

碳纳米管和低功耗 纳米器件电气特征分析 的技巧

目前看来，碳纳米管的潜在用途是无穷无尽的，仅在半导体行业就存在着大量的潜在应用。研究人员已经成功将碳纳米管用于FET开关、消费电子存储器，以及下一代电视机的场发射显示器中。研究人员还在尝试在传感器应用中利用碳纳米管来探测分子颗粒，支持某些国家安全类的应用。此外，人们还在努力探索在数字逻辑中使用碳纳米管。

对于碳纳米管和其它一些低功耗纳米器件，从事半导体和纳米技术研究的人们一直面临着诸多挑战。其中一大挑战就是，无论对于当前一代半导体器件，还是对于下一代纳米电子器件，对极其微小的电路单元进行电气特征分析都是很困难的。

第二大挑战是，当功耗限制变得非常关键时，如何对下一代纳米器件进行特征分析。随着器件和元件的特征尺寸缩小到纳米级，研究人员不得不限制用于特征分析的电信号强度。

最后，对纳米器件进行探测始终是一大挑战。随着晶体管栅极特征尺寸小于90nm以及间距大小不断缩减，大多数探测系统的最小探测点尺寸却仍然保持在50微米左右。这一局限性在很大程度上导致探针移动和针

尖尺寸不准确。必须采用具有纳米级移动精度并且电流测量精度高于1pA的新探测工具（如图1所示）才能解决这个问题。

本文将着重介绍对碳纳米管、低功耗器件进行特征分析的测量技术，以及克服各种测量误差的方法。

方法和技术

消费者总是倾向于速度更快、功能更强、尺寸更小巧的电子产品。由于电子产品的尺寸必须做得较小，因此其中元件的功耗也是受限的。这样一来，当对这些元件进行电气特征分析时，必须采用较弱的测试信号，防止将元件击穿或者造成其他损坏。

当对纳米器件进行电流-电压（I-V）特征分析时，由于必须采用很小的电流控制功耗或者减小焦耳热效应，因此必须要测量很小的电压。所以，无论对于器件I-V特征分析，还是非导电材料与元件的电阻测量，低电压测量技术都是至关重要的。对于研究人员和电子行业的测试工程师而言，这种功耗限制增大了对先进器件与材料以及新一代器件进行特征分析的挑战。

与常规尺寸和微米级元件与材料的I-V曲线生成不同的是，对碳纳米管和纳米器件进行测量需要特殊的技巧和技术。在进行常规I-V曲线特征分析时，通常采用两点式电测量方法。这种方法的问题是，所测得的电压不仅包含待测器件上的电压，还包含测试引线 and 接触点上的电压。如果要测量某个器件的电阻，那么当电阻大于几个欧姆时采用普通欧姆表进行测量引入的电阻通常不会造成问题。但是，如果要测量导电的纳米材料或元件上的低电阻时，采用两点测量法就很难获得准确的结果。

如果I-V特征分析或者电阻测量中涉及低电压或者低电阻，例如对于分子导线、半导纳米线和碳纳米管，那么最好采用基于探针台的四线（即开尔文）测量法，可以得到更精确的结果。开尔文测量法中另

