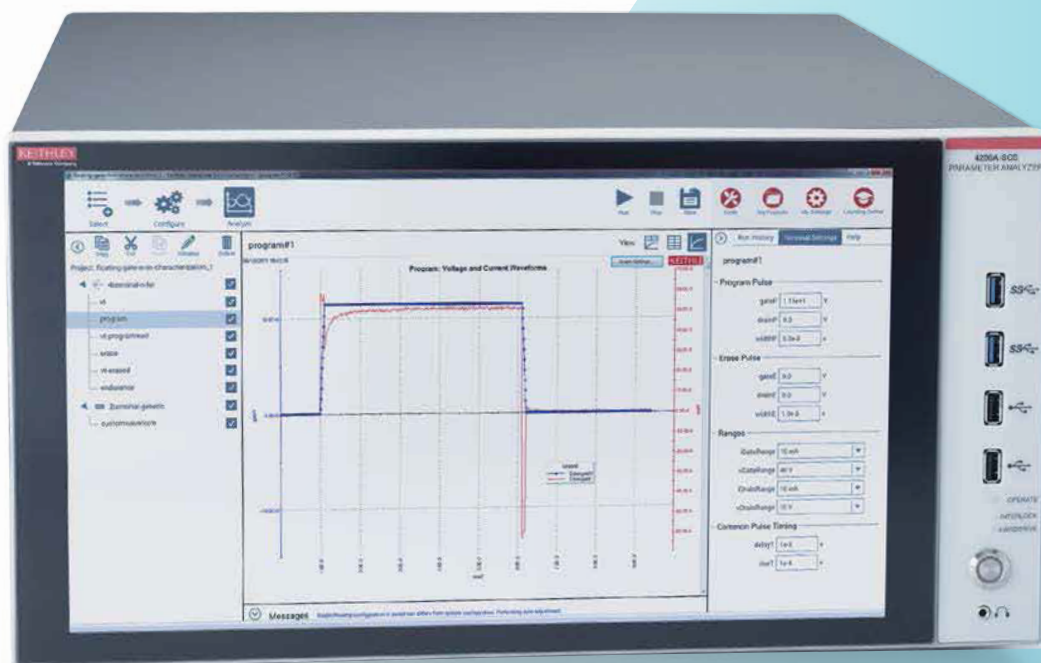


非易失性内存技术脉冲 I-V 表征

应用指南



引言

直到最近，浮栅 (FG) NAND 闪存技术成功地满足了数码相机、MP3 播放器和智能手机对非易失性内存 (NVM) 不断增长的需求。但是，消费电子行业日益担心浮栅 NVM 可能不能继续以每比特更低成本来提供更高的存储功能，而每比特更低成本则是驱动 NVM 市场发展的根本性要求^[1]。浮栅方法可能会“撞墙”，意味着替代技术的研究工作已经变得日益关键。

对更多材料和技术的广泛研究，要求电气测试系统既要拥有宽动态范围，也要拥有灵活的参数控制功能。本应用指南回顾了 NVM 简史，概括介绍了 NVM 材料和器件电气表征要求的测试参数，阐述了 4225-PMU 超快速 I-V 模块及 4225-RPM 远程放大器 / 开关的功能，这是用于吉时利 4200A-SCS 参数分析仪专门设计的两种仪器选项。4225-PMU/4225-RPM 相结合，集成了在每条通道上同时进行电流测量和电压测量功能，与以前的硬件相比，大大简化了考察瞬态脉冲响应的工作。凭借系统的多脉冲波形发生功能，4200A-SCS 及 4225-PMU 可以在瞬态信号域和 I-V 域

表征内存器件的开关机制。在讨论新兴测试要求后，本指南将概括介绍 NVM 项目、测试以及浮栅浮栅闪存、相变单元、铁电单元器件和阻变存储器的测试参数。

NVM 简史

世界各地的科学家正在研究可以替代 FG NAND 技术的 NVM 备选方案，包括相变内存 (PCM/PRAM)、电荷俘获内存 (CTF/SONOS)、电阻内存 (ReRAM)、铁电内存 (FeRAM) 和磁阻内存 (MRAM) (图 1)。业内已经研究这些器件很多年，每种技术目前都以某种形式出现在市场上。业内还在积极研究其他 NVM 技术，包括自旋转移矩 (STT) MRAM、浮体 (FBRAM) 和各种类型的基于碳纳米管的内存 (CNT RAM)，以确定其对内存产品应用的适用性。

除了 NVM 在便携式消费电子器件中的传统用途外，FG NVM 还开创了新的产品品类，比如普遍使用的 U 盘，以及最近在高性能应用中代替传统电脑硬盘的高性能固态硬盘 (SSD) 产品。这些产品以及可能出现的代替现有闪存和动态内存 (DRAM) 的“通用”内存，验证了大学及半导体机构和企业的长期研究成果^[2]。

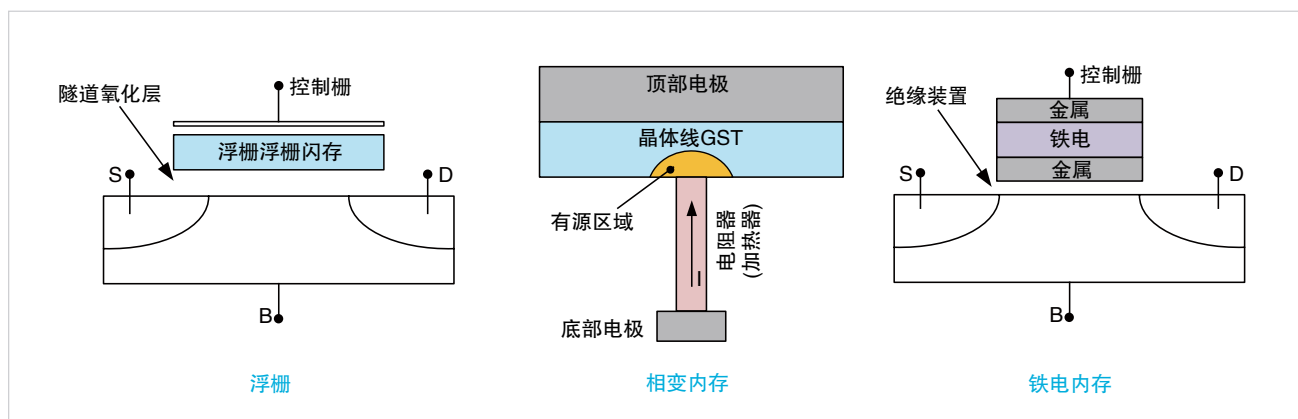


图 1. 各种非易失性内存器件。

理想的内存应兼具动态内存和非易失性内存的特点：

- 基于可以预测的扩充能力，成本越来越低，密度越来越高
- 快速读 / 写 (类似于或快于现有的 DRAM 速度)
- 耐久性高 (以满足 DRAM 或 SSD 应用)
- 保留期长
- 功率和电压要求低
- 兼容现有的逻辑电路和半导体工艺

随着 FG NVM 器件应用数量提高，FG 技术面临的压力也在提高。这为可能代替 FG 方法的多种技术打开了市场。将来可能会有多种 NVM 技术，满足每种产品类型或品类的不同要求。事实上，2010 年“半导体国际技术路线图” (ITRS) 只推荐了两种额外的应加快研发的 NVM 技术，以推出商用 NVM 产品：自旋转移矩 MRAM (STT-MRAM) 和 Redox RRAM^[1]。

NVM 测试要求演变及概况

在浮栅闪存中，电气表征在传统上是使用 DC 仪器执行的，如源测量单元 (SMU) 仪器，表征之前脉冲发生器已经编程和 / 或擦除内存单元。这要求某类开关，对测试器件交替应用 DC 或脉冲信号。偶尔会使用示波器，在被测器件 (DUT) 上检验脉冲保真度 (脉冲宽度、过冲、脉冲电压电平、上升时间、下降时间)。测量脉冲具有重要意义，因为闪存状态对脉冲电压电平相当灵敏。然而，即使在科研中，示波器的使用也相对很少，因为示波器测量要求的设置与脉冲源 /DC 测量方法并不相同。虽然也能使用示波器来表征闪存，但测量瞬态电流的复杂性，意味着只能在脉冲传送时才能获得电压测量。

最近，标准仪器已经改进，在把脉冲应用到内存器件或材料时，现在可望使用一台仪器同时测量电流和电压。尽管这种功能在早期是可能的，但它要求一机架的仪器，需要在成本、性能和复杂性方面进行各种折衷。此外，这些定制系统一般是由内部测试仪器专家创建和维护的，这名专家要拥有各种技能和经验，而且要有大量的时间来把各种仪器整合到一个系统中，以提供脉冲源和测量功能。这些早期系统虽然能用，但一般创造性不强，测试功能有限，测试控制麻烦，要求耗费大量时间提取信息。测量方法一般使用负载或传感电阻器，使用示波器或模数转换器测量电流。这是一种经过验证的技术，但负载电阻器对传送到器件的电压的影响，对许多脉冲测量会产生明显负作用。此外，多个系统之间相关及获得可溯源的系统级校准，实际上是不可能的。

新仪器为科研人员提供了额外的数据，可以用更少的时间更好地了解 NVM 材料和器件特点。应用脉冲，同时使用高速采样技术测量电压和电流，可以更好地了解提供内存行为的电气和物理机制。在 DC 表征中增加这种瞬态表征功能，可以提供与固有的材料属性和器件响应有关的基础数据。

业内目前正在考察许多 NVM 材料和技术，每种材料和技术在物理内存特点方面都有着独特之处。但是，对这些方法进行整体电气表征时，很多重要的测试参数和方法都是相同的。这种共性意味着可以使用一台测试仪器，来表征各种内存技术和器件。

电气表征对更好地了解底层技术的物理特点至关重要。不管考察的是哪种特定内存技术，都要求脉冲传送，来测试开关特点。脉冲传送及同时测量提供了必要的的数据，可以了解开关机制的动态特点。不同材料的说

法不尽相同，例如，编程 / 擦除、设置 / 重设和写入 / 擦除都用来指明比特 1 或 0 的基础存储。这些写入 / 擦除程序在脉冲模式下完成，提供典型内存操作要求的整体速度，仿真最终产品环境。在下一节中，我们将介绍各种非易失性内存技术共同的重要测试参数。

常用 NVM 测试参数

脉冲幅度是编程和擦除内存单元使用的要求的脉冲高度。浮栅内存存在写入脉冲期间可能要求 15-20V 甚至更高。大多数 NVM 方案要求 3-5V。替代 NVM 技术的目标是更低的脉冲幅度，但在任何维度量纲或材料优化前的早期研究可能会要求 6-8V。许多技术在这些电压电平上要求双极脉冲，但在双极源模式下使用时，某些最新脉冲 I-V 解决方案没有提供这么高的电压。

脉冲幅度保真度是 NVM 测试中最重要的参数之一，因为内存状态开关特点是非线性的（例如：Fowler-Nordheim 电流，相位变换），因此这些器件对电压脉冲的幅度很灵敏。脉冲幅度保真度参数用脉冲电平准确度、振铃、过冲和下冲指定。使振铃、过冲和下冲达到最小，对脉冲仪器设计至关重要。现代脉冲 I-V 系统可以提供 3% 或以下的过冲和振铃指标。但是，必需知道，测试器件的脉冲形状保真度明显受到连接设置、电缆、脉冲参数、器件阻抗、定时和阻抗不匹配的影响。

除准确的脉冲电平外，更新的技术要求复杂的、可以简便调节的波形，而不只是一个标准方形脉冲。例如，ReRAM 器件测试通常要求脉冲上扫 / 下扫描线，同时测量电流。FeRAM 测试要求 PUND（正、上、负、下）四脉冲序列。PRAM（相变内存）测试要求能够扫描几乎任何脉冲参数，如扫描 RESET-measure-SET-measure 多脉冲波形中四个脉冲之一的下降时间。所

有这些内存技术都要求能够输出多脉冲波形，其中包括任意波形段，且每个波形中包括多项测量。耐受性测试要求能够迅速输出复杂的任意波形，而不需要额外的设置时间或开销。这要求进一步把更新的脉冲仪器功能与传统二电平脉冲发生器分开。

脉冲定时参数，如测试器件中的上升时间、下降时间和脉冲宽度，仍将具有非常重要的意义，特别是整体发展趋势是脉冲传送速度越来越快，脉冲宽度则正从 100ns 下降到 <10ns。对某些技术来说，如 PRAM，下降时间是确定怎样进行 RESET 重设操作的一个关键参数。这个参数非常重要，因为传统脉冲发生器的上升 / 下降时间范围一般有限，比如不允许同时有 20ns 的上升时间和 2ms 的下降时间。一般来说，脉冲宽度越短越好，跃变时间越快越好，但实际上会由于典型互连阻抗、测量限制和仪器折衷等因素而有很多限制。

新兴 NVM 技术，如前面讨论的变相和铁电方法，正驱动着对动态的同时进行超快速电流和电压测量的需求。4225-PMU/4225-RPM 相结合，可以同时进行电压测量和电流测量，在材料的动态电阻代表着信息存储物理机制的电气特点时，这一点非常重要。

