

用 4200-SCS 和 Zyvex S100 纳米探针台测试纳米线和 纳米管 I-V 测量

应用文档



介绍

在当代半导体及下一代纳米电子和材料，如单壁碳纳米管（SWNT）中，很难用电子的方法来表征非常小的电路元件。许多探针台需要产品较大的金属引脚，而使用光学显微镜的手动机械探针台不能很好表征材料性能。由于标准栅极尺寸小于 90nm，空间预算不断缩小，大多数探针系统所需的最小探针台的引脚尺寸保持固定在 50 微米左右。这种限制很大程度上受限于由于探头运动的不准确和探针尖的尺寸。

这些困难可以通过结合 Keithley 的 4200-SCS 半导体表征系统与先进的纳米操作系统，如 Zyvex S100 纳米探针台（如图 1 所示）来消除。这种组合提供了 5nm 的运动精度，探针尖端直径小于 20nm，目前的测量能力优于 1pA。



图 1: Keithley 的 4200-SCS 半导体表征系统和 Zyvex S100 纳米驱动器

方法和技术

不像宏观和微观组件和材料的通用测量和 I-V 曲线，分子线和碳纳米管的测量需要的注意事项和技术更多。通用电阻测量和 I-V 曲线的生成通常使用两线法电测量技术。当要测量相对较低的电阻时（分子线、半导体纳米线和碳纳米管的情况一样），或者当探针或触点的电阻相对较高时，四线探针法的测试结果更准确。

两线法测试理论

为了确定一个电阻，使用欧姆定律： $R = V/I$ 。一个已知的电流来流过未知的电阻，测量跨越电阻产生的电压，然后将测量的电压除以源电流来确定电阻。当使用双线法测试时出现的一个问题是，电压不仅通过电阻进行测量，整个测量值还包括导线和触点的电阻（见图 2）。当使用欧姆表来测量大于几千欧姆的电阻时，这个增加的电阻通常不是一个问题。然而，当测量纳米级材料或组件上的低电阻时，或当接触电阻可能很高时，用双线测量获得准确的结果可能是一个问题。

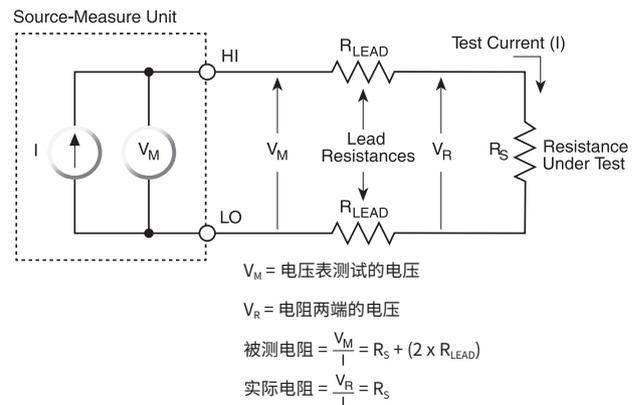


图 2: 两线法测试

四线法测试理论

解决两线测量导线和接触电阻的方法是用四线或“开尔文”测量。通过开尔文测量，第二组探针用于感测信号，这些探头中的电流可忽略不计；因此，仅测量经过 DUT 的电压降（见图 3）。因此，电阻的测量或 I-V 曲线的生成更加准确。

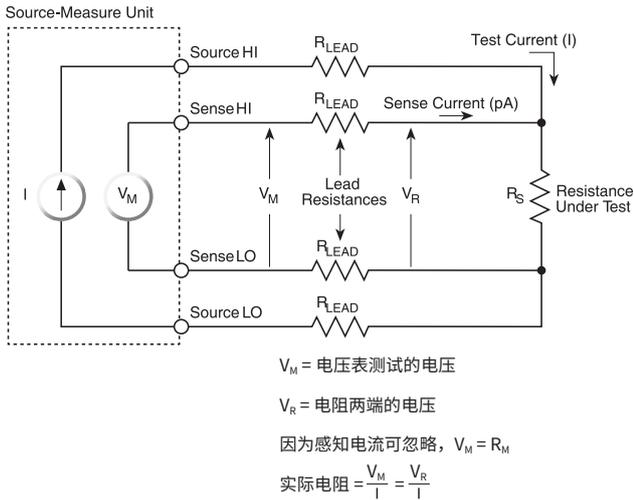


图 3: 四线法测试

四线法测试系统配置

将 Keithley 的 4200-SCS 半导体表征系统与 Zyvex S100 纳米探针台相结合，创建了一个自动化的仪器系统，用于对纳米尺度和半导体器件、测试结构和其他亚微米器件进行 I-V 和 C-V 表征。对于组合系统噪声下限小于 55fA，电流测量优于 1pA 的情况很容易实现。