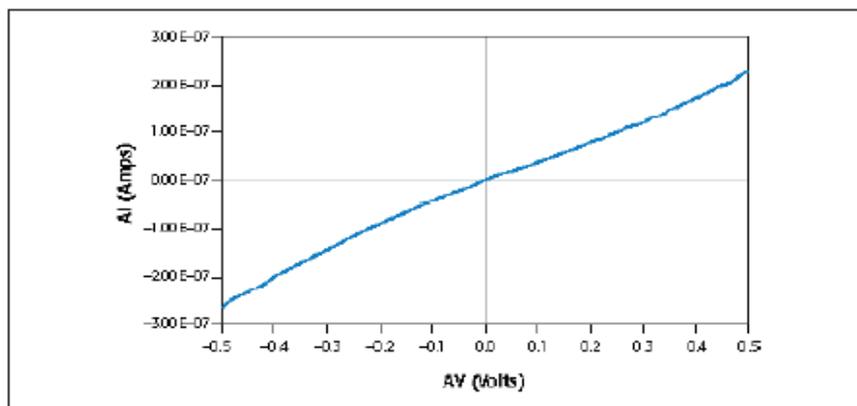


图1. 碳纳米管的I-V曲线



图1a. 吉时利4200-SCS型半导体特征分析系统

外采用了一套探针进行探测。由于探测输入端上具有很高的阻抗，因此流过这些探针中的电流可以忽略不计，从而测出的只有DUT两端上的电压降（如图2所示）。这样一来，电阻测量结果和生成的I-V曲线就更加精确。实现这一测量方法所需的源和测量功能的通常称为源-测量单元（SMU）（提供电源并测量直流电压和电流的电子仪器）。



图1b. Zyvex S100型纳米测试台

（相对的）功能，通常可以使稳定的偏移电压归零。但是，抵消偏移电压可能需要不断的重新调零或者采用特殊的测量方法，尤其是当存在着热电EMF时。

热电电压

热电压，即热电EMF，是低压测量中最常见的误差源。当电路的不同部分处于不同的温度下，或者由不同材料制成的导线连接在一起时，就会产生这种电压。所有导体都采用相同材料制作的传导电路所产生的热电EMF最小。

在低温下进行测量还存在着特殊的问题。这是因为低温容器中的样本与伏特计之间的连接电路通常是采用热传导率低于铜的金属材料制成的，例如铁，这就在电路中引入了异质金属。此外，由于源电路几乎接近零开氏度，而金属导线却处于300开氏度，两者之间存在着巨大的温度差。通过使低温容器和伏特计之间的导线材料相互匹配，并使所有异质金属结对保持相同的温度，就可以提高纳伏测量法的精度。

另外一种控制热电压的方法就是采用德尔塔测量方法。采用基于正负测试电流的电压测量方法可以消除恒定的热电压。交替改变测试电流的极性增大了信噪比，从而增强了抗噪能力。在很短的一段时间内，可以用一个线性函数逼近热电偏移电压。连续电压读数之间的差值是斜率——热电压变化的速率。该斜率是恒定的，因此通过交替三次改变电流源的极性进行两次德尔塔测量——一次在负跳沿，另一次在正跳沿——就可以抵消热电偏移电压。为了获得有效的线性逼近结果，电流源的极性必须快速改变，并且伏特计必须在很短的时间内准确地测量出电压。如果满足这些条件，就可以通过三步德尔塔方法得到精确的不受热电偏移和漂移电压影响的待测信号电压值。

器件发热

测量过程本身产生的少量热量会升高DUT的温度，使测试结果发生偏移，甚至损坏器件。对温度敏感类器件，例如纳米元件或材料进行I-V测量时，就要考虑器件发热的影响。

常见误差源

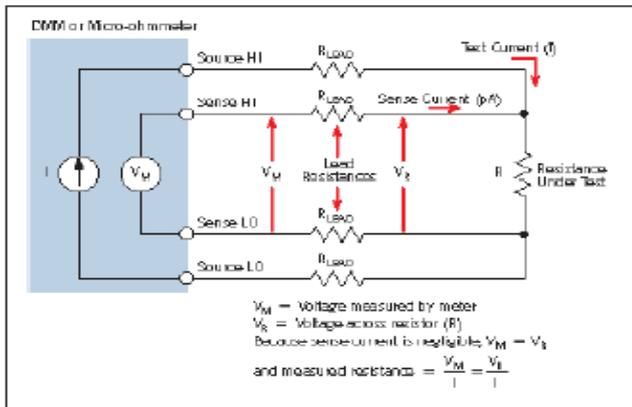


图2. 四点测量原理图

对基于碳纳米管的器件和其他一些纳米元件进行低功耗电气特征分析包含着多种测量误差。在测量较高信号电平时通常被忽略的偏移电压和噪声源对于低电压、低电流和低功耗测量将会造成很大的误差。本文将着重介绍可能会影响测量性能与精度的四大因素。

