

A GREATER MEASURE OF CONFIDENCE

KEITHLEY

纳米技术电气测量的最新进展

引言	2	纳米技术测试挑战	2	电气测量注意事项	5	电气噪声	6	源 - 测量仪器	7				
脉冲技术	8	避免自发热问题	9	应用实例：石墨烯	10	总结	12	术语表	13	选型指南	16	更多信息	17

纳米技术测试挑战

引言

纳米技术能从多个方面改善我们的生活质量，例如速度更快的电子产品，用于PC的超大内存/存储容量，通过高效率能量转换获得更低成本的能量，并通过开发纳米级的生物和化学检测系统提高安全性。

使用纳米电子材料的过程中，高灵敏度电气测量工具必不可少。这些测量工具能提供全面理解最新材料电气特性和最新纳米电子器件电气特性所需的数据。测量仪器的灵敏度必须更高，因为电流低得多而且许多纳米材料具有更高的性能，例如电导率。被测电流的幅度可以是飞安范围而且电阻低至微欧姆。因此，测量方法和测量仪器必须将可能干扰信号的噪声和其它误差源最小化。

纳米技术材料的性质要求采用一些新的测试方法。因为纳米材料建立在量子力学起作用的原子或分子水平。由于粒子尺寸很小，这些新材料的原子和分子结合方式可能与它们在块体物质中的结合方式不同。所以，可能存在新的电子结构，晶体形状和材料特性。具有这些新特性的纳米粒子可以单独使用或者用于构建块体材料。虽然探索块体的性质很重要，但仍然需要测量结果来揭示纳米结构的独特特性。

粒子尺寸和结构对于研究材料的测量技术有重要影响。随着粒子缩小至纳米尺度，材料的化学和电气特性都会发生改变。这对生物材料也适用。因此，这些材料大多都需要进行化学和电气测试以分析它们在实际产品应用中的特性。对许多材料而言，实际测量的量是从另一个物理量转换成的低电平电流或电压¹。现有探测仪器和纳米机械手能对许多物质直接进行电气测量。

随着物质缩小至纳米尺度，材料电子能带的能带隙和相邻能级间隔都会发生改变。相对于材料的平均自由程（电子在相邻两次碰撞之间的平均距离），这些变化和粒子的纳米尺寸会直接影响纳米粒子的电阻。通常，材料的能带隙会直接影响粒子是导体、绝缘体还是半导体。例如，由于这些有影响的电特性，碳纳米管（CNT）能用于创建晶体管开关²。一种方法是在具有漏极和源极功能的两个电极之间连接具有半导体特性的CNT。第三个电极（栅极）直接放在整个碳纳米管通道的下面。对于半导体CNT，引入通道电场（通过邻近CNT通道放置的绝缘栅极）并增大栅极电压可以将CNT从半导体态变为绝缘态。减小栅极电压可将器件变为导通态。这种导电机理类似于硅MOSFET晶体管开关的工作原理，即通过硅掺杂以及电子受体或电子给体改变材料特定位置的电导率。

引言	2
纳米技术测试挑战	2
电气测量注意事项	5
电噪声	6
源测量仪器	7
脉冲技术	8
避免自发热问题	9
应用实例：石墨烯	10
结论	12
术语表	13
选型指南	16
更多信息	17

想了解更多内容？ 特色资源



- 标准有助于确保纳米行业的良好秩序
- 应对未来纳米特性分析挑战的现有方案

更多资源

- 纳米科技测试的最新挑战
- 攀登商业化的高峰

咨询有关吉时利的应用或产品问题。

纳米技术测试挑战 (续)

对于宏观粒子而言,电子在能带内具有离散的能量量子,每个能带包含多个能级,并且电子通过它们的热量共享能级。对于导电材料而言,电子被热激发进入导带(即,电子存在于价带和导带中)。对于绝缘体(能带隙>电子热能)而言,需要极大的能量才能让电子从材料能带隙分隔的价带进入导带。如果吸收的能量(>能带隙),电子就能在能带间跃迁。

随着粒子尺寸缩小至纳米尺度,相邻能带的容许能量分成了离散能级(因为混合物的原子数量要少得多)。这出现在能级间隔接近电子热能的时候(图1)。随着单位能带的能级减少,材料的状态密度也将发生变化。

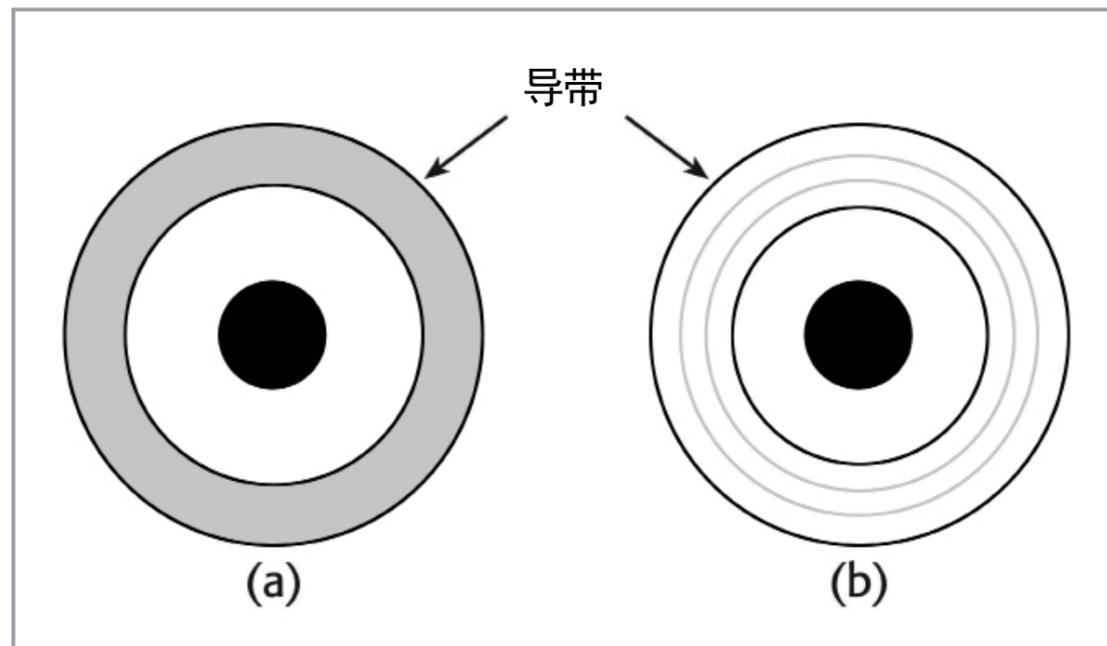


图1. 随着材料从宏观尺度缩小至纳米尺度,其连续能带(a)分成了能带中的离散能级(b)而且能带隙增大了。

状态密度是电子在释放能量进入较低能级或者在吸收能量跃至较高能级时可选能量的数量的度量。一种必然结果是如果状态密度已知,那么粒子尺寸可以减小。

状态密度的分析是纳米材料研究的基础性工作。状态密度(3维)作为能量的函数可以表示为:

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

这代表在能量E条件下,单位体积单位能量的电子状态数目,其中:

- m = 粒子的有效质量,
- h = 普朗克常数,而且
- E = 能量(电子轨道位置),单位:电子伏特。

虽然测量结果不受体积的影响(适于任何尺寸的粒子),如果粒子尺寸/结构未知,此式为有限值。但是,用实验方法可以确定状态密度,从而确定粒子尺寸。

因为状态密度能用于预测材料的电气特性,还能使用阻抗测量推断状态密度信息。通过绘制微分电导与施加电压的关系图可以确定状态密度。微分电导是(dI/dV)。当绘制电导与电压关系图时,此图显示了材料的状态密度。高导电材料的导带有大量未占用能级,即状态密度更高(单位能量支持更多独立能级)。绝缘材料的电子结构在导带缺少可用能级。因为状态密度对应这些能级的密度,所以电导与电压的关系图直接度量了在每个能级(器件两端的电压)的电子状态密度。

引言	2
纳米技术测试挑战	2
电气测量注意事项	5
电噪声	6
源测量仪器	7
脉冲技术	8
避免自发热问题	9
应用实例: 石墨烯	10
结论	12
术语表	13
选型指南	16
更多信息	17

纳米技术测试挑战 (续)

这种技术的一个方法是通过纳米机械手与纳米粒子建立低阻抗连接。这种安排支持电荷传输和状态密度的测量。这对于导电区也非常适用，因为纳米探针直接低阻抗连接被测材料（粒子）。

纳米机械手和它的探针以及源-测量单元 (SMU) 直接对纳米粒子施加电流或电压激励并测量相应的电压或电流响应 (图2)。电气源-测量测试的优点在于能根据相关材料阻抗或被测器件 (DUT) 选择特定的SMU测量模式 (源电流/测量电压或源电压/测量电流)。而且，随着阻抗变化测量模式会动态改变，就像用作半导体开关的CNT出现的那样。这能实现更宽动态范围的电压和电流激励与测量，从而优化了参数测试精度和准确度。SMU电压和电流灵敏度能达到 $1\mu\text{V}$ 和 100aA 。

纳米材料电气测量对测量仪器的要求极为严格。为测量电导率、阻抗或其它电气特性并将测量结果与状态密度联系起来，必须与纳米DUT建立电流连接³。这是纳米技术测试领域需要克服的主要困难之一。能用的工具很少，而且很少有器件设计帮助建立这种类型的连接。