通过 Keithley 交互式测试环境 (KITE)，可以轻松、快速地配置和执行测试。KITE 是一个为半导体器件和材料设计和开发的应用程序，也适用于纳米级器件。测试的源和测量功能由源测量单元 (SMU) 提供。碳纳米管 I-V 测试的设置示例如图 4 所示。图 5 展示了使用 Keithley 4200-SCS、KITE 和 S100 的碳纳米管的 I-V 曲线。

Zyvex S100 纳米探针台是一种用于微米和纳米规模的研究和开发应用的探针台。它可容纳多达 4 个定位器（三维级），具有 5nm 的定位器分辨率，可以在

扫描电子显微镜 (SEMS) 和聚焦离子束系统 (FIBS) 中捕获、移动、测试和定位微米和纳米量级的样品。对于纳米线或纳米管上的四线测量，使用测试系统的四个探针臂。每个探针臂控制一个探头。图 6 展示了 Keithley 4200-SCS 与 S100 的连接。图 7 展示了与碳纳米管的实际接触。

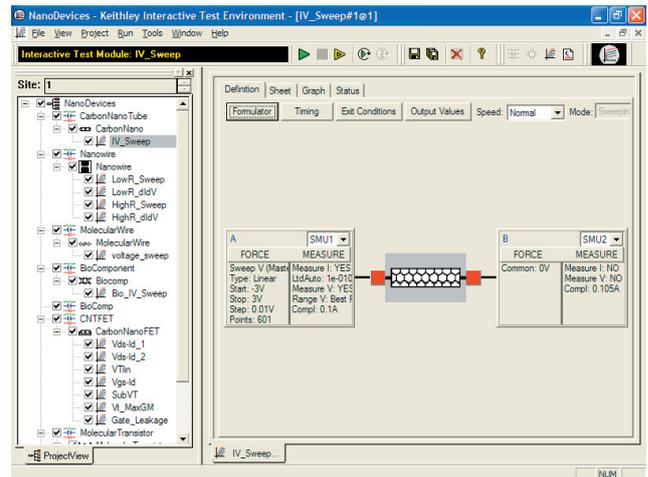


图 4: 用 Keithley 4200-SCS KITE 应用程序测试碳纳米管的 I-V 曲线设置

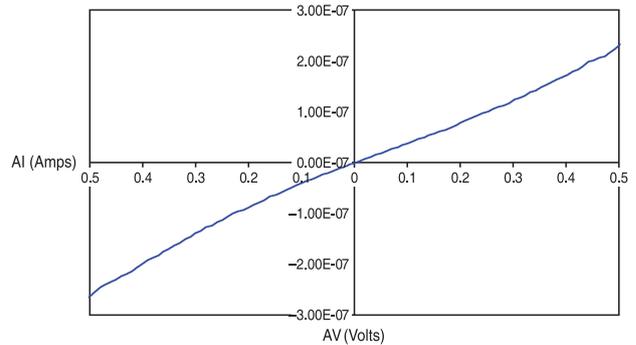


图 5: 碳纳米管上的 I-V 曲线

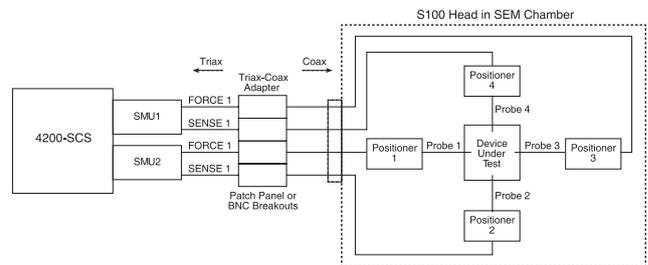


图 6: Keithley 4200-SCS 和 Zyvex S100 测试示意图

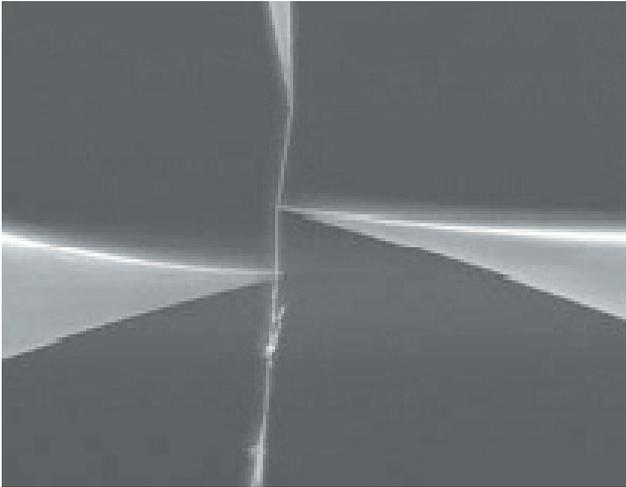


图 7: 在 S100 探针上的碳纳米管的扫描电镜图片

为了在纳米级材料和导线上进行四线测量，在 DUT 的外部 and 内部探头连接到同一个源测量单元 (SMU)。外部探头连接到 SMU 上的 force 端，而内部探头连接到 SMU 上的 sense 端。Keithley 4200-SCS 进行测试。“四线”交互式测试模块，可在 KITE 文件夹中找到，名为“双线电阻器”，可用于生成 I-V 曲线的结果。这是一个预先配置的例程，如前面所述，使用四根电缆和两个 smu 实现四点测量。也可以创建一个基于“two wire resistor”的项目，并使用一个看起来像碳纳米管的图，如图 4 所示。

典型的错误来源

通过偏移电压和噪声源，可以在低压和低电阻测量中引入显著误差，而这些误差在测量较高的信号电平时通常会被忽略。下面讨论可能影响低电压和低电阻测量精度的因素。

