

# 纳米器件的脉冲测试

## 引言

纳米技术研究已深入到原子挨原子的分子级，构造具有全新特性的新结构。特别地，纳米电子领域的发展十分迅速，其潜在影响涉及非常宽的行业领域。目前的纳米电子研究的内容主要是如何开发利用碳纳米管、半导体纳米线、阿分子有机电子和单电子器件。

不过，由于多方面的原因，这些微小器件无法采用标准的测试技术进行测试。其中一个主要原因在于这类器件的物理尺寸。某些新型“超CMOS”器件的纳米级尺寸很小，很容易受到测量过程使用的甚至很小电流的损坏。此外，传统直流测试技术也不总是能够揭示器件实际工作的情况。因此，设计者需要新的测试技术和测试工具。其中一种技术就是脉冲测试，它对于新一代纳米电子器件的研究是必需的。

## 脉冲测试技术

脉冲式电测试是一种能够减少器件总能耗的测量技术。它通过减少焦耳热效应（例如 $I^2R$ 和 $V^2/R$ ），避免对小型纳米器件可能造成的损坏。脉冲测试采用足够高的电源对待测器件（DUT）施加间隔很短的脉冲，产

生高品质的可测信号，然后去掉信号源。

通过脉冲测试，工程技术人员可以获得更多的器件信息，更准确地分析和掌握器件的行为特征。例如，利用脉冲测试技术可以对纳米器件进行瞬态测试，确定其转移函数，从而分析待测材料的特征。脉冲测试测量对于具有恒温限制的器件也是必需的，例如SOI器件、FinFET和纳米器件，可以避免自热效应，防止自热效应掩盖研究人员所关心的响应特征。器件工程师还可以利用脉冲测试技术分析电荷俘获效应。在晶体管开启后电荷俘获效应会降低漏极电流。随着电荷逐渐被俘获到栅介质中，晶体管的阈值电压由于栅电容内建电压的升高而增大；从而漏极电流就降低了。

脉冲测试有两种不同的类型：加电压脉冲和加电流脉冲。

电压脉冲测试产生的脉冲宽度比电流脉冲测试窄得多。这一特性使得电压脉冲测试更适合于热传输实验，其中我们所关心的时间窗口只有几百纳秒。通过高精度的幅值和可编程的上升与下降时间能够控制纳米器件上的能耗大小。电压脉冲测试可用于可靠性测试中的瞬态分析、电荷俘获和交流应力测试，也可用于产生时钟信号，模拟重复控制线，例如存储

器读写周期。

电流脉冲测试与电压脉冲测试非常相似。其中，将指定的电流脉冲加载到DUT上，然后测量器件两端产生的电压。电流脉冲测试常用于测量较低的电阻，或者获取器件的I-V特征曲线，而不会使DUT产生大量的能耗，避免对纳米器件的损害或破坏。

电压和电流脉冲测试都有很多优点，但是它们的缺点却不尽相同。例如，超短电压脉冲的速度特征分析属于射频（RF）的范畴，因此如果测试系统没有针对高带宽进行优化，那么测量过程中很容易产生误差。其中主要有三种误差来源：由于线缆和连接器造成的信号损耗、由于器件寄生效应造成的损耗以及接触电阻。

电流脉冲测试的主要问题是上升时间较慢，可能长达几百纳秒。这主要受限于实验配置中的电感和电容。

## 脉冲I-V测试

在对纳米器件进行电流-电压（I-V）脉冲特征分析时通常需要测量非常小的电压或电流，因为其中需要分别加载很小的电流或电压去控制功耗或者减少焦耳热效应。这里，低电平测量技术不仅对于器件的I-V特征分析而且对于高电导率材料的电阻测量都非常重要。利于研究人员和电子行业测试工程师而言，这一功耗限制对当前的器件与材料以及今后器件的特征分析提出了巨大的挑战。

与微米级元件与材料的I-V曲线生成不同的是，对纳米材料与器件的测量需要特殊的方法和技巧。I-V直流特征分析通常采用两点式电气测量技术来实现。这种方法的问题是如果提供电流源并测量电压，那么所测得

的电压不仅包括器件上的压降，而且包括测试引线和接触点上的压降。如果目标是测量某个器件的电阻，采用普通欧姆表测量大于几个欧姆的电阻，那么这种测量方法增加的电阻通常不成问题。但是，当测量导电纳米材料或元件的低电阻时，如果采用两点测量方法，即使使用脉冲测试，也难以获得准确的结果。

如果脉冲I-V特征分析或电阻测量涉及低电压或低电阻，例如分子导线和半导体纳米线，那么采用基于探针台的四线开尔文测量方法将会得到更准确的结果。开尔文测量法中采用了另外一套探针进行探测。由于探测输入端上具有很高的阻抗，因此流过这些探针的电流可以忽略不计，从而测出的只有DUT两端上的电压降。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），它能够提供电源并测量直流电压和电流。

脉冲测试可以借助直流测量中用到的一些简单低电平测量技术。要想在低电平下实现更有效的脉冲测量，脉冲测试技术应该与行频同步技术结合使用。通过同步脉冲测量与行频，可以消除所有50/60Hz的行频噪声。

对于需要较高电压灵敏度的应用，即使是很小的误差也不容忽视。避免这些误差的一种常用方法是采用德尔塔方法。德尔塔是指“之前”和“当前”读数之间的差值，可用于校正直流偏移量。但是，直流偏移量常常会发生漂移。我们可以采用一种类似的称为三点德尔塔的方法解决这一问题。其中，在脉冲之后再进行一次测量可以校正这种漂移。