粒子自组装可以从硅片到硅片，其中传统的光刻技术用于制作探测的电气连接垫片。那些足够长并能跨越这些垫片的粒子（例如，碳纳米线）可以通过外部产生的静电场连至垫片。

虽然量子阱、量子线和量子点的特性不同，但可以根据检测同种材料的量子线或量子阱形式（纳米薄膜）来推定量子点形式

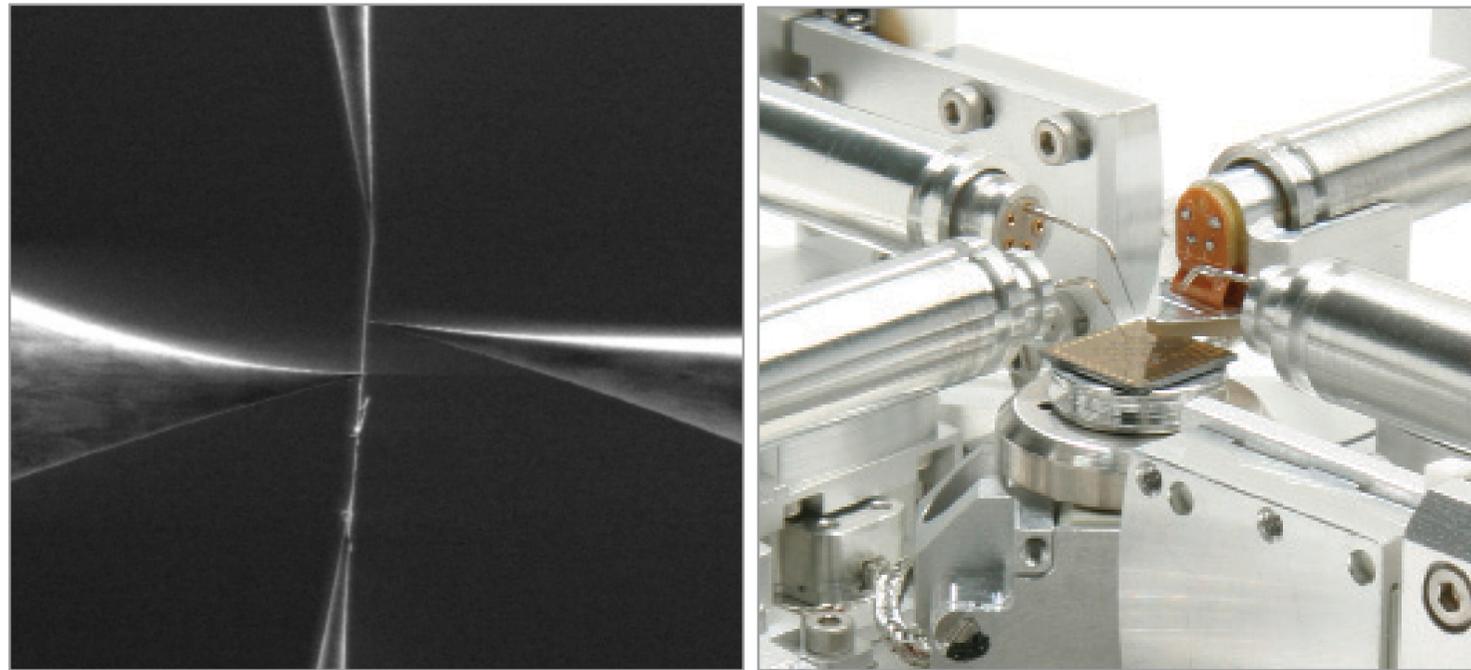


图2. 纳米机械手探测纳米结构: 微观角度的低阻抗探测连接CNT用于直接电气测量。纳米机械手组件头的照片。

的特定材料的有关信息。纳米薄膜特别容易测量因为只有一个维度是小的。这样的薄膜可以堆积在导电基板上，可以通过在材料表面上形成的，使用放置位置合适、肉眼可见的测试垫片测量体积或者面积。对于导电材料而言，可以单独沉淀源和测量的垫片以建立Kelvin (4线) 连接⁴。这种电路类型消除了测量的测试线电阻并提高了准确度。总之，量子阱（纳米薄膜）可以像其它块体材料那样进行测试。

¹ 生物阻抗生物电流基础 (Bioimpedance Bioelectricity Basics), Wiley 2003.

² 用物理快报, 单层和多层碳纳米管场效应晶体管 (Single and Multiwalled Carbon Nanotube Field Effect Transistors), 第17卷, 第73号, 1998年10月26日, IBM研究部门.

³ 用4200-SCS和Zyvex S100型纳米机械手进行纳米线和纳米管的I-V测量 (I-V Measurements of Nanoscale Wires and Tubes with the Model 4200-SCS and Zyvex S100 Nanomanipulator), 应用笔记#2481, 吉时利仪器, 2004年.

⁴ 用4200-SCS实现4针电阻率和霍尔电压测量 (Four-Probe Resistivity and Hall Voltage Measurements with the Model 4200-SCS), 应用笔记#2475, 吉时利仪器, 2004年.

Zyvex公司提供的照片

引言	2
纳米技术测试挑战	2
电气测量注意事项	5
电噪声	6
源测量仪器	7
脉冲技术	8
避免自发热问题	9
应用实例: 石墨烯	10
结论	12
术语表	13
选型指南	16
更多信息	17

想了解更多内容?

特色资源



- 理解印制、有机电子和材料的电气特性分析

Jonathan Tucker



- 用4200-SCS进行碳纳米管晶体管 (CNT FET) 的电气特性分析

更多资源

- 纳米器件和材料的电气测量
- 用于纳米特性和分析的先进粒子束法
- 用4200-SCS半导体特性分析系统优化低电流测量
- 用4200-SCS和Zyvex S100型纳米机械手进行纳米线和纳米管的I-V测量
- 碳纳米管和低功率纳米器件电气特性分析的技巧

咨询有关吉时利的应用或产品问题。

电气测量注意事项

无源器件（不是能量来源的任何器件）的电气测量都采用一个简单的程序：以某种方式激励样本并测量样本对激励的响应。这种方法还适于具有无源或有源特性，具有线性或非线性传递函数的器件。用了适当方法后，源-测量算法就能用于分析能量来源。

对于纳米粒子而言，这种通用方法以源-测量测试的形式量化阻抗、电导和电阻，并揭示了材料的关键特性。即使最终应用不是电子电路，这种测试方法也适用。

分析纳米粒子特性时有几个重要的注意事项：

- 纳米粒子不支持宏观器件带载的电流幅度（除非是无电阻率的）。这意味着在测定器件时，必须严格控制电流激励的幅度。
- 纳米粒子不能像传统电子器件或材料（例如晶体管）那样隔离邻近器件的电压。这是因为越小的器件可以放置得越紧密。器件越小质量越小，而且会受到大电场作用力的影响。此外，纳米粒子相关的内部电场可能很高，要特别留意所施加的电压。
- 考虑到纳米级器件很小，通常具有较小的寄生（杂散）电感和电容。在电子电路中使用纳米器件时，这非常有用，能实现比宏观器件更高的开关速度和更低的功耗。但是，这也意味着分析纳米粒子I-V曲线的测量仪器必须测量低电流，同时追踪很短的反应时间。

因为纳米测试应用常常需要低电流源和测量，选择合适的测量仪器对准确进行电气特性分析至关重要。除了高灵敏度之外，测量仪器的响应时间必须很短（有时指带宽），这与DUT的电容量低和在低电流条件下快速改变状态的能力有关。

源-测量测试电路的开关速度受限于用于追踪器件状态的测量仪器。在使用非最佳测量结构观察器件时尤其如此。两种可能的结构是源电流/测量电压或源电压/测量电流。

当考虑测量低阻抗（ <1000 欧姆）器件时，源电流/测量电压方法通常会得到最佳测量结果。在施加较低阻抗时电流源稳定，而且不难实现高信噪比。这考虑了准确的低电压响应测量。

在测量高阻抗（ $>10,000$ 欧姆）器件时，源电压/测量电流法最佳。很容易构建稳定的电压源来驱动高阻抗。将设计巧妙的电压源放在高阻抗两端时，电压源将为DUT和测试电缆的杂散电容快速充电并快速稳定到最终输出值。使用合适的电流表能准确测量DUT的小电流响应。

引言	2
纳米技术测试挑战	2
电气测量注意事项	5
电噪声	6
源测量仪器	7
脉冲技术	8
避免自发热问题	9
应用实例：石墨烯	10
结论	12
术语表	13
选型指南	16
更多信息	17

