

利用4200-SCS型参数分析仪，对碳纳米管晶体管(CNT FET)进行电气特性分析

引言

近年，碳纳米管(CNT)因其尺寸更小、具有出众的电气和机械特性以及适合诸多潜在应用，已成为大量科学研究的主题。与缩小传统半导体器件尺寸有关的问题，使得研究人员积极研究基于碳纳米管(CNT)的器件作为替代方案，如碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)。由于碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)不会面临传统半导体器件缩小尺寸时的问题，因此已经对其进行了多种应用研究，包括逻辑器件、存储器件、传感器等。对这些器件的研究通常涉及确定不同的电气参数，包括电流-电压(I-V)、脉冲I-V和电容(C)测量。对灵敏的纳米电子器件进行电气特性分析，要求对仪器和测量技术进行优化，使之适合低功率电平和高测量灵敏度。

4200-SCS型参数分析仪在碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)电气特性分析方面具有多种优势。这个可配置测试系统可以简化灵敏的电气测量，因为它在一个集成系统内实现多个测试仪器的完美组合，包括硬件、交互软件、图形和分析能力。这些系统包括履行电气测量所需的预置测试，而且这些测量已为确保碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)的高精度测试结果而优化。本应用笔记说明怎样利用4200-SCS型参数分析仪，对碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)的直流、脉冲I-V和C-V测量进行优化。它包括有关正确布线和连接、防护、屏蔽、降噪技术的详细信息以及进行碳纳米管晶体管测试所需的其他重要测量考虑事宜。

碳纳米晶体管

半导体碳纳米管(CNT)可以用作场效应晶体管(FET)源极和漏极之间的传导通道。图1给出背栅肖特基势垒碳纳米管场效应晶体管。两个金属触点位于碳纳米管(CNT)的两端，构成场效应晶体管(FET)的源极端和漏极端。碳纳米管(CNT)置于氧化物之上，氧化物位于硅衬底之上，硅衬底构成场效应晶体管(FET)的栅极端。与三端待测器件(DUT)进行连接后，即可进行电气测量。

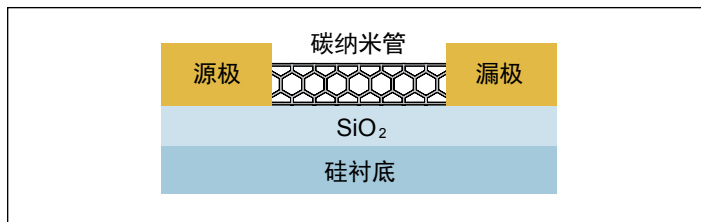


图1. 背栅碳纳米管晶体管

利用4200-SCS型参数分析仪进行电气测量

4200-SCS型参数分析仪包含CNTFET测试项目，适合一些最常见的碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)测量。这个项目包括用于I-V、脉冲I-V和C-V测量的测试。I-V测试使用两部4200-SMU型源测量单元(SMU)仪器，它们都配有4200-PA型远程前置放大器。利用4225-PMU型超快I-V模块并配备4225-RPM型远程/前置放大器开关，可进行脉冲和瞬态I-V测量。最后，利用4210-CVU型C-V测量模块，可进行C-V测量。

