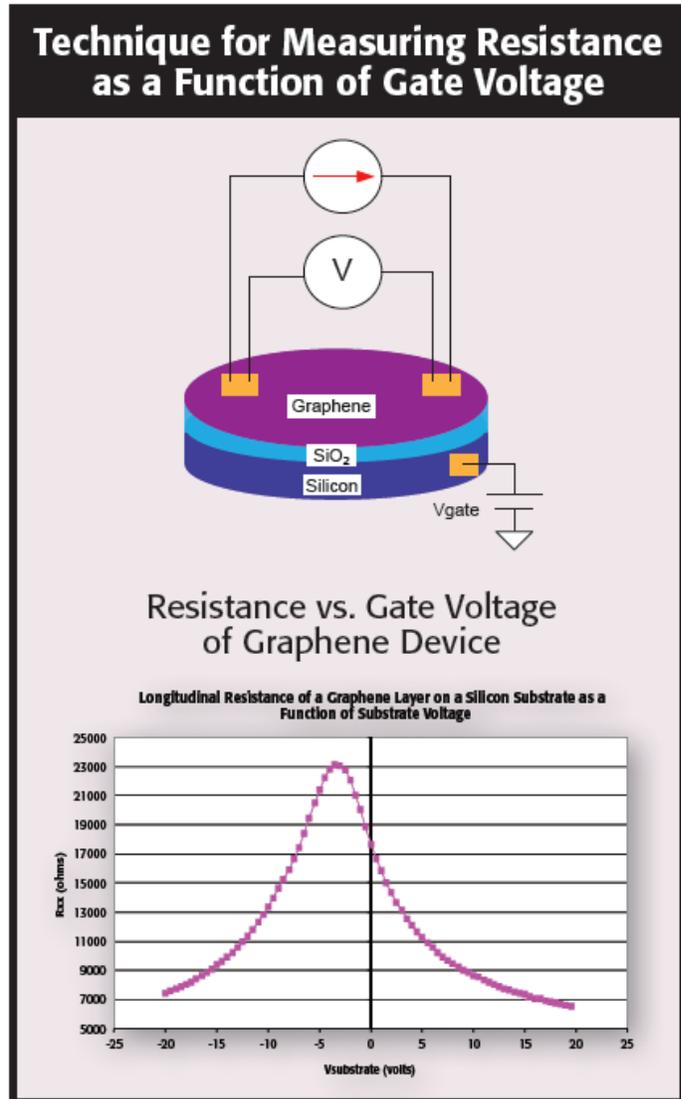
q = Electron charge ( $\text{C}/\text{cm}^2$ )

n = Carrier concentration ( $\text{cm}^{-3}$ )

$\mu$  = Carrier mobility ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )

# 石墨烯材料及石墨烯电子器件电学性能测试要点

- 加低硫测弱压
  - 电流源和电压表精度要高
- 四探针或范德堡法测试电阻率
  - 需与探针台配合
  - 测试设备需方便连接
  - 需易用的软件
- 霍尔效应测试
  - 石墨烯材料制备成霍尔条 (Hall Bar)
  - 需要电流电压范围都很大的测试设备



# 石墨烯材料及石墨烯电子器件电学性能测试方案

## 4200 – SCS 方案

- 4200 + SMU X 4
- SMU模块集电压源/电压表/电流源/电流表于一体，集成度高，无需开关切换
- SMU均配有开尔文接口，在测试小电阻时可有效消除线缆电阻的影响；
- 电流输出精度40fA；电流测试精度10fA；电压测试精度80 $\mu$ V；
- 带有pulse工作模式，使用pulse测试可以消除自加热效应；
- 开放设备底层指令，附带编译软件，支持自编程；

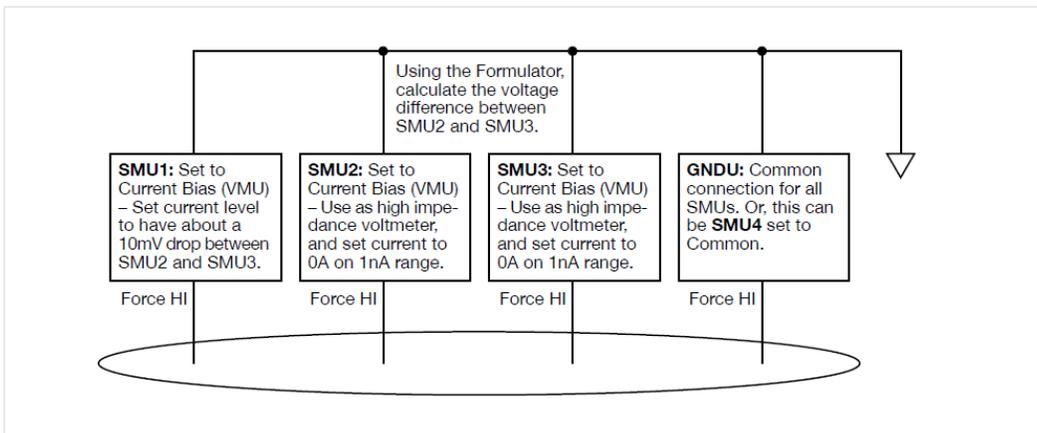
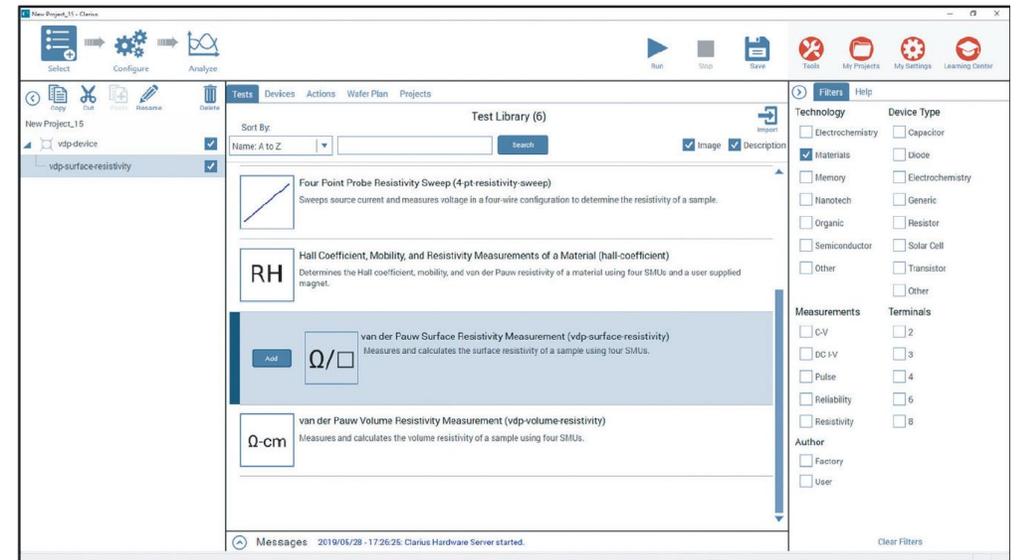
Project: vdp-resistivity

Site: vdp-test

vdp-device

- i2-v34
- i3-v41
- i4-v12
- i1-v23

A1	Test Current					
	A	B	C	D	E	F
1	Test	Thickness	Correction	Coefficient	Resistivity	
2	Current	Voltage Sum	(cm)	Factor	= $\pi(l^2/4)$ ( $\mu\text{m}^2$ )	( $\mu\text{m}^2$ )
3		1E-005	0.09994800575	1	1.133	11324.55943
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						



# 晶体管生物传感器 (BioFET)



# 生物传感器的应用

基于半导体



- 生物学研究
- 即时关怀“Point of Care” (POC) 诊疗 – 低成本、快速、早期发现疾病
- 可穿戴医疗设备 – 血压, 血糖, 心率, 体温(Bluetooth)等
- 食品安全 – 细菌, 污染, 气味等
- 环境监测 – 农药检测, 煤气检测等

# 晶体管生物传感器 BioFET

- 生物传感器通常基于晶体管生物传感器 (bioFET)
- 晶体管生物传感器 (bioFET) 通常是由传感层与晶体管结合而成, 用于检测生物学成分
- 将生物学参数转换为可以用 DC I-V 技术轻松测试的电信号
- 一旦晶体管生物传感器检测到生物学分子, 晶体管源极与漏极间的电流将随生物学分子的数量而变化 (类似于场效应晶体管栅极控制源漏级间的电流)

## 被测生物学参数

血糖

气体

病毒

DNA

离子

细菌

癌细胞

pH

## BioFET 传感器

Bio Receptors



CNT



Membrane

+

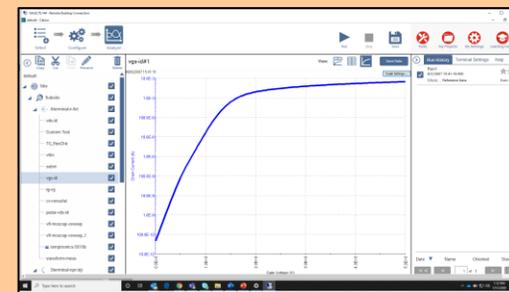
FET

Gate

Drain

Source

## DC I-V 测试



转移 (Transfer) 特性

输出 (Output) 特性

开路电势  
(Open Circuit  
Potential)