偏移电压

理想情况下，当用伏特计测量某个阻抗相对较低且不存在电压的电路时，伏特计的读数应该是零。但是，电路中存在的误差源可能会导致出现一个非零的电压偏移量。这些误差源包括热电EMF、RFI（射频干扰）整流产生的偏移电压以及伏特计输入电路中的偏移电压。通过将测试引线末端短路，然后启用仪器的调零

器件的功耗表达式是 $P=I^2R$ ，这意味着每当电流增大一倍时，器件的功耗就会增大为四倍。尽量减小器件发热效应的一种方法就是尽可能采用最小的电流，同时保持待测器件上具有所需的电压。

具有脉冲测量功能的电流源可以最大限度地减少DUT上产生的功耗。通过脉冲测量工具，用户可以设置最佳的脉冲电流幅值、脉冲间隔、脉冲宽度以及其他一些脉冲参数，以减少可能出现的器件发热，控制器件上的功耗。如果与同步纳伏计结合使用，就可以把脉冲和测量同步起来——从而减少器件发热。

探针污染

当对碳纳米管或者纳米半导体器件进行探测时，测试信号的完整性取决于高质量的探针接触，这与接触电阻直接相关（如图3所示）。随着信号电压的下降以及接触压力的减小，探针接触电阻变得越来越重要了。

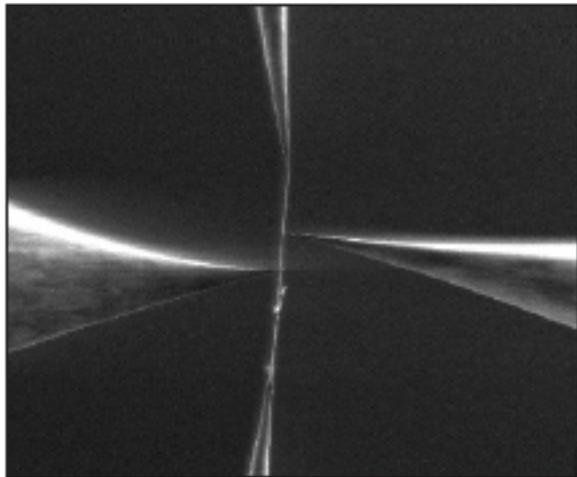


图3. 接触S100型探针的一个碳纳米管SEM照片

在使用过程中，探针会受到污染。探针针尖累积的磨损和污染会增大接触电阻。增强探针长期性能最好的办法就是在测试协议中增加周期性的清洁过程。虽然周期性地清洁能够在污染引起测试问题之前消除它们，但是采用这种方法必须权衡它的代价。与探针清洁相关的一个主要代价是由于探测系统停止工作而造成测试产能降低。另外一个因素是，清洁太少反而会影响测试成品率。

测试标准的必要性

随着人们采用碳纳米管和其他一些纳米材料制成更新的电子器件，制订测试标准的需求变得日益迫切。测量方法和数据报表的一致性对于新制造工艺保持一致性是非常关键的。吉时利仪器公司已密切配合IEEE组织制订了全球第一个碳纳米管电气特征分析的测量标准P1650TM-2005。P1650以及今后将推出的一些标准和测试指导性意见将帮助碳纳米管和纳米材料的半导体制造商和材料制造商精确和制造下一代电子元件。

结语

本文着重探讨了半导体行业和纳米技术研究人员在设计下一代电子器件时必须面对并解决的若干测量问题。传统的测量方法仍然可以使用，但是随着器件尺寸缩小和功耗限制越来越明显，我们必须对传统测量方法进行调整，以便获得预期的测量结果。能够解决其中很多问题的新测量工具已经出现。此外，专业组织还必须不断制订新的测量标准，提高人们获得、对比和验证测量结果的置信度。

KEITHLEY

美国吉时利仪器公司

全国免费电话：400-650-1334 / 800-810-1334

邮箱：china@keithley.com

网址：www.keithley.com.cn