按尺寸缩小趋势导致器件正变得越来越小。这种趋势要求在脉冲传送的同时测量更小的电流，这要求电流测量中使用某种前置放大器。为最大限度地缩小电缆电容的寄生效应，更好地控制到测试器件的能量，远程脉冲放大器可以带来明显优势，它可以连接 15-25 厘米 (6-10 英寸) 范围内的 DUT。这对相变内存 (PCM) 和 ReRAM 表征尤为重要。

表 1. NVM 技术重要测试参数汇总表。

NVM 类型	脉冲电平	脉冲跃变, 脉冲保真度	瞬态测量	多电平脉冲	多通道同步
浮栅浮栅闪存	15-20V+	使脉冲过冲达到最小至关重要, 因为用来编程或擦除单元的隧道电流具有非线性特点。	新兴要求, 需要更多地了解电荷传送。	写入和擦除双极脉冲波形要求。在 FN 擦除过程中还要求在源极和漏极上高速控制固态继电器 (高阻抗)。	新兴需求
PRAM (PCRAM)	~±8V	要求上升时间和下降时间不对称: RESET 脉冲要求快速下降时间 (≤ 20ns), 晶化要求低速下降时间 (几十到几百纳秒)。	对了解材料和单元特点至关重要。	单极多电平脉冲传送, 用于 reset-measure-set-measure 波形。	在转换到 1T1R ¹ 器件时必需
ReRAM	~±6V	准确控制脉冲电平和跃变, 可以研究离子传送或细丝形成。	新兴要求, 帮助了解材料和单元特点, 协助搜索电流较低的变通方案。	单极技术和双极技术都要求。	对 1T1R ¹ 器件结构必需
FeRAM	~±5V	脉冲跃变控制允许表征偏差变化。	高速电荷测量对表征容性内存效应至关重要。	写入和擦除双极脉冲传送 (PUND 方法)。	适用于 1T1C ² 器件结构

1. 1T1R = 内存单元包括一个晶体管和一个电阻器, 晶体管提供单元控制和接入功能。

2. 1T1C = 内存单元包括一个晶体管和一个电容器, 晶体管提供单元控制和接入功能。

电流一致性或电流控制对某些 NVM 技术测试具有重要意义, 如 ReRAM 和 PRAM。通常来说, 这使用 DC 仪器完成, 有时在自定义脉冲设置中实现。DC 仪器中的电流限定是否对电流提供足够快的控制功能来满足典型要求, 这一点并不明确。对脉冲电流控制, 电流控制模块安装到距测试器件要尽可能近, 以避免电流可能从连线的寄生电容放电到测试器件中。

为简化和加快测试, 必需在脉冲和 DC 仪器之间切换。在耐受性测试中, 为在闪存编程 / 擦除周期中浮动连接, 开关速度必须足够快 (10-100ms), 因为开关必须发生在编程和擦除脉冲之间, 以支持数量非常大的压力波形。应通过脉冲发生器直接控制这类开关, 其位于脉冲仪器内部, 可进行快速控制。一般来说, 这种开关由固态继电器 (SSR) 针对每条脉冲通道执行。

通道同步对 NVM 测试必不可少, 其要求多个脉冲源和测量通道。两条通道对 PRAM 和 ReRAM 表征足够了, 以在两端子器件两侧进行输出和测量。对采用晶

体管作为接入器件的 NVM, 可能要求三条或四脉冲 I-V 通道。在闪存中, 需要两条或四条通道。传统脉冲仪器很难同步, 因为各种触发同步方法, 每种方法都有相关的不同复杂度 / 触发性能矛盾。现代脉冲 I-V 仪器提供了内部触发路由和自动同步功能, 以及集成测量功能。

如前所述, 不同的 NVM 技术拥有的测量需求略微不同。**表 1** 汇总了部分内存技术使用的重要测试参数。

4225-PMU 和 4225-RPM 提供的 NVM 表征功能

4225-PMU 超快速 I-V 模块 (图 2) 是 4200A-SCS 使用的一种单插槽仪器卡, 它有两条电压脉冲源通道, 每条通道有集成的同步实时电流和电压测量功能。测量分成两类: 采样和均值。采样类型用来捕获基于时间的电流和电压波形, 这些波形对了解瞬态或动态特点至关重要。均值类型为 I-V 表征提供了类似 DC 的电

流和电压测量。实时采样功能对于在单个波形中捕获 NVM 材料的瞬态特点至关重要，因为应用重复的波形会导致内存开关行为，甚至损坏材料本身。



图 2. 4225-PMU 超快速 I-V 模块和两个 4225-RPM 远程放大器 / 开关模块。

4225-RPM 远程放大器 / 开关是一种选配产品，是对 4225-PMU 的补充。这个小盒子位于 DUT 附近，提供了许多 NVM 材料和技术表征必需的较低的电流测量范围。此外，4225-RPM 为 4200A-SCS 的源测量单元 (SMUs) 和 CVU 信号提供了开关功能，支持高分辨率 DC 测量和 C-V 测量。4225-RPM 是一种单通道设备，

因此要求两个 4225-RPM 模块，以匹配 4225-PMU 的两条通道。4225-RPM 模块设计成位于测试器件附近 ($\leq 30\text{cm}$ 或 1 英尺)，以最大限度减少线缆影响，提供改善的脉冲形状和高速测量。

PMU/RPM 组合为表征现有的和新兴的上述 NVM 技术提供了测试功能。图 3 是 4225-PMU 的方框图。注意两条通道同时有电流测量和电压测量 (每条通道两个模数转换器)。每条通道可以独立提供 $\pm 10\text{V}$ 或 $\pm 40\text{V}$ (到高阻抗)。图 4 是 4225-RPM 的方框图：左侧注意输入来自 4200A-SCS 机箱，右侧注意输出到 DUT。上半部分 (蓝线、红线、深绿线) 是 4225-RPM 的开关部分。注意 SMU 和 CVU 通路全程支持 4 线连接。底部附近较细的绿线表示各种脉冲电流测量范围。

脉冲电平

每条 4225-PMU 通道有两种源范围。10V 源范围可以输出 $-10\text{V} \sim +10\text{V}$ (20V 幅度) 到高阻抗，覆盖大多数现代 NVM 方案。为测试现有的浮栅浮栅闪存或早期未优化的要求更高电压的新兴材料，4225-PMU 还有一个 40V 范围，输出 $-40\text{V} \sim +40\text{V}$ (80V 幅度) 到高阻抗。

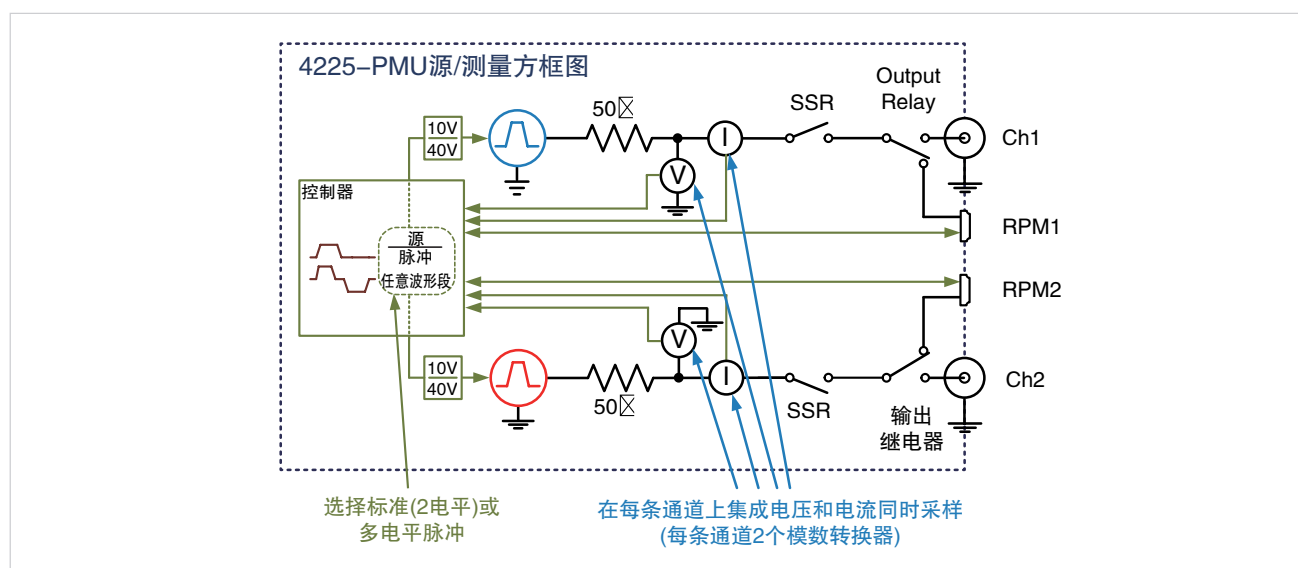


图 3. 4225-PMU 方框图。通过使用 RPM1 和 RPM2 连接，可以使用 4225-PMU 及两个 4225-RPM。SSR 显示了固态中继器，其用于高阻抗模式，通过 Fowler-Nordheim 隧道在闪存器件上执行编程或擦除操作。

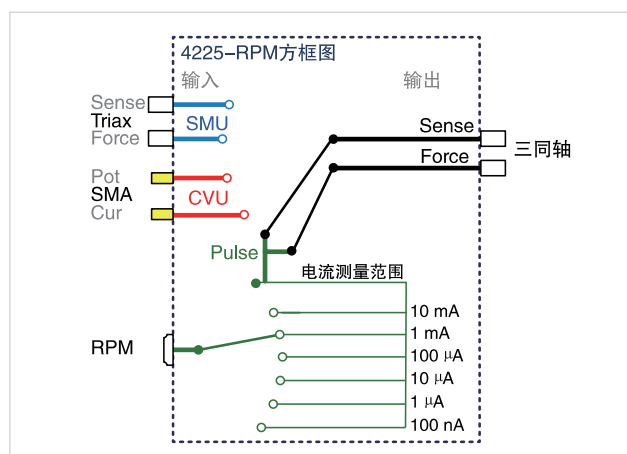


图 4. 4225-RPM 方框图。4225-RPM 既是一个用于高速电流测量的电流前置放大器（在脉冲模式下），也是用来为 4200A-SCS 机箱中其他仪器选择脉冲 I-V、SMU 或 C-V 测量模式的开关。

由于两个源量程都是双极，所以可以同时表征单极和双极内存技术。

瞬态测量和多通道同步

4225-PMU 有两条通道，每条通道有两个模数转换器，同时采样电压和电流。通过两条通道，可以同时输出脉冲到器件的栅极和漏极，同时在两条通道上采样电压和电流，捕获 DUT 的动态响应。如果要求两条以上脉冲 I-V 通道，多张 4225-PMU 卡可以安装在一个机箱中，所有通道将自动同步到 $\pm 2\text{ns}$ 以内。这种同时同步测量对了解 NVM 材料和器件的开关特点至关重要。

4225-RPM 增加了从 10mA 直到 100nA 的测量范围，允许对小电流进行瞬态分析，而小电流是开关状态的特点。此外，RPM 拥有切换、

功能，允许把 SMU 仪器或 C-V 信号路由到测试器件。

脉冲跃变和多电平波形

4225-PMU 有两条独立通道，定时参数可以从 20ns 到 40s 调节。最短脉冲是 40ns (FWHM, 全宽半最大脉冲幅度)，但要求更宽的脉冲测量更小的电流。

通过使用 Segment ARB® 功能把多个线性段（电压相对于时间关系）链接起来，可以创建多电平或多脉冲波形。每条通道最多有 2048 个段，可以用在一个序列中或用在多个序列中。一个序列是一个可以循环的一组片段的集合，一般从测量序列和循环序列中提供压力。

测量是逐段进行的，因此只收集要求的数据，最大限度地使用可用的采样存储内存，与高端示波器中提供的分段内存功能类似。此外，提供了两种测量：采样和均值。采样类型用来捕获基于时间的信号，适合通过评估脉冲形状特点，来捕获瞬态特点，验证连接是否正确。均值测量类型则用来测量 I-V 特点。这两种类型都可以逐通道应用到整个段、部分段或波形中所有段。

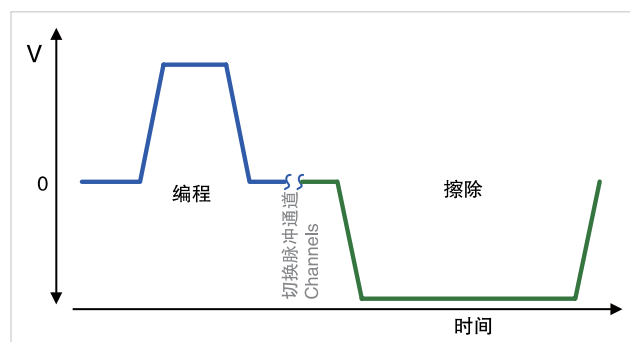


图 5. 闪存编程和擦除波形：两种脉冲，三种电平。传统脉冲发生器只能输出两电平脉冲，因此闪存测试对每项测试要求两条脉冲通道，并要求一个耗时的开关对测试器件应用第二个（负）脉冲。注意这个设置只适用于一个器件端子。对栅极和漏极上的典型脉冲传送，必须重复这一设置。