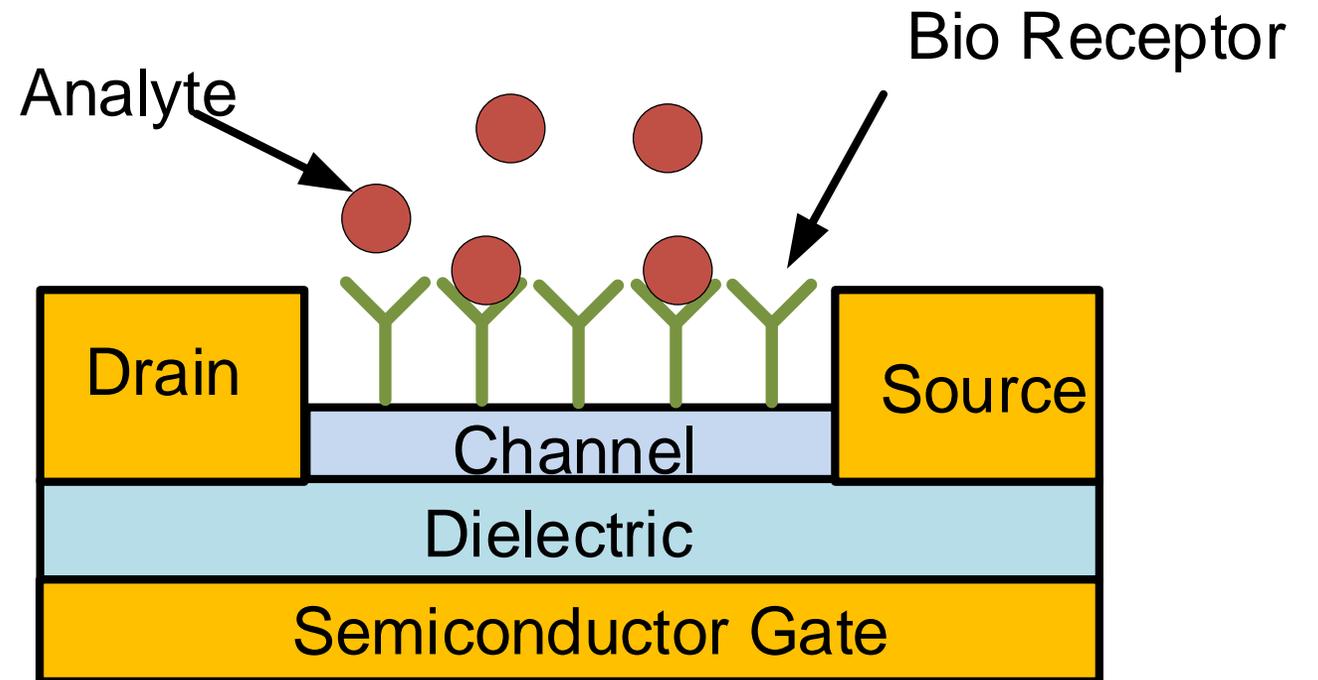
栅极漏电流  
(Gate Leakage)

