



当代材料科学研究中 电学特性测试

方案汇编

2020 年 4 月

KEITHLEY
A Tektronix Company



目录

一、当代材料科学研究概述3

二、当代材料科学研究中电学特性测试方案汇编4

 a. 凝聚态物理中物性表征测试方案.....4

 b. 纳米结构材料测试方案7

 i. 纳米材料及纳米电子器件测试综述.....7

 ii. 纳米线 / 碳纳米管材料及电子器件其测试方案12

 iii. 二维 / 石墨烯材料及电子器件测试方案.....14

 iv. 纳米发电测试方案17

 v. MEMS 测试方案.....20

 c. 宽禁带材料测试方案22

 d. 电子薄膜材料测试方案23

 e. 绝缘材料测试方案25

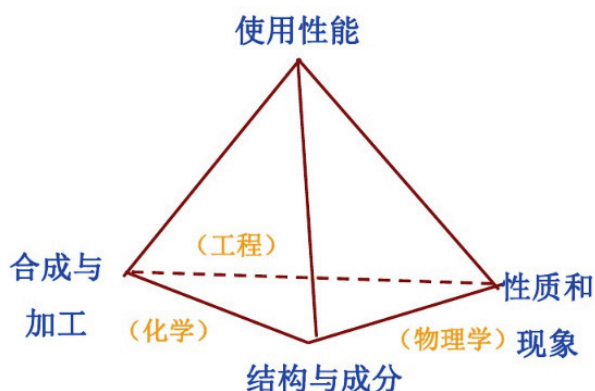
三、当代材料科学研究中 SMU 应用要点及选型指南27

 1. 当代材料科学研究中 SMU 应用要点27

 2. 当代材料科学研究中 SMU 选型指南27

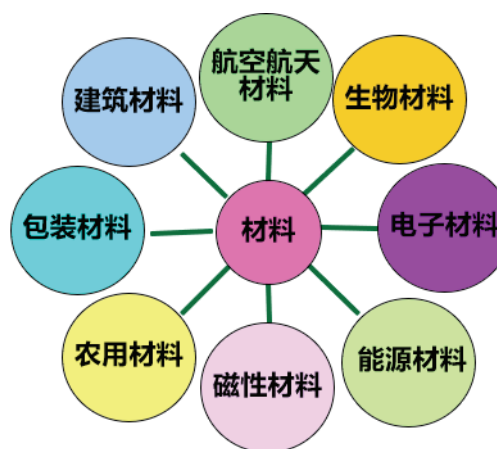
一、当代材料科学研究概述

材料科学是研究材料的组织结构、性质、生产流程和使用效能以及它们之间的相互关系，集物理学、化学、冶金学等于一体的科学。材料的结构与成分、性质和现象、合成与加工以及使用性能构成材料研究的四大



要素。这四大要素的关系可以用右图表示，底层是基础，分别由物理学、化学及工程学相联系，目标是制造出具有使用性能的材料。

材料可按多种方法进行分类：按物理化学属性分为金属材料、无机非金属材料、有机高分子材料和复合材料；按用途分为电子材料、宇航材料、建筑材料、能源材料、生物材料等。实际应用中又常分为结构材料和功能材料，结构材料是以力学性质为基础，用以制造以受力为主的构件。结构材料也有物理性质或化学性质的要求，如光泽、热导率、抗辐照能力、抗氧化、抗腐蚀能力等。功能材料主要是利用物质的物理、化学性质或生物现象等对外界变化产生的不同反应而制成的一类材料，如半导体材料、超导材料、光电子材料、磁性材料等。在新技术迅猛涌现的今天，量子材料、半金属材料、低维材料、拓扑材料、异质结构材料等新名词正不断涌现，这些新型材料的物理学基础是凝聚态物理学。



随着高科技的发展，材料科学和新材料主要在以下几个方面得到发展。

- 1 复合材料是结构材料发展的重点。
- 2 功能材料与器件相结合，并趋于小型化与多功能化。
特别是外延技术与超晶格理论的发展，使材料与器件的制备可以控制在原子尺度上，这将成为发展的重点。
- 3 开发低维材料。低维材料具有体材料不具备的性质。
例如零维的纳米级金属颗粒是电的绝缘体及吸光的黑体，以纳米微粒制成的陶瓷具有较高的韧性和超塑性；纳米级金属铝的硬度为块体铝的 8 倍；作为一维材料的高强度有机纤维、光导纤维，作为二维材料的金刚石薄膜、超导薄膜等都已显示出广阔的应用前景。

- 4 信息功能材料增加品种、提高性能。这里主要是指半导体、激光、红外、光电子、液晶、敏感及磁性材料等，它们是发展信息产业的基础。高温超导材料将会继续得到重视，并预计在 21 世纪末达到产业化。
- 5 生物材料将得到更多应用和发展。
- 6 传统材料仍将占有重要位置。
- 7 C60 的出现为发展新材料开辟了一条崭新的途径。利用原子簇技术可能发展出更多的新材料。

材料性质的研究是当代材料科学的重要一环，所谓材料的性质是指对材料功能特性和效用的定量度和描述，即材料对电、磁、光、热、机械载荷的反应。材料性质主要包括如下三方面：力学性质，研究材料的强度、硬度、刚度、塑性、韧性；物理性质研究材料的电学性质、磁学性质、光学性质、热学性质；化学性质研究材料的催化性质、防腐性质。当代材料科学研究中，新型功能性材料的输运性质及电学性质是表征材料属性的重要参量。

作为电子测量领域主要供应商之一的泰克公司 (Tektronix)，是世界第一台触发式示波器的发明者，其市场遍布全球各洲。泰克公司产品主要包括示波器、信号源、电源、频谱分析仪和误码率分析仪。2010 年，吉时利 (Keithley) 公司加入泰克公司大家庭后，泰克公司更是如虎添翼。吉时利的品牌在全球许多学科工程师和科学家中享有盛誉，其高精度源表 (SMU)、万用表、精密电源、微小信号测试以及数据采集产品，同泰克公司原有的产品线一同为当代材料科学研究提供多种测试方案。

本手册将介绍当代材料科学面临的挑战以及应对这些挑战泰克公司提供的测试方案，这些方案涉及当代材料科学尖端的电输运及量子材料 / 超导材料测试、一维 / 碳纳米管材料测试、二维材料及石墨烯测试及纳米材料的应用测试。由于 SMU 及微小信号测试仪器在这些尖端测试领域起着举足轻重的作用，本手册最后会总结关键的测试要点及 SMU 的选型指南。

希望本手册能为当代材料科学研究尽微薄之力。

二、当代材料科学研究中电学特性测试方案

a. 凝聚态物理中物性表征测试方案

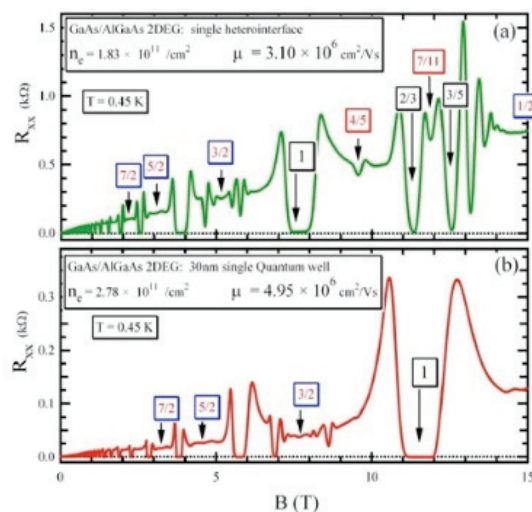
概述：

凝聚态物理学是研究由大量微观粒子 (原子、分子、离子、电子) 组成的凝聚态物质的微观结构、粒子间的相互作用、运动规律及其物质性质与应用的科学，是当代材料科学的物理学基础。

凝聚态物理学研究的方向主要有：高温超导及相关强关联体系的基本电子性质、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等，量子材料 / 超导材料 / 半金属材料 / 异质结构材料 / 超硬等都是凝聚态物理学研究的对象。

综合物性测试是凝聚态物理学的主要测试，包括电输运测试如：电阻率、微分电阻、霍尔系数、伏安特性、临界电流等；磁学测试如：交流磁化率、磁滞回线，磁阻等；热学测试如：比热、热磁曲线、热电效应、塞贝克系数、热导率等；还包括光学测试、压力测试、形貌表征等。通常综合物性测试由 PPMS 完成。

电输运性质是物质 (或材料) 的最基本和最重要的物理属性之一，反映了与电荷相关的基本物理行为，如电阻、Hall 电阻随温度、磁场、压力变化的规律，以及相关的物理效应如 Shubnikov-de Haas 量子振荡、量子霍尔效应等，是综合物性中最重要的性质之一。

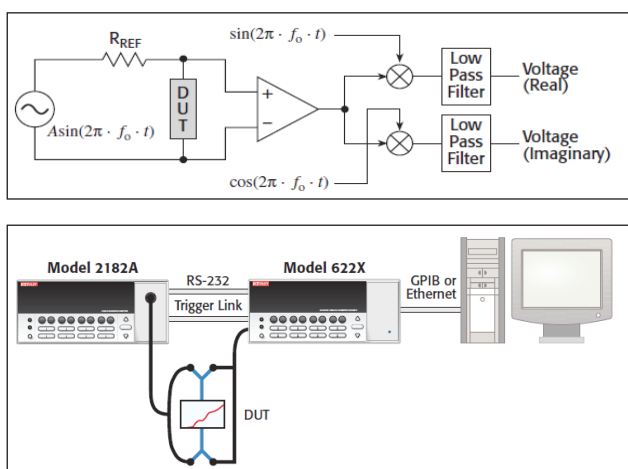


电输运测试面临的挑战

1. 特殊的测试条件。一般条件下，被测样品被放置在低温（通常是超导）及磁场环境中，其低温最低可达 0.1mK，磁场可高达 16T。在极端条件下，磁场可达 100T 脉冲强磁场，压力可达 100GPa。PPMS 可以提供一般条件下的测试环境，在此环境下，测试电缆连线需考虑热效应及对测试结果的误差因素。
2. 需要极小或极大电阻的测试。在超导条件下，被测样品电阻可能低至 $n\Omega$ 级。而极端情况下，被测样品电阻可能高达 $G\Omega$ 级，PPMS 内置输运测试选件达不到要求。
3. 需要测试极小电压、电流及微分电导，此时信号往往淹没在噪声中，PPMS 内置测试选件往往不能满足要求。

应对挑战：

为应对电输运测试面临的挑战，在 PPMS 的基础上，必须添加高精度适合极低电平测试的仪器作为必要的补充，该仪器必须具备去除噪声的能力。以锁相放大器为测试仪器的 AC 法和以泰克（吉时利）622x 低电平电流源 /2182A 纳伏计组合构成的 Delta 模式是两种主要的应对挑战的方法，两种方法的框图如下：

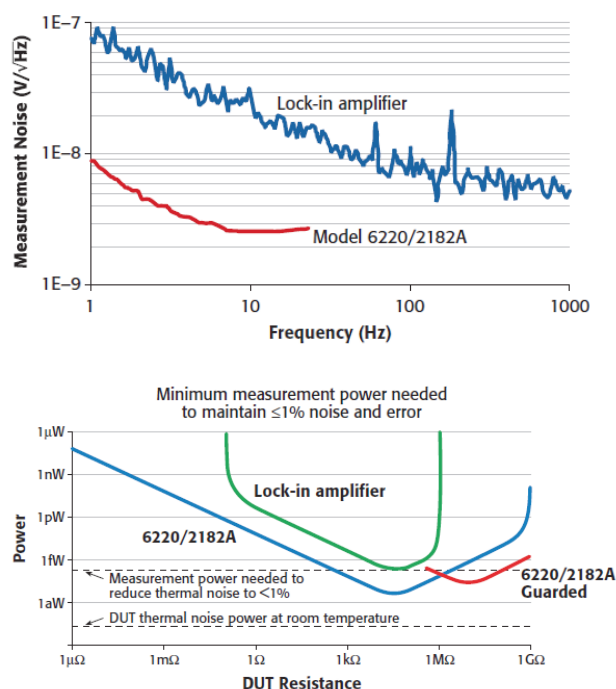


AC 法框图

Delta 模式

Delta 模式可以提供准直流电流反向技术的测量和计算，以消除温差电动势的影响，每个 Delta 读数都是根据通道 1 的两个电压测量结果计算而来；一个测量电流源的正相，一个测量负相，从而使噪声降低 1000 倍。