在一个波形内能够输出几十或几百个唯一的脉冲，较传统脉冲仪器缩短了测试时间，后者只能在两个脉冲电平之间传送脉冲。传统浮栅浮栅闪存使用两条脉冲通道，为一个测试器件端子创建由三个电压电平组成的两脉冲波形（图 5）。此外，它在脉冲发生器和 DUT 之间要求一个外部开关，把每个脉冲交替路由到端子上。这个外部开关增加了复杂性和成本，最重要的是，提高了测试时间。同时脉冲传送栅极和漏极要求 4 条脉冲通道和 2 组开关。图 6 显示了测试相变内存使用的比较复杂的波形。波形上的红框表示测量。注意整个波形由 4 个宽度和高度变化的脉冲组成，是由一条 4225-PMU 通道输出的，其中使用了最多 2048 个段中的 16 个段。

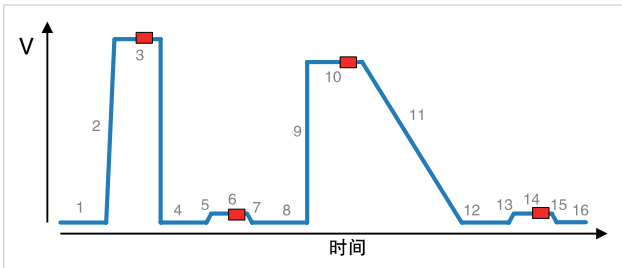


图 6. 多电平脉冲波形由 16 个线性电压段（灰色数字）和 4 个测量（红框）组成。新型脉冲源硬件可以创建多段电压波形，在一个波形内部提供多个脉冲，并增加集成电压和电流采样（图中未画出）。

连接器件

图 7 显示了使用两个 4225-RPM 远程放大器 / 开关连接两端子器件的整体方法。4225-RPM 是双通道 4225-PMU 超快速 I-V 模块的一个选配项目，对 NVM 表征必不可少。对范例 nvm 项目中的器件（本应用指南后面将展开讨论），图中画出了具体互连图。注意 NVM 器件的接地连接，其在使用晶体管作为选择器件的内存单元上通常必不可少，其应连接到本地屏蔽层，每条通道的屏蔽层应连接在一起（图 8）。这些屏蔽连接对保证快速跃变要求的相对较高的带宽及当今新兴 NVM 技术要求的窄脉冲非常重要。

可以使用一条通道连接两端子器件，器件低侧连接到屏蔽层或通道的接地回路。这是测试简单的两端子器件使用的传统方式，对 DC 表征是合理的。但是，由于脉冲过程中的瞬态效应，在两端子器件上使用两条通道可以改善结果。如需进一步信息，请参见“优化测量”部分。

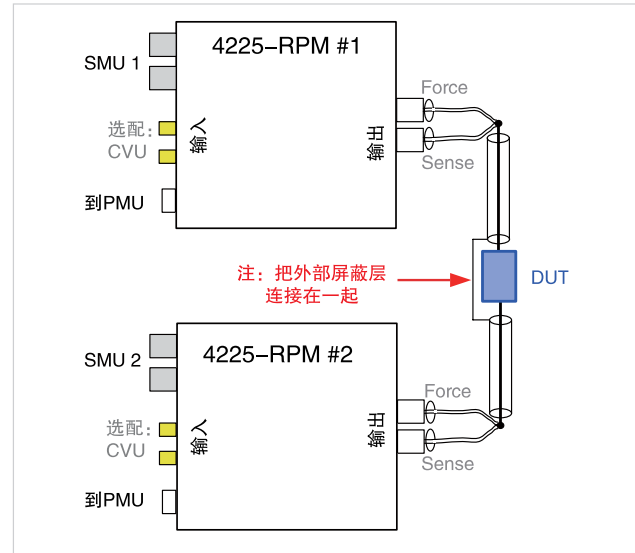


图 7. 连接两端子测试器件。

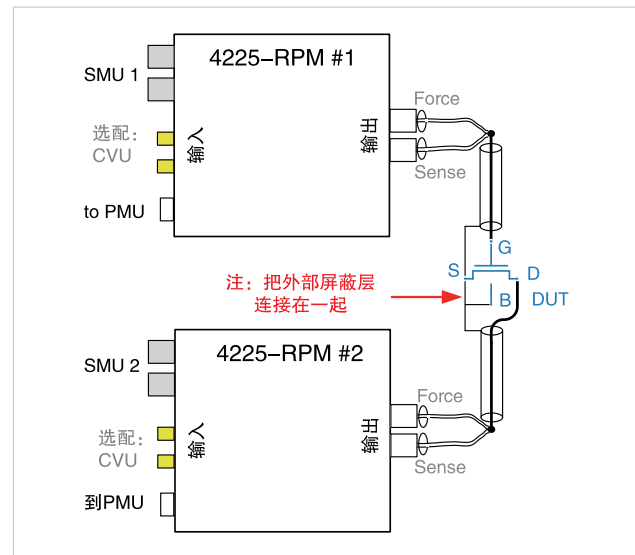


图 8. 使用两个 4225-RPM 连接 4 端子测试器件。

使用 Clarius 软件控制 4225-PMU 和 4225-RPM 进行 NVM 测试

Clarius 软件带有一套 NVM 表征使用的范例项目。可以使用 Memory 过滤器在 Project Library 项目库中找到这四个范例项目。**图 9** 是闪存器件项目浮栅非易失性内存表征项目的截图。这些项目为闪存、PRAM、FeRAM 和 ReRAM 器件提供了测试和数据，演示了 4200A-SCS 特别是 4225-PMU 及 4225-RPM 的功能。4225-PMU/4225-RPM 相结合，提供了基础脉冲和瞬态 I-V 测试功能，可以考察和表征各种 NVM 材料和器件。下面简要介绍了用户模块。

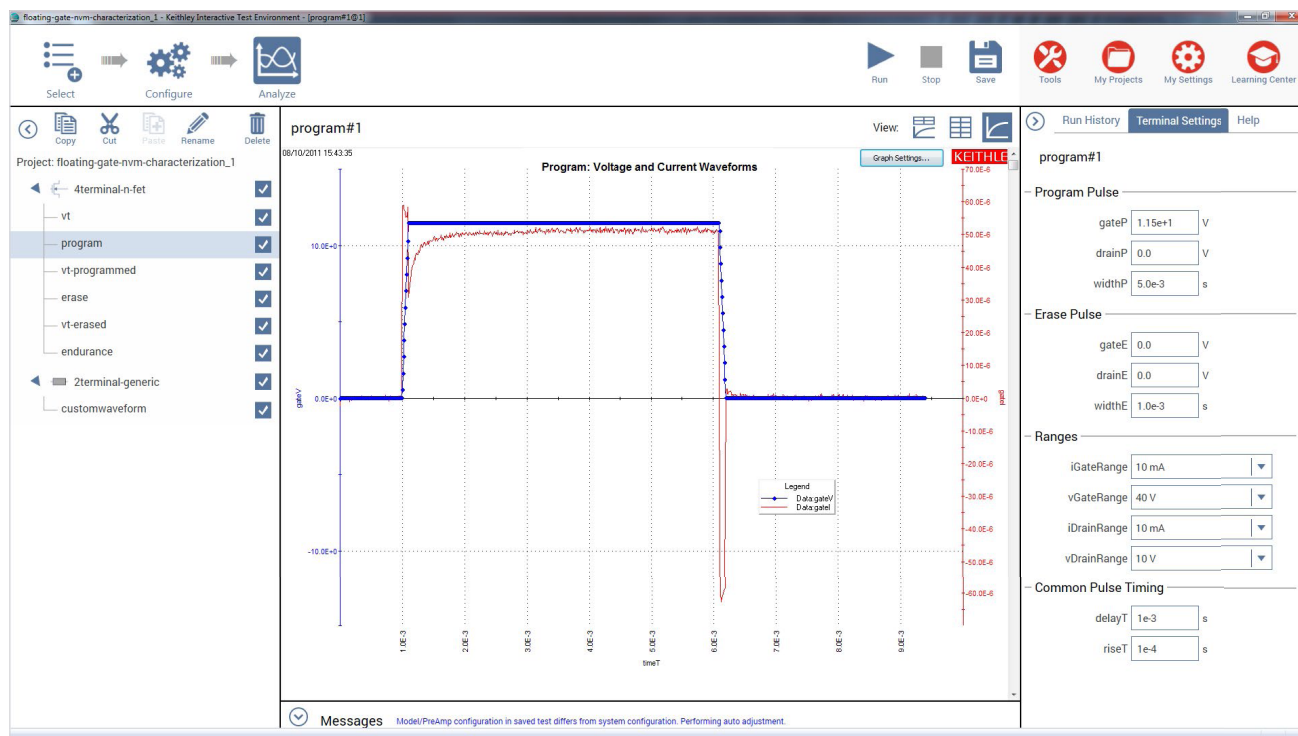


图 9. 浮栅非易失性内存表征项目截图。

范例项目中的测试是为每种内存类型量身定制的，但共享底层方法，最大限度地减少适应其他 NVM 材料或器件类型要求的工作量。项目中使用的所有测试都包含在 nvm 用户程序库中 (表 2)。这些模块用于范例项目中，但它们也可以添加到另一个项目中。如果要求额外的功能或测试类型，4200A-SCS 带有模块源代码，可以使用吉时利用户程序库工具 (KULT) 及选配汇编程序 (订购编号：4200-Compiler) 进行修改。

表 2. nvm 用户程序库中的用户模块。

用户模块	用于	说明
doubleSweep.c	-	输出一个或两个 V 形波形，同时采样电压和电流。另外还计算累积的电荷。要求一个 4225-PMU 及两个 4225-RPM。
doubleSweepSeg.c	PRAM, FeRAM	与 doublesweep 类似，但返回的波形数据会分到 PRAM I-V 扫描使用的多个段中。另外还计算累积的电荷，用于 FeRAM 磁滞测试。要求一个 4225-PMU 及两个 4225-RPM。
flashEndurance.c	闪存	执行脉冲压力和 DC 测量循环。应用请求的最大数量的波形，同时测量每个 log10 波形数。压力波形是典型的编程和擦除，测量由 SMU 仪器执行。要求两个 SMU 仪器、一个 4225-PMU 及两个 4225-RPM。
flashProgramErase.c	闪存	应用编程和擦除脉冲波形，同时采样电压和电流。可以选择同时输出编程和擦除脉冲，或只输出一个脉冲。要求一个 4225-PMU 及两个 4225-RPM。
nvmDebug.c		这个工具模块不进行测试，而是把内部测试状态信息保存到文件中 (C:\nvmlog.txt)。它可以用来调试测试问题，特别是修改现有测试模块或编写新模块。
pramEndurance.c	PRAM	对相变内存执行压力和测量循环。这一测试使用 RESET-SET 波形进行压力测试，每个 log10 数量使用 RESET-measure-SET-measure 获得电阻测量 post-RESET 和 post-SET。要求一个 4225-PMU 及两个 4225-RPM。
pramSweep.c	PRAM	这一项输出 RESET-measure-SET-measure 波形，同时采样电压和电流。要求一个 4225-PMU 及两个 4225-RPM。
pulse_test.c	闪存， PRAM, FeRAM	这是所有测试使用的底层测试例程。要求一个 4225-PMU 及两个 4225-RPM。如需更多信息，请参阅 C:\s4200\kiuser\usrlibs\nvm 中的 4200A_nvm_project_notes.pdf 文件。
pundEndurance.c	FeRAM	对 FeRAM 执行压力和测量循环。这些压力波形会输出最大次数，会以 log10 基础中断，获得 PUND 及 Psw 和 Qsw 提取数据。压力波形是 PUND 波形，测量是 doubleSweepSeg 控制的两个 V-pulses。要求一个 4225-PMU 及两个 4225-RPM。
pundTest.c	FeRAM	这项测试输出 4 脉冲 PUND 波形，同时采样电压和电流。这个例程从波形中提取 P、U、N 和 D 值。要求一个 4225-PMU 及两个 4225-RPM。
reramSweep.c	ReRAM	这项测试输出两个脉冲，一个脉冲用于“SET”，另一个脉冲用于“RESET”。脉冲可以由 SMU 仪器或由 PMU 生成。SMU 仪器扫描速度慢 (ms 级及以上)，PMU 扫描速度快 (ns ~ ms 级)。这两种电压扫描 (PMU 和 SMU 仪器) 都可以与电流限制一起使用。要求一个 PMU 及两个 RPM 和两个 SMU 仪器。
reramEndurance.c	ReRAM	对 ReRAM 执行压力和测量循环。这项测试使用 RESET-SET 波形进行压力测试，每个 log10 数量对 post-RESET 和 post-SET 状态使用 RESET-measure-SET-measure 波形获得电阻测量。要求一个 PMU 及两个 RPM 和两个 SMU 仪器。
util.c		这个工具模块不进行测试，但为其他测试提供了配套例程，如硬件初始化、计算总点数、计算允许的最大采样率。
vt_ext.c	闪存	执行 V_G - I_D 扫描，提取电压阈值 (V_T)。要求两个 SMU 仪器。