# 背栅 (Back-Gated) BioFET

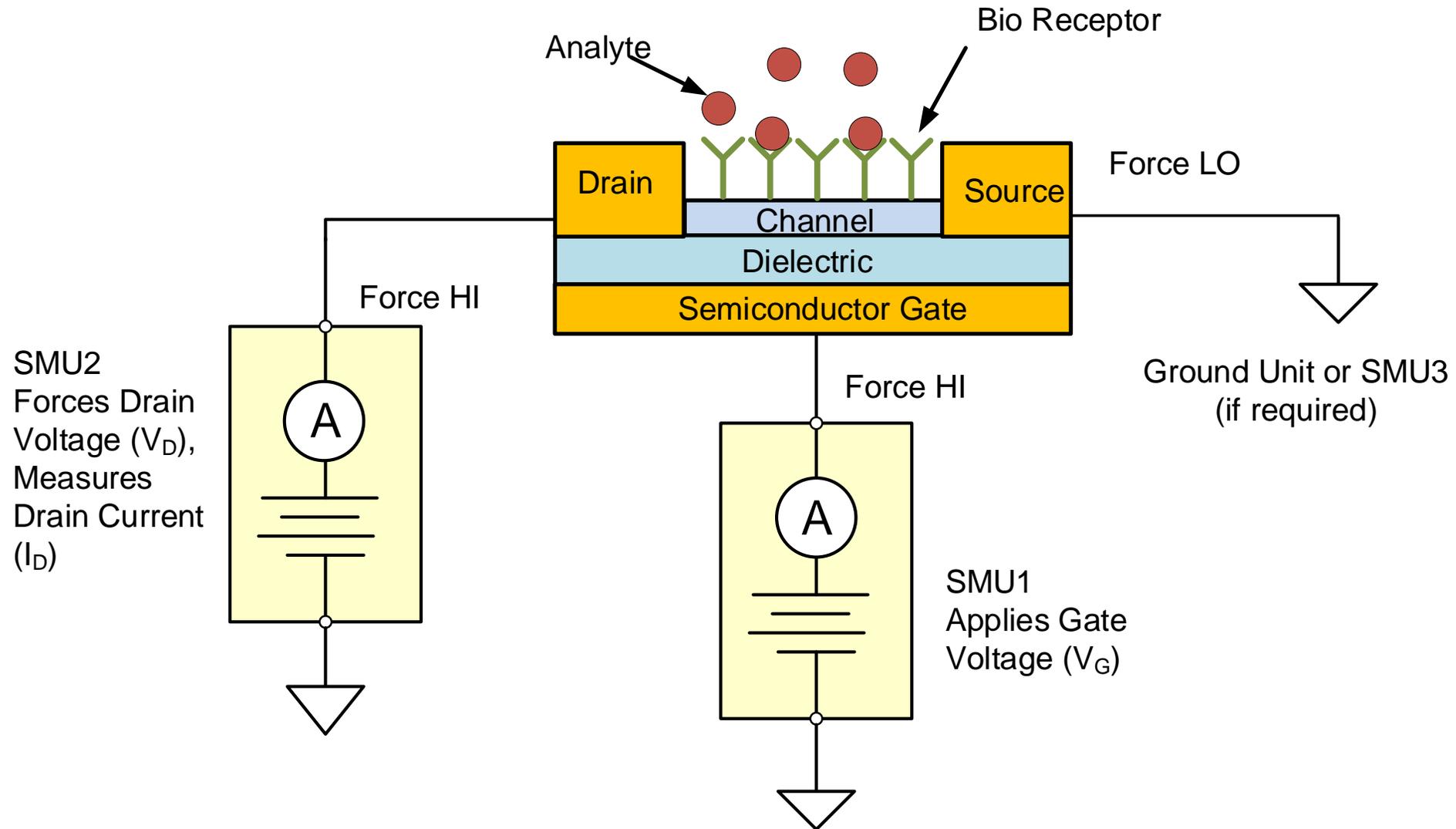
绝缘层将晶体管栅极隔离

当生物传感器放大器检测到生物学被测物，FET的 I-V特性将改变

换言之：漏极电流与生物学被测物相关

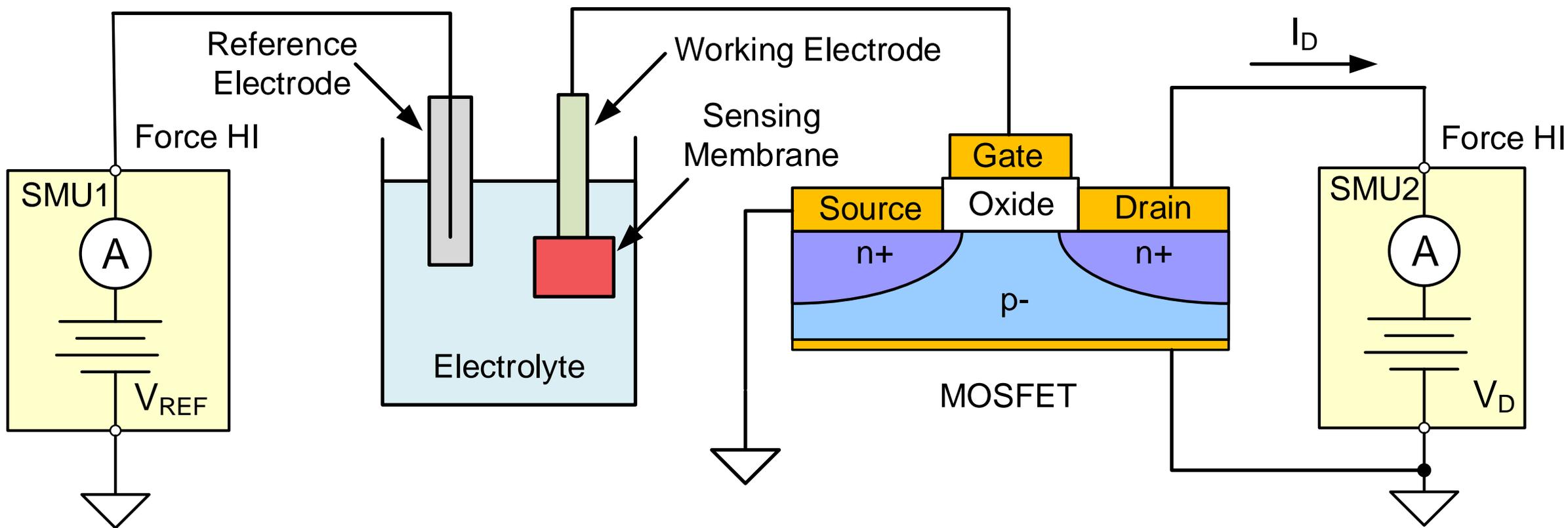


# 背栅 BioFET I-V 测试

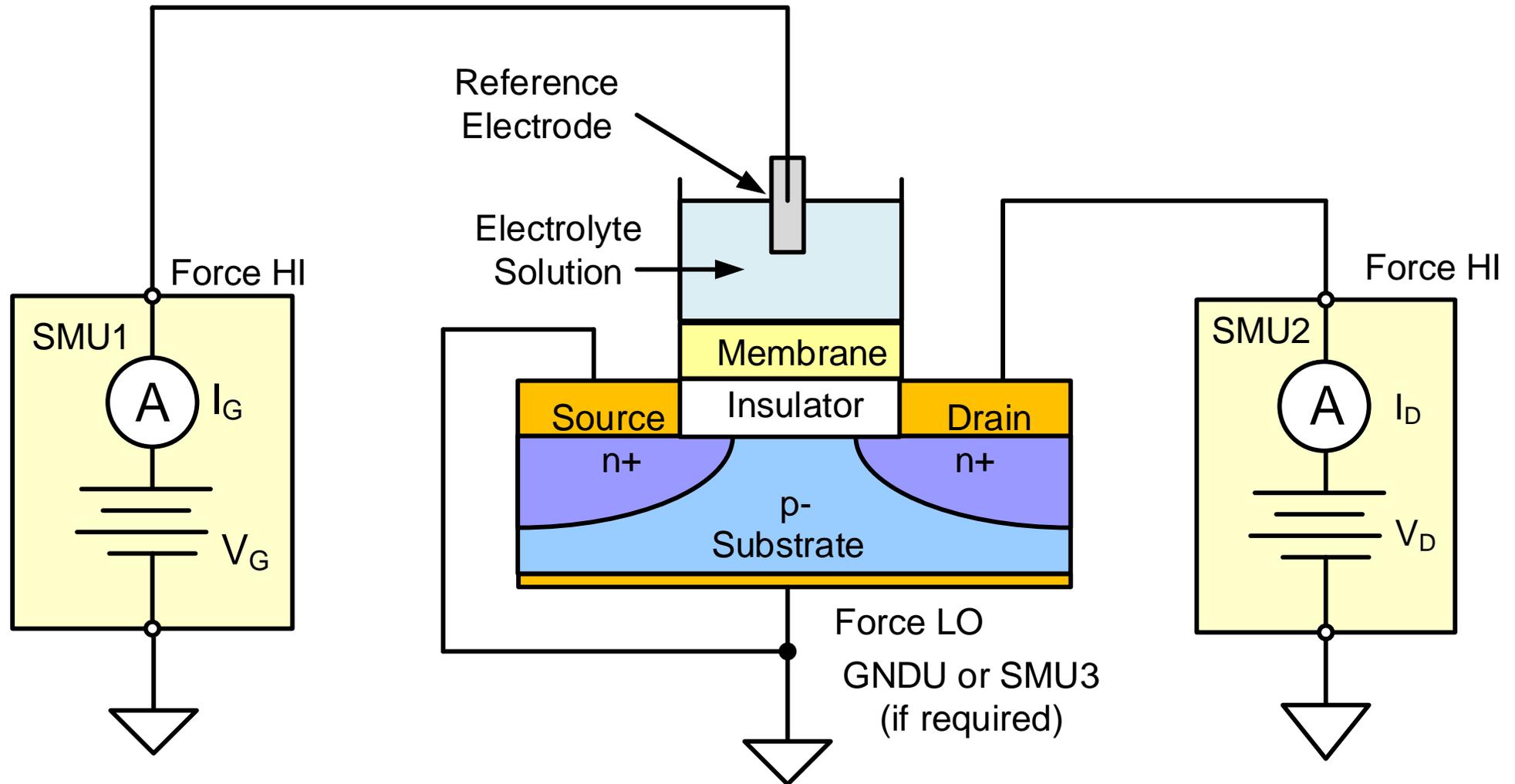


# 延长栅 (Extended-Gate) FET (EGFET)

感知部分的结构与 MosFET 物理上隔离

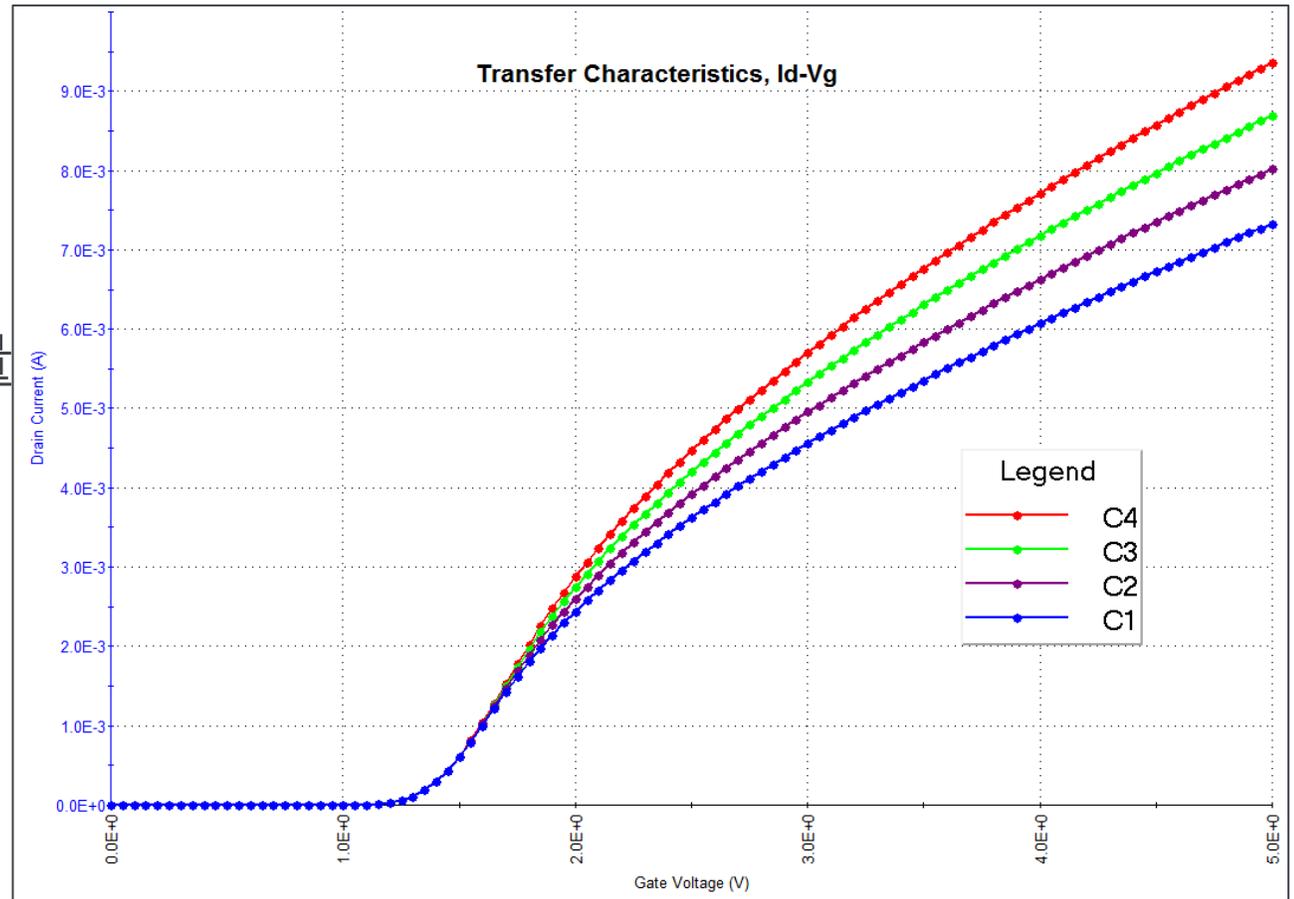
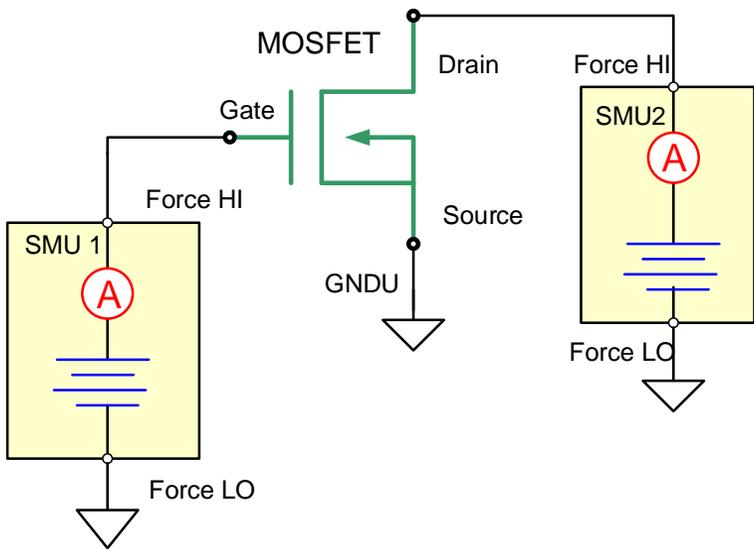