AC 法和 Delta 模式法各有优势，相辅相成，一般在电输运测试时都配置。下图示意出两者应用范围：



从上两图可以看出，锁相放大器可在更高频率应用，比如脉冲测试，但对电阻测试，锁相放大器放较适合 $100m\Omega \sim 1M\Omega$ 范围的测试，而 Delta 模式可测试更低电平的信号，也更适合低于 $100m\Omega$ 及大于 $1M\Omega$ 的电阻测试。

泰克电输运测试方案：

除了低电平测试仪器，通常电输运测试还要配置 SMU 作为直流激励源。特殊情况下还需要 AFG 作为交流激励源，采集卡或示波器用于采集锁放输出信号。如果测试介电常数，还需配置静电计。高频输运特性的研究是电输运特性测试的发展方向，研究高频输运特性时，需配置带宽达 GHz 的任意波形发生器。

单一被测样品测试方案：

- 6221/2182A 一套
- 24XX 或 26XX 一台
- 选配（各一台）
 - AFG31252
 - 2002 八位半数字万用表
 - 6514 或 6517 或 6430(测试介电常数)



6221 电流源



2182A 纳伏表



6517B 静电计



2400 系列 SMU

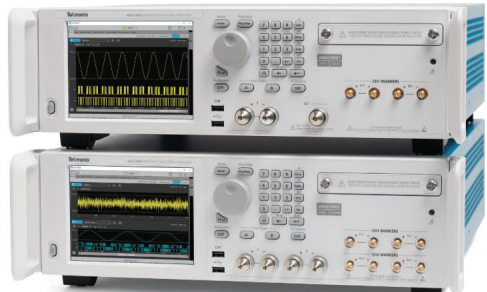
多被测样品同时测试方案：

多样品测试，可以在单一样品的配置基础上加开关阵列轮回测试，但某些情况下，如比热和磁阻测试时，同一过程无法用轮回方式测试，此时需配置多套 SMU 及低电平测试仪器，套数与 PPMS 锁提供的测试线的数量相关。其原则是每四根连一套源表，每八根线连一套 6221/2182A。右表给出某研究院四套 PPMS 多样品同时测试的典型配置，该配置中除了单一样品配置中必配及选配的要求外外，还包含了一些特殊用途的源表及一套 4200A-SCS 半导体参数测试仪，用于特殊被测样品的测试。

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-CV/IV	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

高频输运特性测试方案：

测试高频输运特性，需在一般输运特性配置基础上，增配 AWG 系列任意波形发生器。泰克提供 AWG5200 及 AWG70000 系列任意波形发生器。下表为泰克任意波形发生器的主要参数：



AWG70001B 与 AWG70002B



AWG5200

型号	AWG70001B	AWG70002B	AWG520X
通道数	1	2	2, 4, 8
最高带宽	15GHz	13.5GHz	4GHz
最高采样率	50GHz	25GHz	10GHz
垂直分辨率	10bits	10bits	16bits
SFDR	-80dBc	-80dBc	-70dBc
最大波形存储深度	2G/CH(标配) 32G/CH(选配)	2G/CH(标配) 16G/CH(选配)	2G/CH

方案优势：

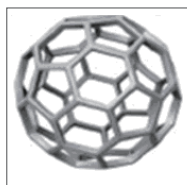
- 100fA~100mA 电流输出，1nV 电压测试灵敏度，高达 10nΩ 电阻测量灵敏度
- 泰克独有的 TSP LINK 连接 6221/2182A，自动完成 Delta 模式测试
- Delta 模式可降低噪声 1000 倍
- 多型号高精度 SMU 供激励源选择
- 领先的 AWG 为高频输运特性研究提供强力支持
- 电输运测试领域普遍采用

纳米材料结构材料测试方案

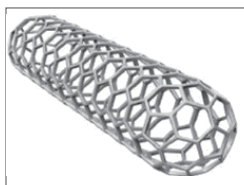
纳米材料及纳米电子器件测试综述

概述：

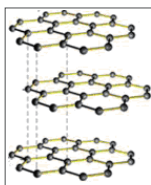
所谓纳米材料，指的是三维空间尺度至少有一维处于纳米量级 (1–100nm) 的材料，是由尺寸介于原子、分子和宏观体系之间的纳米粒子所组成的新一代材料。



零维富勒烯

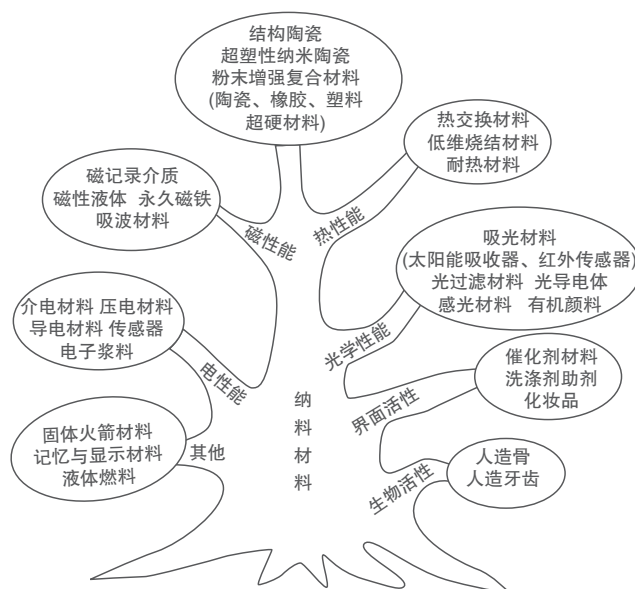


一维碳纳米管



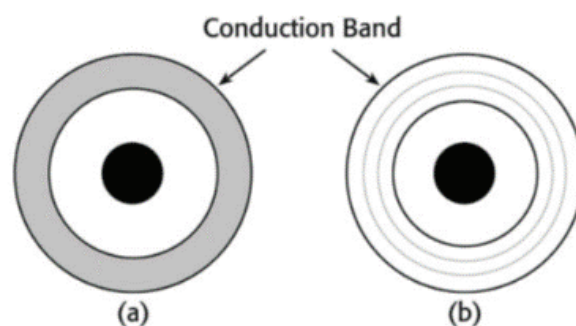
三维石墨烯

纳米材料可以按照多种尺度进行分类，按结构可以分为：零维材料 – 量子点，纳米粉末，纳米颗粒；一维材料 – 纳米线或碳纳米管；二维材料 – 纳米薄膜，石墨烯；三维测量 – 纳米固体材料。按组成可以分为：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。下图是将纳米材料按其物理性质进行分类并列出纳米材料应用的示意图，由此可见，纳米材料已经在多领域得到广泛应用。



纳米材料的特性

由于纳米材料的某一维或多维尺寸为纳米量级，使得其具有许多异于宏尺寸材料的特性。纳米材料的基本特性包括：表面与界面效应，如熔点降低比热增大；小尺寸效应，如导体变得不能导电；绝缘体却开始导电以及超硬特性；量子尺寸效应和宏观量子隧道效应。纳米材料的理化性能为：高强度、高韧性；高比热和热膨胀系数；异常电导率和扩散率；高磁化率。



纳米材料电子器件

基于以上特性，纳米材料被广泛用于制作纳米电子器件。纳米电子器件指的是利用纳米级加工和制备技术，设计制备而成的具有纳米级尺度和特定功能的电子器件。纳米电子器件包括纳米 CMOS 器件，如绝缘层上硅 MOSFET、硅-锗异质 MOSFET、低温 MOSFET、双极 MOSFET、本征硅沟道隧道型 MOSFET 等；量子效应器件；量子干涉器件、量子点器件；谐振隧道器件如横向谐振隧道器件、谐振隧道晶体管，谐振隧道场效应晶体管 (RTEET)、双极量子谐振隧道晶体管、谐振隧道热电子晶体管等；纵向谐振隧道器件如隧道势垒调制晶体管等；单电子器件如单电子箱、电容耦合和电阻耦合单电子晶体管、单电子神经网络晶体管、单电子结阵列、单电子泵浦、单电子陷阱和单电子旋转门等；单原子器件和单分子器件如单电子开关、单原子点接触器件、单分子开关、分子线、量子效应分子电子器件、电化学分子电子器件等。

纳米材料电学性能测试

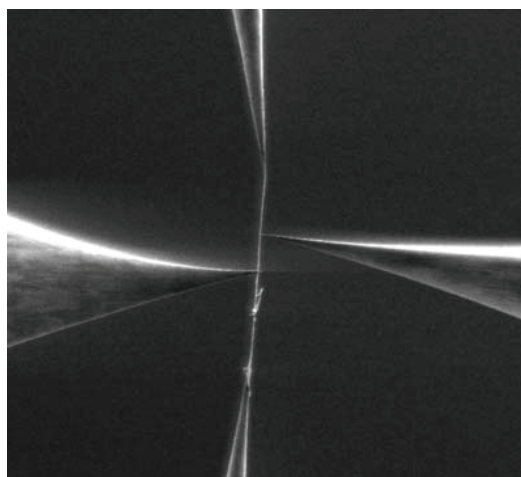
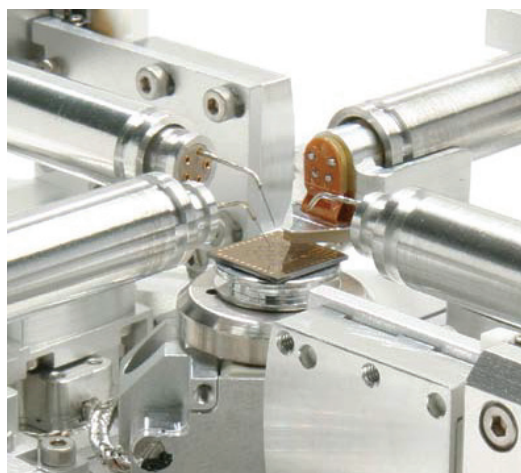
纳米材料的表征包括成分分析，颗粒分析，结构分析，性能分析，分析方法以电镜分析为主，特别是扫描隧道电镜 (SMT)，在导体和半导体纳米材料分析上具有优势。

纳米材料的电学性能测试是对其态密度 (Density of State) 进行分析。所谓态密度指的是单位能量范围内所允许的电子数，也就是说电子在某一能量范围的分布情况。态密度是微观量，适合解释纳米粒子尺寸变化引起的特性。

$$\rho(E) = \frac{dn_s}{dE} = \frac{4\pi(2m)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E}$$

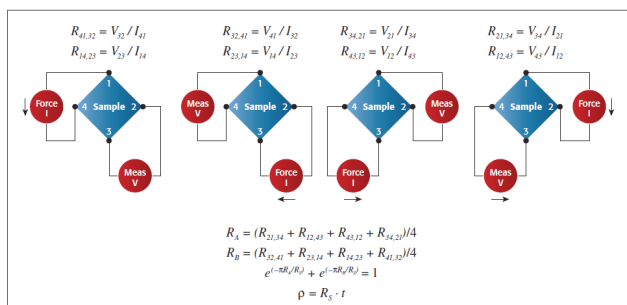
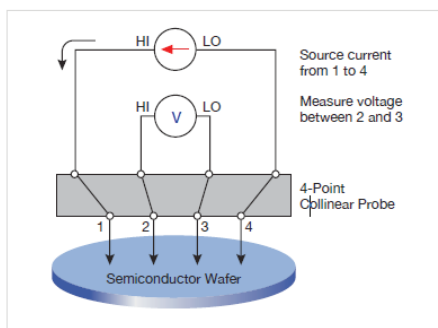
X 射线光谱 (X-Ray Spectroscopy) 是进行态密度测试的常规方法，但通过对纳米材料电性能直接测试，也可以推到出态密度。用扫描隧道电镜测试用微分电导 (di/dv) 随电压的曲线即可推到出态密度。这种方法利用低电平 AC 信号调制于静态电流进行测试，电镜电极与被测样品间为高阻接触。