闪存测试

闪存单元是 NVM 的主要类型，因为它们是在 MOSFET 晶体管基础上实现的，拥有标准源极、栅极（实际上是控制栅或 CG）、漏极和衬底偏置电位 / 基底连接（图 12）。通过栅极氧化物和热载流子注入的 Fowler-Nordheim 电流隧道，代表着存储及从浮栅中移除电荷使用的两种标准方法（图 10）。这些方法是标准（非 NVM）MOSFET 晶体管的劣化机制，这也说明了闪存的耐受性有限。由于 NVM 市场以闪存为主，因此这是业内正在这一领域积极开展研发工作^[3,4]。

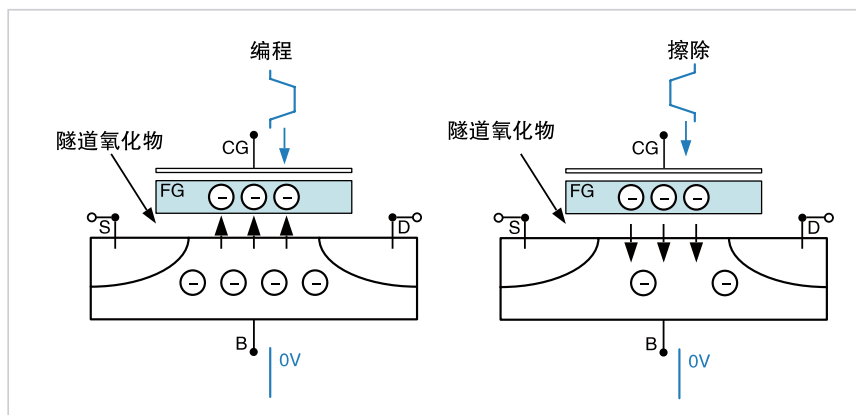


图 10. 闪存结构，显示了 Fowler-Nordheim 隧道的编程和擦除条件。

初始闪存表征通常要确定电压脉冲高度和脉冲宽度等相应值，为编程和擦除状态提供目标阈值。传统闪存单元都是 1 比特 (1/0)，而大多数现代闪存每个单元采用两个或三个比特，对应 4 个或 8 个唯一的 VT 电平。VT 电平数量不断提高，要求更加精确的脉冲电平性能和更高的脉冲电压。

闪存器件项目浮栅非易失性内存表征项目（图 11）中有 7 项测试。这些测试支持独立式 NAND 或 NOR 单元，其中三项测试测量闪存晶体管的 VT，两项测试应用编程或擦除脉冲，一项是耐受性测试。图 12 是独立式闪存内存单元的连接图。在这些测试中，只使用两条脉冲 I-V 通道，因此源极和衬底偏置电位都连接到 4225-RPM 屏蔽层上。这些测试要求以下硬件：

- 4200A-SCS
- 两个或多个 SMU 仪器，中等功率 4200-SMU 或高功率 4210-SMU
- 一个 4225-PMU 及两个 4225-RPM

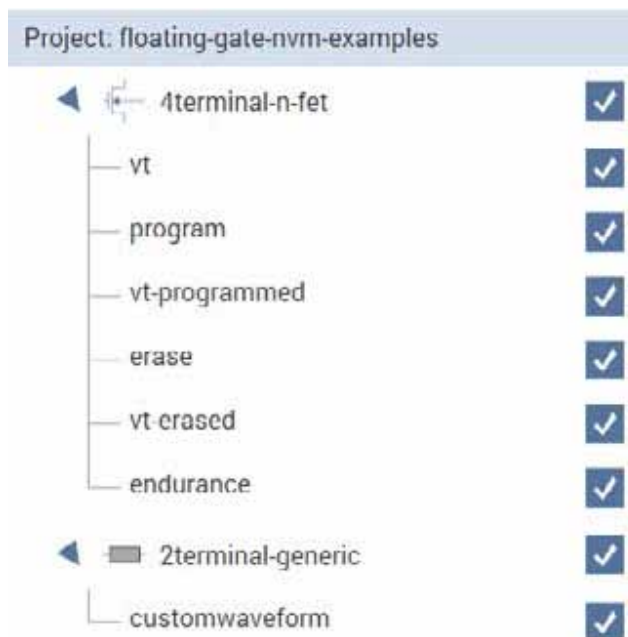


图 11. 浮栅非易失性内存表征项目中的闪存器件测试。

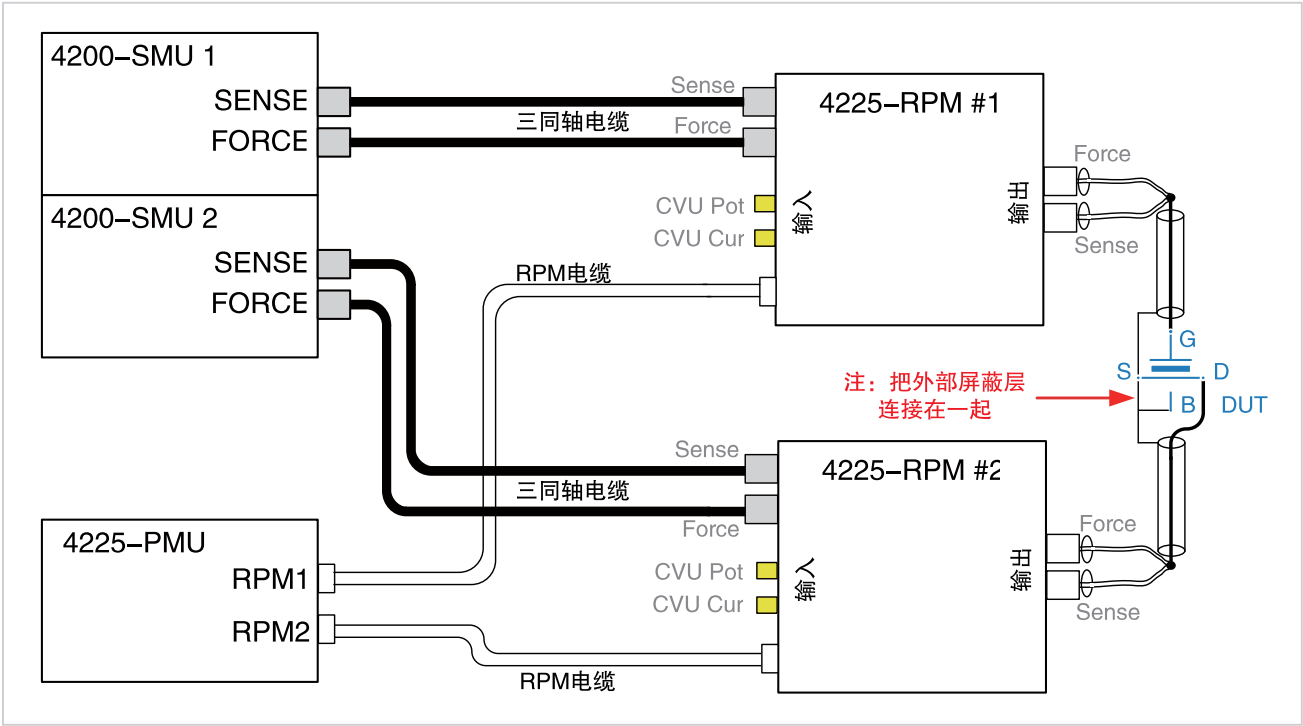


图 12. 连接 4 端子浮栅浮栅闪存器件。

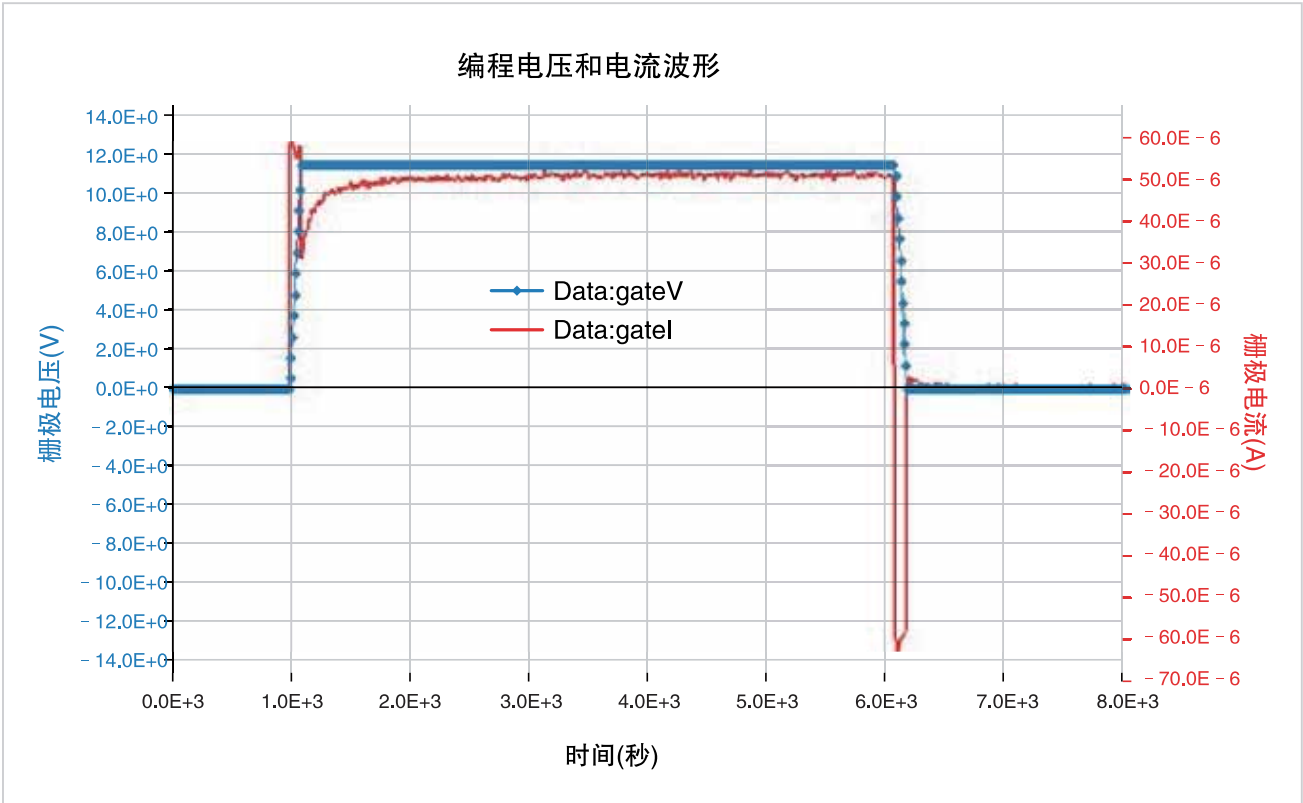


图 13. 使用 4225-PMU 及 4225-RPM 在 NAND 单元上获得的 Program 脉冲的脉冲电流和电压波形。注意脉冲跃变期间的电容充电和放电电流 (说明请参见“优化测量”)。本图来自 Flash program 测试 (用户模块 flashProgramErase)。

三项 V_T 测试相同，使用两个 SMU 仪器测量闪存晶体管的 V_T 。编程和擦除测试应用脉冲波形，编程和擦除独立式闪存单元。由于 4225-PMU 已经集成了高速采样，所以编程和擦除测试还捕获电压和电流波形 (图 13)。这两项测试都使用 Fowler-Nordheim 隧道，执行电荷传递，因此漏极电压 = 0V，图表中只显示了栅极电压和电流。但是，每项测试中都会同时测量栅极和漏极电流和电压，因此在需要时也可以显示。

在脉冲输出的同时测量电流在以前是不可行的。因为隧道电流对应用的电压是非线性的，所以测得的电流提供了电压与为编程或擦除提供充足电场的接近程度有关的额外信息。瞬态电流提供了与动态电流流动和整体电荷传送有关的信息。可以把瞬态电流和电压信息与基于 DC 的 VT 结果关联起来，进一步了解编程和擦除流程，这种流程对不同的结构、维度和材料可能都是唯一的。vt-programmed 和 vt-erased 测试提供了编程和擦除脉冲结果 (图 14)。

最后一项测试是耐受性，其中以提高的对数间隔应用编程 + 擦除波形，然后测量和绘制编程和擦除 VT 图 (图 15)。

闪存测试模块

NAND 或 NOR 浮栅器件测试有三个模块：flashProgramErase、vt_ext 和 flashEndurance。flashProgramErase 模块应用一个脉冲波形，其可以是编程脉冲，也可以是擦除脉冲，还可以是两者。vt_ext 模块使用 SMU 仪器执行 V_G - I_D 扫描，提取阈值电压。flashEndurance 模块应用数量不断提高的编程 + 擦除波形，同时定期测量 (按应用波形数量的对数间隔) 编程和擦除电压阈值，并绘制图表。

为进行初始表征，为编程和擦除确定相应的脉冲参数，flashProgramErase 和 vt_ext 模块允许调节脉冲参数，然后使用 SMU 仪器测量电压阈值。注意，可以使用 4225-RPM 开关功能对器件交替应用脉冲或 SMU 仪器电压，因此不要求重新布线。

flashProgramErase 模块使用 4225-PMU 和 4225-RPM 输出单脉冲，或使用 4225-PMU 的 Segment ARB 功能输出双脉冲波形。这个模块支持 4225-PMU 的两条通道，因此可以为栅极和漏极输出唯一的脉冲电压。这个模块还可以为诊断目的测量波形，如检验脉冲形状性能和正确的电压电平。