# 离子感应 (Ion-Sensitive) FET (ISFET)



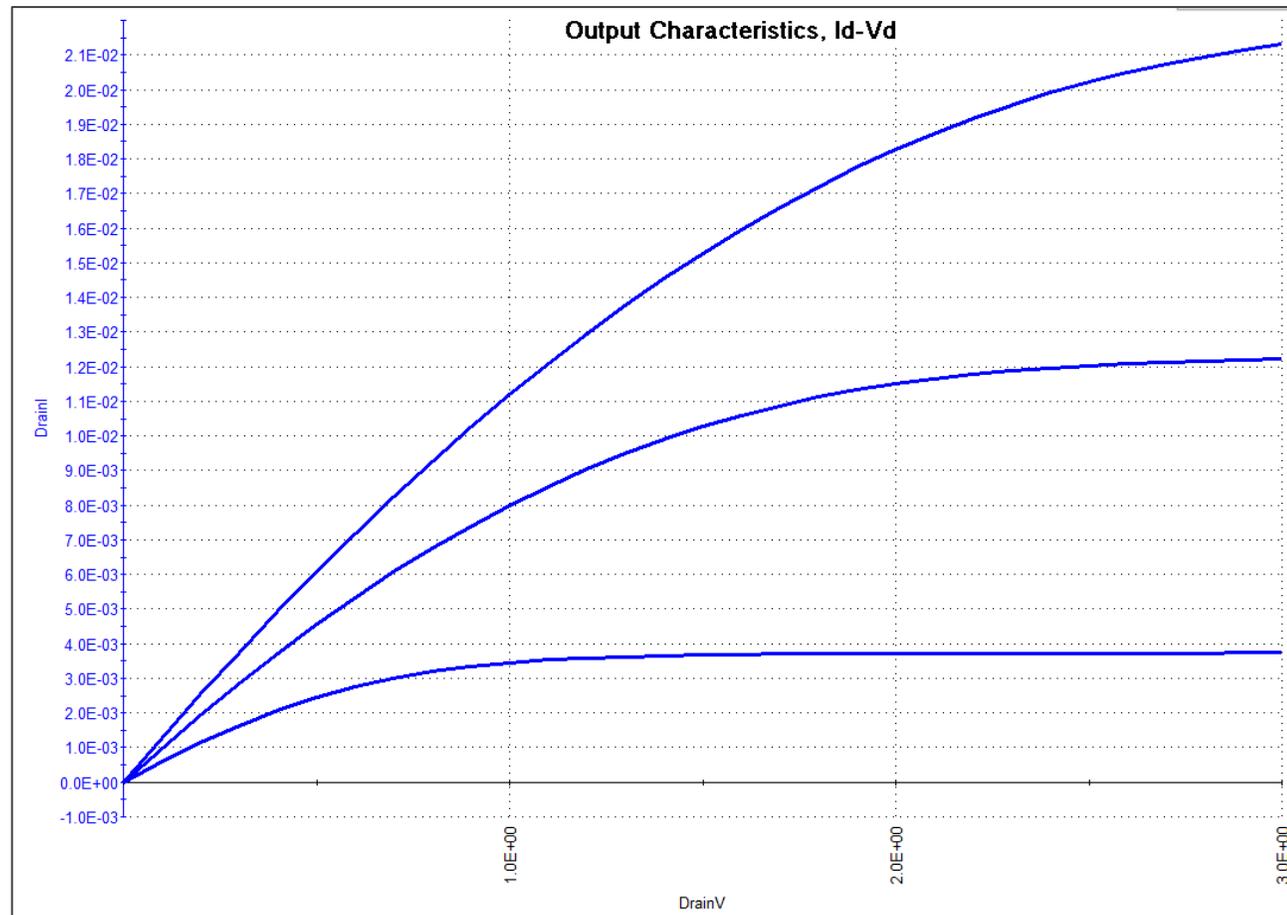
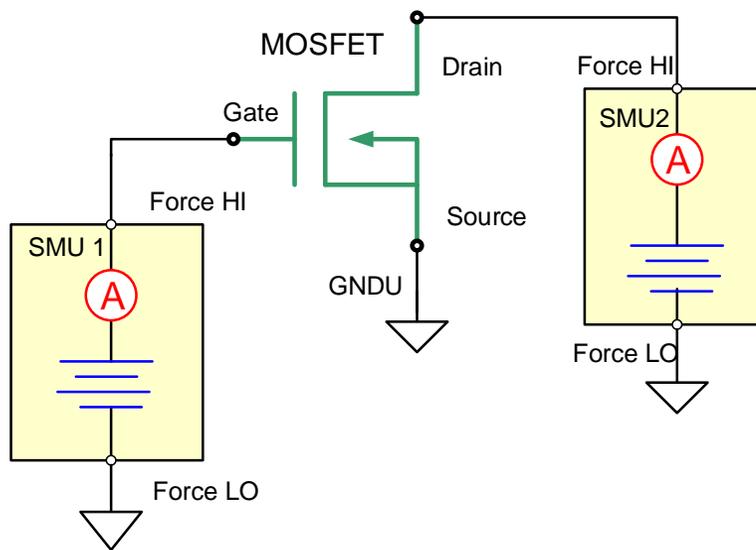
# 转移特性, $I_d$ - $V_g$

- SMU1: 扫描  $V_G$
- SMU2:  $V_D =$  恒定, 测量  $I_D$
- 每条曲线表示被测分析物或病原体不同含量



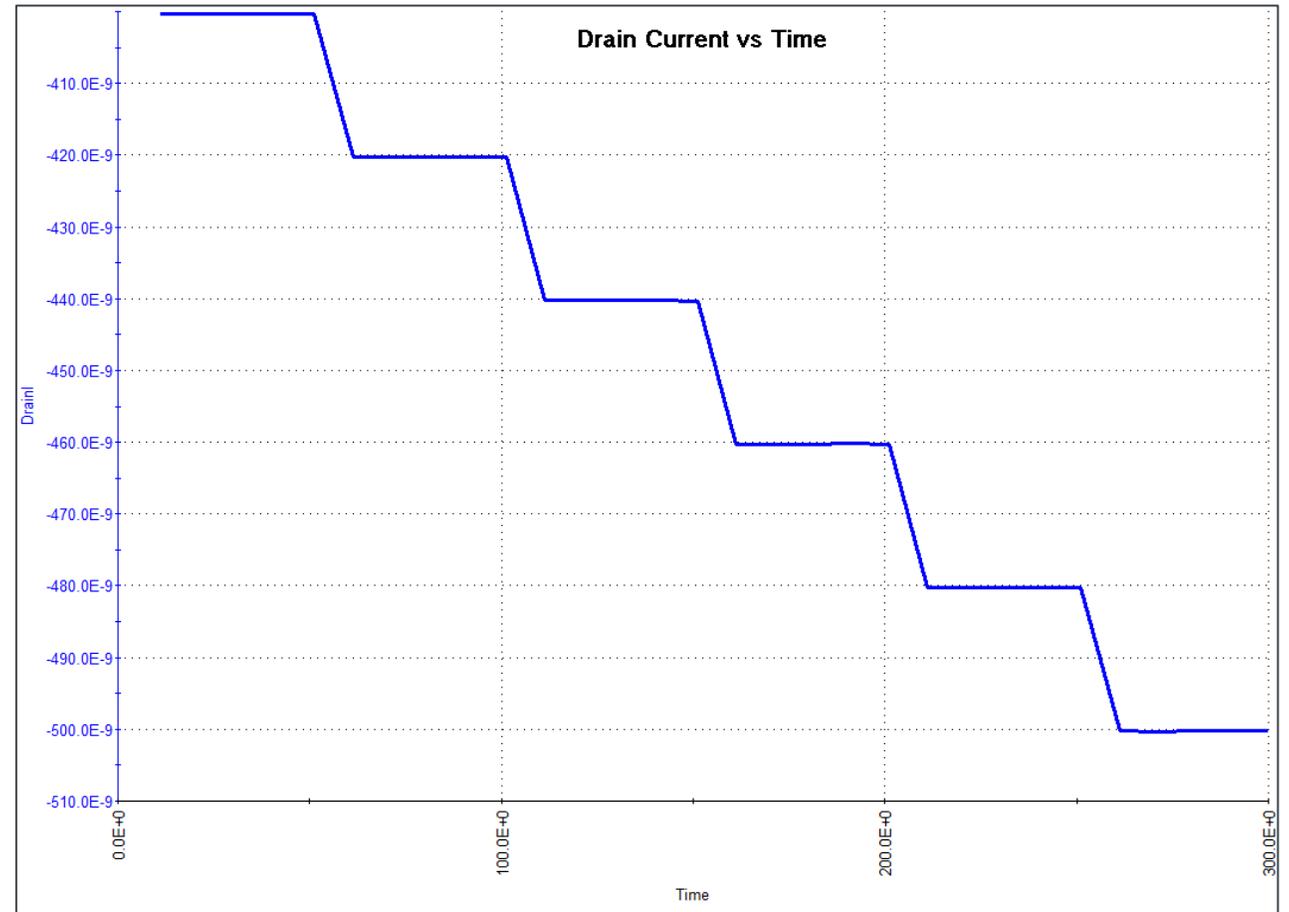
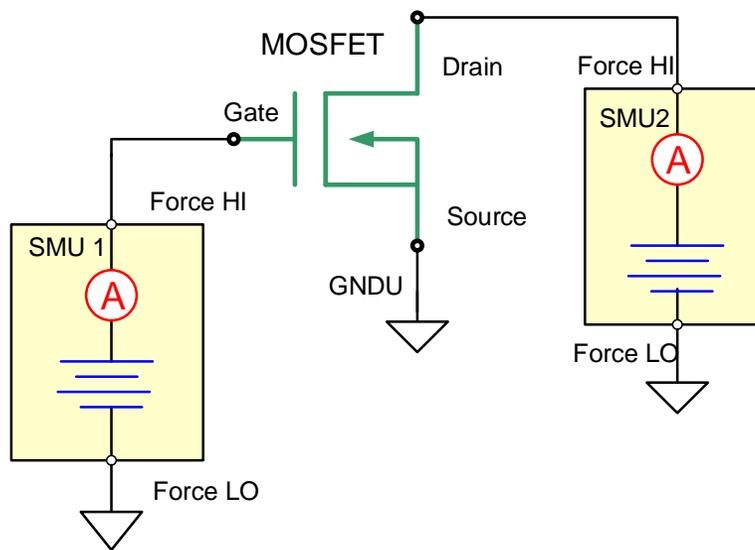
# 输出特性, $I_D$ - $V_D$