由于 X 射线光谱和扫描隧道电镜都是昂贵的设备，如果不是制备并表征纳米材料，仅仅是对纳米材料进行应用性研究，源表 (SMU) + 纳米探针台不失为一种高性价比的替代方案。与扫描隧道电镜法不同，纳米探针台和被测样品间为低阻接触，这就要求 SMU 必须具备低电平测试能力，并根据被测样品的阻抗改变 SMU 工作模式。这种方法主要测试被测样品的电阻，电阻率及霍尔效应，更适合纳米电子器件的测试。



二维纳米材料电阻率测试

对二维纳米材料(如石墨烯),电阻率测试是重要的测试项目,测试方法主要为四探针法(The Four-Point Collinear Probe Method)与范德堡法(The van der Pauw method)下两图分别为两种方法的示意图,具体理论此处不再赘述。

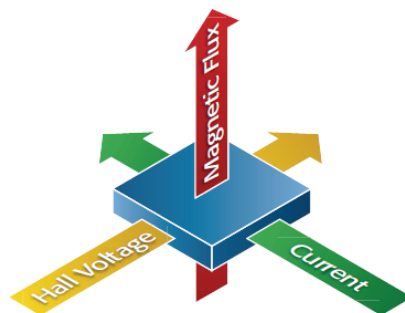


$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V}{I} \times t \times k$$

$$\sigma = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} k = 4.532 \frac{V}{I} k$$

二维纳米材料霍尔效应测试

当电流垂直于外磁场通过半导体时,载流子发生偏转,垂直于电流和磁场的方向会产生一附加电场,从而在半导体的两端产生电势差,这一现象就是霍尔效应,这个电势差也被称为霍尔电势差。通过对电势差测试,可以得到被测材料的载流子浓度与载流子迁移率等参数。二维纳米材料霍尔效应测试,依然用范德堡法,但电极接线与范德堡法测试电阻率有所不同,并且在测试霍尔效应时,通常要加磁场。下图为霍尔效应测试示意图,其理论不再赘述。

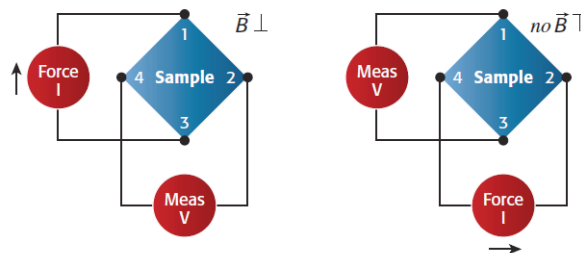


$$V_C = V_{24P} - V_{24N}$$

$$V_D = V_{42P} - V_{42N}$$

$$V_E = V_{13P} - V_{13N}$$

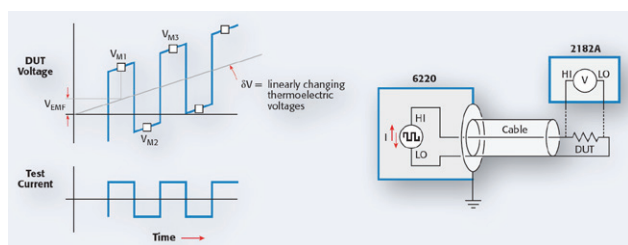
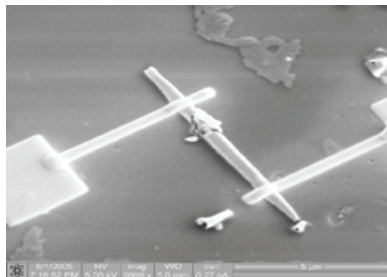
$$V_F = V_{31P} - V_{31N}$$



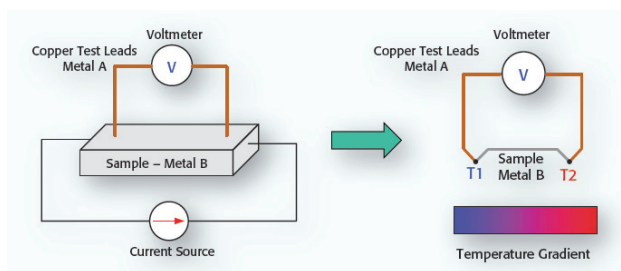
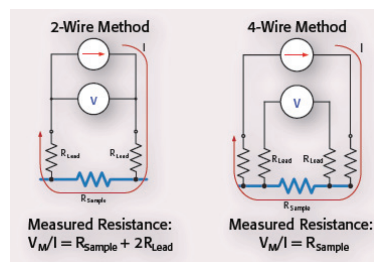
$$V_H = (V_C + V_D + V_E + V_F)/8$$

纳米材料及电子器件电学测试面临的挑战

- 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
- 需配合纳米探针台
- 必须防自热，否则极易烧毁被测样品，需选择带有脉冲模式的 SMU



- 纳米材料承受及测试电流超小 (达 fA 级)，承受及测试电压超低 (达 nV 级)，不同种类的材料，电阻范围超宽，从 $\mu\Omega \sim T\Omega$ ，需选择与被测纳米材料和器件电性能相适应的 SMU，需多种降低误差与噪声的手段，如加流测压或加压测流，四线法连接，屏蔽与滤波，降低热噪声等。

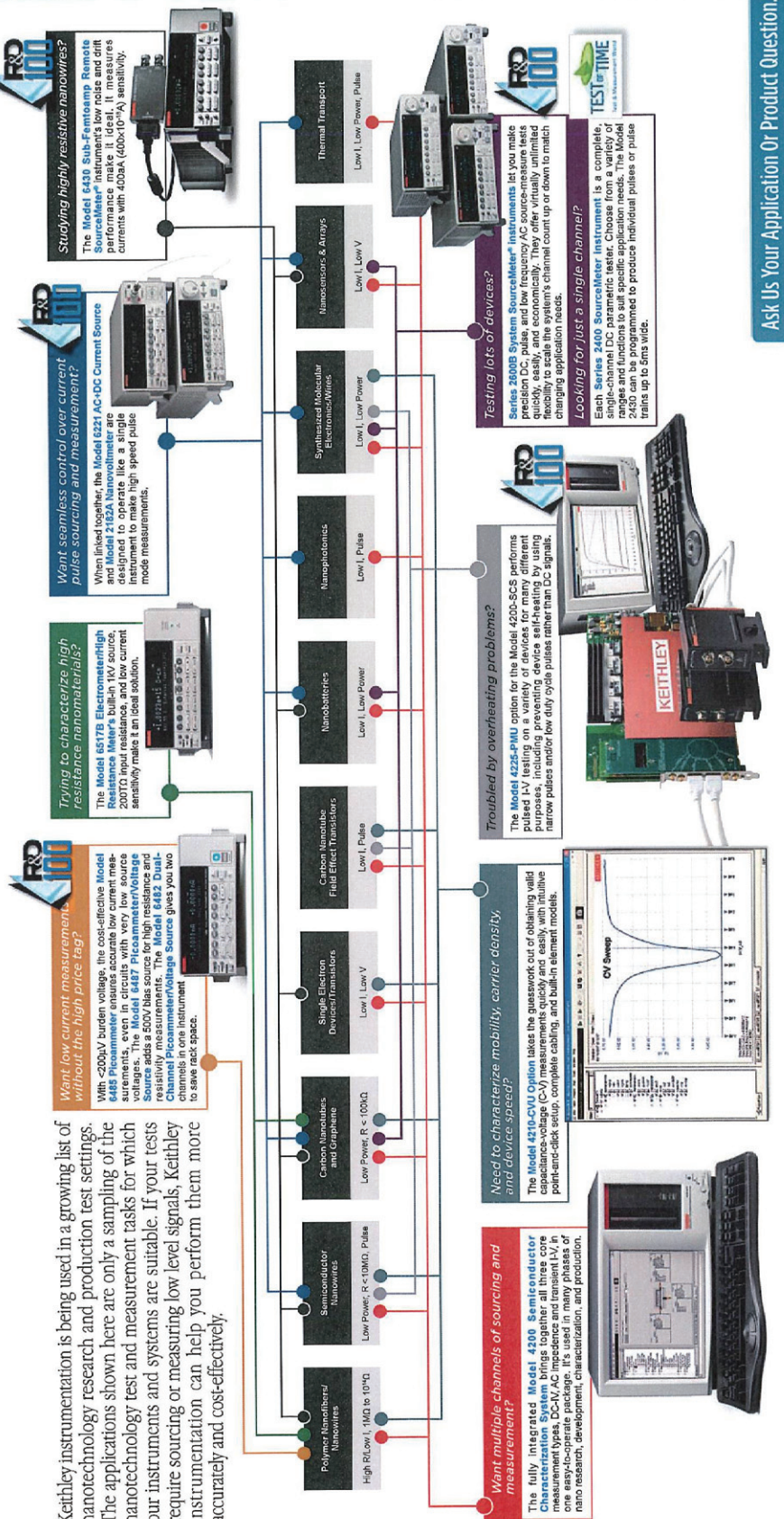


纳米材料及电子器件电学测试方案

有关纳米材料电学测试方案将分别在《纳米线 / 碳纳米管测试方案》及《二维 / 石墨烯材料测试方案》中详述。下页给出了纳米材料电学测试 SMU 应用场景，测试特点及选型原则的示意图，通过该图，结合被测纳米材料或纳米电子器件的类型及测试要点，选择最适合的 SMU。从该图还可以看出，4200 - SCS 几乎适用于全部种类的纳米材料的测试，当然，某些特殊的源表更适合一些特殊的应用。

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.



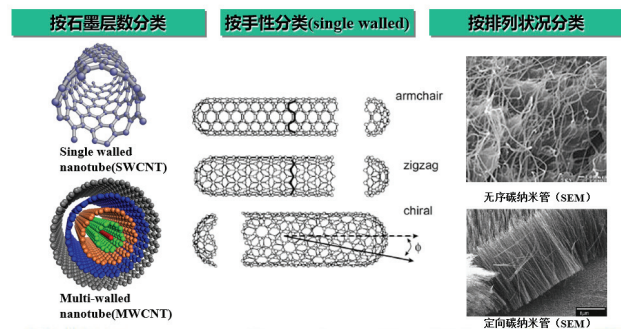
纳米线 / 碳纳米管及电子器件测试

概述：

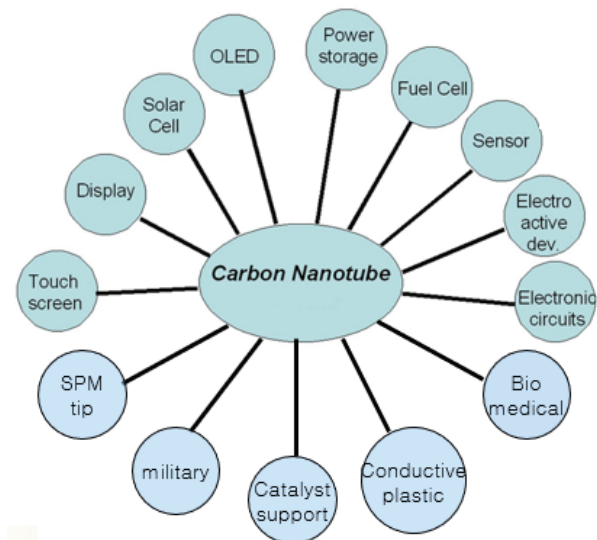
纳米线（Nano Wire）为一种横向上被限制在 100 纳米以下（纵向没有限制）的一维材料。根据组成材料的不同，纳米线可分金属纳米线，半导体纳米线和绝缘体纳米线。

作为纳米材料的一种，纳米线具备上节中概述的纳米材料全部特性，在电子、光电子和纳电子机械器械中，纳米线起到很重要的作用。它同时还可以作为合成物中的添加物、量子器械中的连线、场发射器和生物分子纳米感应器等。