想了解更多内容？ 特色资源



• 纳米结构设计的测量需求

Dr. Kang Wang
美国洛杉矶市加利福尼亚大学
功能纳米结构设计工程中心主任



• 改进纳米电子和分子电子器件的低电流测量

更多资源

- 纳米材料的电气测量
- 用4200-SCS进行4探针电阻率和霍尔电压测量
- 新型材料和器件的测量指南

咨询有关吉时利的应用或产品问题。

电噪声

测量拓扑结构也对电气噪声有影响，这是制约测量灵敏度和准确度的因素。对于用电流源的低阻抗电压测量而言，测量电路对DUT电压噪声和阻抗非常敏感。对于电阻器等宏观器件而言，室温（270K）条件下的约翰逊噪声电压表示为：

$$V_n = \sqrt{(4kTBR)}$$

其中，k=玻尔兹曼常数

T=源的绝度温度，单位开尔文

B=噪声带宽，单位赫兹

R=源阻抗，单位欧姆

上式可进一步简化为：

$$V_n = 6.5 \times 10^{-10} [\sqrt{(BR)}] / R$$

该式说明了随着DUT电阻（R）减小，DUT产生的约翰逊噪声电压也减小。相反，用电压源激励的高阻抗器件被电流测量噪声所限制。

在270K条件下，电阻器的约翰逊电流噪声为：

$$I_n = 6.5 \times 10^{-10} [\sqrt{(BR)}] / R$$

表明噪声随DUT电阻的增大而减小。

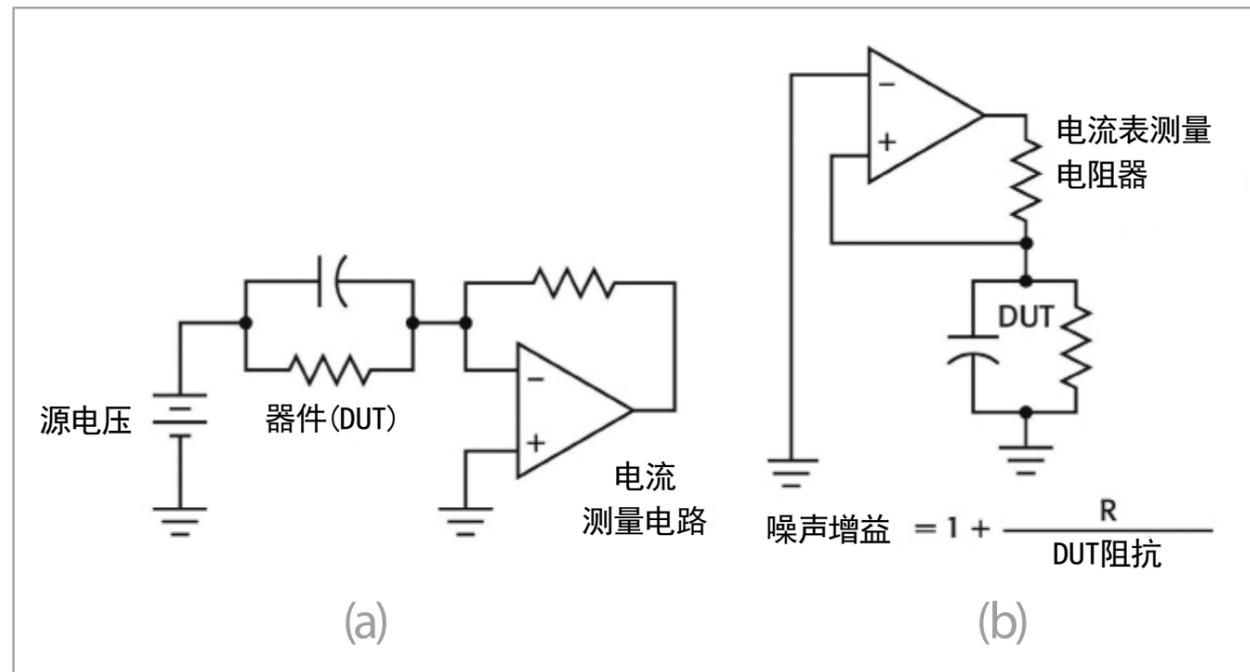


图3. (a) 源电压/测量电流法的电路模型；(b) 修改的模型说明了当DUT阻抗低于测量阻抗时的噪声增益（运算放大器噪声“增加”）。

对所有粒子尺寸，除约翰逊噪声之外，可能存在与所选测量拓扑结构有关的噪声增益。噪声增益是测量系统噪声的杂散放大，而当选用正确的测量结构时该噪声增益就不存在了。例如，考虑源电压/测量电流的拓扑结构。运算放大器用于许多电流测量（电流表）电路，如图3所示。

为最小化噪声增益，电流表电路相对其同相输入端子必须工作在低增益点。

- 引言 2
- 纳米技术测试挑战 2
- 电气测量注意事项 5
- 电噪声 6
- 源测量仪器 7
- 脉冲技术 8
- 避免自发热问题 9
- 应用实例：石墨烯 10
- 结论 12
- 术语表 13
- 选型指南 16
- 更多信息 17

想了解更多内容？
特色资源



• 闪锌矿纤锌矿双相氮化镓纳米线和纳米场效应晶体管（NanoFET）的电子特性。
Dr. Virginia Ayers
美国密歇根州立大学
电子和生物纳米结构实验室主任



• 用低噪声4200-SCS进行超低电流测量

更多资源

- 低电平测量手册

咨询有关吉时利的应用或产品问题。

源-测量仪器

商用直流源-测量单元 (SMU) 是一种适于很多纳米材料和器件测量的方便测试工具。SMU能自动改变测量拓扑结构(即, SMU能快速在源电压/测量电流和源电流/测量电压之间进行切换)。这更容易在最小化测量噪声的同时最大化测量速度和准确度。

某些纳米粒子会随着应用的外部电场改变状态。在研究此类材料时, SMU可配置为源电压和测量电流用于高阻态的纳米粒子。当材料在低阻态时, 通过源电流和测量电压能实现更准确的测量结果。而且, SMU的电流箝位功能可以自动限定直流电流幅度以免损坏材料或被测器件 (DUT)。类似地, 源电压时有电压箝位功能。

在用箝位功能时, 除超出了用户的箝位值以外SMU将满足源值。例如, 在用预设的箝位电流配置SMU源电压时, 如果超出此箝位值, SMU会自动启用为恒流源。然后, 输出电平将为箝位电流值。另外, 如果SMU设为以箝位电压方式源电流, 而且如果DUT阻抗和耗电流开始驱动高于箝位值的电压, SMU将自动切换为源电压(箝位电压)。

虽然纳米器件(例如CNT开关)能快速改变状态, 测量仪器状态的变化不是瞬时的。开关时间取决于SMU模型, 可从100纳秒至100微秒。虽然这样的开关速度不足以跟踪纳米粒子状态改变的速度, 但开关时间足够短就能准确测量两种状态, 并同时将DUT功耗限制在能接受的水平。

引言.....	2
纳米技术测试挑战.....	2
电气测量注意事项.....	5
电噪声.....	6
源测量仪器.....	7
脉冲技术.....	8
避免自发热问题.....	9
应用实例: 石墨烯.....	10
结论.....	12
术语表.....	13
选型指南.....	16
更多信息.....	17

想了解更多内容? 特色资源



• 测试系统是纳米技术实际应用的关键



• 采用导电性纳米压痕技术材料的机械性能、变形特征和电气特性的现场关系

Ryan Major
Hysitron公司
研发项目经理

更多资源

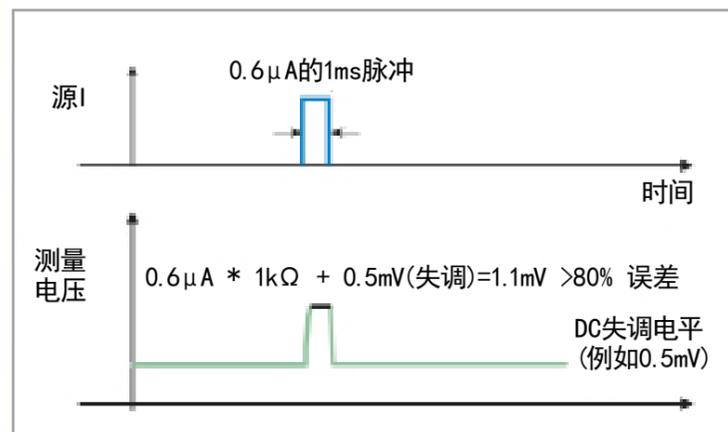
- 4200-SCS半导体特性分析系统
- 2600A系列数字源表

咨询有关吉时利的应用或产品问题。

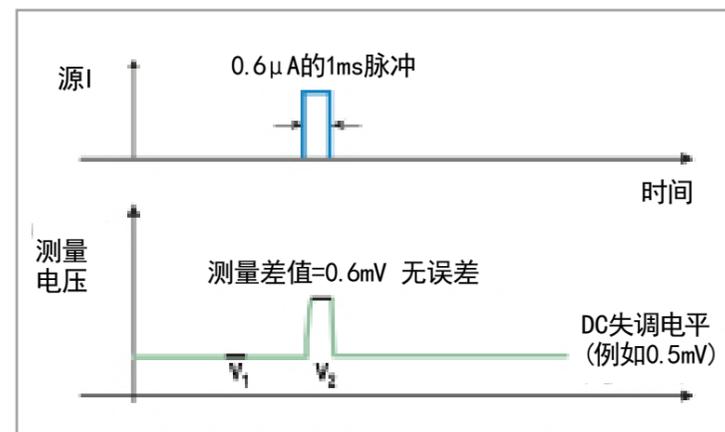
脉冲技术

对于某些纳米材料而言，选择正确的测量结构以提高测量速度并最小化噪声可能还不能满足测试需求。例如，某些CNT呈现的开关速度比传统CMOS晶体管快1000倍。此速度对于商用皮安表的纳米放大范围而言太快了。像这类要求高的器件需要采用其它技术加快阻抗测量的速度。