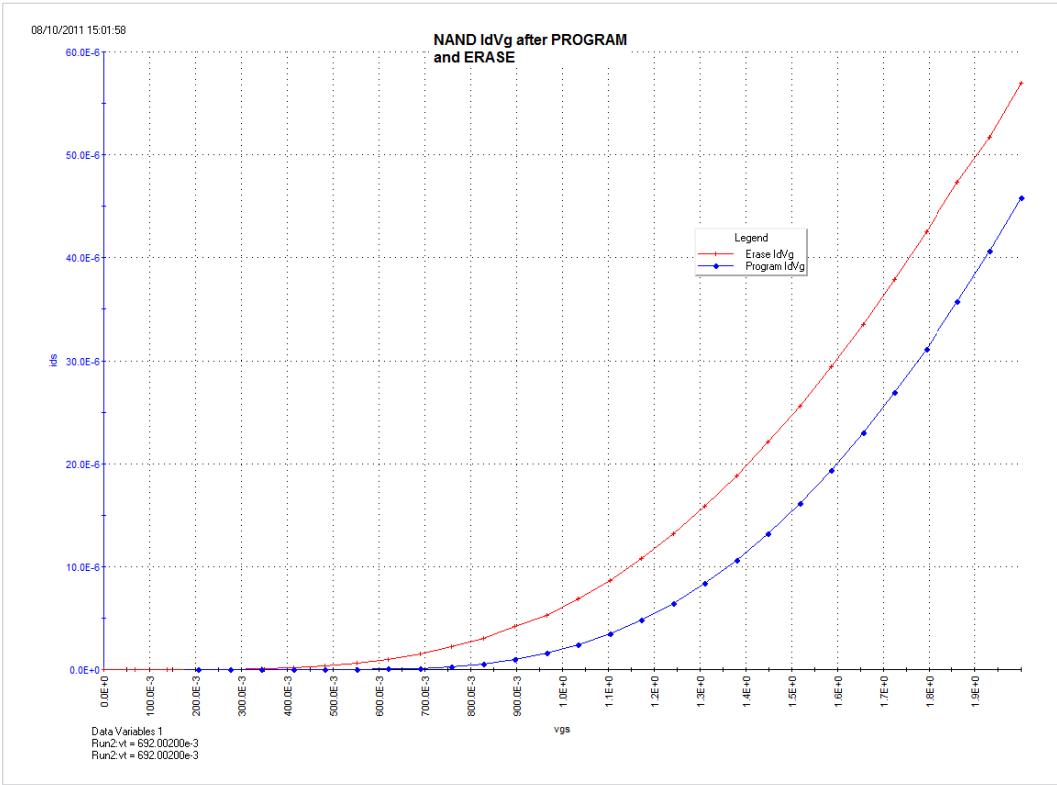


图 14. VT 扫描, 使用 SMU 从 vt-erased 测试 (用户模块 vt_ext) 中获得编程和擦除的单元。在这个图中, 编程后和擦除后的 VT 差约为 180mV。

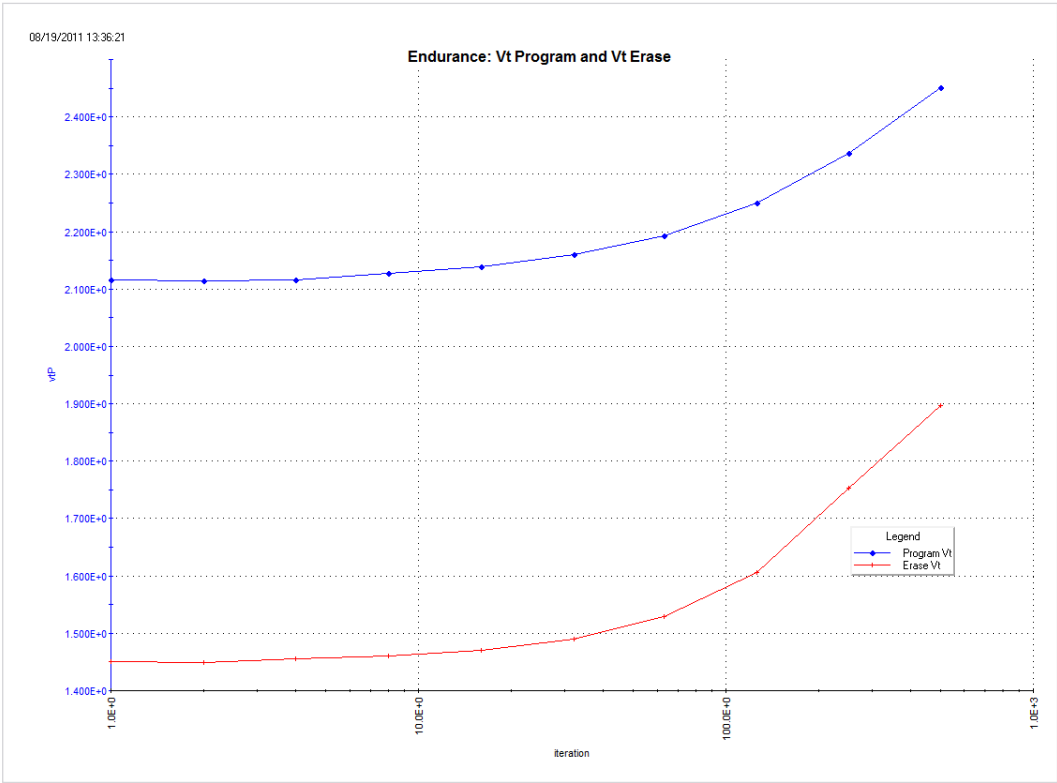


图 15. 来自闪存耐受性测试 (用户模块 flashEndurance) 的 NANDw 存耐受性结果。

设置 flashProgramErase 模块中的参数

表 3 列出了 flashProgramErase 模块的输入参数。这个模块同时包括栅极和漏极编程和擦除脉冲设置。它同时使用 4225-PMU 的两条通道，一条通道连接一个 4225-RPM (图 12)。这个模块定义和输出编程和擦除波形，如图 16 所示。如果想在发送编程和 / 或擦除脉冲后测量电压阈值，可以使用 vt_ext 模块，如下一节所述。

表 3. flashProgramErase 模块中的参数。

参数	范围	说明
gateP	-40V ~ +40V	栅极编程脉冲电压
drainP	-40V ~ +40V	漏极编程电压
widthP	20ns ~ 1s	编程脉冲顶部宽度
gateE	-40V ~ +40V	栅极擦除脉冲电压
drainE	-40V ~ +40V	漏极擦除脉冲电压
widthE	20ns ~ 1s	擦除脉冲顶部宽度
riseT	20ns ~ 33ms	脉冲跃变时间，编程、擦除的上升时间和下降时间
delayT	20ns ~ 1s	脉冲延迟时间，在编程脉冲前及在编程脉冲和擦除脉冲之间
loops	1 ~ 10 ¹²	ProgramErase 波形输出次数

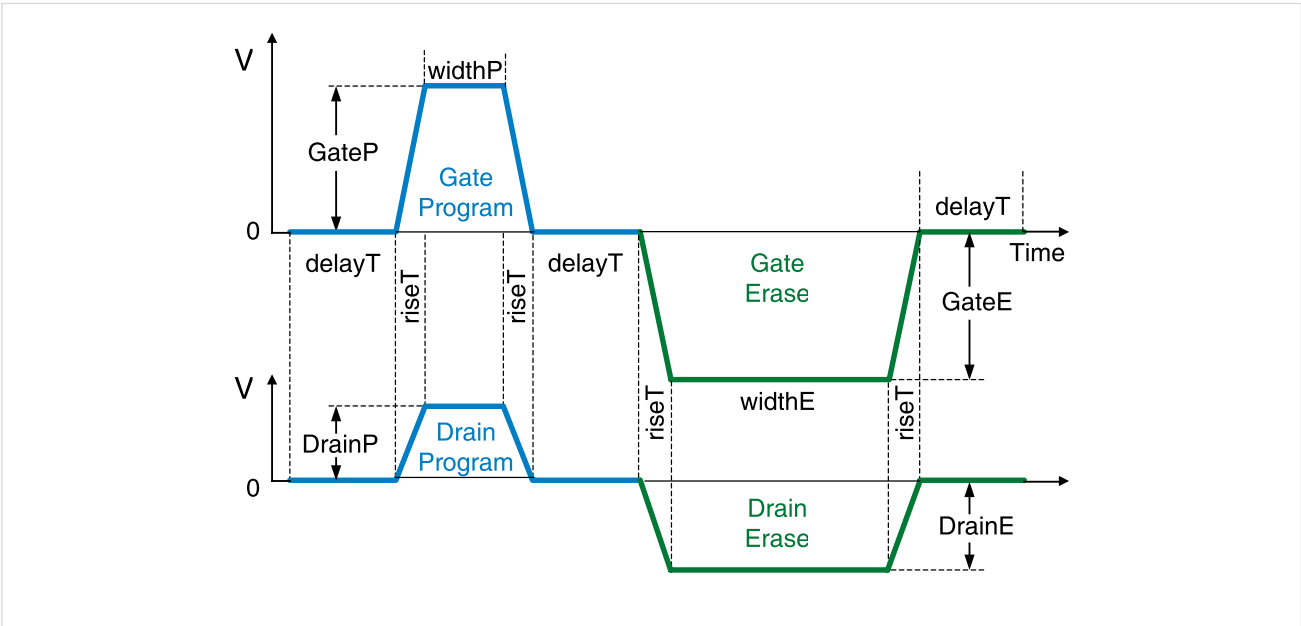


图 16. flashProgramErase 模块的波形参数。

如果只想要一个脉冲，可以把其他脉冲电平都设置成 0。例如，如果不想要擦除脉冲，那么设置成 drainE = gateE = 0。这将令波形的擦除部分保持在 0V。

对 Fowler-Nordheim 隧道，通常漏极电压为 0V，只是把栅极脉冲 (gateP) 设置成把电荷推送到浮栅 (gateP = +V) 或从浮栅中清除电荷 (gateE = -V)。对热载流子注入方法，漏极电压为正，在通道中创建必要的场，以创建热载流子。

设置 vt_ext 模块中的参数

表 4 列出了 vt_ext 模块的输入参数。这个模块执行 V_{GS} - I_D 扫描，使用最大 gm 方法返回晶体管阈值电压，其中阈值电压定义为：

$$V_T = V_{G_{MAX}} - I_{D_{MAX}} / g_{m_{MAX}} - 1/2 * V_{DS}$$

$V_{G_{MAX}}$ 是最大栅极电压。

$I_{D_{MAX}}$ 是最大漏极电流。

$g_{m_{MAX}}$ 是最大 g_m 时的转导 (g_m)。

表 4. vt_ext 模块中的参数。

参数	范围	说明
DrainSMU	SMU1 ~ SMUn	DUT 漏极使用的 SMU 仪器
GateSMU	SMU1 ~ SMUn	DUT 栅极使用的 SMU 仪器
SourceSMU	SMU1 ~ SMUn	DUT 源使用的 SMU 仪器 (如有)
BulkSMU	SMU1 ~ SMUn	DUT 衬底偏置电位使用的 SMU 仪器 (如有)
vlow	-40V ~ +40V	栅极 SMU 仪器使用的开始扫描电压
vhigh	-40V ~ +40V	栅极 SMU 仪器使用的最后扫描电压
vds	-40V ~ +40V	漏极 SMU 仪器使用的漏极偏置电压
vbs	-40V ~ +40V	脉冲延迟时间，在编程脉冲之前，在编程脉冲和擦除脉冲之间
vgs_pts	10 ~ 100	Vgs-Id 扫描中的点数
ids_pts	10 ~ 100	Vgs-Id 扫描中的点数
gm_pts	10 ~ 100	Gm 阵列中的点数
vt		从 max Gm 计算中得到的电压阈值

V_T 扫描中的点数由 vgs_pts 和 ids_pts、gm_pts 设置。注意这三个参数都要设置成相同的值 (vgs_pts = ids_pts = gm_pts)。

一般来说，30 点扫描足可以获得可靠的 VT。注意，这个模块假设 DrainSMU 连接到 RPM2 上，GateSMU 连接到 RPM1 上。如图 12 所示，测试器件源极和衬底偏置电位连接到 RPM 屏蔽层，因此 vt_ext 中相应的设置为 SourceSMU = BulkSMU = “”。

设置 flashDurance 模块中的参数

表 5 列出了 flashDurance 模块的输入参数。这个模块可以同时设置栅极和漏极编程和擦除脉冲及压力循环的最大数量。它同时使用 4225-PMU 的两条通道，每条通道连接一个 4225-RPM (图 12)。这个模块向测试器件输出一定数量 (max_loops) 的编程和擦除波形 (图 16)。这个模块使用来自 max_loops 的 log10 压力数量及 iteration_size 中所需数量的迭代，确定对每个压力间隔应用多少个编程 + 擦除脉冲波形。在每个压力间隔后，将运行 vt_ext，一次在应用编程脉冲后，一次在擦除后。注意 iteration_size、vtE_size 和 vtP_size 的值必须相同 (iteration_size = vtE_size = vtP_size)。