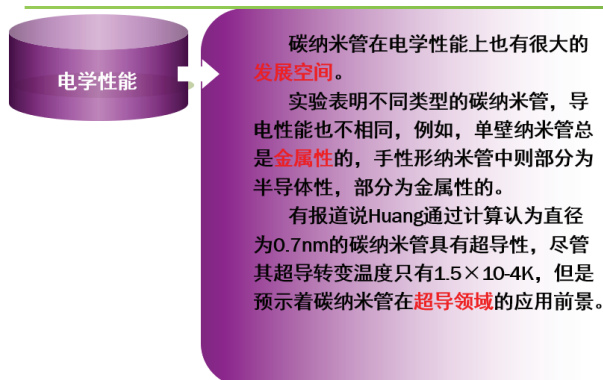
碳纳米管又名巴基管，碳的同素异形体，是一种典型的纳米线。碳纳米管的分类如下图所示。



碳纳米管的应用十分广泛，下图示意出碳纳米管的典型应用。



碳纳米管的性质可以从电学，力学，热学，储氢及其它性质五个方面表征，其电学性质如下图：



□ 电特性与管径有较大关系

- $d > 6\text{nm}$ 导电性明显下降
- $d < 6\text{nm}$ 优良的导电性
- $d \sim 0.7\text{nm}$ 表现出超导性

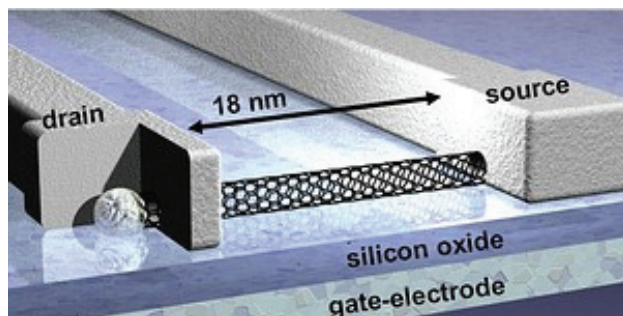
□ 电阻率 $0.05\ \mu\Omega\cdot\text{m} \sim 10\ \text{m}\Omega\cdot\text{m}$

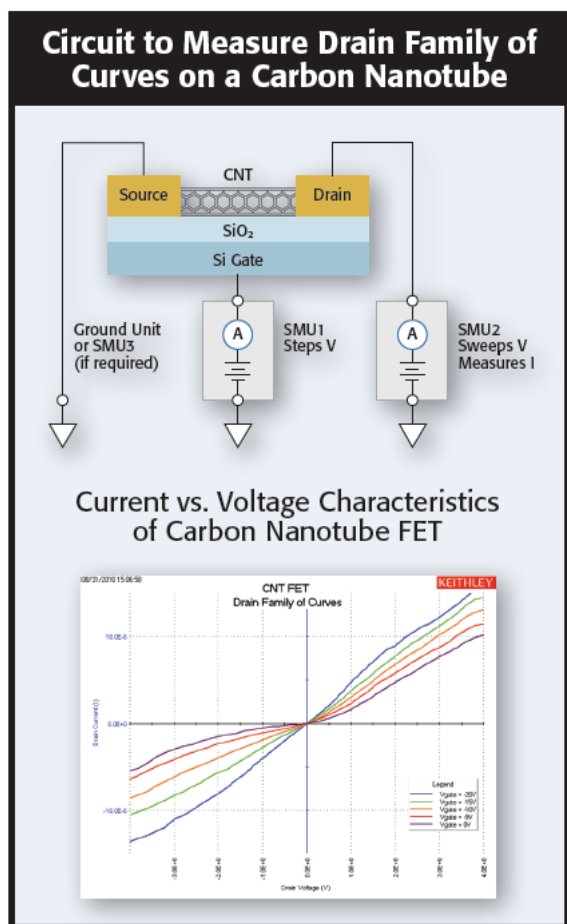
□ 电流密度 $10^{10} \sim 10^{13}\ \text{A}/\text{m}^2$

纳米线 / 碳纳米管及其电子器件测试

碳纳米管特殊的电学性能，使其被广泛用于制作碳纳米管电子器件。碳纳米管电子器件主要包括碳纳米管场发射器，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，碳纳米管集成电路及碳纳米管计算机。

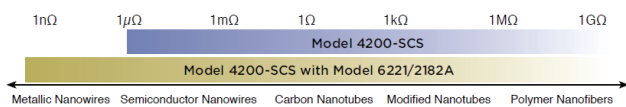
纳米线 / 碳纳米管电学性能测试面临的挑战已经在上节中讨论过，在此不再赘述。





I-V 测试是纳米线 / 碳纳米管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，SMU 选择依据为：

- 被测样品所需 SMU 通道数
- 被测样品是否有脉冲测试需求
- 被测样品是否有电容测试需求
- 被测样品电阻范围，施加或测试的电流范围以及施加或测试的电压范围



SMU 选型指南详见上节中最后一张图。

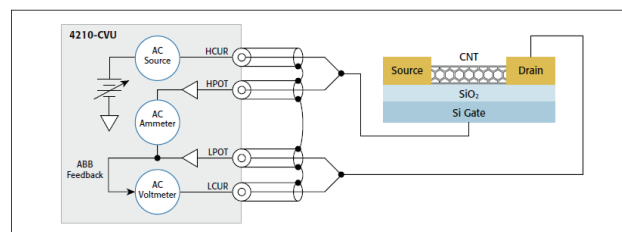
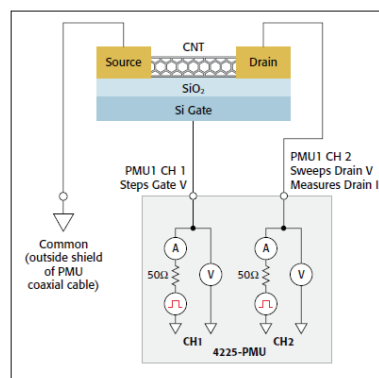
纳米线 / 碳纳米管及其电子器件综合测试方案

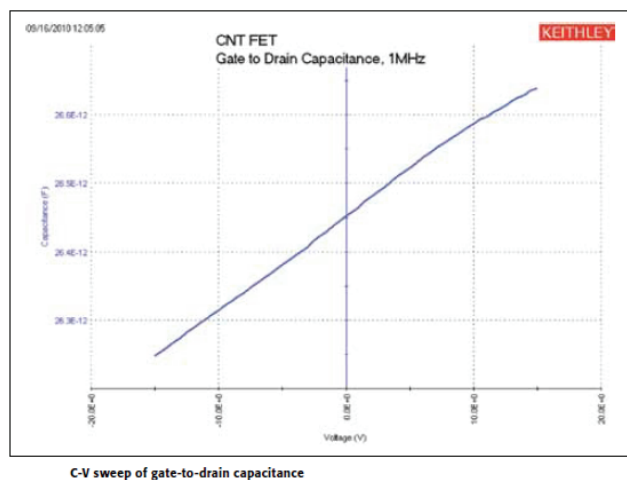
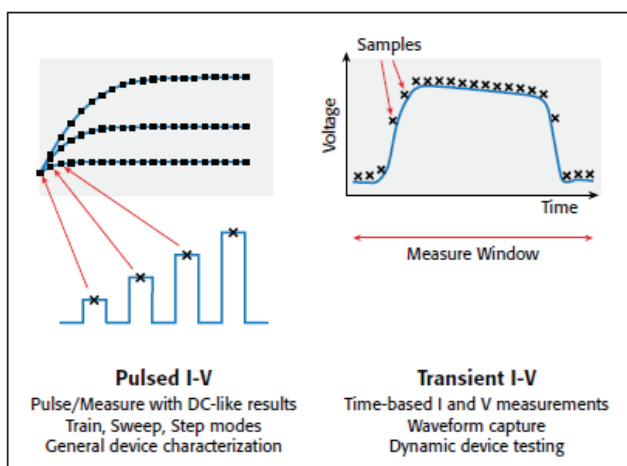
硬件

- 4200A-SCS 主机
- 4200 SMU 模块，模块数量由通道数决定



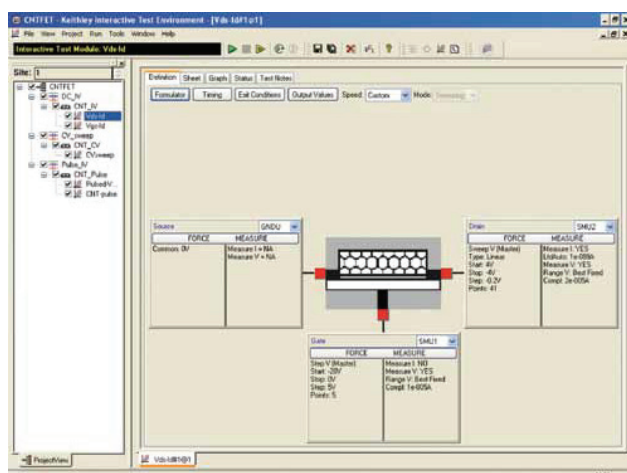
- 4200 PA, 选件，依据最小测试电流定，数量与 SMU 模块匹配
- 4225 PMU, 选件，依据脉冲需求定，模块数由通道数定，是否加放大器由最小测试电流定
- 4210 CVU, 选件，有电容特性测试需求时配置
- 纳米探针台（第三方）





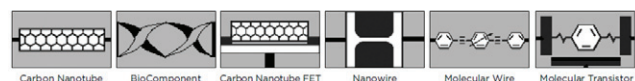
软件

- Clarius



方案优势：

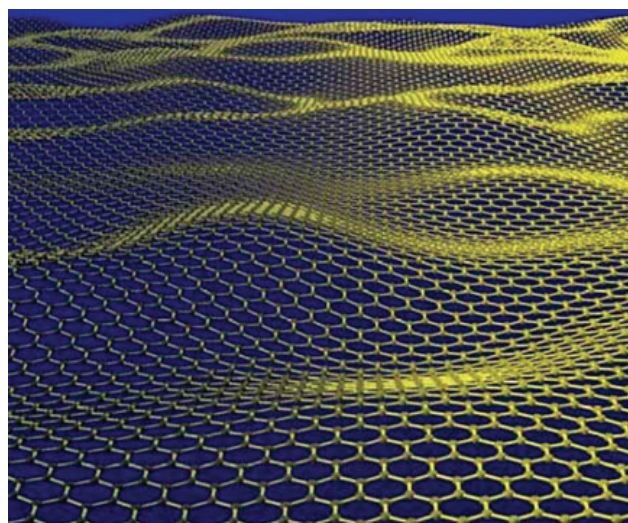
- 测试范围宽，满足全部种类纳米线 / 碳纳米管及其电子器件测试需求
- 多种配置满足不同的应用需求
- 内置多种纳米线 / 碳纳米管器件库，调用后自动生成相应器件的测试流程



二维 / 石墨烯材料及电子器件测试

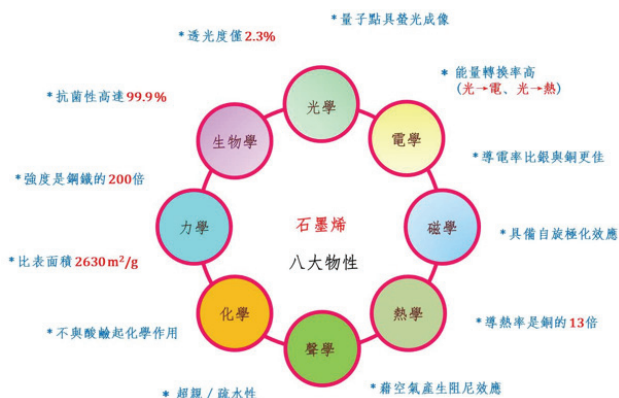
概述：

所谓二维材料（Two dimensional material），指的是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，属于纳米材料的范畴，包含具有超导、金属性、半金属、拓扑绝缘体、半导体、绝缘体的材料。二维材料表现出不同于普通材料的奇异性质，这源于其超薄的厚度引起的量子限域效应，这些奇异的性质使得二维材料成为物理学、化学和材料科学研究的热点。二维材料在透明导电电极、光电探测器、气敏探测器、二极管、晶体管、忆阻器、太阳能电池、LED、电催化剂、光催化剂等领域得到广泛应用。此外，二维材料其超薄的特性有望解决常规半导体面临的短沟道效应，使得晶体管尺寸进一步缩小，在大规模集成电路领域有潜在的应用前景。