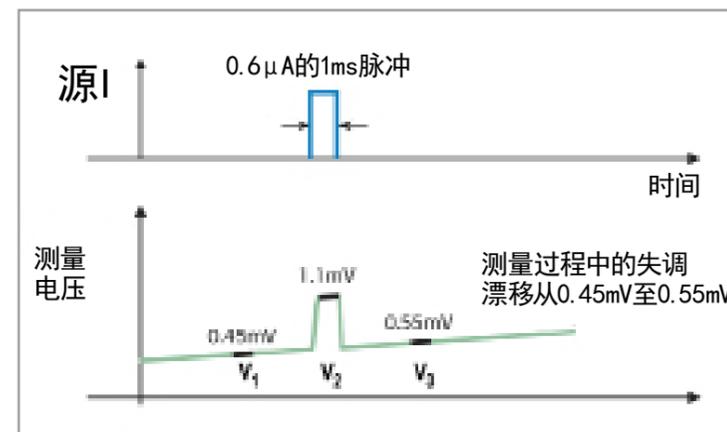
低功率脉冲技术能部分地解决此问题，并且有某些SMU设计可供使用。该思路使用更高的测试电流或测试电压，并在很短的源周期内施加这个大激励。大激励会降低源噪声（通过提高信噪比）而且分别缩短了电压脉冲或电流脉冲的上升时间或建立时间。低噪声源需要的滤波较少而且能缩短源周期时间（脉冲宽度更窄）。而且，较大的源激励增大了响应电流或响应电压，所以能使用更大仪器量程，进一步降低了噪声的影响。因为噪声减小，测量采集时间（积分周期）缩短了，进而提高了测量速度。



由热电压和仪表失调引起的直流失调会给被测电压带来严重误差。



执行2点Δ测量消除了失调误差。测量的Δ电压对电流脉冲产生了正确的电压响应。



可选的第三个测量点有助于消除失调漂移。

- 引言..... 2
- 纳米技术测试挑战..... 2
- 电气测量注意事项..... 5
- 电噪声..... 6
- 源测量仪器..... 7
- 脉冲技术..... 8
- 避免自发热问题..... 9
- 应用实例: 石墨烯..... 10
- 结论..... 12
- 术语表..... 13
- 选型指南..... 16
- 更多信息..... 17

想了解更多内容?
特色资源

- 用6221/2182A组合进行低电平脉冲电气特性分析

- 4225-PMU超快I-V模块的超快I-V应用

更多资源

- 纳米级器件的脉冲测试
- 吉时利脉冲方案

咨询有关吉时利的应用或产品问题。

避免自发热问题

在纳米研究中，一种可能的误差源是DUT电流过大引起的自发热。这类电流甚至会导致样品损毁。因此，测量仪器必须能在器件测试过程中自动限制源电流。可编程电流和电压箝位电路是大部分具有脉冲电流功能、基于SMU测试系统的标准配置，而且可用于避免某些低阻结构的自发热。

当要求提高测试电流时，测试电流必须足够短才不至于使DUT因引入能量而升温并损坏。（纳米器件能承受的热量极少，所以总能耗必须维持在极低的水平。）此外，需要格外谨慎的是，让测试电流幅度尽可能的低以使DUT纳米通道不会达到饱和。（例如，1.5纳米直径的电流通道严格限制了单位时间通过其中的电子数量。）某些纳米器件的导通态仅支持几百纳安电流。因此，即便在脉冲应用中，器件的饱和电流可以限定最大测试电流。

下式说明了在脉冲模式下，占空比和测量时间如何影响DUT的功耗。脉冲模式的功耗计算用视在功率（V•I）乘以测试激励时间并除以测试重复率：

$$P_p = P_a \times T_t / T_r$$

- 其中：P_p = 脉冲功耗
- P_a = 视在功率（即，V•I）
- T_t = 测试时间
- T_r = 测试重复率

脉冲模式还适用于低阻抗连接的状态密度测量，例如通过纳米机械手。脉冲支持在先前因粒子自发热无法分析的I/V位置的测量。

- 引言 2
- 纳米技术测试挑战 2
- 电气测量注意事项 5
- 电噪声 6
- 源测量仪器 7
- 脉冲技术 8
- 避免自发热问题 9
- 应用实例：石墨烯 10
- 结论 12
- 术语表 13
- 选型指南 16
- 更多信息 17

想了解更多内容？
特色资源



Jonathan Tucker
纳米技术部高级市场营销
吉时利仪器

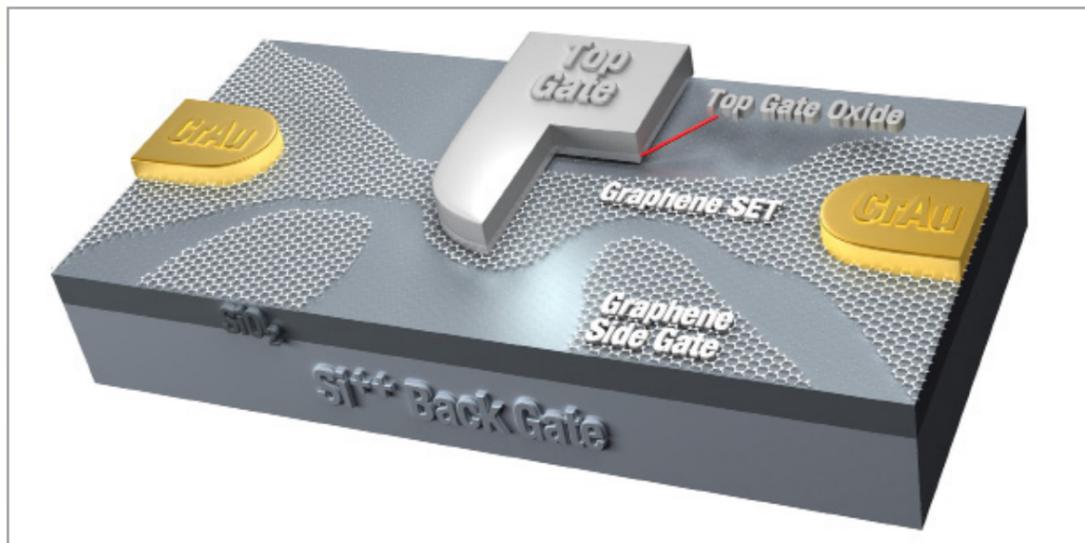
- 如何避免纳米器件的自发热效应

咨询有关吉时利的应用或产品问题。

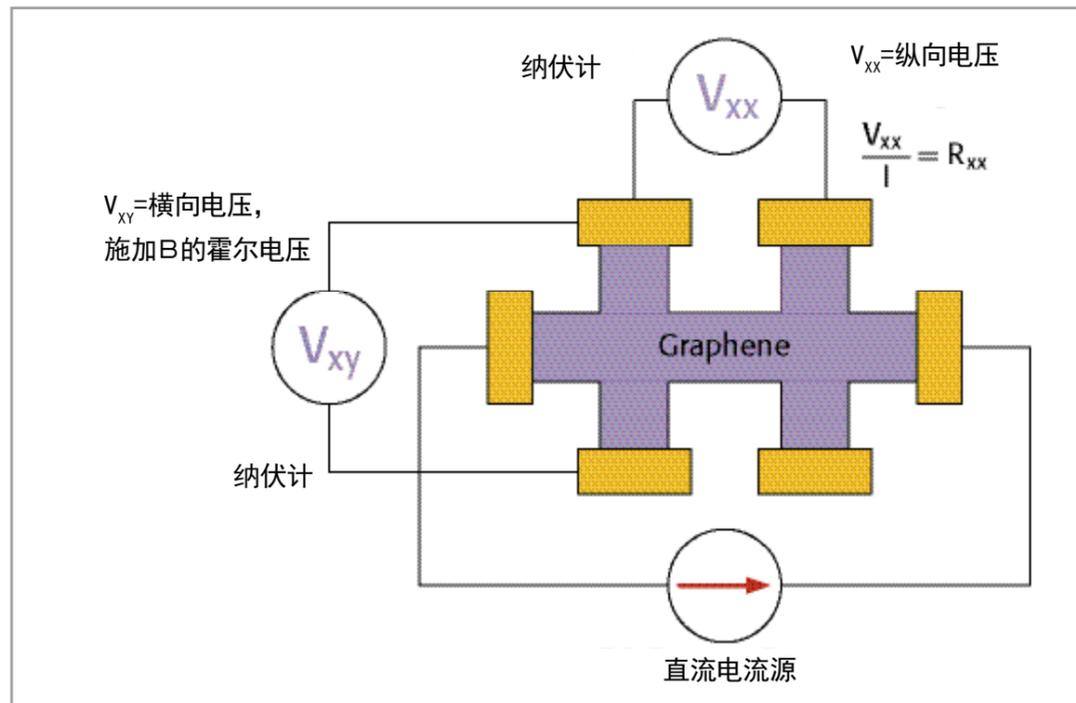
石墨烯： 半导体行业中硅的接替者？

石墨烯（仅由一层原子组成的碳晶体）具有出色的电导率。它还具有非常牢固，但很灵活的键。其硬度大于钻石的硬度。物理学家不久前还不相信存在着仅为单层原子厚的固体晶体。然而，在2004年Novoselov教授和Geim教授证实发现了石墨烯；他们因此发现获得了2010年物理学诺贝尔奖。