表 5. flashDurance 模块中的参数。

参数	范围	说明
gateP	-40V ~ +40V	栅极编程脉冲电压
drainP	-40V ~ +40V	漏极编程电压
widthP	20ns ~ 1s	编程脉冲顶部宽度
gateE	-40V ~ +40V	栅极擦除脉冲电压
drainE	-40V ~ +40V	漏极擦除脉冲电压
widthE	20ns ~ 1s	擦除脉冲顶部宽度
riseT	20ns ~ 33ms	脉冲跃变时间，编程 + 擦除脉冲的上升时间和下降时间
delayT	20ns ~ 1s	脉冲延迟时间，在编程脉冲前及在编程脉冲与擦除脉冲之间
max_loops	1 ~ 10 ¹²	输出编程 + 擦除波形，以对测试器件进行压力测试的次数
vds	-40V ~ +40V	漏极 SMU 的 V _T 扫描漏极偏置电压
vgsstart	-40V ~ +40V	栅极 SMU 的 V _T 扫描开始扫描电压
vgsstop	-40V ~ +40V	栅极 SMU 的 V _T 扫描最后扫描电压
vtP_size	2 ~ 100	编程脉冲后 V _{GS} -I _D 扫描中的点数
vtE_size	2 ~ 100	擦除脉冲后 V _{GS} -I _D 扫描中的点数
Iteration_size	2 ~ 100	max_loops 压力过程中测量 V _T 的次数

PRAM 材料测试

相变内存 (PRAM、PCRAM 或 PCM) 单元由硫族化合物合金制成 (即元素周期表中第六组元素中至少一种，外加第五组和第四组中各一种元素)。这些相同类型的材料还广泛用于可重写光学介质的有源层中，比如 CD 和 DVD。PRAM 是一种阻性内存，其他阻性内存还有 OxRRAM 和 TMO-RRAM (这两种都属于 Redox RAM) 和基于阳离子的电导桥内存 (CBRAM)。图 17 显示了变相非易失性内存表征项目 (PRAM) 中相变内存测试包括的测试。

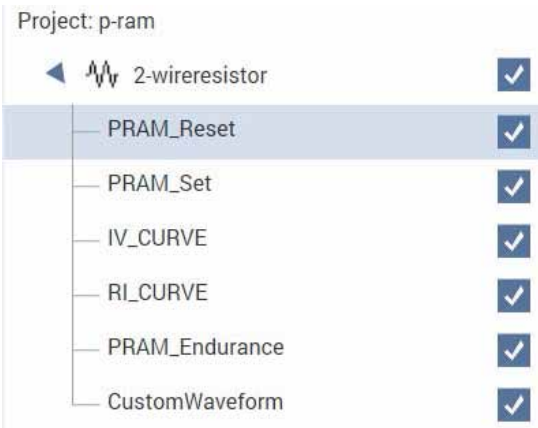


图 17. 变相 NVM 项目中 PRAM 两端子器件测试。

通过应用电脉冲形式的热能 (或 CD/DVD 中的激光脉冲), PCM 单元可以从有序晶相 (低电阻) 迅速切换到无序非晶相 (电阻高得多)。从晶相切换到非晶相, 再切换回去, 是通过熔化和快速冷却 (或称为再结晶的稍微慢一些的工艺) 来触发的。GST [锗 (Ge)、锑 (Sb) 和碲 (Te)] 的熔化温度在 500° 600°C, 已经成为 PCM 器件使用的最有前景的材料之一 (图 18)。

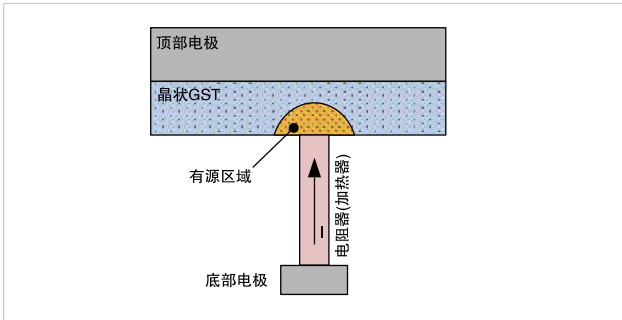


图 18. GST [锗 (Ge)、锑 (Sb) 和碲 (Te)] 结构。

这些器件可以存储二进制数据，因为这些合金的晶相和非晶相有不同的电阻率。高电阻非晶相状态代表二进制 0，低电阻晶相状态代表二进制 1。多个电阻电平允许多位 PCM，实践证明，其允许 PCM 定标及提供更低的每比特成本 [5, 6]。这些状态随着时间推移变得稳定，这一点对任何商用应用都非常重要 [7]。

在非晶相下，GST 材料有短距离原子顺序和低自由电子密度，因此电阻率较高，这有时称为 RESET 相位，因为它通常是在 RESET 操作后形成的，这时单元的温度会上升到略高于熔点，然后材料突然熄灭并冷却。冷却速度对非晶相状态的形成至关重要。如果速度太慢，那么材料的非晶相会略低。对所谓的“低速材料”，冷却速度约为 30ns；对“快速材料”，冷却速度约为单位数纳秒或更快 [8]。脉冲的下降时间可以慢于要求的速度，重要的是脉冲顶部的下降速度，也就是

单元从熔点冷却到晶状时。在达到结晶温度后，晶状顺序被冻结。例如，脉冲下降时间可能是 20ns，但可能要用 5ns 从 TMELT 变成 TCRYSTALLIZE。此外，某些 PRAM 结构会集成一个“选择二极管”或“保护二极管”，其与 PRAM 单元串联。除了会给 I-V 曲线带来某些缺点外，这个二极管会让有效下降时间变得更短。流经二极管的电流与电压呈指数级相关，因此小的电压下降会导致流经二极管的电流大幅度下降，特别是在小电流时 ($\sim 50\mu\text{A}$)。因此，在测试带有串联选择二极管的器件时，脉冲下降时间对小的电流测试器件并不是特别关键，允许使用标准脉冲 I-V 仪器进行测试，比如 4225-PMU 和 4225-RPM。

PCRAM 单元在很大程度上与其他类型的 NVM 技术一样，必须先成形，然后再显示一致的作为内存单元必需的开关行为。成形过程可以解释为它建立了 PCRAM 小区的有源区域。有源区域是指硫族化物在非晶相和晶相状态之间跃变的那个部分。图 18 显示了一个半圆，表示有源区域，这是成形过程的结果。成形过程的目标是在 SET 和 RESET 状态之间可复现循环。测试新单元或未知单元的挑战之一，是为 RESET 和 SET 脉冲确定相应的脉冲参数 (幅度、上升 / 下降时间、宽度)。这通常是一个迭代过程，先从合理的 RESET 脉冲开始，然后优化 SET 脉冲。pram-reset 和 pram-set 测试用于脉冲参数的这个初始确定。与闪存一样，其可能会给单元带来过度压力，永久损坏单元。由于 RESET 电压是最大的，所以必须谨慎搜索相应的 RESET 电压。

项目中有多项相变内存器件测试 (图 17)。pram-reset 测试应用一个带 RESET 脉冲的波形，测量到 PRAM 器件的 R 脉冲 (图 20)。pram-set 测试与第一项测试类似，但测试应用的波形是一个 SET 脉冲后面

跟着一个测量脉冲。I-V 扫描测试 (iv-curve) 显示开关效应 (图 22)。ri-curve 测试显示典型的 R-I 曲线，这是单元电阻相对于 SET 脉冲的电流 (R-I) 关系 (图 24)。pramEndurance 测试是一项耐受性测试，显示 SET 电阻变化相对于 RESET-SET 波形数量的关系 (图 26)。

这些测试要求以下硬件：

- 4200A-SCS
- 一个 4225-PMU 及两个 4225-RPM

图 19 显示了连接图。为获得最佳测量，连接采用源高测量低方法，参见“优化测量”部分。这些测试不使用 SMU，但可以增加 SMU 测试。

pram-reset 测试对测试器件应用一个两脉冲 RESET 和测量波形，捕获电压和电流波形 (图 20)。这种瞬态响应数据用来确定器件的电阻和复位程度。这项测试和 pram-set 测试用来确定重设和设置脉冲的正确电压和脉冲宽度，并能够向测试器件发送仅重设或仅设置波形。在执行耐受性测试前，可以使用这些测试优化 RESET 和 SET 脉冲参数。