- SMU1: 阶跃或恒定  $V_G$
- SMU 2: 扫描  $V_D$ , 测量  $I_D$



# 漏极电流 vs 时间, $I_D$ -t

- SMU1: 恒定  $V_G$
- SMU 2: 恒定  $V_D$ , 测量  $I_D$
- 漏极电流的幅度随生物学被测物量值而变化



# 有机场效应晶体管 (OFET)测试

# 有机场效应晶体管 (OFET)

- 利用有机半导体组成信道的场效应晶体管

- 原料分子通常是含有芳环的 $\pi$ 电子共轭体系

## • 优点

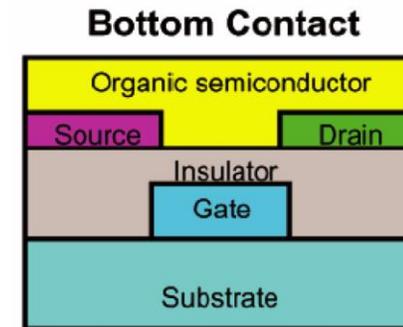
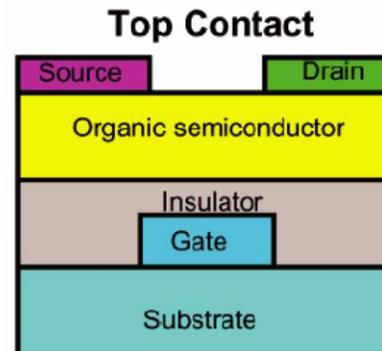
- 低成本
- 重量轻
- 柔性

## • 应用

- 发光 – OLET
- 光电
- 储能



典型结构：顶接触类和底接触类。



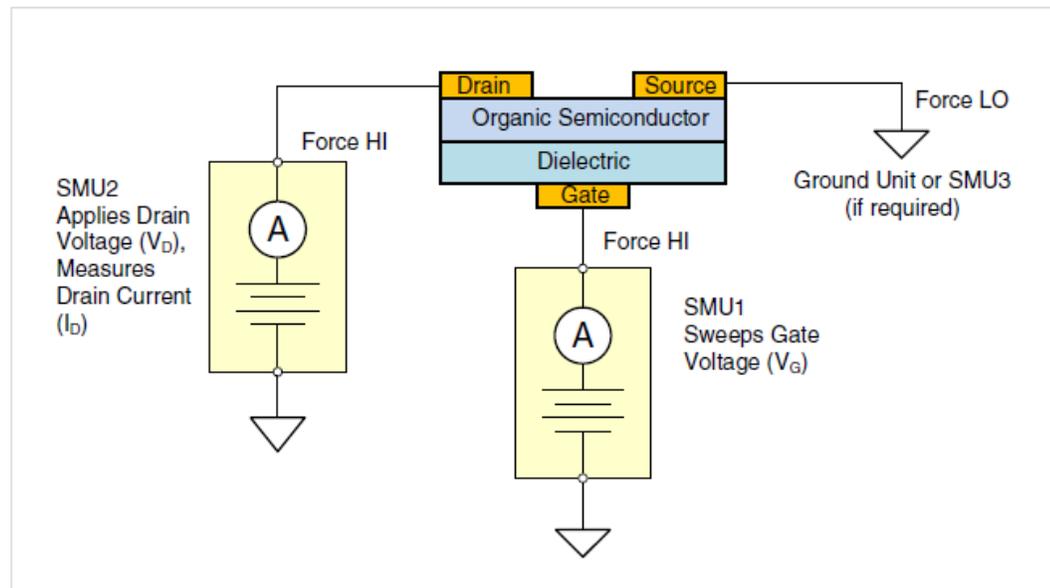
非典型结构：双有源层或双绝缘层等。

Au	Au	CoPc
		CuPc
		Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
		n++ Si

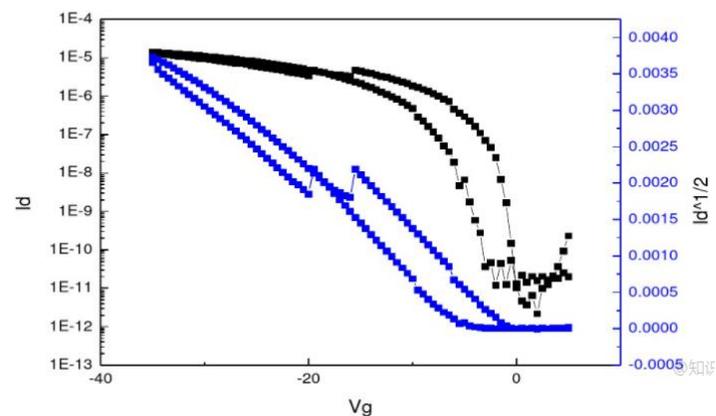
# 有机场效应晶体管 (OFET) 测试

## • DC I-V 测试

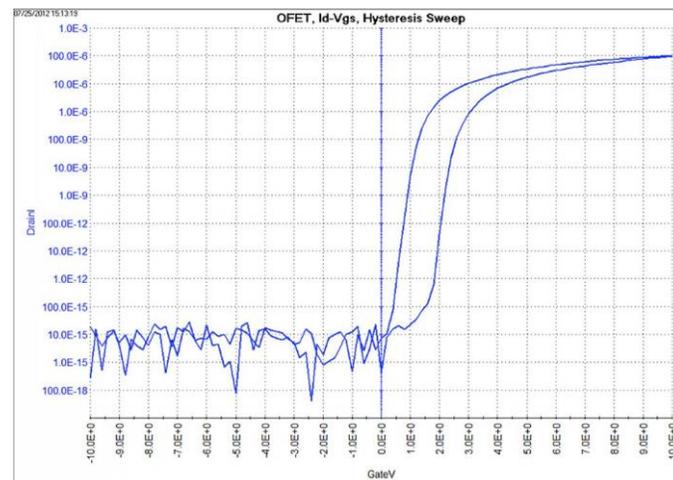
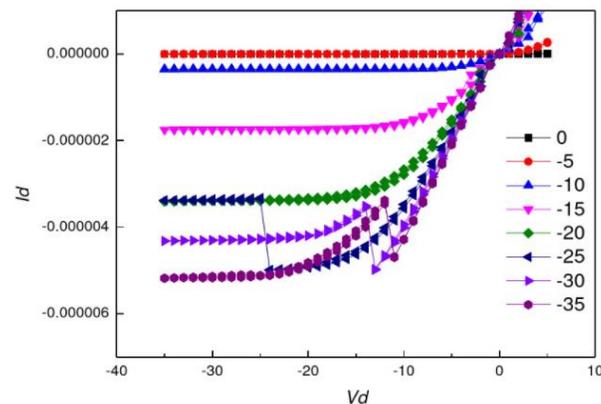
- 输出转移特性
- 迟滞效应 (hysteresis effects)
- 偏压压力测试
- 栅极漏电流测试
- .....