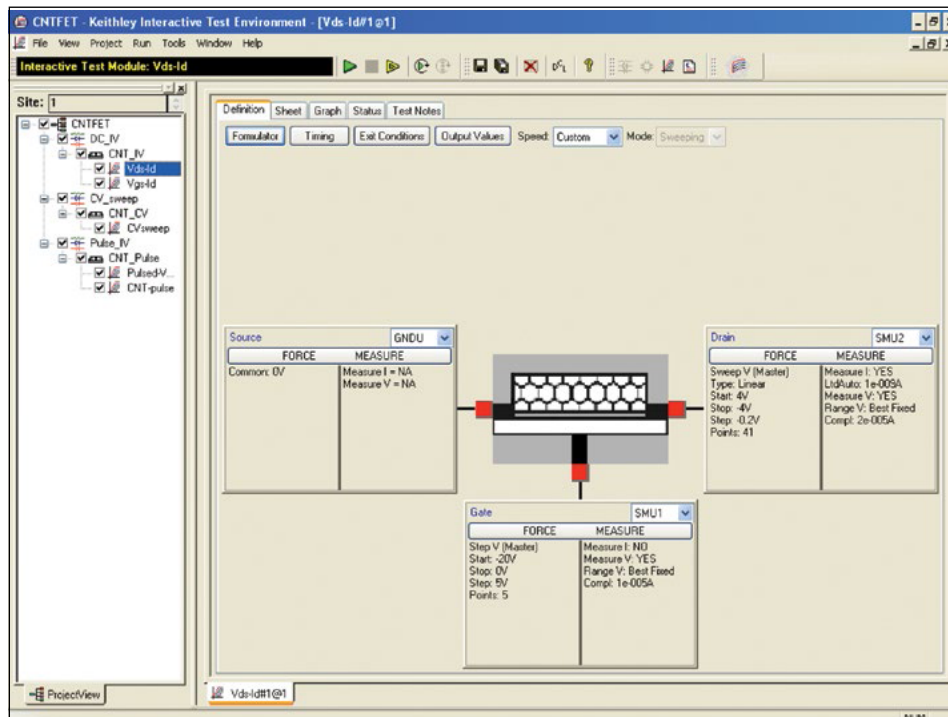


图2. 4200-SCS型参数分析仪的CNTFET项目

运行KTEI 8.1版本以上的所有4200-SCS型参数分析仪系统都包括CNTFET项目。图2给出运行吉时利交互测试环境(KITE)软件的项目CNTFET项目。

电流-电压测量

利用碳纳米管 (CNT) 晶体管的I-V特性, 可以提取器件的许多参数, 研究制作技术和工艺变化的影响, 确定接触点的质量等。图3给出采用两部4200-SMU型仪器的直流I-V测试配置。这些源测量单元 (SMU) 仪器能够源和测量电流和电压; 它们具有皮安级灵敏度, 可以进行电流限幅, 以防损坏器件。在图3中, SMU1与碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)栅极连接, SMU2与漏极连接。如果需要对场效应晶体管(FET)的所有三端进行源和测量, 那么其源端连接至接地设备(GNDU)或第三部源测量单元 (SMU) 仪器。

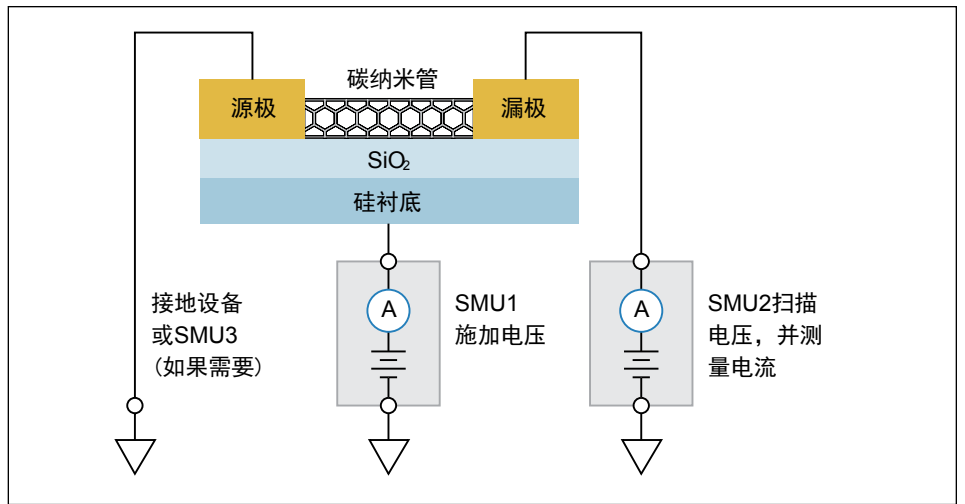


图3. 测量碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)直流I-V特性的电路图

在本例中, 将4200-SCS型参数分析仪KITE软件设置为测量直流漏系列曲线($V_{ds} - I_d$)。随着SMU1施加栅极电压(V_g), SMU2扫描漏极电压(V_d), 并测量作为结果的漏电流(I_d)。图4给出利用CNTFET项目生成的场效应晶体管(FET)特性。

无需改变器件连接, 4200-SCS型参数分析仪的交互式KITE软件简化了常见的I-V测试, 如漏电流(I_d)-栅极电压(V_g)曲线。在这个测试中, 对栅极电压进行扫描, 并测量恒定漏电压下的漏电流。图5给出在恒定漏电压的 $I_d - V_g$ 曲线结果。对栅极电压进行扫描时, 也可以施加漏电压。

优化直流测量

利用4200-SCS型参数分析仪对碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)进行测试时, 以下技术将改进直流测量质量:

- **限流:** 为防止在进行I-V特性分析时对器件造成损害, 用户应当限制流经器件的电流。具体做法是: 在软件中将每个源测量单元 (SMU) 的电流上限设置为安全级别, 如 $20\mu A$ 。这个预设限幅将确保电流不超过用户定义的上限。