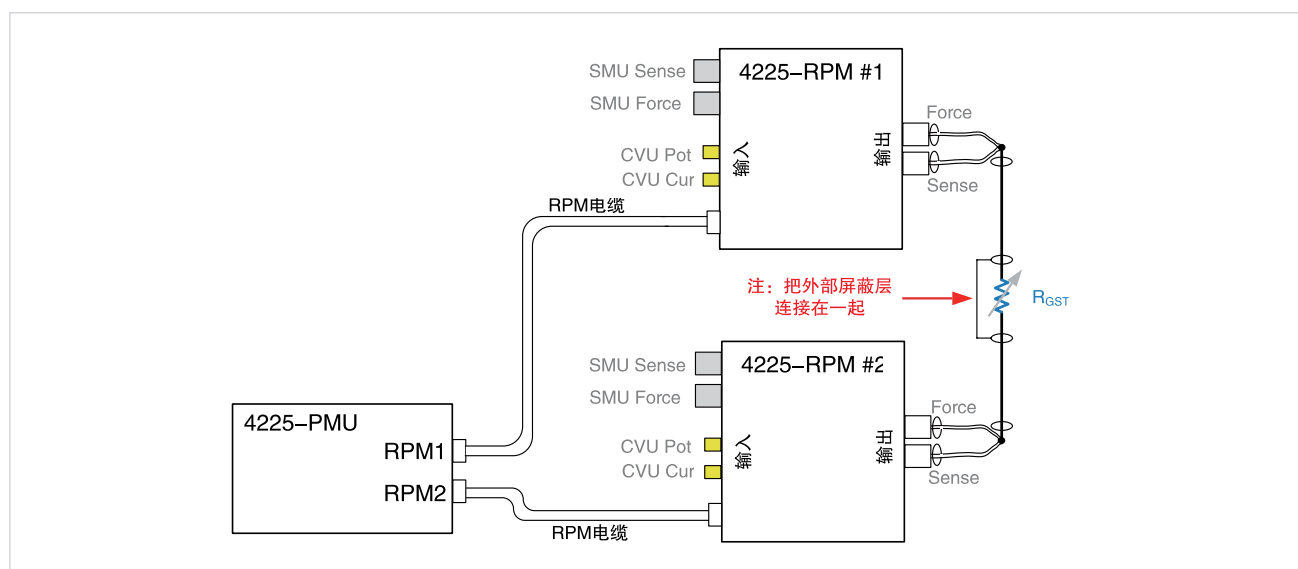


图 19. PRAM 测试连接图。注意 PRAM 测试不使用 SMU 或 CVU。

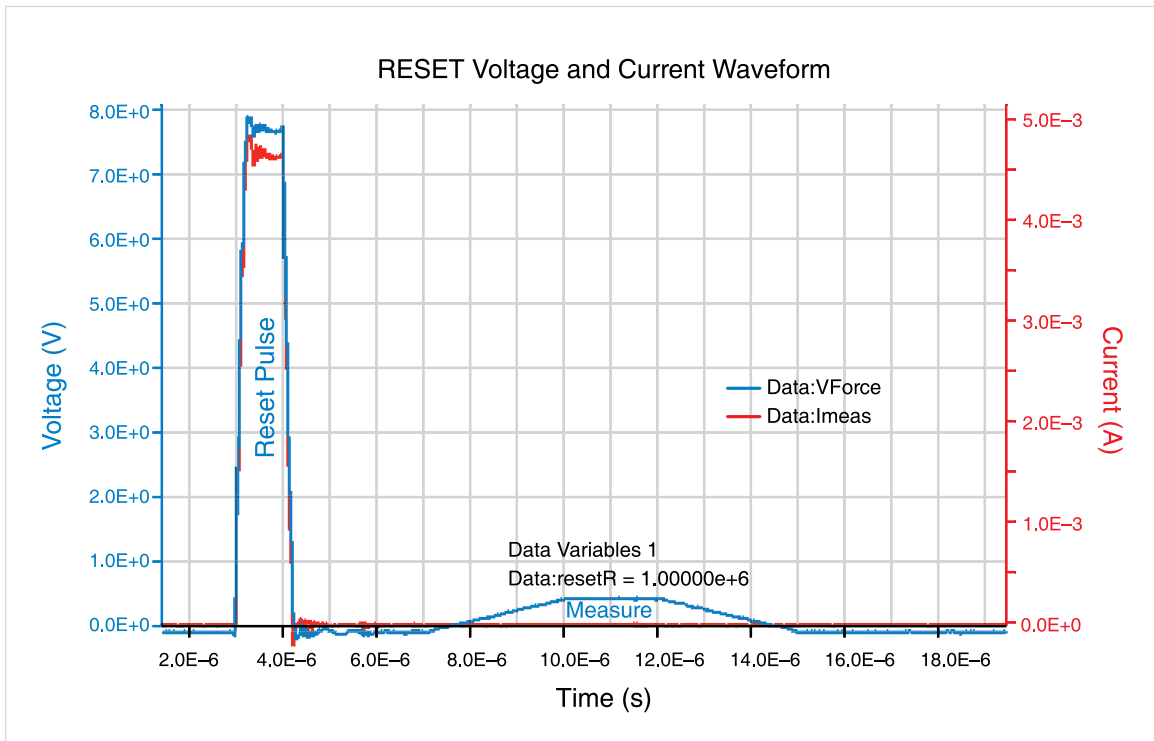


图 20. 4225-PMU 及 4225-RPMs (用户模块 pramSweep) 生成和测量的 PRAM RESET 波形。

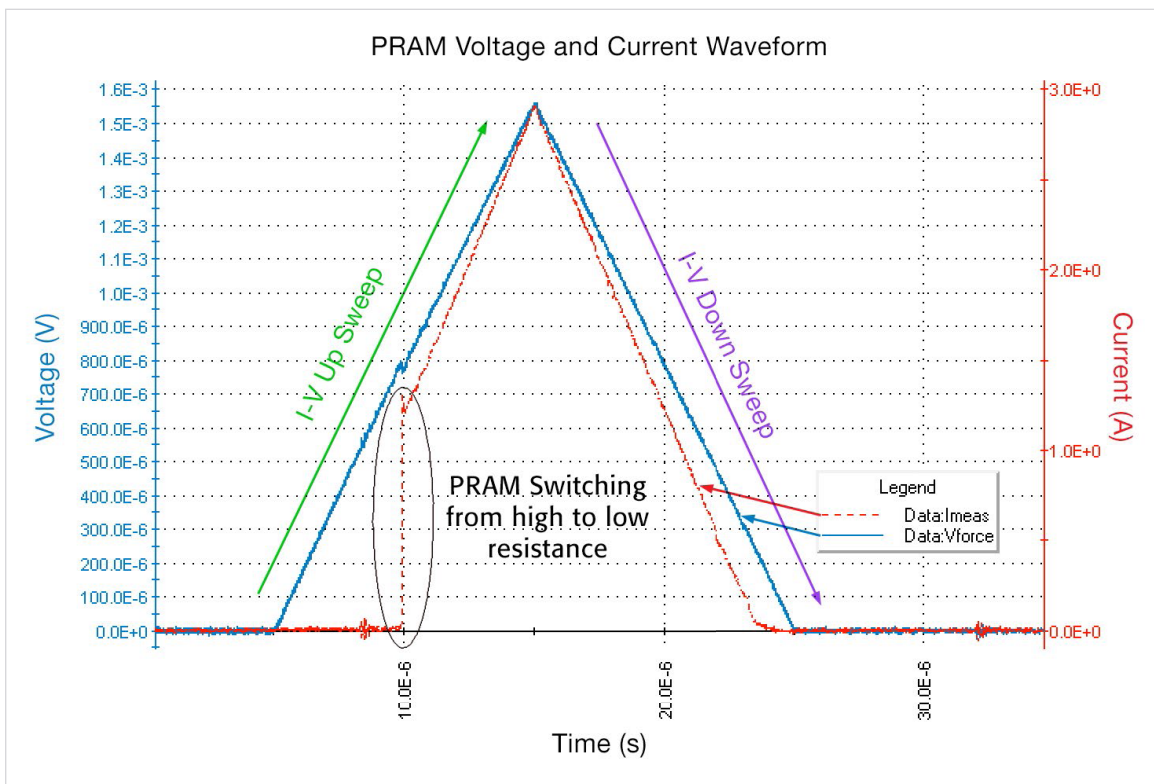


图 21. 4225-PMU 及 4225-RPMs (用户模块 double SweepSeg) 生成和测量的来自 iv-curve 测试的 I-V 波形。

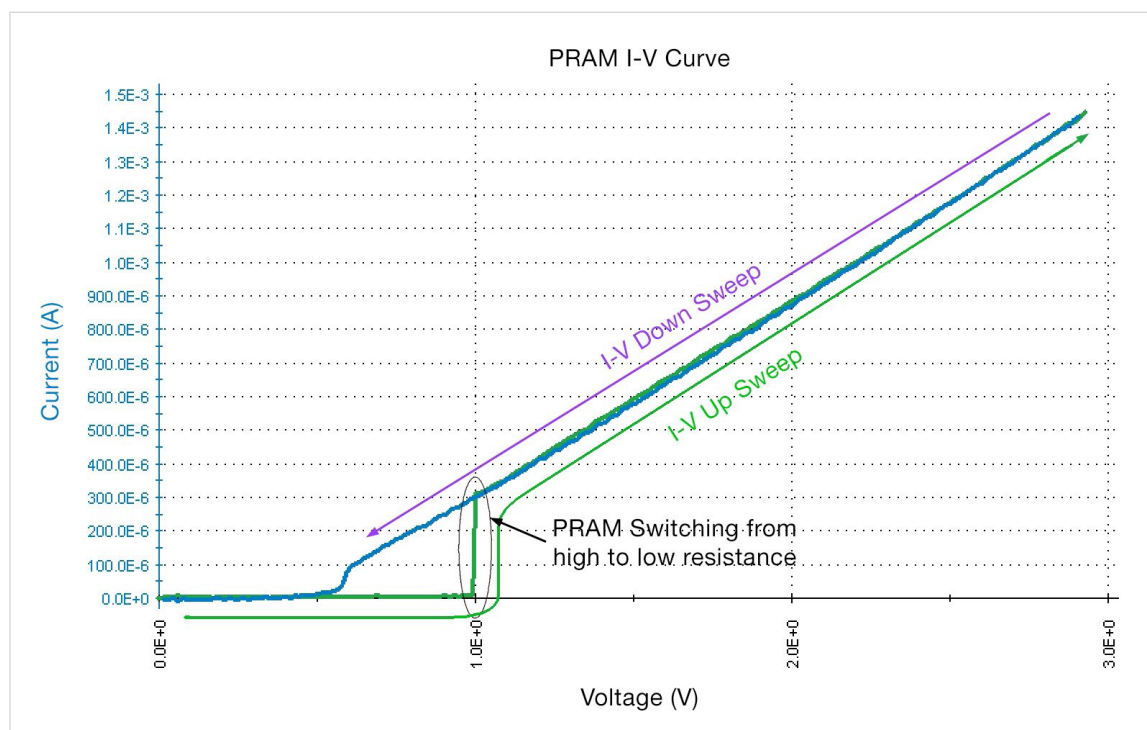


图 22. 4225-PMU 及 4225-RPMs 生成和测量的来自 iv-curve 测试的 I-V 曲线。这项测试使用的数据与图 21 相同，但曲线绘制是 I vs. V 图（用户模块 doubleSweepSeg）。

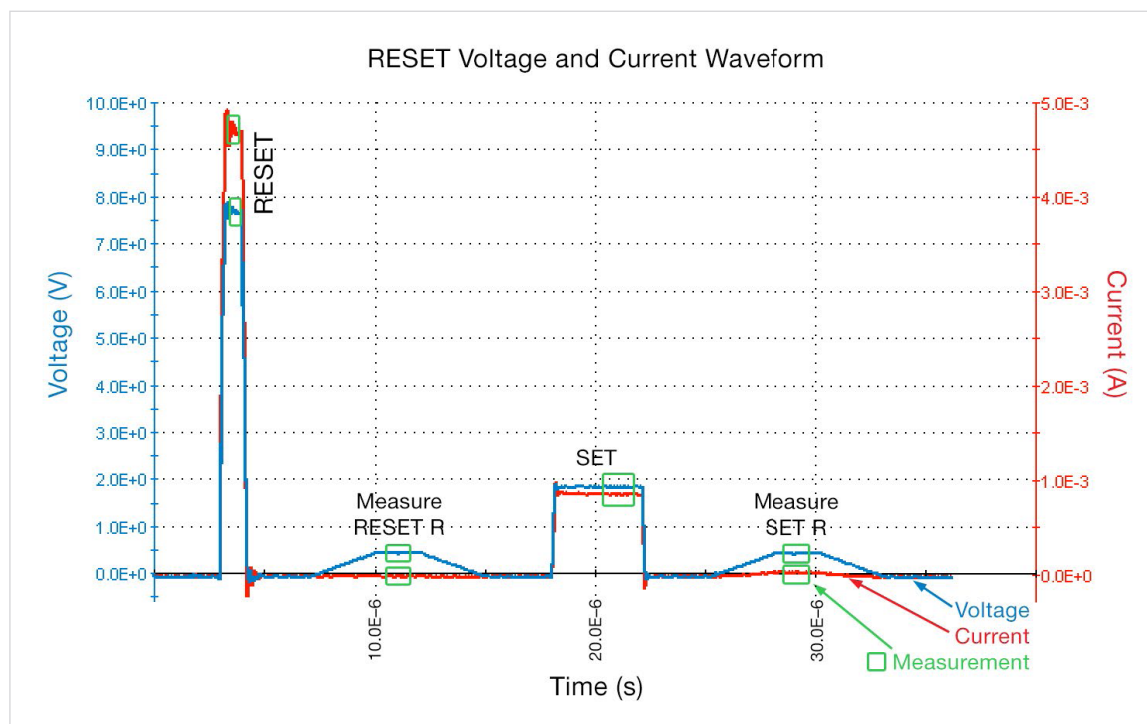


图 23. 4225-PMU 及 4225-RPMs (用户模块 pramSweep) 生成和测量的 R-I RESET-Measure-SET-Measure 波形。这个图显示了电压 (蓝色, 左面 y 轴) 和电流 (红色, 右面 y 轴) 波形。这个波形内部有四个脉冲。第一个脉冲是 RESET 脉冲, 重设 PRAM 材料, 把它置入高阻抗非晶相状态。第二个脉冲测量 RESET 状态的电阻。第三个脉冲是 SET 脉冲, 把材料置于低电阻晶相状态。第四个也是最后一个脉冲, 测量材料在 SET 状态下的电阻。图 24 是一条 R-I 曲线, 是扫描 SET 脉冲高度, 在 R-I 曲线中绘制结果图得到的。

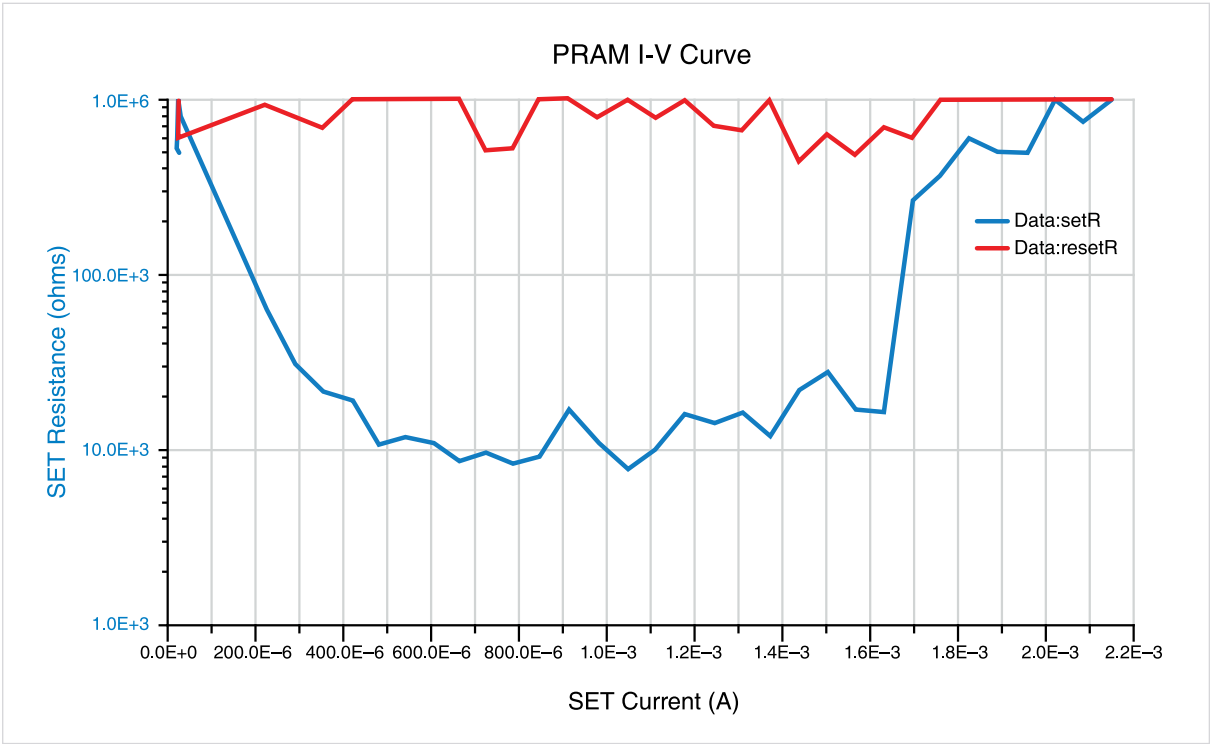


图 24. R-I 曲线显示了 4225-PMU 及 4225-RPM (用户模块 pramSweep) 生成和测量的 SET 状态电阻的电阻变化。这项测试使用从图 23 所示的脉冲顶部捕获的数据。