转移特性曲线



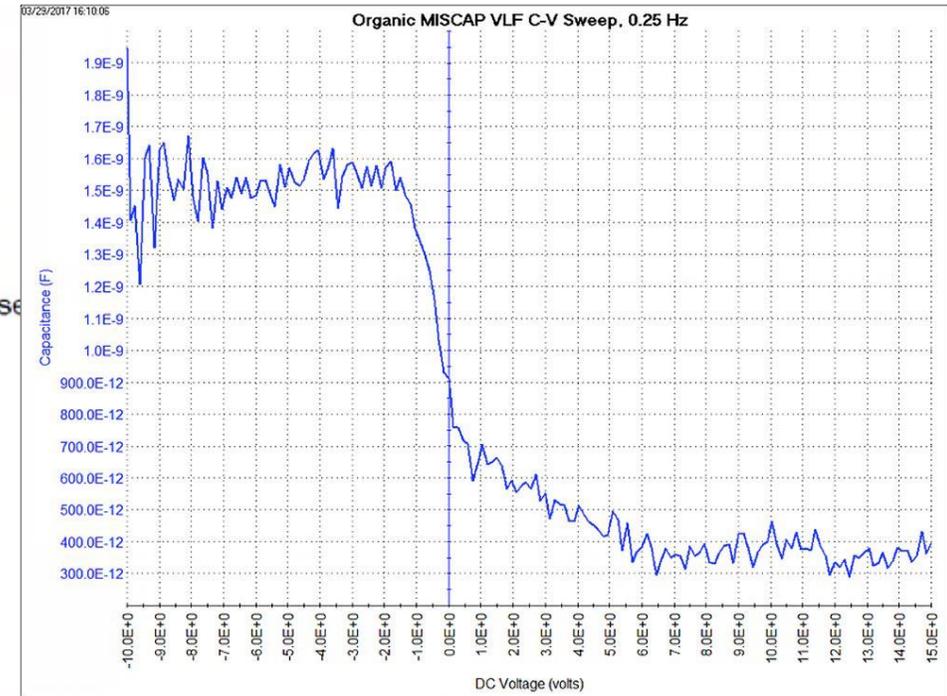
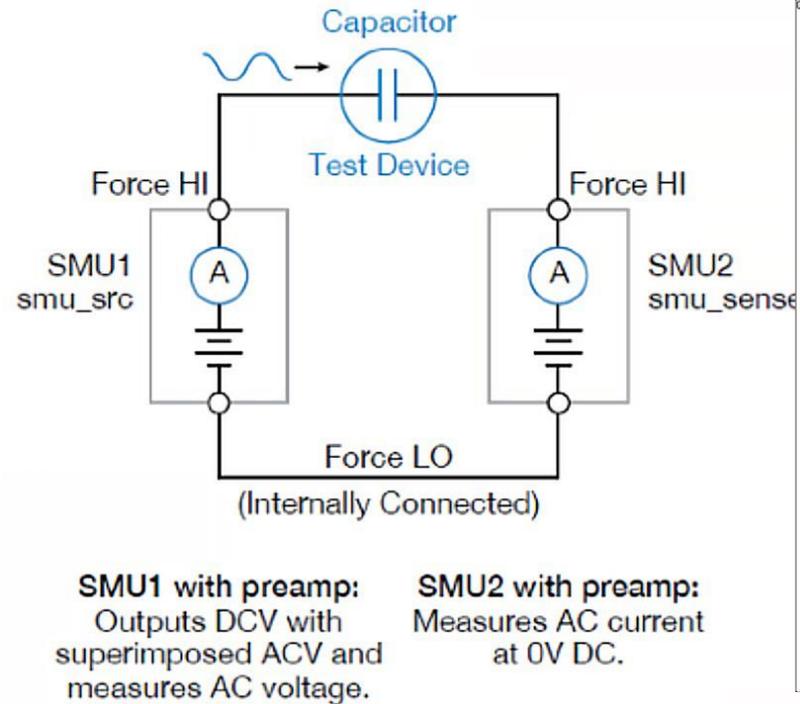
1. 输出特性曲线 (横坐标为源漏电压, 纵坐标为源漏电流)



# 有机场效应晶体管 (OFET) 测试

- 极低频电容测试 (VLF TEST)

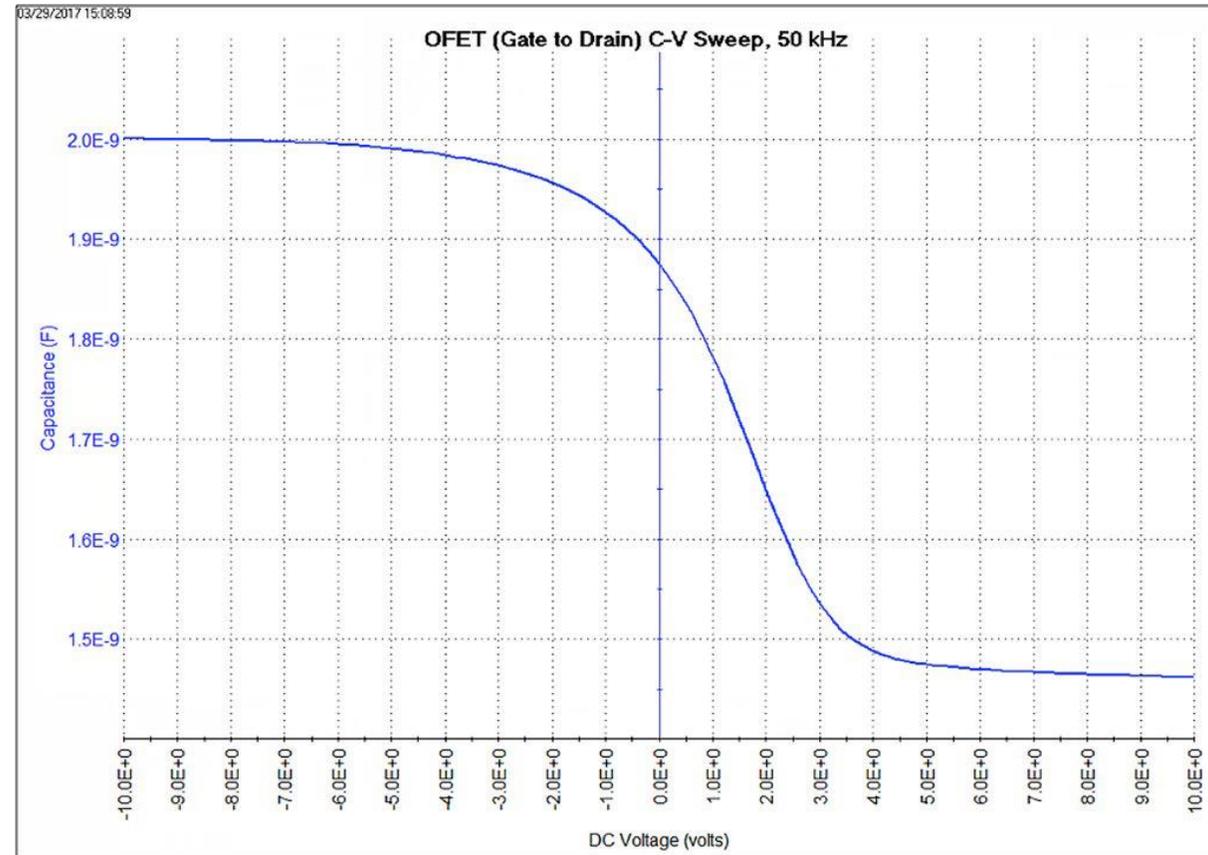
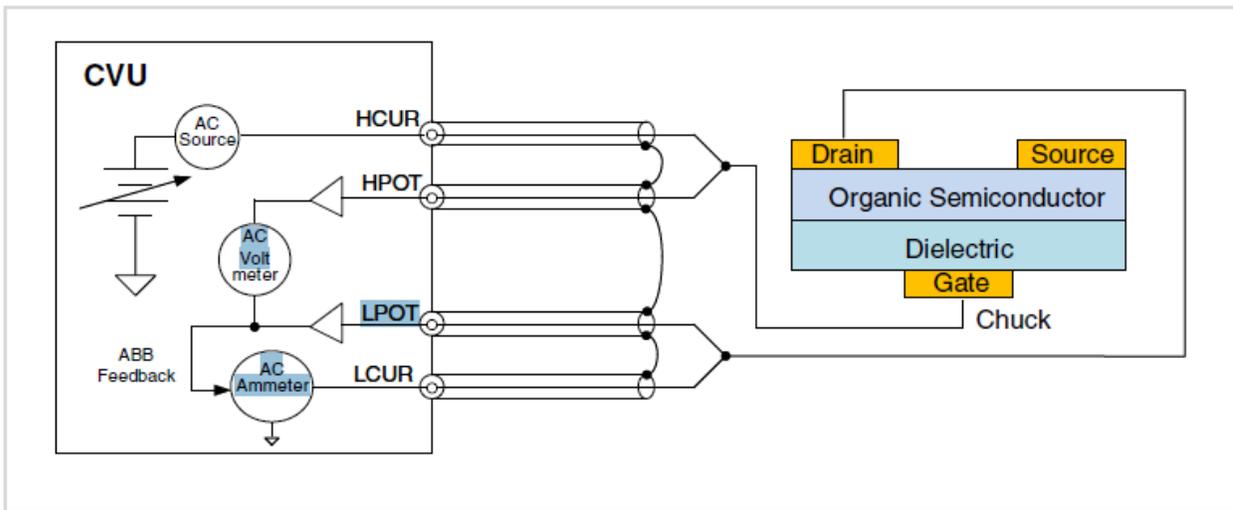
- C-V 及 C-t 测试
- 10 mHz ~ 10 Hz
- 被测电容 1 pF ~ 10 nF 范围
- 利用离散傅里叶变换可计算
  - 阻抗 (Z)
  - 相角 ( $\theta$ )
  - 电容 (C)
  - 电导 (G)
  - 电阻 (R)
  - 电抗 (X)
  - 散逸因数 dissipation factor (D)



# 有机场效应晶体管 (OFET) 测试

- 高频电容测试

- 载流子迁移率
- 门限电压
- 平带电压 (flat band voltage)
- 电荷效应 (charge effects)



# 4200A-SCS 材料测试应用

# Select View - Library

SEARCH AND SELECT FROM HUNDREDS OF TESTS AND PROJECTS IN THE LIBRARY

Select

Project Tree

Library

Test Library (205)

Search Bar

Project Tree

Filters

Messages 2020/10/24 - 21:46:15: Model/Preamp configuration in saved test differs from system configuration. Perform...