偏移电压

在理想情况下，当电压表连接到一个没有电压存在的相对较低阻抗的电路时，它应该读数为零。然而，电路中的一些误差源可以被视为非零电压偏移。这些源包括热电电场、RFI（射频干扰）整流产生的偏移量和电压表输入电路中的偏移量。稳定偏移通常可以通

过短路测试导线的末端来消除零，然后使仪器的零（相对）特性。然而，请注意，抵消偏移漂移可能需要多次重新归零，特别是在热电电动场的情况下。

热电电压

热电电压（热电电动场）是低压测量中最常见的误差来源。当电路的不同部分处于不同的温度和由不同材料制成的导体连接在一起时，就会产生这些电压。使用相同材料的电路，可以最大限度地减少热电电动势的产生。

允许测试设备在恒定的环境温度下加热并达到热平衡也使热电电磁势影响最小。任何剩余的热电电动势，只要它相对恒定，都可以通过使用仪器零特征进行补偿。为保持环境温度恒定，设备应远离阳光直射、排气扇和类似的热流或移动空气源。绝缘泡沫（如聚氨酯）中的包裹连接也能最大限度地减少由空气运动引起的环境温度波动。

在低温下测量源存在特殊的问题，因为低温恒温器中的样品和电压表之间的连接通常由导热系数低于铜的金属制成，如铁，它将不同的金属引入电路。此外，由于源可能是接近 0 开尔文，而仪表是在 300 开尔文，有一个非常大的温度梯度。通过匹配低温恒温器和电压表之间的导线组成，并将所有不同的金属结对保持在相同的温度下，可以以良好的精度进行非常低的电压测量。

非欧姆接触

当非欧姆接触点之间的电位差与流过它的电流不是线性比例时，非欧姆接触点是明显的。由于氧化膜或其他非线性连接，在低压电路中可能发生非欧姆接触。非欧姆连接很可能会纠正存在的射频能量 (RFI)，导致电路中出现偏移电压。有几种方法来检查非欧姆接触点和一些方法来减少它们。

当使用微欧姆表、数字万用表（DMM）或源 - 测量单元进行低电阻测量时，通过改变范围来检查非欧姆触点。通过改变测量范围，通常也会改变测试电流。正常情况下表示相同的读数，但分辨率较高或较低，这取决于仪器是上升或下降的范围。如果读数有显著差异，这可能表明存在非欧姆条件。

如果使用单独的电流源和电压表进行低电阻测量，则必须检查每个仪器的非欧姆触点。如果电流源触点是非欧姆，当源极性反转时，顺应电压可能有显著差异。如果电压表触点是欧姆的，它们可以纠正任何交流小信号的存在，并造成直流偏移误差。

为了防止非欧姆接触，请选择合适的接触材料，如钨或金。确保合规电压足够高，以避免由于源接触非线性引起的问题。为了减少由电压表非欧姆触点引起的误差，通过使用屏蔽和适当的接地来减少交流干扰。