对于半导体行业而言，石墨烯令人激动的特性是电子可以毫不受阻地通过，而且这些电子的行为符合量子电动力学原理。石墨烯的载流子迁移率在室温下约为 $10,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，而且悬浮石墨烯样品的迁移率据报道高达 $200,000\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。石墨烯的高迁移率已经引起了开发极高频（100GHz以上）RF晶体管。不幸的是，石墨烯不具有天然的能带隙，所以许多研究人员正在研究创建能带隙的方法，以便在下一代FET数字电路中利用石墨烯的高速特性和纳米尺寸取代硅，从而扩展摩尔定律的寿命。



石墨烯单电子晶体管 (SET)



在霍尔棒结构中，霍尔效应电压和石墨烯样品纵向电阻的同步测量配置

研究人员用霍尔效应测量分析石墨烯和基于石墨烯的材料特性，研究纵向电阻分析载流子迁移率，并且寻找量子霍尔效应的证据，其中纵向电阻率降至 $0\Omega\cdot\text{cm}$ 附近。这些测量需要纳安级的弱电流、精密源。但严格进行源控制最重要的一个方面是确保石墨烯样品的功率不能过大以免损坏样品。而且，在纳安级源电流条件下，样品上形成的电压极微小，约为几十至几百纳伏。这类纳伏级的测量要求分辨率足够高、灵敏度极高的专用测量仪器。

在纳伏级测量中，热电压和噪声源都会显著影响测量准确度，所以采用能将这些影响减至最小的方法极为重要。例如，利用能反转信号极性的电流源消除热电压失调所产生的测量误差。而且，输出低占空比、窄脉冲的电流源将最小化由于石墨烯样品自发热引起电阻率变化所导致的测量误差。

- 引言..... 2
- 纳米技术测试挑战..... 2
- 电气测量注意事项..... 5
- 电噪声..... 6
- 源测量仪器..... 7
- 脉冲技术..... 8
- 避免自发热问题..... 9
- 应用实例：石墨烯..... 10
- 结论..... 12
- 术语表..... 13
- 选型指南..... 16
- 更多信息..... 17

想了解更多内容？

特色资源



- 掌握石墨烯和其它纳米材料特性分析的低功耗、低电压、低电阻测量方法

Robert Green

更多资源



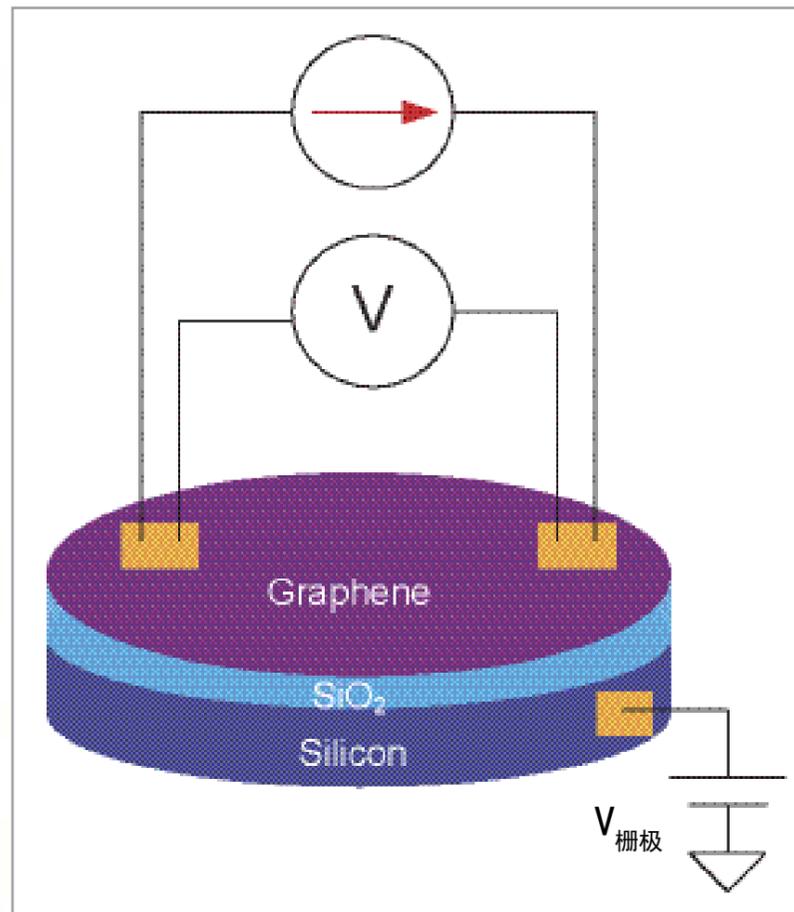
- 霍尔效应测量对高载流子迁移率的分析至关重要

欲获知全世界科学家使用吉时利测量仪器探索石墨烯潜能的最新见解，请点[这里](#)。

咨询有关吉时利的应用或产品问题。

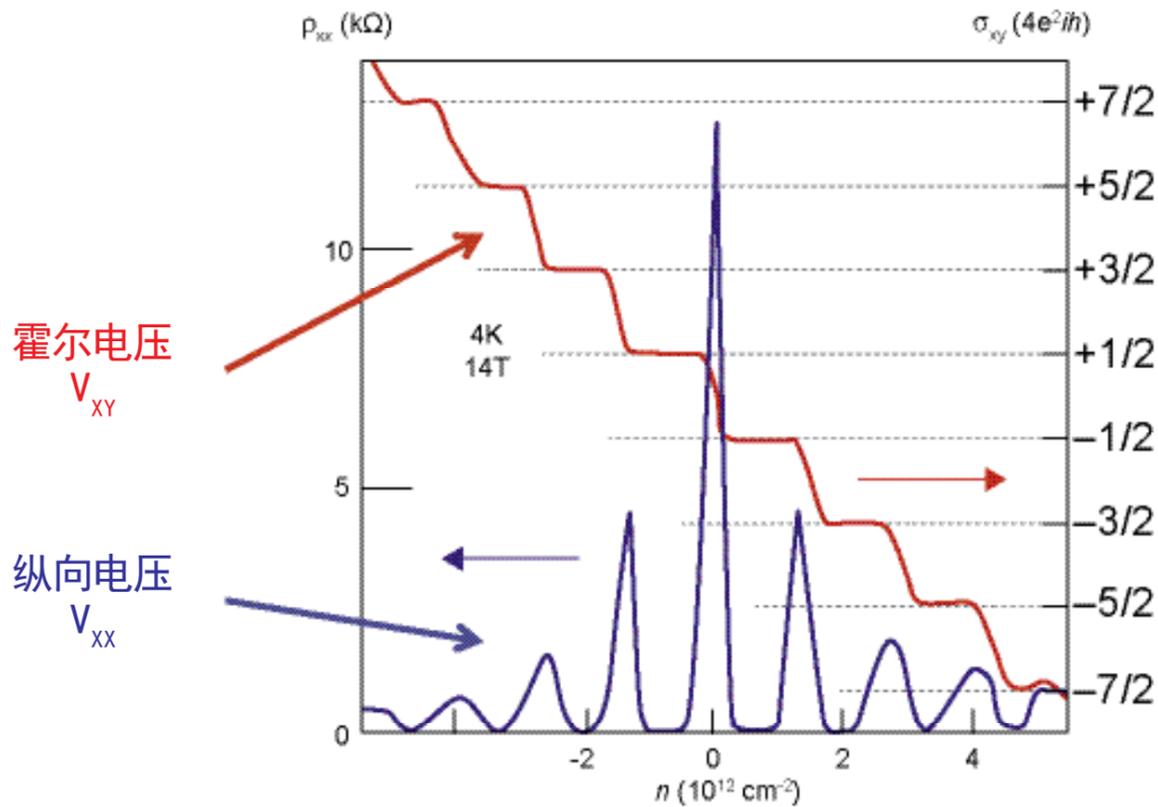
石墨烯：半导体行业中硅的接替者？（续）

因此，使用源和测量同步的电流源和纳伏计组合简化了热失调的消除和输出噪声信号的平衡。



评估石墨烯和基于石墨烯结构的能带隙的测试系统配置

为了用石墨烯或基于石墨烯的材料替代硅，材料必须具有能带隙才能闭合或断开FET通道。精密源表需调节基底或“栅极”电压来分析样品在一系列栅极电压条件下的性能。再次，需要低电平电流源和纳伏计来实现低功率、低电平测量。



在磁场强度变化的条件下绘制霍尔电压和纵向电压。值得注意的是，霍尔电压怎样在特定磁场密度点保持恒定；在这些点上，纵向电压降接近0，表明电导率极高。这证明石墨烯显示了量子霍尔效应。

图片来自Neto, Novoselov, Geim等人的石墨烯电子特性 (The Electronic Properties of Graphene), 2009年1月。

- 引言 2
- 纳米技术测试挑战 2
- 电气测量注意事项 5
- 电噪声 6
- 源测量仪器 7
- 脉冲技术 8
- 避免自发热问题 9
- 应用实例: 石墨烯 10
- 结论 12
- 术语表 13
- 选型指南 16
- 更多信息 17

想了解更多内容？ 特色资源



- 充分利用吉时利在石墨烯测量方面的技术专长

更多资源

- Δ 模式在线演示
- 在低功率和低压应用中实现准确、可靠的电阻测量

咨询有关吉时利的应用或产品问题。

结论

纳米粒子的电子结构反映了原子电子能量以及分子共享和自由电子的轨道分布。这种信息能用于描述在能量和其它材料存在的条件下这类材料如何相互作用。材料的状态密度与其电子结构直接相关，而且能用于预测或控制其特性。