# Configure View

## CONFIGURE TESTS WITH MINIMAL KEYSTROKES

### Configure

The screenshot displays the 'Configure' view of a software application. The interface is divided into several sections:

- Project Tree (Left):** A tree view showing a hierarchy of test configurations. The 'ig-vg' configuration is selected and highlighted. Other configurations include '4terminal-n-fet', 'cv-nmosfet', 'pulse-vds-id', 'waveform-meas', '3terminal-npn-bjt', 'vce-ic', 'gummel', 'vcsat', '2-wire-resistor', 'res2t', 'pulse-high-resistance', and 'diode'.
- Set Parameters (Center):** A configuration panel for the selected 'ig-vg#1' test. It features a central schematic diagram of a MOSFET circuit. The parameters are organized into sections:
  - Gate (SMU3):** Operation Mode: Voltage Linear Sweep; Start: 0 V; Stop: 5 V; Step: 0.1 V; Compliance: 0.1 A;  Measure Current;  Report Voltage.
  - Drain (SMU2):** Operation Mode: Voltage Bias; Bias: 0 V; Compliance: 0.1 A;  Measure Current;  Report Voltage.
  - Bulk (GNDU):** Operation Mode: Ground Unit.
  - Source (SMU1):** Operation Mode: Voltage Bias; Bias: 0 V; Compliance: 0.1 A;  Measure Current;  Report Voltage.
- Help Pane (Right):** A pane titled 'MOSFET Gate Leakage Current (ig-vg)' containing a schematic diagram of the MOSFET and descriptive text: 'This test measures the gate leakage current of the MOSFET as a function of the sweeping gate voltage. The test determines the gate leakage resistance using a linear line fit.' It also lists 'Extracted parameter' (Gate resistance), 'Required equipment' (Three or four SMUs), and 'Also see' (The Keithley Instruments Low Level Handbook, 7th edition). Below this are 'Videos' links for 'Accuracy terms defined' in English, Japanese, Chinese, and Korean.

Red annotations highlight the 'Project Tree', 'Set Parameters', and 'Help Pane' sections.

# Analyze View

## ANALYZE RESULTS

Analyze

Run  
Button



Sheet and Graph Views

	DrainI(1)	DrainV(1)	GateV(1)	DrainI(2)	DrainV(2)	GateV(2)	DrainI(3)	DrainV(3)	GateV(3)	DrainI(4)	DrainV(4)
1	15.0859E-6	000.0000E-3	2.0000E+0	23.6998E-6	000.0000E-3	3.0000E+0	32.1665E-6	000.0000E-3	4.0000E+0	4.8572E-6	000.0000E-3
2	679.9682E-6	100.0000E-3	2.0000E+0	1.0752E-3	100.0000E-3	3.0000E+0	1.3885E-3	100.0000E-3	4.0000E+0	1.6533E-3	100.0000E-3
3	1.2967E-3	200.0000E-3	2.0000E+0	2.1007E-3	200.0000E-3	3.0000E+0	2.7341E-3	200.0000E-3	4.0000E+0	3.2682E-3	200.0000E-3
4	1.8516E-3	300.0000E-3	2.0000E+0	3.0768E-3	300.0000E-3	3.0000E+0	4.0369E-3	300.0000E-3	4.0000E+0	4.8448E-3	300.0000E-3
5	2.3429E-3	400.0000E-3	2.0000E+0	4.0001E-3	400.0000E-3	3.0000E+0	5.2914E-3	400.0000E-3	4.0000E+0	6.3776E-3	400.0000E-3
6	2.7744E-3	500.0000E-3	2.0000E+0	4.8758E-3	500.0000E-3	3.0000E+0	6.5072E-3	500.0000E-3	4.0000E+0	7.8763E-3	500.0000E-3
7	3.1456E-3	600.0000E-3	2.0000E+0	5.6980E-3	600.0000E-3	3.0000E+0	7.6770E-3	600.0000E-3	4.0000E+0	9.3332E-3	600.0000E-3
8	3.4591E-3	700.0000E-3	2.0000E+0	6.4706E-3	700.0000E-3	3.0000E+0	8.8003E-3	700.0000E-3	4.0000E+0	10.7472E-3	700.0000E-3
9	3.7179E-3	800.0000E-3	2.0000E+0	7.1893E-3	800.0000E-3	3.0000E+0	9.8734E-3	800.0000E-3	4.0000E+0	12.1139E-3	800.0000E-3
10	3.9282E-3	900.0000E-3	2.0000E+0	7.8585E-3	900.0000E-3	3.0000E+0	10.9025E-3	900.0000E-3	4.0000E+0	13.4409E-3	900.0000E-3

Run History And Terminal Settings

Run4 3/3/2017 14:18:07.000  
More... Reference Data ★★★★★

Run3 3/3/2017 14:17:33.000  
More... Reference Data ★★★★★

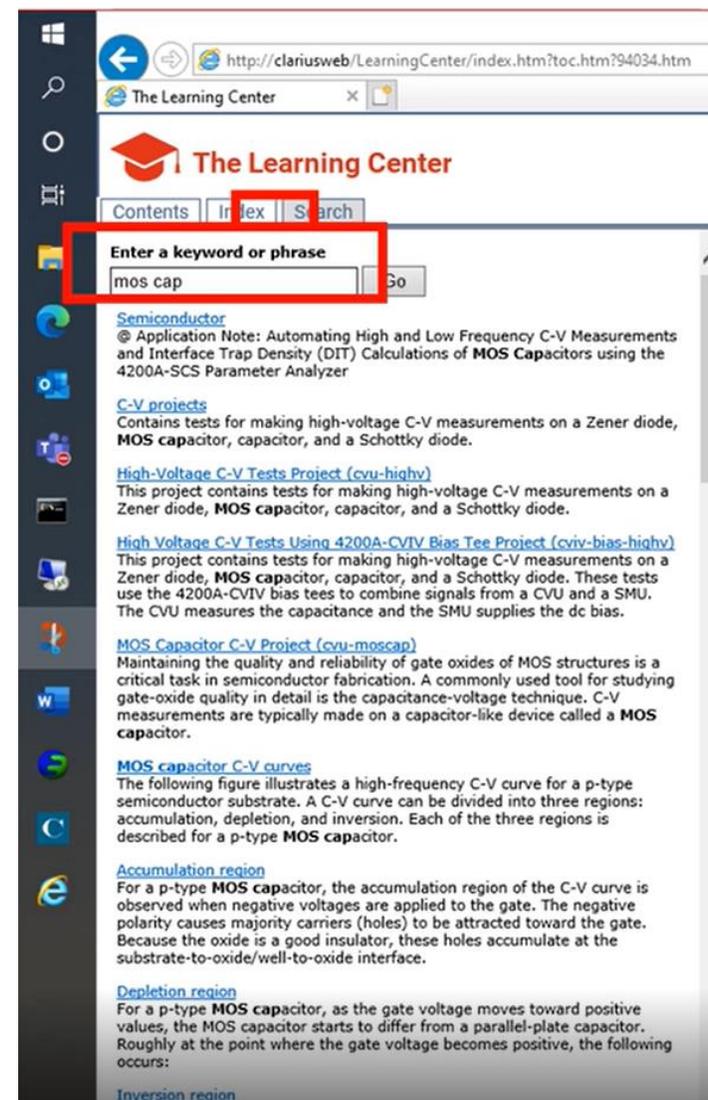
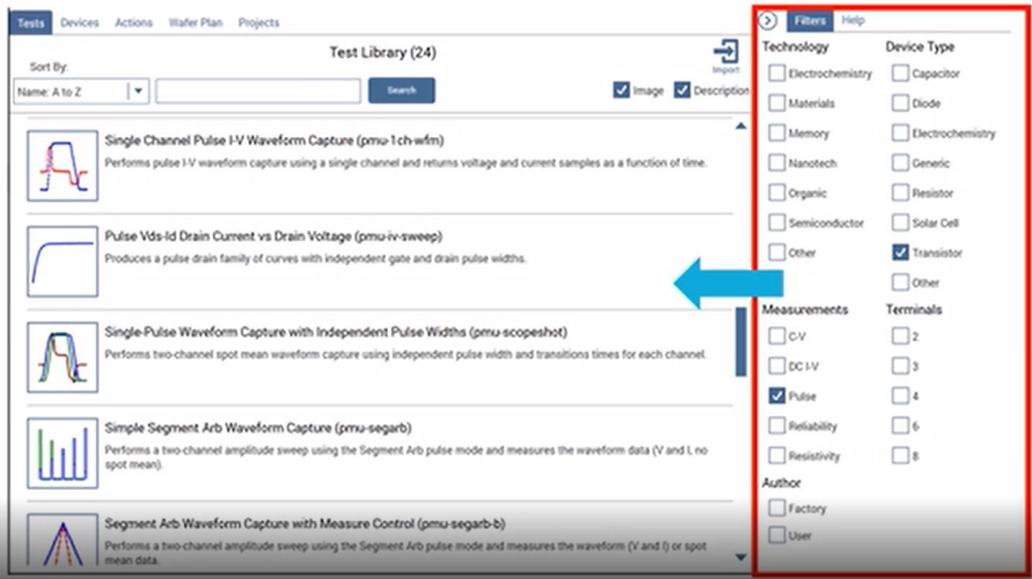
Run2 3/3/2017 14:17:02.000  
More... Reference Data ★★★★★