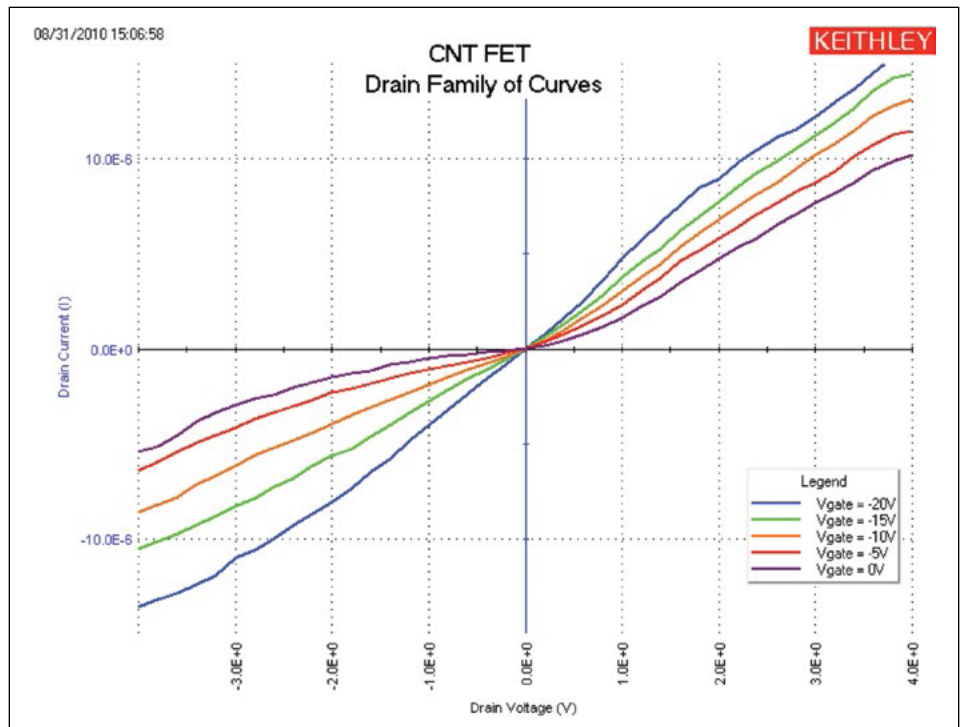


图4. 利用4200-SMU型源测量单元 (SMU) 测量的直流I-V漏系列曲线

- **留有足够的建立时间:** 由于碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)测量往往涉及测量弱电流($<1\mu A$), 因此, 重要的是, 要留有足够的建立时间, 确保施加电流或电压后测量稳定。影响测量电路建立时间的一些因素包括电缆、测试夹具、开关、探针、待测器件 (DUT) 电阻以及测量仪器电流量程。为确保稳定的读数, 可以在测量前为电压或电流进阶时间添加一定的延迟时间。在KITE软件的定时菜单 (Timing Menu) 中, 很容易调节这个时间延迟。

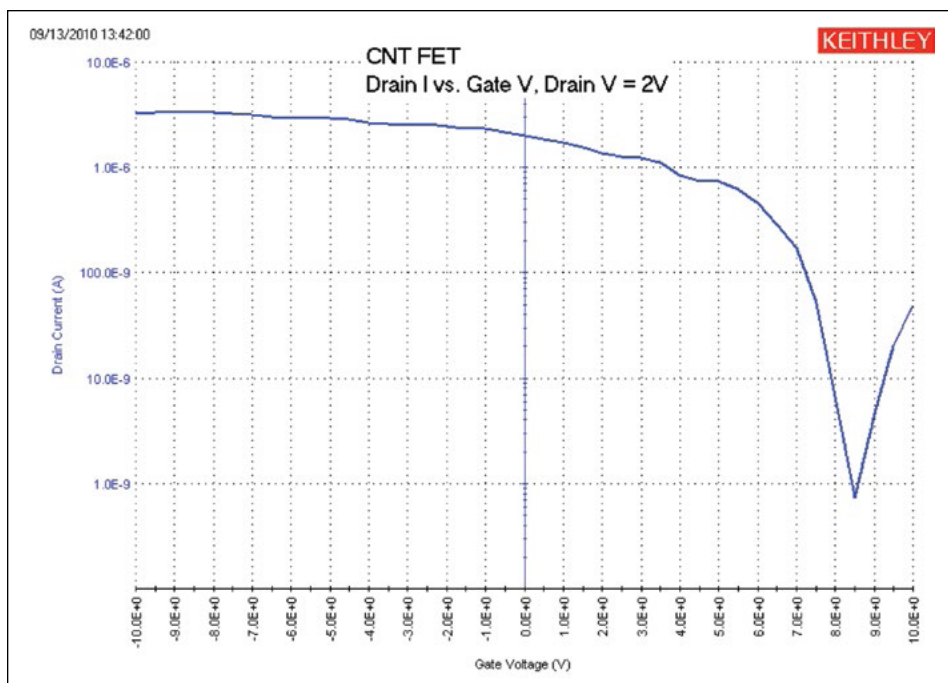


图5. 碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)漏电流-栅极电压

- **使用正确的加速模式：**定时菜单（Timing Menu）中还提供加速模式（Speed Mode），包括延迟和滤波因子设置，这将影响读数的建立时间以及测量的积分时间。增加延迟因子、过滤因子和A/D孔径时间，可以降低噪声测量。
- **把噪声测量降至最低：**噪声来源有很多种，包括粒子碰撞、缺陷、交流干扰及静电效应。当噪声信号叠加于正在测量的直流信号时，就发生噪声测量。这可能导致测量不准确或波动。