器件自热

在对纳米级器件或材料等温度敏感器件进行电阻测量时，需要考虑器件自加热。用于低电阻测量的测试电流通常比用于正常范围内电阻测量的电流要高得多，因此，如果功耗足以导致器件的电阻值发生变化，则可以考虑器件中的功耗。

电阻器中的功耗由公式为 $P = I^2R$ 。从这个关系中，我们可以看到，每次电流加倍时，器件中的功耗就增加 4 倍。因此，最小化设备加热的影响的一种方法是使用尽可能最低的电流，同时在整个被测试的设备上仍然保持所需的电压。然而，在许多情况下，测试电流是不可调的。例如，大多数微欧姆表和 DMM 都没有设置测试电流的规定。在这些情况下，必须找到替代

方法来减少设备加热。一个简单但有效的方法是在测量期间使用仪器的一次性触发模式。在这种模式下，在测量周期中，仪器将只对 DUT 施加一个短暂的电流脉冲，从而最大限度地减少设备加热造成的误差。Keithley 4200-SCS 中使用的源测量单元，提供了完整的可编程性，使其易于控制设备加热。

被污染的探针

测试信号的完整性依赖于高质量的探头接触，这与接触电阻直接相关。随着信号电压降、接触压力的降低以及纳米技术中新器件技术的研究，探针接触电阻变得越来越重要。

在使用过程中，探针可能会被污染，导致测量误差。探针尖端的磨损和由此产生的污染会导致接触电阻的增加。提高探针尖端长期性能的最佳方法是在测试方案中纳入定期清洗程序。虽然定期清洗会影响测试产量，但清洗和收益必须与成本进行权衡。与清洗相关的一个主要成本因素是在探测台停止服务时降低了测试吞吐量。另一个考虑因素是，清洁太少会对测试产量产生不利影响。

你怎么知道这些探测器是脏的呢？下列任何一项都可能表明存在污染问题：

- 探头产生高接触电阻。
- 存在接触电阻高的产量沉降物。
- 重新探测并不会提高测试失败率。
- 目视（显微镜）检查显示探针尖端有颗粒或涂层。

通常，不正确的测量是第一个错误，重新扎针不会改变故障率。用显微镜检查探针尖端可以验证诊断结果。请参考提供探头公司提供的清洁建议。

测试系统安全

许多电气测试系统或仪器都能够测量或获取危险的电压和功率水平。在单一故障条件下（例如，编程错误或仪器故障），即使系统表明没有危险存在，也有可能输出危险水平。

这些高电压和功率水平使操作人员在任何时候都要免受任何危险。保护方法包括：

- 设计测试夹具，以防止操作员接触到任何危险的回路。
- 确保被测设备完全封闭，以保护操作人员免受任何飞行碎片的伤害。
- 双绝缘连接是操作员可以接触到的所有电气连接。双绝缘确保操作者仍然得到保护，即使有一个绝缘层失效。当测试固定装置罩打开时，使用高可靠性、故障安全的联锁开关断开电源。
- 如果可能，请使用自动处理程序，使操作人员不需要访问测试固定装置的内部，也不需要打开防护装置。
- 为系统的所有用户提供适当的培训，使他们了解所有潜在的危险，并知道如何保护自己免受伤害。

测试系统设计人员、集成商和安装人员的责任是确保操作人员和维护人员的保护到位和有效。

更多信息参考

有关二线和四线电阻测量、低压测量和典型误差源的更多信息，请参阅 Keithley 的低电平测量手册。

结论

Keithley 4200-SCS 半导体表征系统结合 Zyvex 测试系统是一种非常有效的纳米器件 I-V 表征测量工具。该系统具有四点探针能力，1pA 精度，和 5nm 精度移动，提供了一个独特的特征组合，是理想的纳米技术和半导体表征。

感谢

Keithly 感谢应用程序 / 销售工程经理菲尔福斯特和 Zyvex 公司的控制系统工程师 Jeff Hochberg 对本应用文档的贡献。



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：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) 8620 3028
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) 8836 0984
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718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) 3168 6695
传真：(852) 2598 6260

更多宝贵资源，敬请登录：TEK.COM.CN

© 泰克公司版权所有，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外国专利保护。本文中的信息代替所有以前出版的材料中的信息。本文中的技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克公司的注册商标。本文中提到的所有其它商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