可以通过微分电导的直接电气测量得出状态密度。因此，状态密度能预测材料的阻抗，反之亦然。

但根据纳米材料的阻抗高低，分析其电气特性的方法有一种是正确的，一种是错误的。对于低阻抗材料而言，源电流/测量电压法得到的测量结果电气噪声最小，并能用最宽的带宽实现准确度最高的响应测量。对于高阻抗材料而言，基于类似的原因，源电压/测量电流法更适合。有时，必须以完全一致的方式使用合适的测量模式，但可以用另一种电压源或电流源启动或激励器件。

- 引言 2
- 纳米技术测试挑战 2
- 电气测量注意事项 5
- 电噪声 6
- 源测量仪器 7
- 脉冲技术 8
- 避免自发热问题 9
- 应用实例: 石墨烯 10
- 结论 12
- 术语表 13
- 选型指南 16
- 更多信息 17

想了解更多内容? 特色资源



- 用微分电导测量分析纳米器件

更多资源

- 4200-SCS 半导体特性分析测试系统的产品介绍
- 4200-SCS 半导体特性分析系统

咨询有关吉时利的应用或产品问题。

词汇表

Absolute Accuracy. (绝对准确度) 衡量测量仪器读数与基准的接近程度, 此基准完全能追溯到公认标准组织批准的标准。准确度通常分为增益项和失调项。请参见Relative Accuracy。

A/D (Analog-to-Digital) Converter. (模数转换器) 用于将模拟输入信号转化为数字信息的电路。所有数字仪表都使用模数转换器将输入信号转换为数字信息。

Analog Output. (模拟输出) 输出与输入信号成正比。

Assembler. (组合器) 一种由分子组成的制造设备, 能通过分子定位引导化学反应。组合器能通过编程虚拟地从更为简单的化学构件建立任意分子结构或器件。

Auto-Ranging. (自动量程) 测量仪器自动切换量程并确定具有最高分辨率量程的能力。这些量程通常以十进制步进。

Auto-Ranging Time. (自动量程时间) 对具有自动量程功能的测量仪器, 在施加阶跃输入信号及其显示之间的时间间隔, 包括确定和更改为正确量程的时间。

Bandwidth. (带宽) 在一定范围内能传导或者放大的频率范围。带宽通常规定为-3dB (半功率) 点。

Bias Voltage. (偏置电压) 施加至电路或器件的电压, 以建立器件在测试过程中的参考电平或工作点。

Capacitance. (电容量) 在导体和电介质的电容器或系统中, 当导体间存在电位差时, 此特性允许保存电气上分离的电荷。电容与电荷和电压的关系如下: $C=Q/V$, 其中C为电容量 (单位: 法拉), Q是电荷 (单位: 库伦), 并且V是电压 (单位: 伏特)。

Carbon Nanotube. (碳纳米管) 管状纳米器件由单层碳原子形成, 具有新颖的电气和抗拉特性。这些纤维能具有像铜那样的高电导率, 像宝石那样的高导热性, 以钢铁1/6的重量达到钢铁100倍的强度而且极不易失效。它们可以是超导、绝缘、半导体或导体 (金属的)。非碳的纳米管常被称为纳米线, 通常由氮化硼或硅制成。

Channel (switching). [通道 (开关)] 开关卡上几条信号路径之一。对于扫描卡或多路复用卡, 此通道被用作测量电路的开关输入或者源电路的开关输出。对于开关卡, 每条通道的信号路径独立于其它通道。对于矩阵卡, 由行和列交叉点的继电器动作建立通道。

Coaxial Cable. (同轴电缆) 由两条以上相互绝缘的同轴圆柱体芯形成的电缆。最外层的芯通常接地。

Common Mode Rejection Ratio (CMRR). [共模抑制比 (CMRR)] 测量仪器输入端相对地抑制共模电压干扰的能力。通常用给定频率的分贝数表示。

Common Mode Current. (共模电流) 流经低输入端和测量仪器机壳地的电流。

Common Mode Voltage. (共模电压) 测量仪器低输入端和地之间的电压。

Contact Resistance. (接触电阻) 当触点闭合或接触时, 继电器或连接器的触点之间的电阻 (单位: 欧姆)。

Contamination. (污染) 通常用于描述无用材料对半导体或绝缘体的物理、化学或电气性能的不利影响。

D/A (Digital-to-Analog) Converter. (数模转换器) 用于将数字信息转换为模拟信号的电路。数模转换器广泛用于测量仪器, 能提供隔离的模拟输出。

Dielectric Absorption. (介质吸收) 在预先充电的电容器瞬间放电后, 剩余电荷存储的效应。

Digital Multimeter (DMM). (数字万用表) 通过模拟信号转换为数字信息的方式测量电压、电流、电阻或其它电气参数并显示的电子仪器。标准五功能DMM能测量直流电压、直流电流、交流电压、交流电流和电阻。

Drift. (漂移) 逐渐变化的读数, 在输入信号或工作条件不改变的情况下。

Dry Circuit Testing. (干电路测试) 在测量器件的过程中将器件电压保持在某个电平以下 (例如, <20mV), 以防被测器件的氧化物作用或其它退化的干扰。

Electrochemical Effects. (电化效应) 由污染和潮湿形成的原电池作用产生电流的现象。

Electrometer. (静电计) 高精度直流万用表。与数字万用表相比, 静电计具有较高的输入阻抗和较高的电流灵敏度。而且, 它拥有一般DMM所没有的功能 (例如, 测量电荷、源电压)。

EMF. 电动势或电压。 EMF通常用于由电磁、电化学或热效应产生电压差的环境。

Electrostatic Coupling. (静电耦合) 由导体附近变化电压源或移动电压源产生电流的现象。

Error. (误差) 测量值与真值的偏差 (差值或比率)。真值就其本质而言是不确定的。请参见Random Error和Systematic Error。

Fall Time. (下降时间) 从信号峰峰值的大百分率 (通常是90%) 变至小百分率 (通常是10%) 所需的时间。请参见Rise Time。

Faraday Cup. (法拉第杯) 法拉第杯 (通常称为法拉第筒或冰桶) 是金属薄片或网制成的外壳。它由两个电极组成, 一个位于另一个的内部, 并被绝缘体隔开。当内电极连至静电计时, 外电极接地。当带电体放在内电极中, 全部电荷将流入测量仪器。在封闭、空导体内的电场为零时, 法拉第杯将对放在其中的物体屏蔽空气电场或杂散电场。这样就能准确测量物体上的电荷。

Feedback Picoammeter. (反馈皮安表) 一种高灵敏度电流表, 利用运算放大器反馈配置将输入电流转化为电压进行测量。

Floating. (浮地) 在大地与仪器之间, 或大地与目标电路之间存在共模电压的状态。(电路低电位与大地电位无关联。)

Four-Point Probe. (4点探测) 4点共线探测电阻率的测量方法包括将4个等距探针接触未知电阻的材料。探针组放置在材料中间。两个外层探针通过已知电流, 两个内层探针感测电压。电阻率用下式计算:

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

其中: V=被测电压 (单位: 伏特), I=源电流 (单位: 安培), t=晶圆厚度 (单位: 厘米), k=基于探针与晶圆直径比例并且基于晶圆厚度与探针间距比例的校准因子。

Four-Terminal Resistance Measurement. (4端电阻测量) 用两条测试线提供电流至未知电阻, 用另两条测试线感测该电阻压降的测量。4端配置在测量低电阻时最有优势。

引言	2
纳米技术测试挑战	2
电气测量注意事项	5
电噪声	6
源测量仪器	7
脉冲技术	8
避免自发热问题	9
应用实例: 石墨烯	10
结论	12
术语表	13
选型指南	16
更多信息	17

术语表续

Fullerene. (富勒烯) 指的是C60, 一种近似于球形、中空的碳分子, 包含排列为互锁六边形和五角形的60个碳原子, 令人想起建筑师R. Buckminster Fuller设计的网格状球顶建筑结构。有时称为“巴克敏斯特富勒烯”或“巴克球”。

Ground Loop. (接地回路) 当两台以上仪器连至接地母线的不同点以及接地或接电源地产生的情形。接地回路会产生不希望有的失调电压或噪声。

Guarding. (防护) 一种能减少漏电误差并缩短响应时间的技术。防护由围绕高阻抗信号线的低阻抗源驱动的导体组成。防护电压保持在或接近于信号电位。

Hall Effect. (霍尔效应) 将导体放置在磁场中时, 对导体横向电压的测量。通过此测量, 能确定硅载流子的类型、浓度和迁移率。

High Impedance Terminal. (高阻抗端子) 当电源内阻乘以期望的杂散电流(例如, 1 μ A) 超出电压测量灵敏度要求的端子。

Input Bias Current. (输入偏置电流) 由于测量仪器内部电路和偏压, 在其输入端产生的电流。

Input Impedance. (输入阻抗) 输入端测量的并联电阻和电容(或电感), 不包括输入偏置和失调电流的影响。

Input Offset Current. (输入失调电流) 为使输出指示降为零, 差分仪器输入测量端子必须施加的两路电流的差(在零输入电压和零失调电压的条件下)。有时, 非正式指的是输入偏置电流。