最常见的外部噪声“拾波”是60Hz（或50Hz）线性周期拾波。在这荧光灯附件是经常发生的。毫伏噪声并不少见。吉时利采用线性周期积分技术，把60Hz（或50Hz）线性周期拾波降至最低。当积分时间等于电源线性周期的整数倍时，线性周期噪声将最终得到平衡。在KITE软件的定时菜单中，可以很容易调节电源线性周期的倍数。

在测量弱电流时，静电干扰是引起噪声测量的另一个原因。当带电物体接近待测电路时，会发生这种耦合。在高阻抗电路中，这个电荷不会迅速衰减，可能导致不稳定的测量。错误的读数可能是由于直流或交流静电场，因此静电屏蔽将有助于将这些电场的影响降到最低。

静电屏蔽可以是一个包围测试电路的简单金属盒。探针台往往包括静电/电磁干扰（EMI）屏蔽或可选配暗盒。屏蔽应当与测试电路LO连接，这是源测量单元（SMU）仪器的Force LO端。Force LO端是源测量单元（SMU）三同轴电缆的外屏蔽层或者位于GNDU上。所有电缆都必须采用低噪声设计和屏蔽。每个4200-SMU仪器都配有两根低噪声三同轴电缆。

- **保持探针处于上方：**当器件端口与仪器连接和中断连接时，确保探针处于上方位置（不与器件接触）。移动电缆的过程中有可能向器件注入电荷并造成损害。这是因为摩擦电效应和压电效应。

脉冲I-V测量

除了进行传统的直流I-V测量，出于各种原因，还希望进行超快脉冲I-V测量。首先，观察碳纳米管（CNT）器件的高速响应非常重要。在某些情况下，当进行传统的直流测量时，产生的热量可能损坏纳米结构。脉冲I-V测量可以降低整个器件内的散热，进而降低潜在的损害。最后，脉冲电气测试可以防止直流测量期间可能出现的测量电流漂移。

利用4225-PMU型超快I-V模块，可以很容易对碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)进行脉冲I-V测量。4225-PMU型模块提供两通道高速、多级电压脉冲输出，同时测量电流和电压。这个模块取代了传统脉冲/测量的测试配置，后者包括脉冲发生器、数字示波器、互连硬件和软件。

4225-PMU型模块具有两种超快I-V源和测量模式：脉冲I-V和瞬态I-V。图6给出这两种模式。

脉冲I-V指利用脉冲源进行的任何测试以及相应的基于时间的高速测量，可提供类似直流的结果。电流和/或电压测量是在预定脉冲测量窗的平均读数。这个平均读数称作“点平均”。用户定义脉冲参数，包括脉宽、占空比、上升/下降时间、幅度等。

瞬态I-V或波形捕获是基于时间的电流和/或电压测量，通常对脉冲波形进行捕获。瞬态测试通常是一个脉冲波形，用于研究时变参数，如因电荷俘获或自热引起的漏电流降级与时间关系。利用瞬态I-V测量，可以对动态测试电路进行测试，或者作为脉冲I-V模式下选择适当脉冲设置的诊断工具。

4225-PMU型模块具有两个通道，只需一个模块，即可测试三端碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)。图7给出4225-PMU型模块与碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)连接的典型测试配置。在本图中，PMU的通道1 (Ch 1) 与栅极端连接，通道2 (Ch 2) 与漏极端连接。源极端与PMU公共端相连，它是PMU同轴连接器的外部屏蔽层。为了连接公共端与探针，使用BNC或三同轴短路插头，它们可实现同轴电缆外层与机械探针的连接。为生成 $V_{ds}-I_d$ 曲线，Ch 1施加栅极电压，Ch 2扫描漏电压，并测量作为结果的漏电流。

图8给出利用4225-PMU型模块测得的脉冲I-V漏系列曲线。在这个测量中利用500 μ s脉宽生成曲线。不过，每个PMU通道都能够输出短至70ns的电压脉冲，其上升时间为20ns。脉宽的最短持续时间取决于几个因素，包括测试电路RC时间常数以及测试电流的大小。曲线中的每个点表示对脉冲波形的“点平均”的测量。