二维材料最为典型的代表是石墨烯，石墨烯是由碳原子组成的二维结构，由于在电学 / 热学 / 光学等方面的优良特性，被广泛研究并使用在这个领域。在半导体特性上，石墨烯具有优良的导电特性及易掺杂改性的特性，因此被用来制作各种半导体器件，如零带隙、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等。在应用上可作为穿戴设备，传感器，充电设备等。



二维 / 石墨烯材料及电子器件电性能测试

二维 / 石墨烯材料电学方面的研究，材料改性后的电阻率，载流子浓度及载流子迁移率，这些参数之间的关系如图：

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V}{\frac{\rho L}{A}} = \frac{VA}{\rho L} = \frac{q n \mu V A}{L} \quad \mu_H = \frac{|V_H t|}{B I \rho}$$

I = Current (A)
 V = Voltage (V)
 R = Resistance of sample (Ω)
 ρ = Resistivity of sample ($\Omega\text{-cm}$)
 L = Length of sample (cm)
 A = Cross sectional area of sample (cm^2)

For a doped semiconductor:

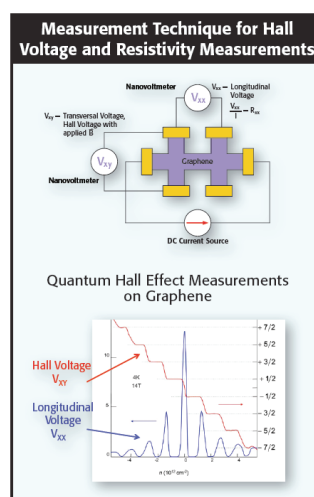
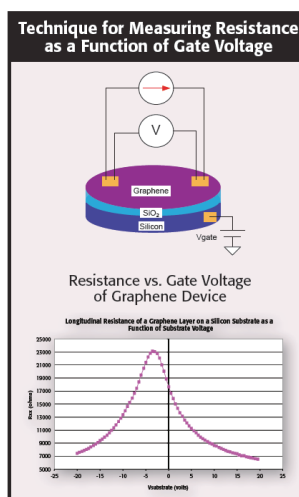
$$\rho = \frac{1}{q n \mu}$$

q = Electron charge (C/cm^2)
 n = Carrier concentration (cm^{-3})
 μ = Carrier mobility (cm^2/Vs)

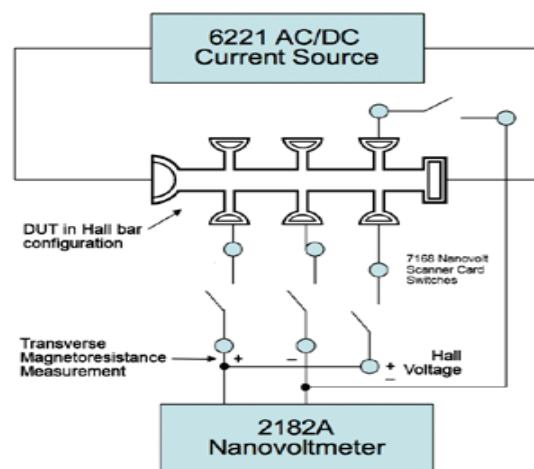
对二维 / 石墨烯材料，通常使用四探针法或范德堡法测试电阻率，用霍尔效应测试载流子迁移率及载流子浓度，有关这几种测试方法，请参阅《纳米材料电性能测试概述》。对二维 / 石墨烯电子器件，通常用 I-V 曲线表征其特性。

二维 / 石墨烯材料及电子器件电性能测试挑战

- 首先，二维 / 石墨烯材料属于纳米材料范畴，第一节中讨论的测试挑战对二维 / 石墨烯材料都适用。



- 电阻率及霍尔效应测试均是加流测压的过程，需要设备能输出电流并且测试电压，这意味着同时需要电流源和电压表，并且电流源和电压表精度要高，保证测试的准确性。
- 电阻率及电子迁移率通常范围较大，需要电流电压范围都很大的设备。
- 需与探针台配合，测试设备需方便连接，需易用的软件
- 霍尔效应测试时，通常要准备霍尔条 (Hall Bar)



高性价比测试方案

硬件

- 6221 高精度脉冲电流源
- 2182 纳伏表
- 7168 开关卡
- 探针台（第三方）



软件

- 自行开发

方案优势

- 性价比高
- 具有脉冲电流
- Delta 模式
- 被测样品电阻适用范围广 ($\mu\Omega \sim T\Omega$)
- 纳伏开关卡不影响测试精度

高性能测试方案：

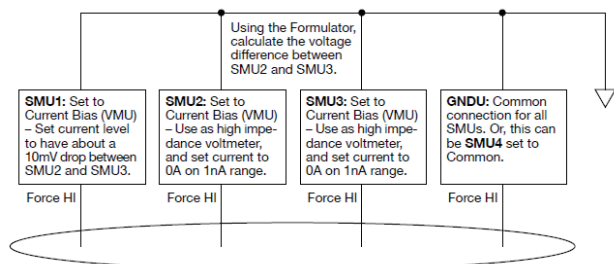
硬件

- 4200A-SCS + 4200 SMU X 3 或 4
- 4200 PA X 3 或 4
- 测试台（第三方）



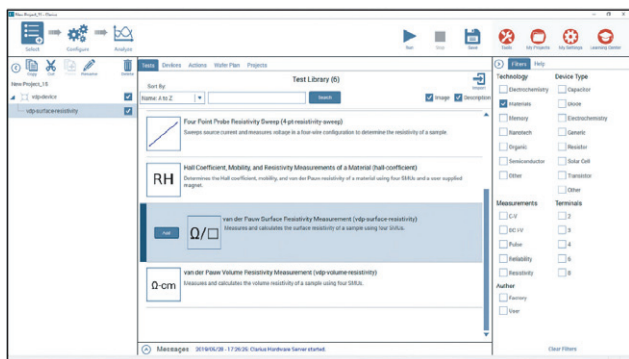
软件

- Clarius



方案优势:

- SMU 模块集电压源 / 电压表 / 电流源 / 电流表于一体，集成度高，方便使用
- 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 80μV；
- 带有 pulse 工作模式，使用 pulse 测试可以消除自加热效应（需增加 4225 PMU 硬件）
- Clarius 软件可调用内置 Project，不仅适用于针对二维 / 石墨烯材料的四探针，范德堡，霍尔效应测试，也适用于二维 / 石墨烯电子器件 I-V C-V 特性测试（C-V 特性测试时需添加 4210 CVU 硬件）
- 开放设备底层指令，附带编译软件，支持自编程



纳米发电测试方案

概述:

纳米发电机，是基于规则的氧化锌纳米线，在纳米范围内将机械能转化成电能，是世界上最小的发电机。

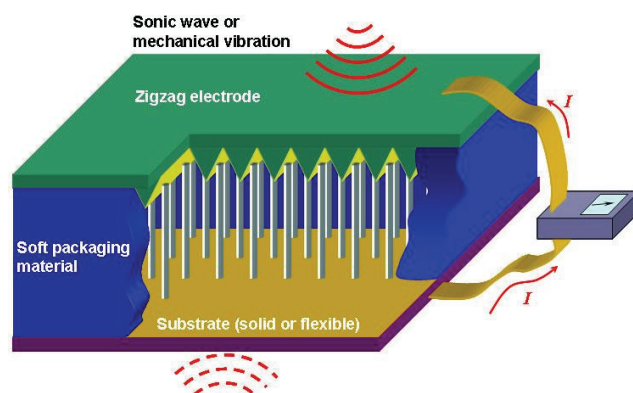
目前纳米发电机可以分为三类：

第一类是压电纳米发电机；

第二类是摩擦纳米发电机；

第三类为热释电纳米发电机。

一般被应用在生物医学，军事，无线通信，无线传感。



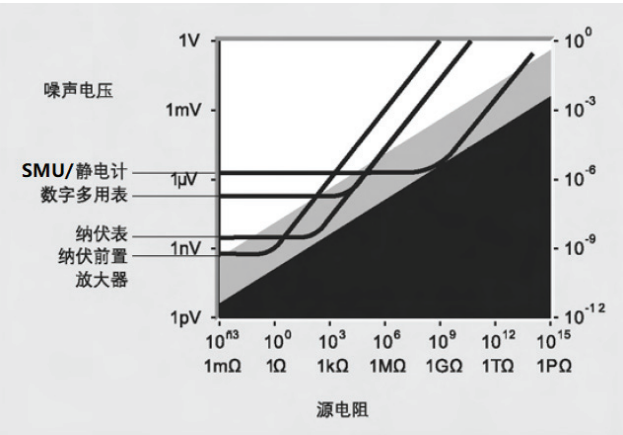
纳米发电面临的测试挑战

1. 发电机产生的电流小

由于纳米发电自身的技术特点，在研究过程中需要测试单位面积机械能产生的电能，测试产生的电压，微小的电流及功率信号，电压基本在几伏甚至几十伏，而电流一般都是 uA 甚至 nA 级别，功率在 mW 甚至 uW 级别。如何精确的测试微小电流及功率信号比较困难，对测试仪器精度和稳定性要求非常高。泰克吉时利公司专注于微小电信号测试，史上多位物理学诺贝尔奖获得者都使用和信赖吉时利测试仪器。在纳米发电研究中，吉时利的产品仍是业内的首选，尤其在微小信号测试值得信赖。

2. 发电机的内阻大，开路电压测不准

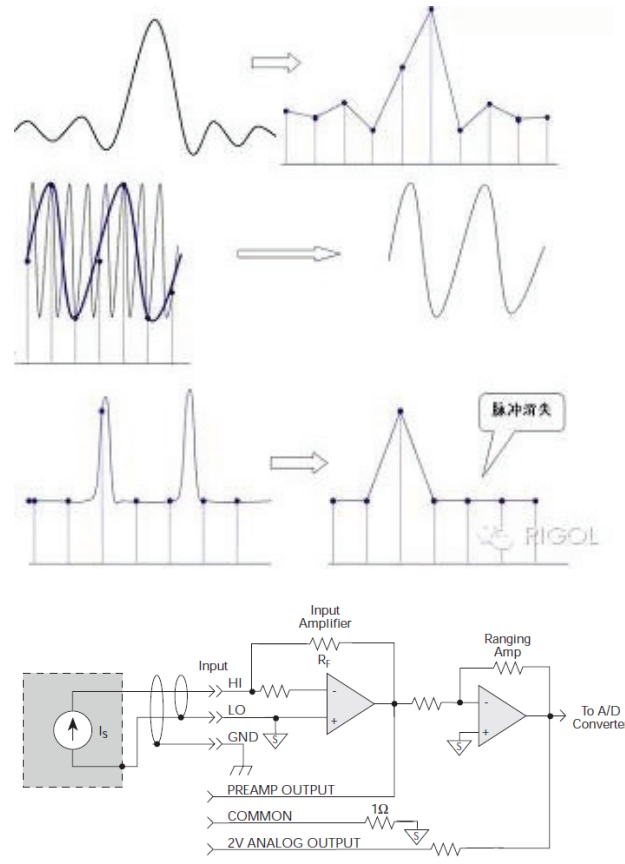
下图为您介绍测量灵敏度的理论极限取决于在电路中的电阻所产生的噪声。电压噪声是与电阻、带宽和绝对温度的乘积的平方根成正比的。从图中可见，源电阻限制了电压测量的理论灵敏度，也就是说能准确测量一个 1Ω 源电阻的 $1\mu\text{V}$ 信号时，如果该信号的源电阻变成 $1\text{T}\Omega$ ，则该测量就会变得不可能。因为在源电阻为 $1\text{M}\Omega$ 时对于 $1\mu\text{V}$ 的测量已经接近理论极限了。这时候采用通常的数字万用表是无法完成这类测量的。了解了这个原理，选择合适的仪器是保证准确测试微小信号前提。(小信号测试红宝书《低电平手册》)