Input Offset Voltage. (输入失调电压) 为使输出指示降为零, 输入测量端子之间必须直接施加的电压, 其中偏置电流由阻抗路径提供。

Input Resistance. (输入阻抗) 输入阻抗的有功分量。

Insulation Resistance. (绝缘阻抗) 绝缘欧姆电阻。随着湿度升高, 绝缘阻抗迅速降低。

Johnson Noise. (约翰逊噪声) 电阻中载荷子热运动所形成的噪声。约翰逊噪声具有白噪声谱, 并且由温度、带宽和电阻值决定。

Leakage Current. (漏电流) 施加电压时, 绝缘电阻流过(泄露)的误差电流。即使在小电导体与邻近电压源之间的高阻路径都能产生明显的漏电流。

Long-Term Accuracy. (长期准确度) 在90天以上的期间, 误差不会超过的极限。长期准确度表示为读数(或源值)的百分率加上规定温度量程内的若干位数。

Maximum Allowable Input. (最大容许输入值) 加在高输入和低输入测量端子之间而且不损坏测量仪器的直流最大值加上交流峰值(电压或电流)。

MEMS. 微机电系统. 描述能响应激励或产生物理力(传感器和激励器)并具有1微米级尺度的系统。它们通常采用与基于硅IC同样的光刻技术制造。

Micro-ohmmeter. (微欧姆计) 专为低阻测量优化的欧姆计。标准微欧姆计使用4端测量法并具有最佳低电平测量准确度的特性。

Molecular Electronics. (分子电子学) 任何利用纳米尺度的原子级精密电子器件的系统, 特别是由独立分子件而不是当今半导体器件的连续材料组成。

Molecular Manipulator. (分子机械手) 一种装置, 结合了用于原子级精密定位的近似探测机制与在尖端的分子结合点; 能通过位置合成作为构建复杂结构的基础。

Molecular Manufacturing. (分子制造) 用分子机械装置进行制造, 能通过位置化学合成对产品和副产品的分子进行控制。

Molecular Nanotechnology. (分子纳米技术) 基于产品和副产品分子控制的全面、低成本物质结构控制; 分子制造的产品和过程, 包括分子机械。

MOSFET. 金属氧化物场效应晶体管. 具有极高输入阻抗的单极型器件。

Nano-. (纳米) 一种前缀, 意思是十亿分之一(1/1,000,000,000)。

Nanoelectronics. (纳米电子学) 在纳米尺度上的电子学。包括分子电子学和纳米器件, 类似于当前的半导体器件。

Nanotechnology. (纳米技术) 以原子级或分子级的精度制造器件。最小特性尺寸小于100纳米(nm)的器件被认为是纳米技术产品。一纳米[十亿分之一米(10⁻⁹m)]一般是最适于描述单分子大小的单位长度。

Nanovoltmeter. (纳伏计) 一种优化的电压表, 具有纳伏灵敏度(通常使用低热电EMF连接器, 失调补偿等)。

Noise. (噪声) 在有用信号上叠加的任意无用信号。

Normal Mode Rejection Ratio (NMRR). (常模抑制比) 测量仪器在其输入端抑制干扰的能力。通常用特定频率(例如交流电力线频率)的分贝数表示。

Normal Mode Voltage. (常模电压) 测量仪器的高输入端和低输入端之间施加的电压。

Offset Current. (失调电流) 即使在未施加信号条件下, 电路产生的电流。失调电流由电路中存在的摩擦电、压电或电化效应产生。

Overload Protection. (过载保护) 一种电路, 防止测量仪器的输入端子接入过大电流或电压。

Picoammeter. (皮安表) 一种安培表, 专为小电流的精密测量优化。通常是一种反馈电流表。

Piezoelectric Effect. (压电效应) 一个术语, 用于描述当某些绝缘体被施加机械应力时所产生的电流。

Precision. (精度) 指的是测量不确定性的自由度。通常用于再现性或复现性的情况下, 而且不能代替准确度使用。请参见Uncertainty。

Quantum Dot. (量子点) 一种纳米对象(通常是半导体岛), 能限制单个(或少数几个)电子而且电子占据离散能态, 就像原子中那样。量子点被称为“人造原子”。

Random Error. (随机误差) 大量测量值的平均, 受随机误差对应真值的影响。请参见Systematic Error。

Range. (量程) 能被测量或源的连续信号值。在双极型测量仪器中, 量程包括正值或负值。

Reading. (读数) 代表输入信号特性的显示数量。

Reading Rate. (读速率) 读数更新的速率。读速率与读数间隔时间互为倒数。

Relative Accuracy. (相对精度) 就次级标准而言的测量仪器准确度。请参见Absolute Accuracy。

引言	2
纳米技术测试挑战	2
电气测量注意事项	5
电噪声	6
源测量仪器	7
脉冲技术	8
避免自发热问题	9
应用实例: 石墨烯	10
结论	12
术语表	13
选型指南	16
更多信息	17

术语表续

Repeatability. (再现性) 在相同条件下连续测量结果之间的接近程度。

Reproducibility. (复现性) 在声明条件的情况下, 相同数量测量结果之间的接近程度。

Resolution. (分辨率) 能被测量 (或源) 和显示的输入 (或输出) 信号的最小部分。

Response Time. (响应时间) 对于测量仪器, 在额定准确度下施加阶跃输入信号与其幅度被显示之间的时间。对于源测量仪器, 在改变设置和得到输出值之间的时间。也称为Settling Time (建立时间)。

Rise Time. (上升时间) 信号从峰峰幅度的小百分率 (通常是10%) 变至大百分率 (通常是90%) 所需的时间。请参见Fall Time。

Sensitivity. (灵敏度) 能被测量和显示的最小数量。

Settling Time. (建立时间) 对于测量仪器, 是在额定准确度内施加阶跃输入信号和幅度被显示之间的时间。对于源仪器, 是在改变设置和得到输出值之间的时间。也称为Response Time。

Shielding. (屏蔽) 被测电路周围的金属外壳, 或包围芯线 (同轴或三同轴电缆) 的金属套管以降低静电干扰、相互作用或漏电。屏蔽通常接地或连至输入LO。

Shunt Ammeter. (分流安培表) 一种安培表, 通过分流电阻方式将输入电流转换为电压来实现电流测量。与反馈安培表相比, 分流安培表具有较高的电压降和较低的灵敏度。

Shunt Capacitance Loading. (并联电容负载) 对输入端子 (例如从电缆或测试夹具) 电容量测量的影响。并联电容增大了上升时间和建立时间。

Short-Term Accuracy. (短期准确度) 在短期、规定时期内 (例如24小时) 连续操作误差不会超过的极限。除另有指明, 非零或任何一种调节都允许。短期准确度表示为读数 (或源值) 的百分率加上规定温度范围内的位数。

Single Electron Transistor. (单电子晶体管) 一种开关器件, 使用受控电子隧道效应放大电流。SET用两条隧道结共用一个电极制成。隧道结由很薄 (~1nm) 绝缘体隔开的两片金属组成。一个金属电极中的电子到达另一个电极的唯一办法是通过绝缘体隧道。隧道是一个离散过程, 所以电荷以多个e (单电子电荷) 通过隧道结。

Source Impedance. (源阻抗) 源在测量仪器输入端呈现的电阻和容抗或感抗的组合。

Source-Measure Unit (SMU). [源-测量单元 (SMU)] 源和测量直流电压和电流的电子仪器。一般地, SMU具有两种操作模式: 源电压和测量电流, 或者源电流和测量电压。也称作源-监控单元或激励-测量单元。

SourceMeter. (源表) 源表在许多方面都非常类似于源-测量单元, 包括源和测量电流与电压的能力以及执行扫描。此外, 源表能直接用电阻、电压和电流显示测量结果。源表适用于通用、高速生产测试应用。它还能用作调节低电平测量和研究应用的源。

Source Resistance. (电源内阻) 电源阻抗的有功分量。请参见Thevenin Equivalent Circuit。

Spintronics. (自旋电子学) 以某种方式利用电子旋转的电子学, 而不仅仅是电荷。

Standard Cell. (标准电池) 一种化学电池, 用作实验室的基准电压。

Superconductor. (超导体) 具有零电阻的导体。这类材料通常仅在极低温度下变为超导。

Switch Card. (开关卡) 一种卡, 具有独立和隔离的继电器, 用于切换每条通道的输入和输出。

Switching Mainframe. (开关主机) 连接源和测量仪器和被测器件之间信号的开关仪器。主机也指扫描器、多路复用器、矩阵或可编程开关。

Systematic Error. (系统误差) 受偏离真值系统误差影响的大量测量值的平均。请参见Random Error。

Temperature Coefficient. (温度系数) 测量温度变化时读数 (或源值) 的变化。温度系数表示为读数 (或源值) 百分数加上温度每变化一度的位数。

Temperature Coefficient of Resistance. (电阻温度系数) 温度每变一度, 材料或器件阻抗的变化, 通常用ppm/°C表示。

Thermoelectric EMFs. (热电EMF) 在测量电路中或当不同材料的导体连接在一起时, 由温度差产生的电压。

Thevenin Equivalent Circuit. (戴维南等效电路) 用于简化复杂二端线性网络电路的分析。戴维南等效电压是开路电压, 并且戴维南等效电阻等于开路电压除以短路电流。

Transfer Accuracy. (传输准确度) 在有限温度范围和时间间隔内, 两个几乎相等测量值的比较。传输准确度用ppm表示。请参见Relative Accuracy, Short-Term Accuracy。