4225-PMU型模块具有5个满刻度量程，从800mA至100 μ A。为了测量较低电流，建议使用4225-RPM型远程放大器/开关，因为它增加6个测量量程，低至100nA的满刻度。图8给出在100 μ A量程采集的I-V脉冲曲线。由于阈值电流设置为20 μ A，因此如果达到阈值电流，则停止测试。

对于某些应用，可能需要研究碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)的瞬态响应。在这种情况下，可以利用波形捕获模式(瞬态I-V)来捕获基于时间的电流和电压响应。图9给出碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)的瞬态响应。图9中的蓝色曲线是脉冲漏电压，红色曲线是作为结果的电流响应，它是时间的函数。

蓝色电压输出曲线看起来接近定义：其脉宽是50 μ s，上升和下降时间为10 μ s。注意，脉宽是在输入电压幅度(1V)一半时测量的。因此，在500mV时测量脉宽。在本例中，采样周期是25ns(速率40MHz)。通过适当的布线和连接，可实现输出电压波形与用户定义的偏差最小。

红色曲线给出漏电流，并在右侧标注Y轴。漏电流是在恒定漏极和栅极电压时测量的。曲线峰值是电缆充电和放电以及电流流经器件引起的。注意，在脉冲过渡期间，出现这些峰值。降低脉冲幅度或者增加脉冲过渡时间，可以降低dV/dt，从而降低峰值高度。

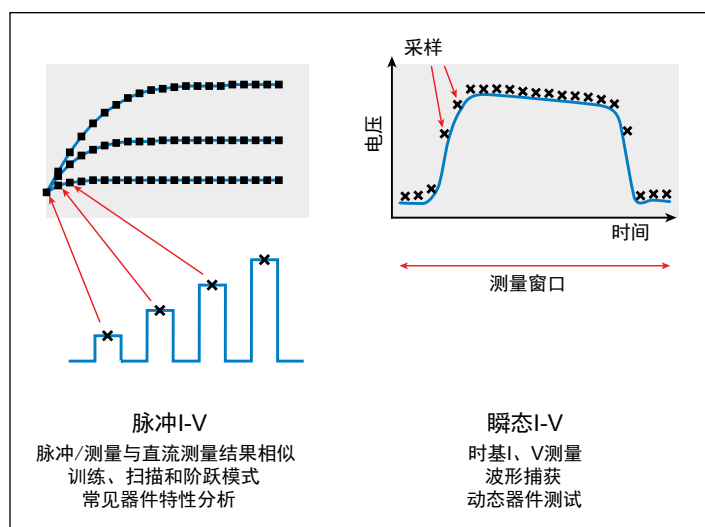


图6. 超快I-V源和测量的两种模式：脉冲I-V和瞬态I-V

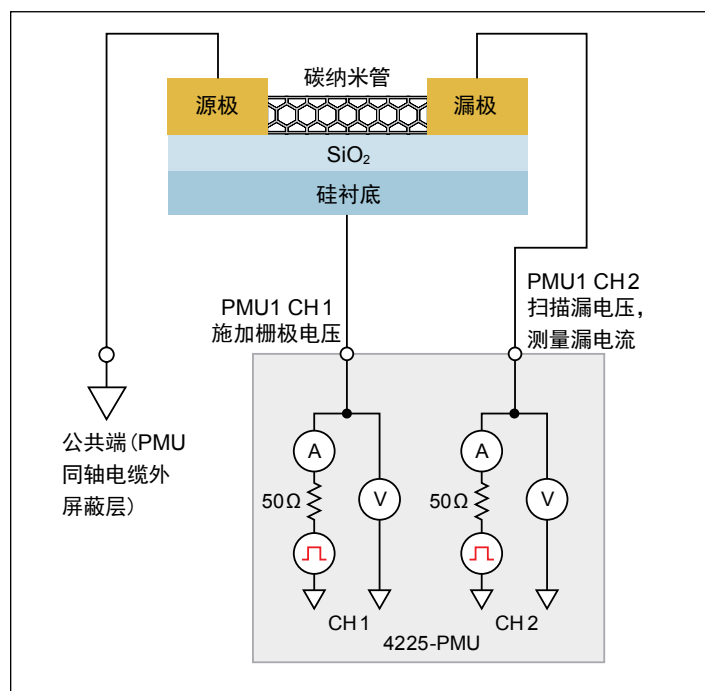


图7. 对碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)进行脉冲I-V特性测量的电路图

脉冲I-V测量优化

为了改进利用4200-SCS型参数分析仪进行脉冲I-V测量的质量，请遵循以下指南：

- 使用正确的电缆和连接：对于超快I-V应用而言，为了实现最高频率输出并避免信号失真和电容充电效应，必须使用正确的电缆和连接。

- 使用为高频(至少150MHz)优化的电缆和连接。
- 使用与仪器阻抗(50Ω)匹配的信号路径。
- 将待测器件(DUT)低端与PMU同轴电缆屏蔽层相连。
- 将每个PMU通道的屏蔽连接在一起, 尽量靠近待测器件(DUT)。
- 测试电路的中心导体与屏蔽分离后, 环路面积尽量小。
- 电缆长度尽量短。
- 进行正确的卡盘连接: 碳纳米管场