## 纳米测试的工具

对于纳米电子和半导体材料与薄膜，采用灵敏的电气测量工具是十分必要的。它们提供的数据能够帮助我们完全掌握新材料的电气特性和新器件与元件的电气性能。纳米测量仪器的灵敏度必须要高得多，因为需要测量的电流和电压更低，而且很多纳米材料还明显表现出改善的特性，例如超导性。待测电流的幅值可能处于飞安量级，电压处于纳伏量级，电阻低至微欧量级。因此，测量技术和仪器必须尽可能地减少噪声和其他误差源，以免干扰信号。

具有0.1fA（即100埃安）和1μV分辨率的吉时利4200-SCS半导体特征分析系统就是这样一种解决方案。其专门提供的脉冲I-V工具套件为脉冲I-V测量提供了双通道脉冲发生与测量功能。如果结合内部安装的高速脉冲发生器和示波器，4200及其PIV工具套件能够同时实现直流和脉冲I-V测试。

信号反射常常会干扰用户定制的脉冲测试系统，为了尽可能减少由于阻抗匹配不好而造成的信号反射，吉时利的4200脉冲I-V测试解决方案提供了一种系统互连箱——RBT（Remote Bias-Tee），为连接脉冲发生器

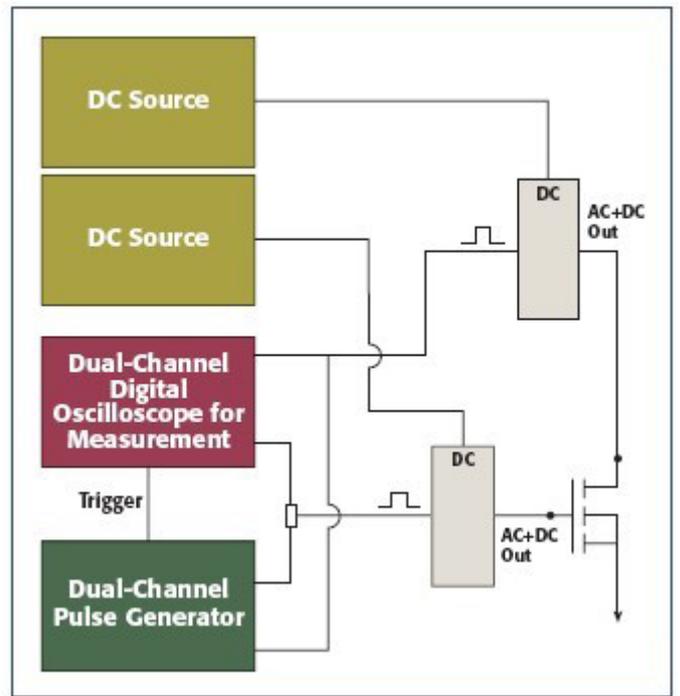


图1. 吉时利4200-PIV测试系统的原理图

提供了AC/DC耦合，该直流测试仪器的原理结构如图1所示。

利用这种工具套件，研究人员可以同时进行直流和脉冲IV测试以掌握器件特性，例如如图2所示的FET器件系列特征曲线。

对于具有较大电阻幅值变化的各种导电材料或器件，用户利用吉时利的6221/2182A组合可以设置最佳的脉冲电流幅值、脉冲间隔、脉冲宽度和其它一些脉冲参数，从而最大限度降低了DUT上的功耗。6221能够在全量程上产生具有微秒级上升时间的短脉冲（减少了热功耗）。6221/2182A组合能够实现脉冲和测量同步——可以在6221加载脉冲之后的16μs内开始测量。整个脉冲，包括一次完整的纳伏测量一起，可以短达50μs。6221和2182A之间的行同步也消除了与电源线相关的噪声。

最后，吉时利的3400系列脉冲/码型发生器为广大纳米技术研究者提供了处理各种应用需求的灵活性。用

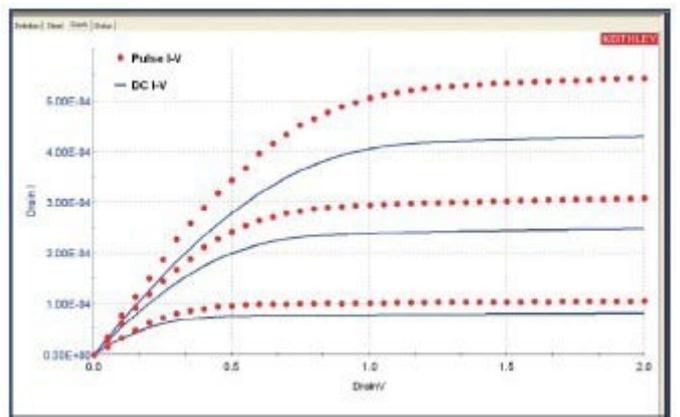


图2. 一系列FET曲线的脉冲I-V与直流I-V特征分析

用户可以设置脉冲参数，例如幅值、上升和下降时间、脉冲宽度和占空比，可以选择多种操作模式，包括用于材料和器件特征分析的脉冲与猝发模式。其简洁的用户界面加快了学习曲线的建立过程，相比同类产品能够使用户更快地设置和执行测试操作。

## 结语

脉冲测试为人们和研究纳米材料、纳米电子和目前的半导体器件提供了一种重要手段。在加电压脉冲的同时测量直流电流是电荷泵的基本原理，这对于测量半导体和纳米材料的固有电荷俘获特性是很重要的。施加电流脉冲同时测量电压使研究人员能够对下一代器件进行低电阻测量或者进行I-V特征分析，同时保护这些宝贵的器件不受损坏。

---

The logo for Keithley, featuring the word "KEITHLEY" in white, uppercase, sans-serif font inside a red rectangular box.

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