Triboelectric Effect. (摩擦电效应) 一种现象, 其中导体和绝缘体摩擦创造的电荷产生电流。

Trigger. (触发器) 一种外部激励, 能启动一项以上仪器功能。触发器激励包括: 输入信号、前面板、外部触发脉冲以及IEEE-488总线X, talk和GET触发器。

Two-Terminal Resistance Measurement. (2端阻抗测量) 一种测量, 其中通过同一组测试线施加源电流和感测电压。

Uncertainty. (不确定度) 对测量结果可能误差的估计; 换句话说, 是对可能偏离真值的估计。

van der Pauw Measurement. (范德堡测量) 用于测量任意形状样品电阻率的测量方法。

Voltage Burden. (输入压降) 电流表输入端子间的电压降。

Voltage Coefficient. (电压系数) 外加电压条件下电阻值的变化。通常用百分率/V或ppm/V表示。

Warm-up Time. (预热时间) 在基准条件下, 从测量仪器加电至达到额定准确度所需的时间。

Zero Offset. (零点偏移) 当测量仪器输入端子短路 (电压表) 或开路 (电流表) 时出现的读数。

引言	2
纳米技术测试挑战	2
电气测量注意事项	5
电噪声	6
源测量仪器	7
脉冲技术	8
避免自发热问题	9
应用实例: 石墨烯	10
结论	12
术语表	13
选型指南	16
更多信息	17

哪种吉时利纳米技术方案最适于您的源或测量应用？

吉时利测量仪器越来越多地用于纳米技术研究 and 生产测试环境。这里示出的应用仅仅选取了适合吉时利测量仪器和系统的纳米技术测试和测量工作。如果您的测试需要源或测量低电平信号，那么吉时利测量仪器能帮助您更准确、更经济有效地进行测量。

需要无缝地控制电流脉冲源和测量？

当6221型AC+DC电源和2182A型纳伏表连在一起使用时，它们能像一台仪器那样进行高速脉冲模式测量。



研究高阻纳米线？

具有低噪声和低漂移性能的6430型亚飞安远程数字源表是理想选择。它能以400aA ($400 \times 10^{-18}A$) 灵敏度测量电流。



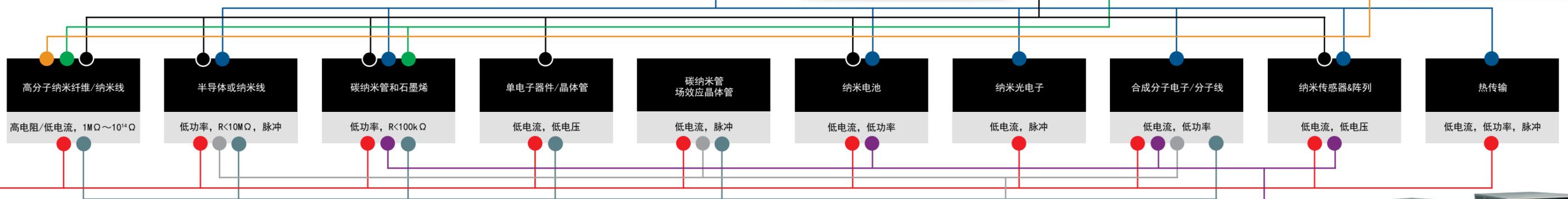
设法分析高阻抗纳米材料的特性？

具有内置1kV源、200TΩ输入阻抗和弱电流感度的6517B型静电计/高阻抗仪表是理想方案。



想不花高价就实现低电流测量？

凭借<200 μV的输入压降，经济有效的6485型皮安表即便在源电压极低的电路中也能确保低电流测量的高准确度。6478型皮安表/电压源增加了500V偏置源用于高阻抗和高电阻率测量。



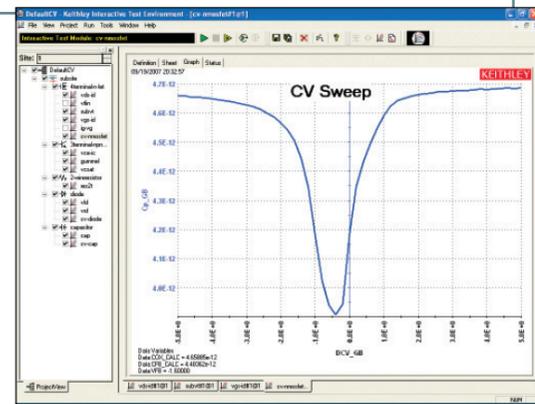
需要多通道源和测量？

完全集成的4200型半导体特性分析系统将三种核心测量（DC-IV、交流阻抗和瞬态I-V）集中在一个易于操作的包中。它能用于纳米研究、开发、分析和生产等多个阶段。



需要分析迁移率、载流子浓度和器件速度

4210-CV型选件能通过直观点击设置、完整接线和内置要素模型，快捷、方便地推测出电容-电压（C-V）测量的有效结果。



面临过热问题的困扰？

用于4200-SCS的4225-PMU选件能在各种器件上为各种不同目标进行脉冲I-V测试，包括用窄脉冲和/或小占空比脉冲代替直流信号防止器件自发热。



测试大量器件？

2600A系列数字源表能迅速、方便和经济地进行精密直流、脉冲和低频交流源-测量测试。它们几乎能无限地灵活性增减系统通道数以满足不断变化的应用需求。



只寻找单通道？

每台2400系列源表都是一个完整的单通道直流参数测试仪。多种量程和功能供选择，适于特定应用需求。2430能设置产生脉宽达5ms的单个脉冲或脉冲序列。

咨询有关吉时利的应用或产品问题。

了解更多信息

纳米技术测量手册：纳米科学应用电气测量指南是吉时利提供的一本辅助资料，便于您高效了解如何测试纳米级材料和器件。它为纳米材料和器件的精密低电平直流和脉冲测量提供了实际帮助。这本130多页的手册可用作参考文献并用作辅助理解实验室观察到的低电平现象。此手册概述了低电流、高电阻、低电压和低电阻测量的理论和实际问题。[点这里下载手册的副本](#)（需要Adobe Reader）

关于纳米技术的其它信息来源

[TryNano.org](#)是一个面向学生及其父母、老师和学校辅导员的资源。它是为了公众的利益由IEEE、IBM和纽约科学博物馆联合创建的。TryNano.org由IEEE纳米技术委员会和IEEE教育协会创建，并由IEEE新倡议组委会提供资金。

引言.....	2
纳米技术测试挑战.....	2
电气测量注意事项.....	5
电噪声.....	6
源测量仪器.....	7
脉冲技术.....	8
避免自发热问题.....	9
应用实例：石墨烯.....	10
结论.....	12
术语表.....	13
选型指南.....	16
更多信息.....	17

咨询有关吉时利的应用或产品问题。

联系我们

吉时利仪器

www.keithley.com.cn

全国免费电话: 800-810-1334 400-650-1334

Email: china@keithley.com

以上内容是根据英文原文翻译的, 仅供参考。
说明书如有变动不另行通知。
所有吉时利的注册商标或商标名称都是吉时利仪器的财产。
所有其它注册商标或商标名称都是相应公司的财产。

A GREATER MEASURE OF CONFIDENCE

KEITHLEY
A Tektronix Company

KEITHLEY INSTRUMENTS, INC. ■ 28775 AURORA RD. ■ CLEVELAND, OH 44139-1891 ■ 440-248-0400 ■ Fax: 440-248-6168 ■ 1-888-KEITHLEY ■ www.keithley.com

BELGIUM

Sint-Pieters-Leeuw
Ph: 02-3630040
Fax: 02-3630064
info@keithley.nl
www.keithley.nl

KOREA

Seoul
Ph: 82-2-574-7778
Fax: 82-2-574-7838
keithley@keithley.co.kr
www.keithley.co.kr

CHINA

Beijing
Ph: 86-10-8447-5556
Fax: 86-10-8225-5018
china@keithley.com
www.keithley.com.cn

MALAYSIA

Penang
Ph: 60-4-643-9679
Fax: 60-4-643-3794
sea@keithley.com
www.keithley.com

FRANCE

Les Ulis
Ph: 01-69868360
Fax: 01-69868361
info@keithley.fr
www.keithley.fr

NETHERLANDS

Son
Ph: 040-2675502
Fax: 040-2675509
info@keithley.nl
www.keithley.nl

GERMANY

Germering
Ph: 089-84930740
Fax: 089-84930734
info@keithley.de
www.keithley.de

SINGAPORE

Singapore
Ph: 65-6747-9077
Fax: 65-6747-2991
sea@keithley.com
www.keithley.com.sg

INDIA

Bangalore
Ph: 080-30792600
Fax: 080-30792688
supporting@keithley.com
www.keithley.in

SWITZERLAND

Brugg
Ph: 41-56-460-7890
Fax: 41-56-460-7879
info@keithley.ch
www.keithley.ch

ITALY

Peschiera Borromeo (Mi)
Ph: 02-5538421
Fax: 02-55384228
info@keithley.it
www.keithley.it

TAIWAN

Hsinchu
Ph: 886-3-572-9077
Fax: 886-3-572-9031
info_tw@keithley.com
www.keithley.com.tw

JAPAN

Tokyo
Ph: 81-3-6714-3070
Fax: 81-3-6714-3080
info.jp@keithley.com
www.keithley.jp

UNITED KINGDOM

Bracknell
Ph: 044-1344-392450
Fax: 044-1344-392457
info@keithley.co.uk
www.keithley.co.uk