效应晶体管(CNT FET)与其他纳米晶体管可能是背栅或顶栅的。对于背栅器件而言, 1个PMU通道必须连接至探针卡盘。对PMU与卡盘进行连接时, 用户将放弃的PMU某些功能: 快速转换、高频、低电流等。这是因为PMU高频通道的输出连接至卡盘电容和卡盘电缆, 这将减缓源响应, 并将噪声耦合进测量。如果可能, 最好使用第三个操纵臂, 并直接连接探针与卡盘。对于高速元和测量, 最好使用所有顶部连接, 避免PMU与夹头的连接。

- 验证脉宽: 确保脉宽足够宽, 从而确保稳定的读数。利用波形捕获模式输出单一脉冲, 验证作为结果的电流测量稳定。在图表中, 可以作为时间函数绘制电流和电压曲线。
- 把噪声降至最低: 为了把噪声影响降至最低, 对多个波形进行平均或者利用内置的Formulator生成移动平均函数, 使测量结果进一步平滑。

电容-电压测量

除了对碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)进行直流和脉冲I-V测量, 测量场效应晶体管(FET)的电容也可以提供器件的有关信息, 包括迁移率、定时效应和栅极电介质。图10给出4210-CVU与碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)的连接。在这个配置中, 栅极-漏极电容是作为栅极电压函数而测量的。

连接电压源高端与栅极的HCUR/HPOT端子应当与卡盘相连。测量电容的LCUR/LPOT端子应当与待测器件(DUT)漏极端相连。为了得到最佳结果, 测量端不应当与卡盘相连。对于顶栅碳纳米管场效应晶体管(CNT FET), 测量和电压源都可能是CVU同一端(HCUR/HPOT或LPOT/LCUR)场效应晶体管(FET)的栅极输出。在KITE软件中, CVU激励测量窗口(Force Measure Window)的HI和LO端是可互换的。图11给出碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)栅极和漏极之间生成C-V扫描的结果。