3. 信号变化快，很难采集电压或者电流峰值

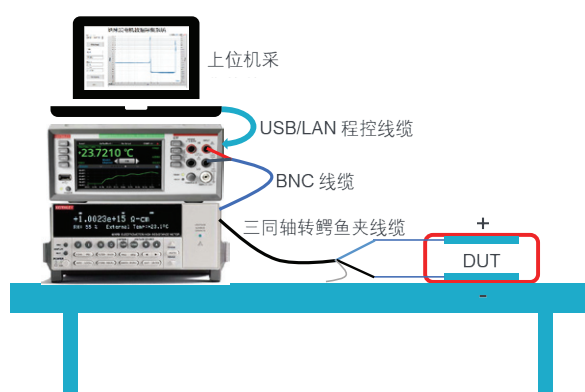
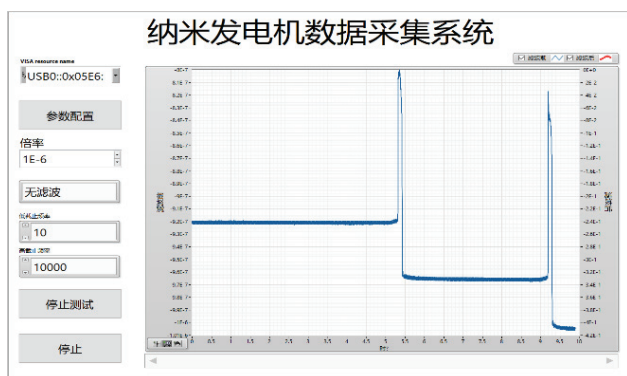
由于机械的拉伸和冲击碰撞运动都是在短时间内完成，而评价一个纳米发电机的性能高低的一个关键因素是其输出的峰值电流和峰值电压，以及峰值功率，而采用传统的表类由于采样率的不足，就可能导致峰值点采集缺失，从而会误导实验人员，导致错失机遇，在吉时利的高阻计内置了模拟输出端口，通过将测试信号转化为一个 2V 的模拟电压信号进行实时输出，这样只需要在外部再加一个高速 / 高 ADC 的采集系统

就可以将快速变化的电流，电压和电量，电阻进行实时采集。

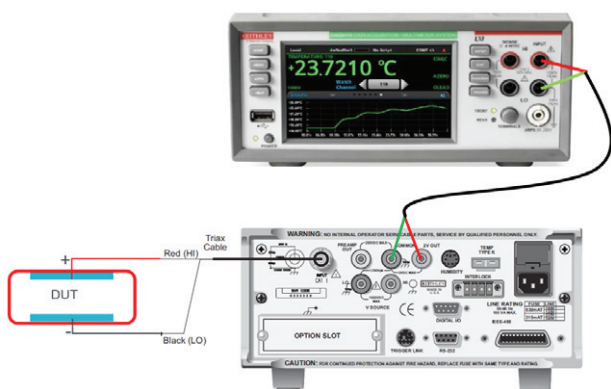


泰克纳米发电测试方案配置：

仪器型号	数量
6517B	1
6500/7510	1
香蕉头转 BNC 转接头	2
BNC 线缆	1
三同轴转鳄鱼夹	1
网线 /USB 程控线缆	1



配置图



信号连接图

微小电流信号测试应用

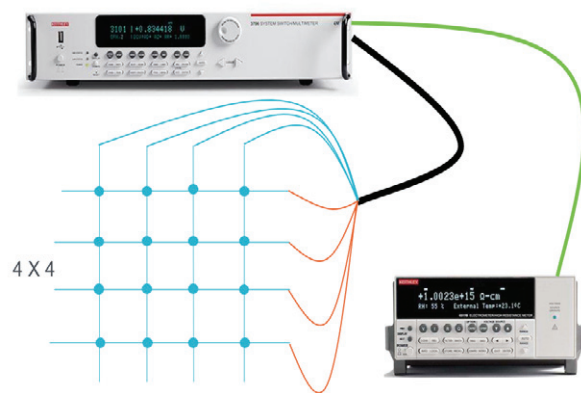
采用高内阻的静电计 6517+ 数据采集仪 DMM6500+ 纳米发电采集软件来进行微小纳米发电电流数据采集。

纳米发电矩阵应用测试

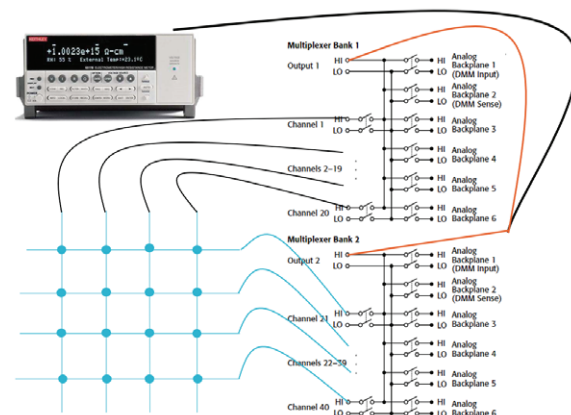
由于现在纳米发电机中有一部分已经转向实际应用研究，其中之一就有压力传感方向，而矩阵式压力传感器的测试是很多老师和同学比较头疼的一个问题，为了解决这类问题，我们就根据要求搭建了一个测试方案如下：

设备	数量
3706A-S	1
3721	1
3721-ST	1
6517B	1
三同轴转鳄鱼夹	1
6500（如需要做高速采集，则配置）	1

测试配置:



测试框图



信号连接图

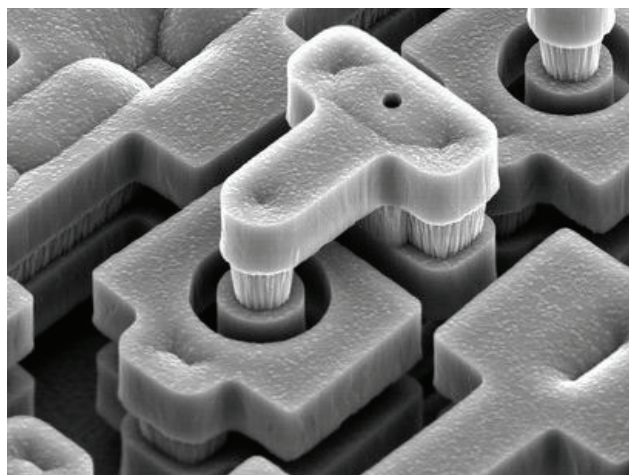
方案优势：

- 纳米发电研究领域推荐测试方案
- 优异的小心测试能力
- 定制化软件，更快，更简单，更专业
- 可升级，满足研究将来的测试需求

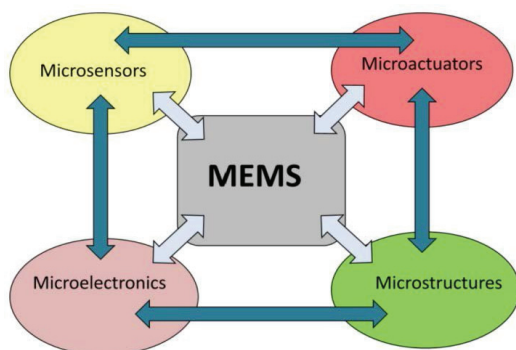
MEMS 测试

概述：

微机电系统 (MEMS, Micro-Electro-Mechanical System)，是一种基于 CMOS 工艺的集成技术。它将传感器 / 微处理器 / 信号处理与控制集于一体，有效缩小了系统的体积，是一种先进的加工技术。



微机电系统是在微电子技术（半导体制造技术）基础上发展起来的，其内部结构一般在微米甚至纳米量级，严格说不是纳米电子器件，但纳米范围的 MEMS - 纳机电系统也日益普及。



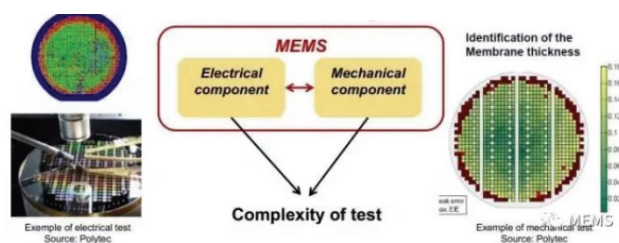
MEMS 是由传感器、作动器（执行器）和微能源三大部分组成微结构系统(右图)，涉及物理学、化学、光学、医学、电子工程、材料工程、机械工程、信息工程及生物工程等多种学科和工程技术。

MEMS 主要包括传感，生物，光学，射频四大类，对工农业、信息、环境、生物工程、医疗、空间技术、国防和科学发展产生重大影响。

MEMS 测试难点：

MEMS 测试包括晶圆测试和成品测试，测试内容包括电学测试和非电学测试，涉及了声学激励、光学激励、磁学激励、化学激励、生物激励等不同的激励信号。

MEMS 电学测试难点如下：



- 泄露电流是 MEMS 的必测项目。泄露电流是指 MEMS 在非工作状态时的电流值，其值大小将决定系统能耗的大小。MEMS 系统的泄露电流一般都小至 pA 量级，因此在测试泄露电流时，需要带前置放大器的高精度的源表设备。
- 电容是 MEMS 的必测项。电容式微传感器是 MEMS 系统中常用的传感器，它负责接收外界的信号并转换为电学信号。这个电容值很小，一般为 pF 量级。测试设备所能施加的交流频率和电容测量的精度是需要考虑的因素。

- 电阻是 MEMS 的必测项。电阻式传感器在 MEMS 系统中非常常见，其阻值的变化可以表征外界信号的变化。MEMS 系统中的电阻范围较大，因此测试设备的电压电流动态范围也必须足够大。
- MEMS 工艺监控也是 MEMS 测试的重要内容。MEMS 使用 CMOS 工艺进行加工制造，为使系统性能稳定，各步骤工艺必须严格监测。比如载流子浓度，载流子迁移率都能都是需要监测的参数。这需要能使用能进行此类测试的电学设备。

测试方案：

硬件：

- 4200 – SCS
- 4200 – SMU
- 4200 – PA
- 4210 – CVU
- 4200A – CVIU
- 4225 PMU，选件，依据脉冲需求定，是否加放大器由最小测试电流定
- 高功率探针台 / 测试夹具（第三方）

软件

- Clarius

测试参数：

- MEMS 输出电容 C
- MEMS 输出电阻 R
- MEMS 泄露电流 I

方案优势：

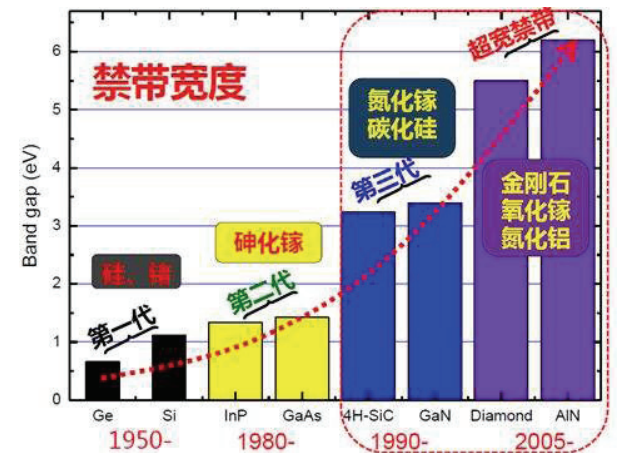
- 集成化的测试系统，直流测试 /CV 测试集于一体，多卡槽灵活配置测试模块；
- 最小电流测试精度 10fA，最大电压 210V；四线法配置；1pF–1uF 电容测试量程；
- 自带 Clarius 操作软件，图形化设计，简单易懂；丰富的测试库直接用，减少测试配置时间；
- 附带教学视频，多语言版本，边学边用；
- 多种切换开关，支持 SMU/CVU 的自动切换，消除换线烦恼；
- 提供低漏电矩阵开关，为自动化，高密度，大批量测试提供支持；
- 开放设备底层指令，附带编译软件，支持自编程。