Run1 3/3/2017 14:16:24.000  
More... Reference Data ★★★★★

# 4200A-SCS

CLAURIS

- 调用应用的方法
  - 过滤 (Filter)
  - 搜索(Search)
  - Learning Center



# 4200-SCS 碳纳米管测试

nanodevices - Clarius PC Edition

Select → Configure → Analyze

Run Stop Save

Copy Cut Paste Rename Delete

nanodevices

- cnt ✓
- nanowire ✓
  - low-sweep ✓
  - low-didv ✓
  - high-sweep ✓
  - high-didv ✓
- molecular-wire ✓
- voltage-sweep ✓
- biocomp ✓
- cntfet ✓
- molecular-transistor ✓
- 6terminal-nanocell ✓

highr-didv#1

View: [Table] [Grid] [Curve]

Save Data Edit

Run1 Formulas List

DIDV= DIFF(CURRENT,VOLTAGE)

	A	B	C	D
1	Current	Voltage	RESISTANCE	DIDV
2	-9.9287E-9	-10.0000E+0	1.0030E+9	#REF
3	-9.8243E-9	-9.9000E+0		1.0436E-9
4	-9.7222E-9	-9.8000E+0		1.0210E-9
5	-9.6230E-9	-9.7000E+0		992.5445E-12
6	-9.5271E-9	-9.6000E+0		958.8918E-12
7	-9.4291E-9	-9.5000E+0		980.2344E-12
8	-9.3286E-9	-9.4000E+0		1.0048E-9
9	-9.2300E-9	-9.3000E+0		985.2886E-12
10	-9.1286E-9	-9.2000E+0		1.0141E-9
11	-9.0314E-9	-9.1000E+0		972.6498E-12
12	-8.9318E-9	-9.0000E+0		995.7686E-12
13	-8.8333E-9	-8.9000E+0		984.5154E-12
14	-8.7344E-9	-8.8000E+0		989.7828E-12

01/06/2004 10:21:04

High Resistance NanoWire dI/dV Sweep

Data Variables  
Run1.RESISTANCE = 1.0030E+9

# 4200A-SCS BioFET 测试

I-V Characterization - Clarius PC Edition (OFFLINE)

Select Configure Analyze

Run Stop Save

Tools My Projects My Settings Learning Center

bioFET test#1

Key Parameters All Parameters

Test Settings Terminal Settings Help

Gate Advanced

Force

Operation Mode: Voltage Linear Sweep

Start: 0 V

Stop: 5 V

Step: 0.05 V

Compliance: 0.1 A

Dual Sweep

Measure

Current

Range: Limited Auto

Low Range: 100pA

Voltage

Report Value: Programmed

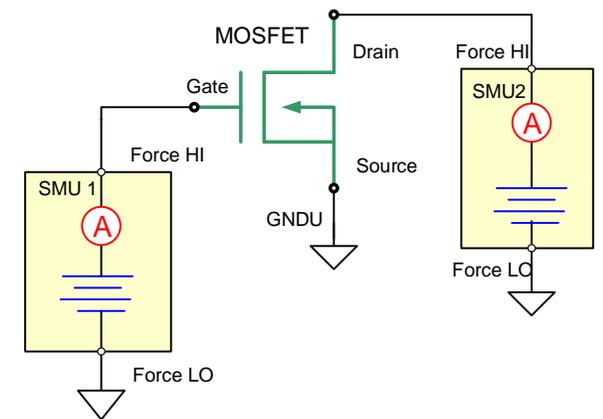
SMU1

SMU2

DUT / BioFET

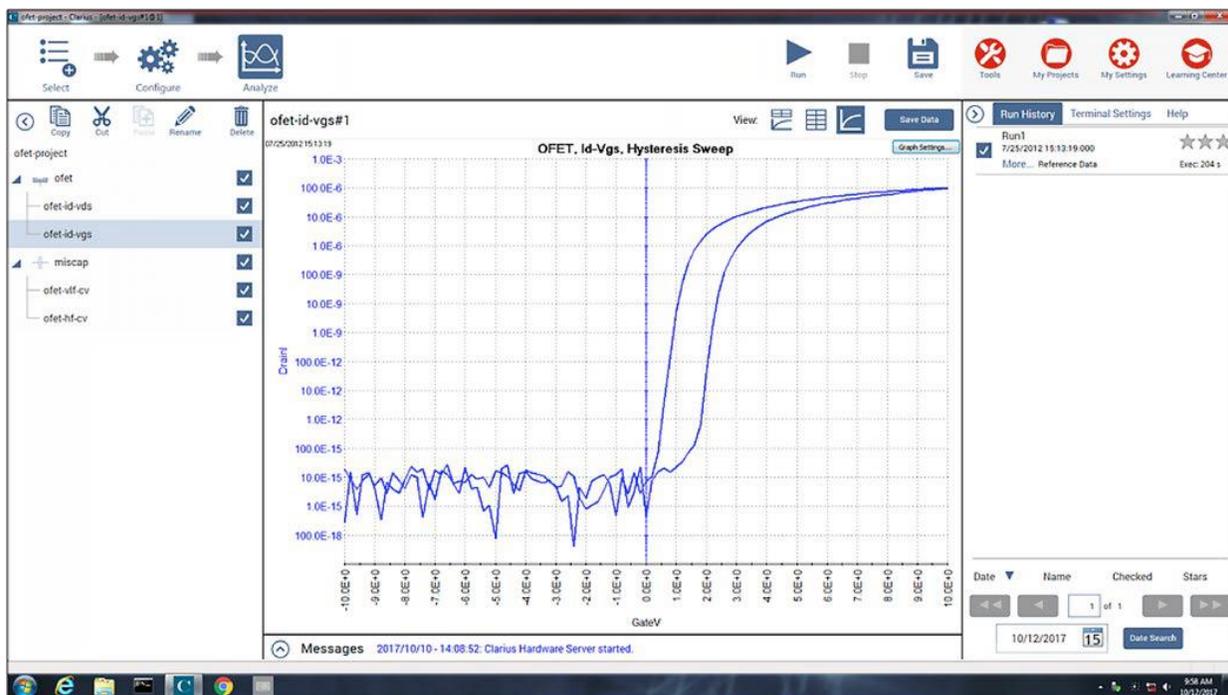
Messages 2020/09/14 - 14:29:14: Clarius Hardware Server started.

每个 SMU 电压、电流电平及相应的时间参数在 4200 相关的测试“Configure View”中设置

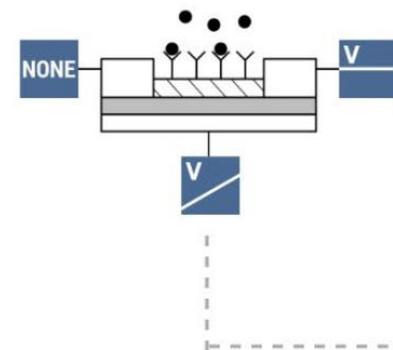


# 4200A-SCS OFET 测试

- SMU进行 DC I-V 及 VLF 测试; fA级电流灵敏度
- CVU进行电容/阻抗测试; fF级电容灵敏度
- 一体化结构, 集成化系统, 自带测试软件, 高精度, 更快速



Source	NONE
Operation Mode	Not Connected



Drain	SMU2
Operation Mode	Voltage Bias
Bias	0.65 V
Compliance	0.1 A
<input checked="" type="checkbox"/> Measure Current	<input checked="" type="checkbox"/> Report Voltage

Gate	SMU1
Operation Mode	Voltage Linear Sweep
Start	0 V
Stop	5 V
Step	0.05 V
Compliance	0.1 A
<input checked="" type="checkbox"/> Measure Current	<input checked="" type="checkbox"/> Report Voltage



**Tel***tronix*<sup>®</sup>

Measurement Solutions to  
Accelerate Innovation