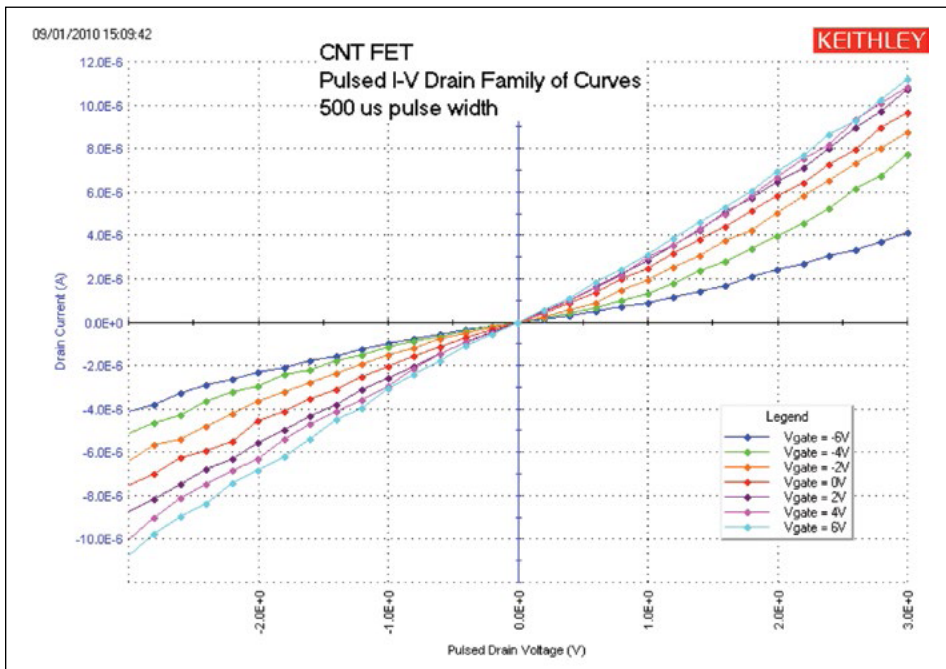


图8. 碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)脉冲I-V漏系列曲线

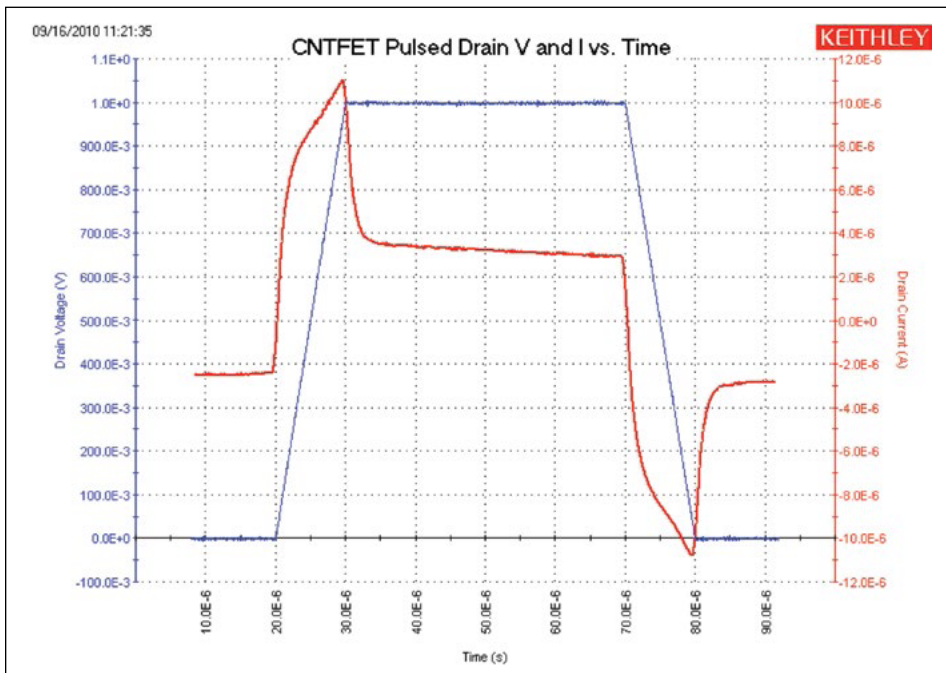


图9. 碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)漏电压脉冲和作为结果的漏电流波形

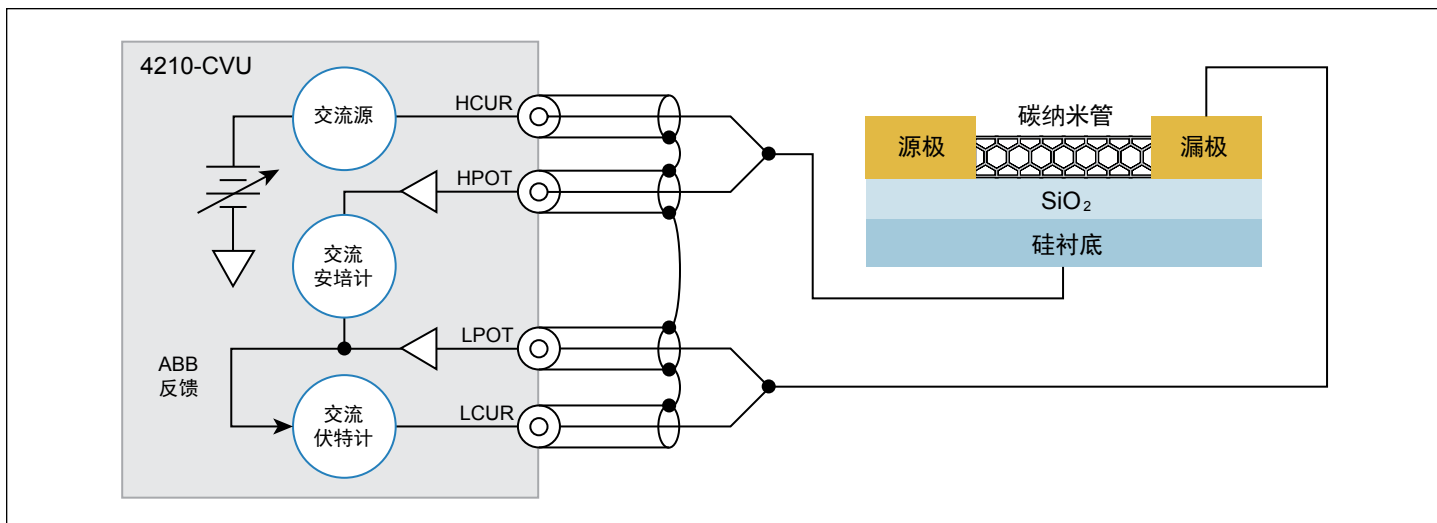


图10. 4210-CVU与碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)的连接

电容测量优化

为了改进利用4200-SCS型参数分析仪进行电容测量的质量，请遵循以下指南：

- **进行开路补偿（对于<10pF的测量）：**开路校正特性可以补偿电缆和连接中的电容偏移。进行校正分两步。首先进行校正，然后再测试模块中予以支持。为了进行校正，打开工具菜单，选择CVU连接补偿。对于开路校正，电极测量开路（Measure Open）。探针必须位于上方或者测试夹具离开待测器件（DUT）。在Forcing Functions/Measure Options窗口，点击补偿按钮，即可进行校正。
- **使用正确的屏蔽连接：**将同轴电缆屏蔽连接在一起，尽可能靠近待测器件（DUT）。这将缩小屏蔽的环路面积，从而把电感降至最低。这还有助于保持传输线效应。如果屏蔽没有连接在一起，可能出现偏移。频率越高，这就越重要。