宽禁带材料测试方案

概述：

宽禁带材料是指禁带宽度大于 2.3eV 的半导体材料，以 III – V 族材料，SiC 等最为常见。随着电子电力的发展，功率器件的使用越来越多，SiC, GaN 等被广泛应用于射频，超高压等领域，此外，为适应特高压输电，电动汽车充电桩等超高压应用，可以承受更高电压的超宽禁带半导体，如金刚石，氧化镓等的研究也在逐渐深入。宽禁带材料一直是研究方向的热点。在半导体材料的研究中，电阻率，载流子密度和迁移率是测试的关键参数。



宽禁带材料测试挑战：

- 宽禁带材料的带隙较大，击穿电场较高。超禁带材料击穿电场更高。因此需要上千伏高压源表进行测试。
- 功率器件带隙较宽，稳定性好，受温度影响较小，所以也是高流器件的制备材料。电流特性的测试，需要用到几十安培的高流源表。
- 四线法及霍尔效应测试均是加流测压的过程，需要设备能输出电流并且测试电压，这意味着同时需要电流源和电压表。
- 电阻率及电子迁移率通常范围较大，需要电流电压范围都很大的设备。
- 电流源和电压表精度要高，保证测试的准确性。

电阻率测试方法：

- 四探针测试法
 - 测试载台：四探针测试台



载流子浓度及迁移率测试方法：

- 霍尔效应测试法
 - 测试载台：磁场设备及探针台

中功率测试设备：

- 测试设备：4200A-SCS

高功率测试方案：

- 测试设备：2600-PCT

泰克优势：

- 高压 3kV，高流 100A 高精度源表；
- SMU 模块集电压源 / 电压表 / 电流源 / 电流表于一体，集成度高，方便使用；
- 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；
- 4200A 设备电流输出精度 40fA；电流测试精度 10fA；电压测试精度 80 μ 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；
- 提供高压高流测试夹具，保证测试安全。

电子薄膜材料测试方案

概述：

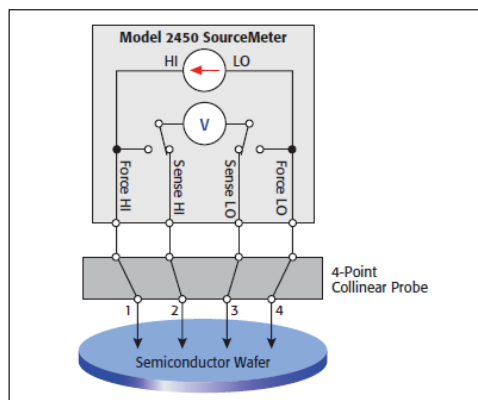
某一维线性尺度远远小于它的其他二维尺度的材料称为薄膜材料，理论上薄膜材料厚度介于单原子到几毫米，但由于厚度小于 100nm 的薄膜已经被称为二维材料，因此薄膜材料通常指厚度介于微米到毫米的薄金属或有机物层。



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

表面电阻率测试常用方法是四探针法与范德堡法，但对电子薄膜材料，范德堡法很少应用。多数情况下，电子薄膜材料表面电阻率测试对测试仪器的要求没有二维材料 / 石墨烯材料高，用源表加探针台即可手动或编写软件自动完成测试。



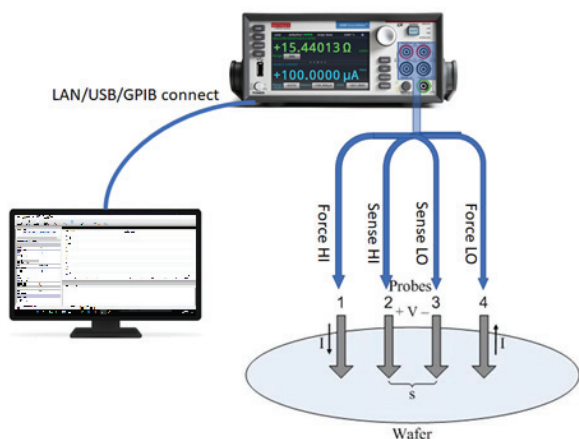
电子薄膜材料电阻率测试面临的挑战

- 电子薄膜种类多，电阻率特性不同
 - 需选择适合的 SMU 进行测试
- 被测样品形状复杂，需选择适当的修正参数
 - 厚度修正系数对测试结果的影响 $F(W/S)$
 - 圆片直径修正系数对测试结果的影响
 - 温度修正系数对测试结果的影响
- 环境对测试结果有影响
 - 利用电流换向测试消除热电势误差
 - 利用多次平均提高测试精度
- 需考虑测试成本

电子薄膜材料测试方案：

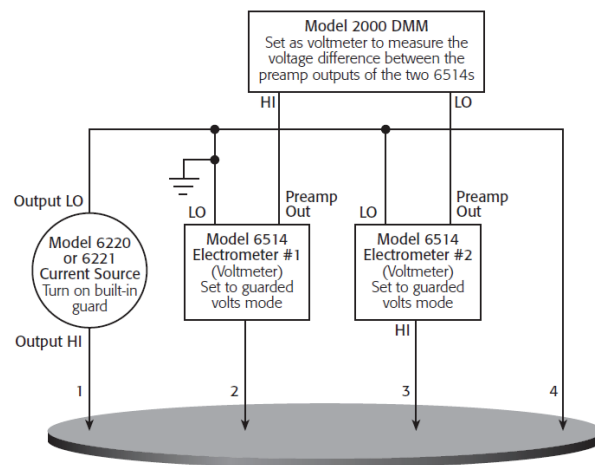
通用配置

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



高阻电子薄膜材料测试方案

- 6221/2182A + 6514 X 2 + 2000 DMM
- 第三方探针台
- 手动或软件编程



方案优势：

- 不同配置满足不同电子薄膜材料电阻率测试需求
- 高精度 SMU, 即可手动测试，也可以编程自动测试
- 高性价比

绝缘材料测试方案

概述：

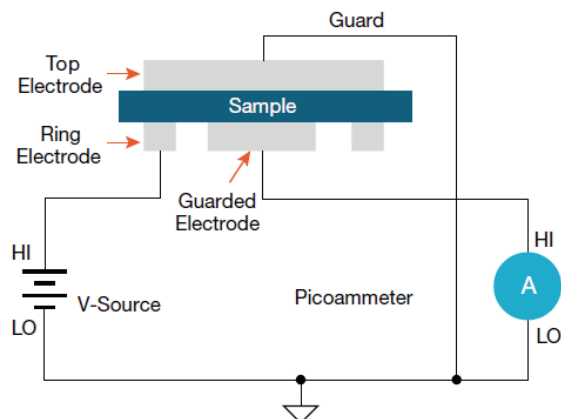
绝缘材料又称电介质，是指在直流电压作用下，不导电或导电极微的物质。绝缘材料的绝缘性能通常用绝缘电阻来表征，通过绝缘电阻，可以推导出绝缘材料介电击穿，散逸因数，水汽含量，机械连续性等参数，并利用这些参数，评估诸如轮胎放电的安全性能或打印纸对油墨的吸收扩散性能等。



绝缘材料测试标准及测试项目

针对绝缘材料的测试，国际上有美国标准《ASTM-D-257 绝缘材料的直流电阻或电导的试验方法》及欧洲标准《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 ），这两个参数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。

表面电阻率测试电路图如图：



表面电阻率 $\rho_s = KSR$

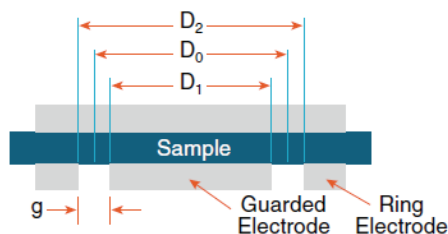
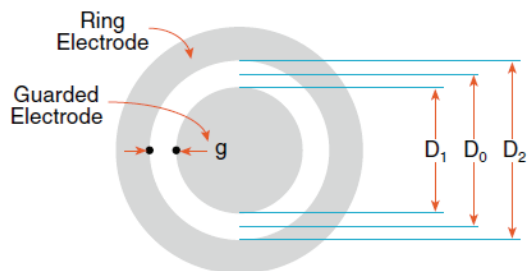
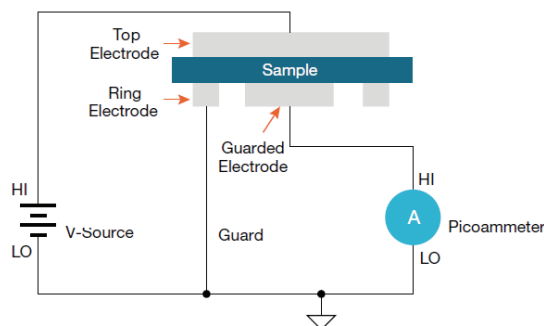
式中 $R = V/I$ 即测试电阻， $KS = P/g$

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

$D_0 = D_1 + g$; $g = (D_2 - D_1) / 2$

体电阻率测试电路图如下：



体电阻率 $\rho_v = (K_v/\tau) R$

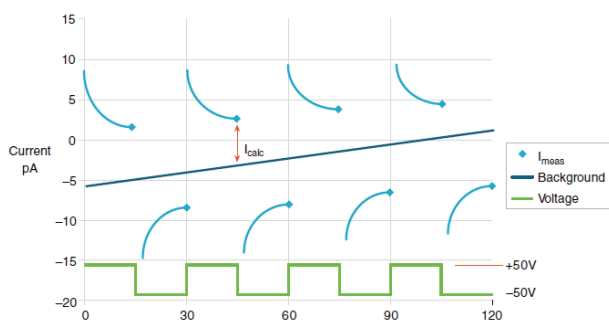
式中 $R = V/I$ 即测试电阻,

K_v 为保护电极有效面积, 对上图, $K_v = \pi \left(\frac{D_1}{2} + B \frac{g}{2} \right)^2$

B 为有效面积系数, 体电阻率测试时通常为 0

绝缘材料电阻率测试面临的挑战

- 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 ($10^{12} \sim 10^{16}$), 因此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 (如下图) 可以消除背景电流误差。
- 需施加高直流电压 (500V 以上), 因此必须采取必要的安全措施, 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



绝缘材料测试方案:

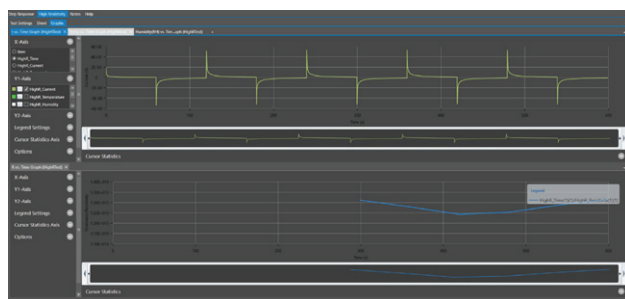
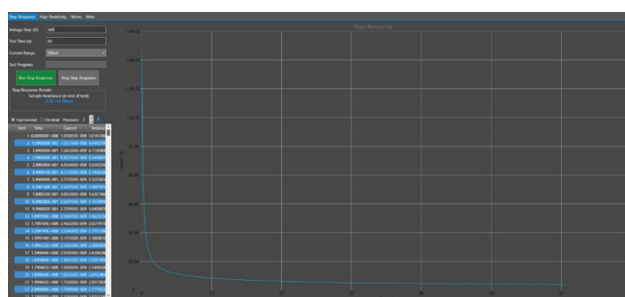
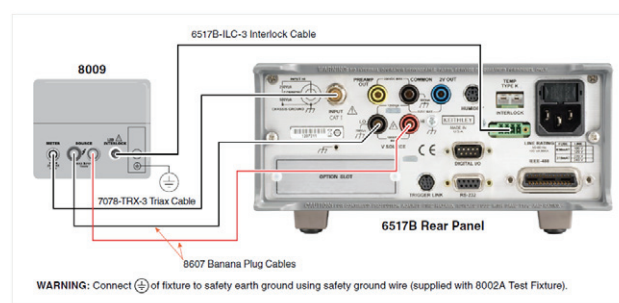
硬件:

- 6517B + 8009



软件:

- Kick Start



方案优势：

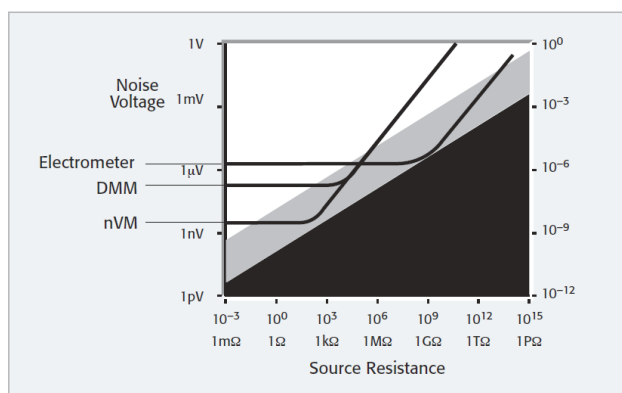
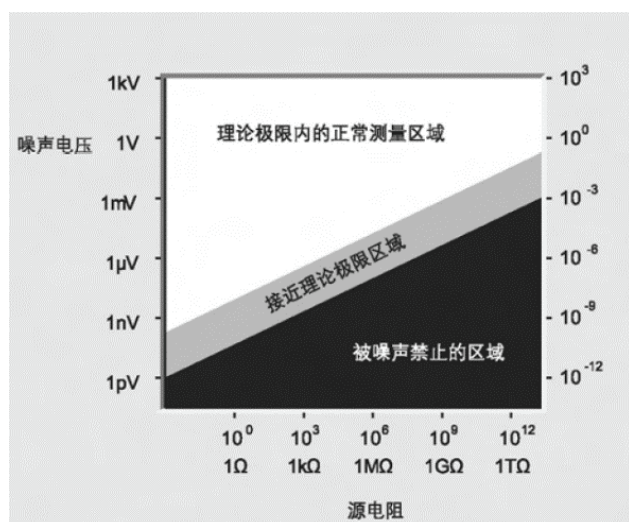
- 满足 ASTM-D-257 及 IEC 62631-3-1 标准
- 可测试高达 $10^{18}\Omega\cdot\text{cm}$ 体电阻率， $10^{17}\Omega$ 表面电阻率
- 可施加 $\pm 1000\text{ V}$ 测试电压
- 10 aA 电流分辨率
- 自动切换体电阻率及表面电阻率测试功能
- 多种安全防护机制
- Kick Start 软件自动进行正反极性测试

三、当代材料科学研究中 SMU 应用要点及选型指南

当代材料科学研究中 SMU 应用要点

源表 SMU 在当代材料科学研究中，起到举足轻重的作用，选择适合某类材料电性能测试的 SMU，如何降低测试误差，测试中应当注意什么，这些问题都需要重点关注。

微小信号测试，对当代材料科学研究中至关重要的，下图示意出高源内阻情况下，电压测试的理论极限值。这张图在纳米发电测试章节中曾示意过，实际上，在当代材料科学研究中，很多情况都是在接近理论极限值的情况下进行测试的。在接近理论极限值情况下，必须选择相适应的 SMU 才能准确测试相应的电压值。



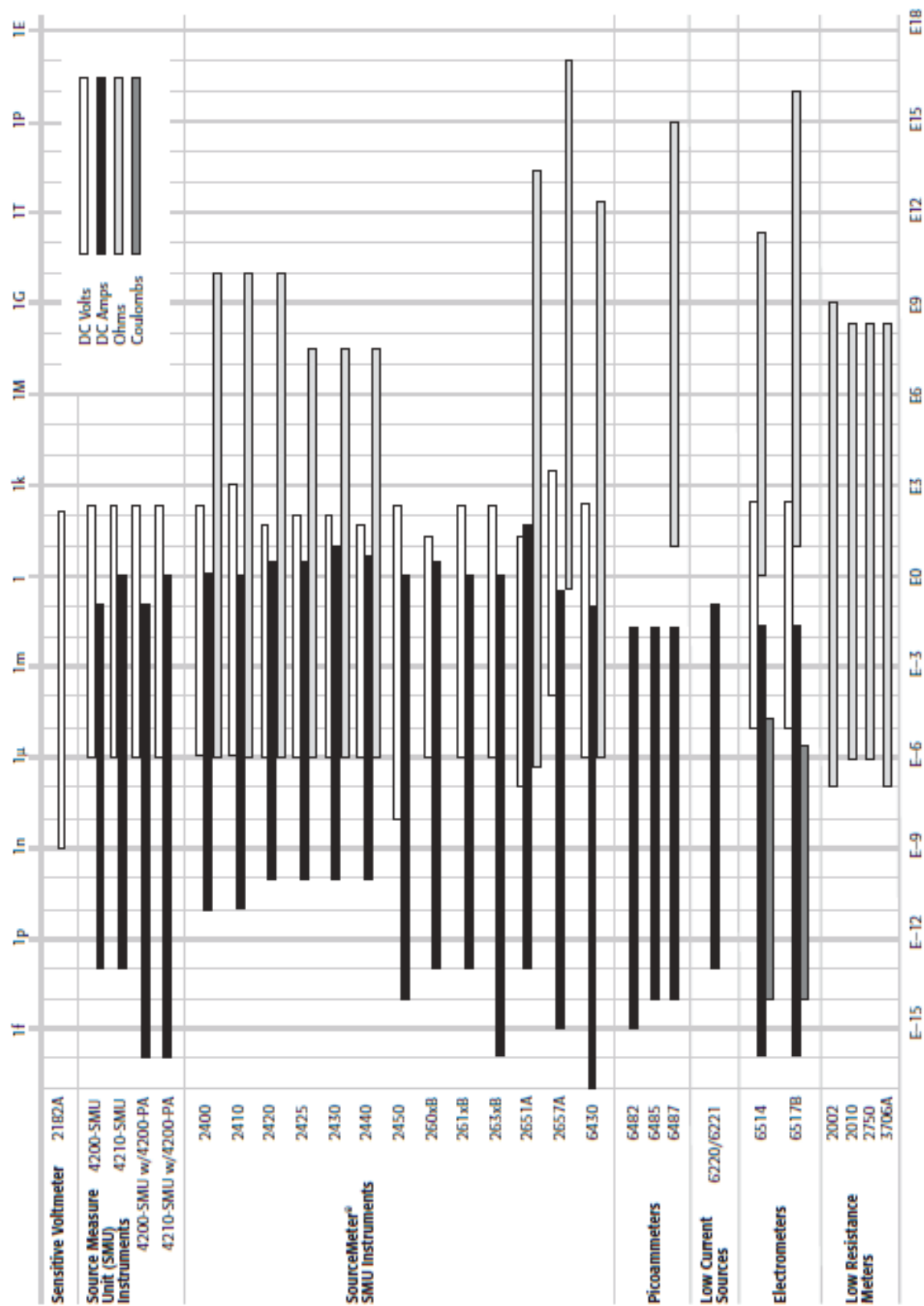
有关微小信号的测试，泰克《低电平测试手册》中详细论述了各种低电平测试时的误差控制及测试要点，请大家下载，在此不再赘述。

当代材料科学研究中 SMU 选型指南

SMU 的选型应该从如下几个方面考虑

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

下图示意出泰克各种型号 SMU 量程对比。



下图为泰克 SMU 系列

				
Feature	高功率源表 (2657A, 2651A)	低电流源表 (2635A/36A, 6430)	2600A系列源表	2400系列源表
#通道数	1 (可扩展至32)	1 – 2 (可扩展至64)	1 – 2 (可扩展至64)	1
电流 最大/最小	50A pulse / 1pA	10A pulse / 10aA	10A pulse / 1pA	5A / 10pA
电压 最大/最小	3000V / 1uV	1100V / 1uV	200V / 1uV	1100V / 1uV
功率	180W(2657A) 200W,(2651A) 脉冲2000W (2651A)	2W- 30W/通道	30W – 40W/通道	20W – 110W
最大读数/秒	38,500 1uSec / pt., 18-bit Digitizer	20,000	20,000	2,000
接口类型	GPIO, LAN (LXI), RS-232, Digital I/O, TSP-Link®	GPIO, LAN (LXI), RS-232, Digital I/O, TSP-Link®	GPIO, LAN (LXI), RS-232, Digital I/O, TSP-Link®	GPIO, RS-232, Digital I/O

下图为泰克低电平 SMU 系列

					
特征	6430 亚飞安源表	6514 / 6517B 静电计	6485 / 6487 皮安表	6220 / 6221 电流源	2182A 纳伏表
电流 最小/最大	10aA / 100mA	100aA / 20ma	10fA / 20ma	100fA / 100ma	--
电压 最小/最大	1μV / 200V	10μV / 1000V	--	--	1nV / 100V
电阻 最小/最大	1μΩ / >20TΩ	10mΩ / 10PΩ	10Ω / 1PΩ(6487)	10nΩ / 1GΩ(和2182A)	10nΩ / 1GΩ (同6220 或 6221)
最大读数/秒	2,000读数/秒	1,200读数/秒	1,000读数/秒	10,000,000读数/秒 (6221 ARB 功能)	115读数/秒
存储大小	5,000 读数	50,000 读数	3,000 读数	65,536 点	1,024 读数
分辨率	6½	5½	5½	4½	7½
输入接口	3轴 Triax	3轴 Triax	BNC (6485) 3轴 Triax(6487)	3轴 Triax	低噪声接头
通讯接口	GPIO, RS-232	GPIO, RS-232	GPIO, RS-232	GPIO, RS-232, (LAN on 6221)	GPIO, RS-232
其他	数字IO	内建正负1kV 电压源 (6517B), 数字IO	内建 500v 电压源 (6487)	数字IO	双通道 热电偶测量



泰克官方微信

如需所有最新配套资料，请立即与泰克本地代表联系！

或登录泰克公司中文网站：www.tek.com.cn

泰克中国客户服务中心全国热线：400-820-5835

泰克科技(中国)有限公司

上海市浦东新区川桥路1227号
邮编：201206
电话：(86 21) 5031 2000
传真：(86 21) 5899 3156

泰克北京办事处

北京市朝阳区酒仙桥路6号院
电子城·国际电子总部二期
七号楼2层203单元
邮编：100015
电话：(86 10) 5795 0700
传真：(86 10) 6235 1236

泰克上海办事处

上海市长宁区福泉北路518号
9座5楼
邮编：200335
电话：(86 21) 3397 0800
传真：(86 21) 6289 7267

泰克深圳办事处

深圳市深南东路5002号
信兴广场地王商业大厦3001-3002室
邮编：518008
电话：(86 755) 8246 0909
传真：(86 755) 8246 1539

泰克成都办事处

成都市锦江区三色路38号
博瑞创意成都B座1604
邮编：610063
电话：(86 28) 6530 4900
传真：(86 28) 8527 0053

泰克西安办事处

西安市二环南路西段88号
老三届世纪星大厦26层L座
邮编：710065
电话：(86 29) 8723 1794
传真：(86 29) 8721 8549

泰克武汉办事处

武汉市洪山区珞喻路726号
华美达大酒店702室
邮编：430074
电话：(86 27) 8781 2760

泰克香港办事处

香港九龙尖沙咀弥敦道132号
美丽华大厦808-809室
电话：(852) 2585 6688
传真：(852) 2598 6260

更多宝贵资源，尽在 WWW.TEK.COM.CN

© 泰克科技公司版权所有，侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国专利和国外专利保护。本文中的信息代替所有以前出版的材料中的信息。技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX 和泰克徽标是泰克公司的注册商标。本文提到的所有其他商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