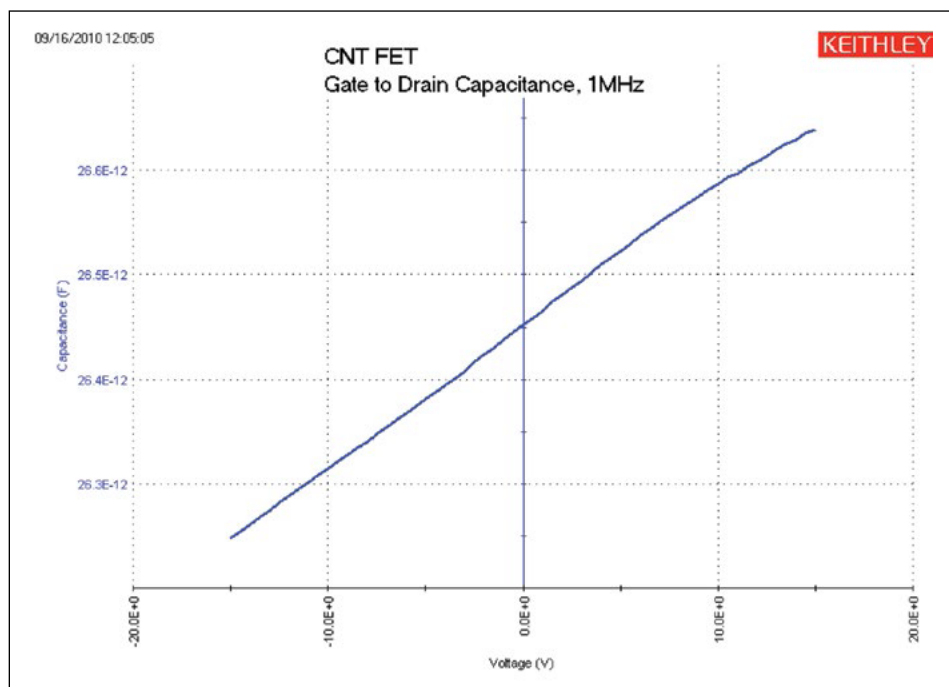


图11. 栅极-漏极电容C-V扫描

- **选择适当的保持和扫描延迟时间：**在施加电压脉冲后，当所有内部电容完全充电后的器件状况称作“均衡”。如果在器件达到均衡之前进行电容测量，结果可能不准确。

为了选择C-V扫描延迟时间，使用采样模式（Sampling Mode）施加电压，并绘制电容-时间曲线。从图中观察建立时间。对于初始施加的电压或扫描中每个阶跃的扫描延迟时间，使用这个时间作为保持时间。扫描延迟时间可能不需要像第一个阶跃那么长。在验证适当的时间方面，用户需要尝试。

- **在定时菜单中选择适当的快速模式：**快速模式功能支持用户调节测量的建立时间和积分时间。对于小电容（皮法以下），使用安静（Quiet）或定制加速（Custom Speed）模式，可以得到最好的结果。
- **使用保护：**进行微小电容测量时，保护有助于防止来自器件未用端口的寄生电容影响测量精度。例如，如果测量栅极端和漏极端之间的电容，那么场效应晶体管（FET）源极端必须连接至保护。4210-CVU型的保护端在同轴电流的外屏蔽层。

结束语

使用适当的仪器和测量技术，可以得到碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)电气特性分析的最优结果。4200-SCS型参数分析仪非常适合碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)及其他纳米结构的电气特性分析，因为它集成了硬件、软件和分析工具。利用4200-SMU型源测量单元仪器可以测量碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)的

$V_{ds}-I_d$ 、 $V_{GS}-I_d$ 、电阻及其他I-V测量。利用4225-PMU型超快I-V模块，可以进行脉冲I-V测量或观测向待测器件（DUT）施加脉冲波形后的瞬态响应。利用4210-CVU型电容计，可以生成C-V、C-f或C-t曲线。利用4200-SCS型参数分析仪的CNTFET项目，可以进一步简化测量设置和执行。

致谢

作者感谢位于加利福尼亚州利弗莫尔市的桑迪亚国家实验室的帮助。在本应用笔记撰写期间，在器件测试过程中使用了该实验室提供的碳纳米管场效应晶体管(CNT FET)。