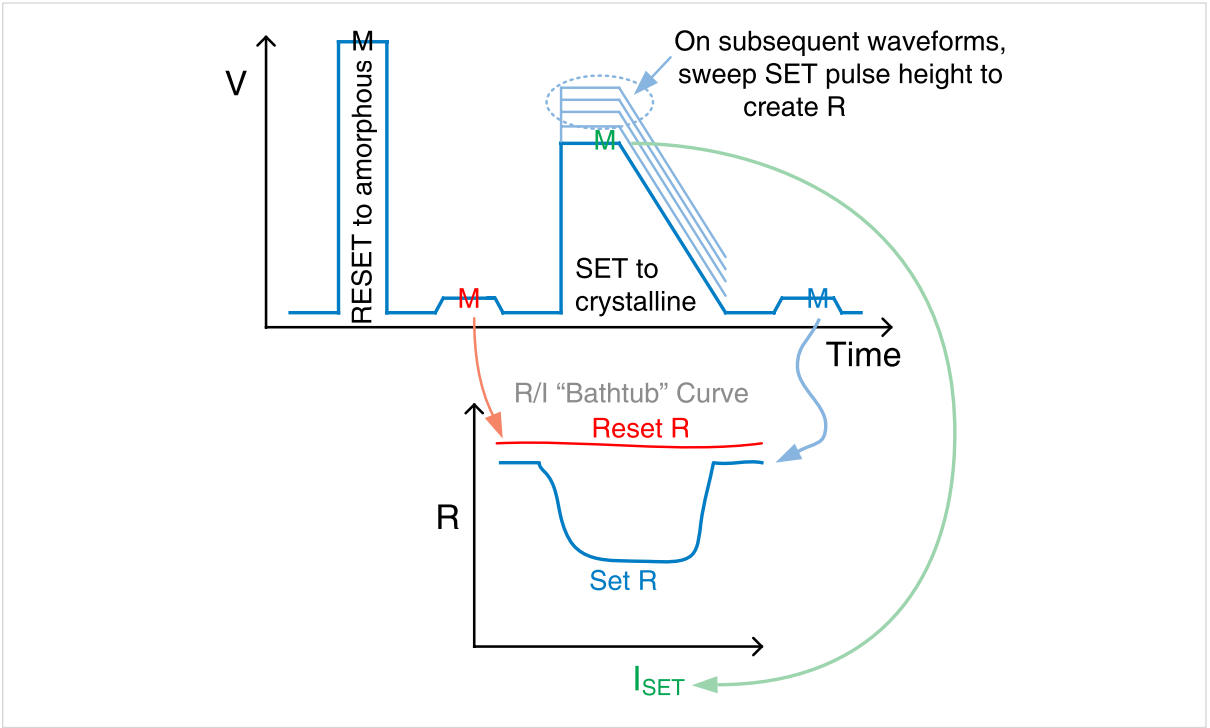


图 25. 这个图解释了怎样使用各种测量确定 R-I 曲线。在测量 RESET 电阻 (红色 M)、SET 电流 (绿色 M) 和 SET 电阻 (蓝色 M) 的同时, 会扫描 SET 曲线。

I-V 扫描测试使用单个倒 V 形脉冲，捕获 PRAM 开关特点。由于这项测试使用 V 和 I 采样的脉冲，因此有两种方式查看数据。**图 21** 显示了波形数据，包括电流和电压相对于时间关系图。这并不是显示特点的典型方式，但显示了测试执行方式。第二个图 (**图 22**) 显示了典型的 PRAM I-V 曲线 (电流相对于电压关系)。

R-I 曲线是一种典型的变相测量。在测量 RESET 和 SET 电阻值的同时，会提高 SET 脉冲电压。**图 23** 显示了 R-I 中一个点的 4 脉冲波形。对这条曲线取即期中位数 (绿框)，捕获 R-I 曲线的测量 (**图 24**)。注意，传统上 RESET 电阻是与 SET 电阻一起显示的，尽管 RESET 脉冲在整个扫描中不变，而这会导致 RESET R

变成一条直线。绘制 RESET R 图会指明 RESET 脉冲在每个 SET 脉冲后是否充分重设材料。**图 25** 显示了波形测量怎样与 R-I 结果对映。某些测试系统可能会使用 SMU 仪器进行电阻测量，但这要求额外的开关，测试时间大大延长。PMU+RPM 相结合，可以在多个测试点上同时测量电压和电流，在保证正确测量的同时提供足够的灵活性。

PRAM 耐受性测试在每 log n 个迭代中应用 RESET+SET 波形 (**图 23**)，测量 SET 电阻。**图 26** 显示了耐受性曲线实例。这个例程还测量 RESET 电阻，因此在需要时也可以绘制图表。

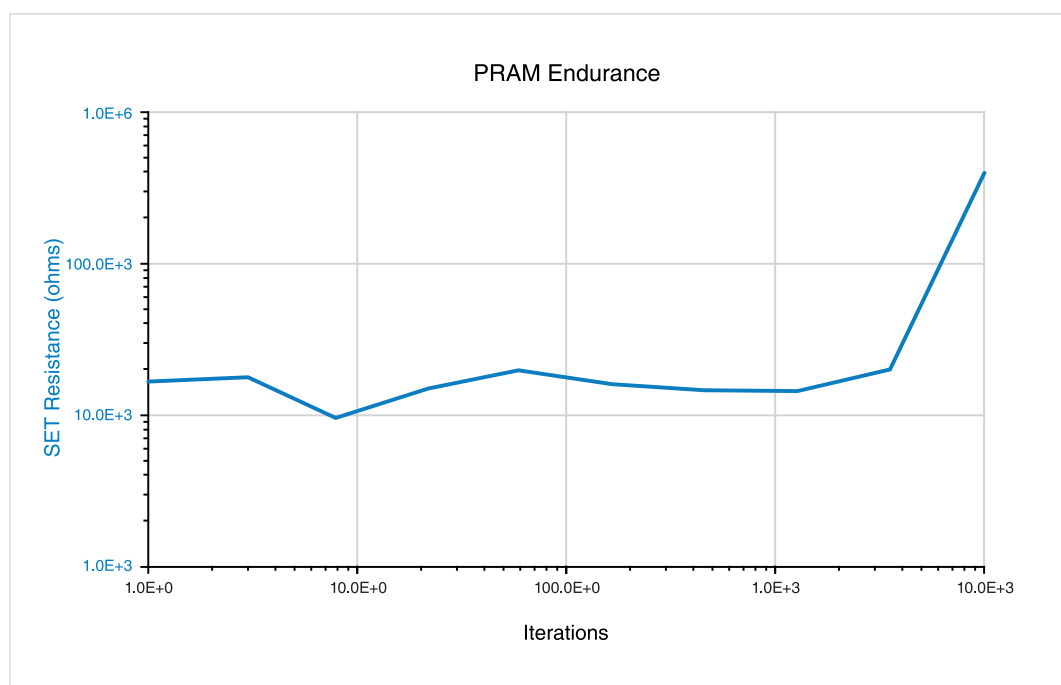


图 26. 4225-PMU 及 4225-RPM (用户模块 pramEndurance) 生成和测量的 PRAM 耐受性曲线。

PRAM 测试模块

变相材料或器件测试有三个模块：doubleSweep、pramSweep 和 pramEndurance，其中使用一个 4225-PMU 和两个 4225-RPM。doubleSweep 模块应用一个 V 形脉冲，同时采样电压和电流。

设置 doubleSweep 和 doubleSweepSeg 模块中的参数

表 6 列出了 doubleSweep 模块的输入参数，它用一个 4225-PMU 和两个 4225-RPM 执行瞬态 I-V 扫描，从一个或两个 V 形脉冲中绘制 I-V 样本图 (图 27)。这个模块用于各种 NVM 技术，不管是单极 (V1 和 V2 +V) 还是双极 (V1 = +V, V2 = -V)。在 PRAM 中，只使用第一个脉冲，所以 V2 = 0。

表 6. doubleSweep 和 doubleSweepSeg 模块中的参数。

参数	范围	说明
riseTime	20ns ~ 33ms	脉冲的跃变时间
V1	-10V ~ +10V	第一个脉冲的电压幅度
V2	-10V ~ +10V	第二个脉冲的电压幅度
lrange1	100nA ~ 10mA	RPM1 电流测量范围 (RPM1 强制电压)
lrange2	100nA ~ 10mA	RPM2 电流测量范围 (RPM2 测量电流)

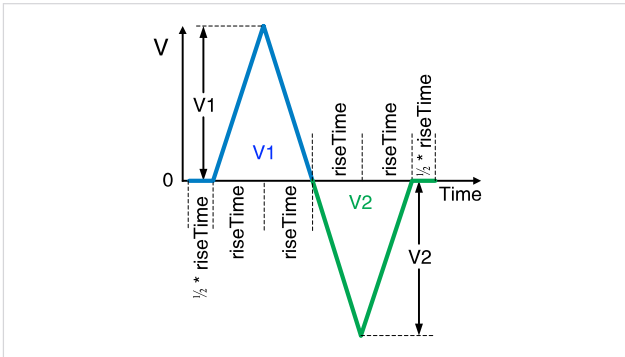


图 27. doubleSweep 的多脉冲波形。

这项测试返回两个波形：RPM1 上的电压波形，RPM2 上的电流波形 (参见图 19 中的连接图)。注意，V1 和 V2 可以是任意极性。脉冲的基本电压是 0V。返回的数据是来自 RPM1 的电压 (V_{FORCE}) 和来自 RPM2 的电流 (I_{MEAS})。数据可以绘制成相对于时间关系图 (图 21，只显示 V1)，也可以绘制成 I-V (图 22)。doubleSweep 和 doubleSweepSeg 的区别在于，doubleSweepSeg 模块作为单独的阵列返回上下段，允许用单独的颜色绘制曲线的每个部分，帮助区分每个部分对磁带或其他相对复杂的 I-V 结果的作用。图 22 显示了这个例程实例，其中上扫用绿色表示，下扫用蓝色表示。

对 FeRAM，会同时使用两个脉冲 (图 31)。这个模块也用于 ReRAM、CBRAM 及其他传导桥或离子传送技术的材料表征，许多都基于过渡金属氧化物 (TMO) 材料。这项测试返回的数据可以用来创建“蝴蝶”曲线，这是 TMO ReRAM 表征使用的标准技术。

设置 pramSweep 模块中的参数

表 7 列出了 pramSweep 模块的输入参数。这个模块从 setStartV 到 setStopV 执行 SET 电压幅度扫描，步进数由参数迭代设置。图 28 显示了波形图。在扫描的每一步中，都会从 RPM1 上的电压波形及 RPM2 上的电流波形中提取多项测量 (图 28 中的绿框)：RESET 电阻 (测量 RESET 脉冲后的单元电阻)，SET 电阻 (测量 SET 脉冲后的单元电阻)，Set V 和 Set I

(SET 脉冲顶部的电流和电压)。测量从脉冲顶部 30% ~ 90% 中提取 (图 28 中的绿框)，避免电流设置问题，提供相对较宽的窗口，降低测量中的噪声。除每次扫描的标量测量 (Reset R, Set V, Set I, Set R) 外，这个例程还从扫描的一个步进中返回一个电流和电压波形。选择捕获和返回哪个波形由 iteration 值设定。

表 7. pramSweep 模块中的参数。

参数	范围	说明
<i>riseTime</i>	20ns ~ 10ms	RESET 脉冲的上升时间和下降时间
<i>resetV</i>	-10V ~ +10V	RESET 脉冲的电压
<i>resetWidth</i>	20ns ~ 1s	RESET 脉冲的脉冲顶部宽度
<i>measV</i>	-10V ~ +10V	测量 V 脉冲的电压
<i>measWidth</i>	20ns ~ 1s	测量 V 脉冲的脉冲顶部宽度
<i>Delay</i>	20ns ~ 1s	脉冲之间的延迟时间及测量脉冲的上升 / 下降时间
<i>setWidth</i>	20ns ~ 1s	SET 脉冲的脉冲顶部宽度
<i>setFallTime</i>	20ns ~ 10ms	SET 脉冲的下降时间
<i>setStartV</i>	-10V ~ +10V	SET 脉冲幅度扫描的开始电压
<i>setStopV</i>	-10V ~ +10V	SET 脉冲幅度扫描的停止电压
<i>lrange1</i>	100 nA ~ 10 mA	RPM1 的电流测量范围 (RPM1 强制电压)
<i>lrange2</i>	100 nA ~ 10 mA	RPM2 的电流测量范围 (RPM2 测量电流)
<i>iteration</i>	1 ~ 10,000	从 SET 扫描中捕获哪个波形
<i>setR_size,</i> <i>resetR_size,</i> <i>setV_size, setI_size</i>	10 ~ 10,000	SET 扫描中的步长数和测量阵列的大小。所有大小必须设置成相同的值。
<i>pts</i>	10 ~ 10,000	返回的点数

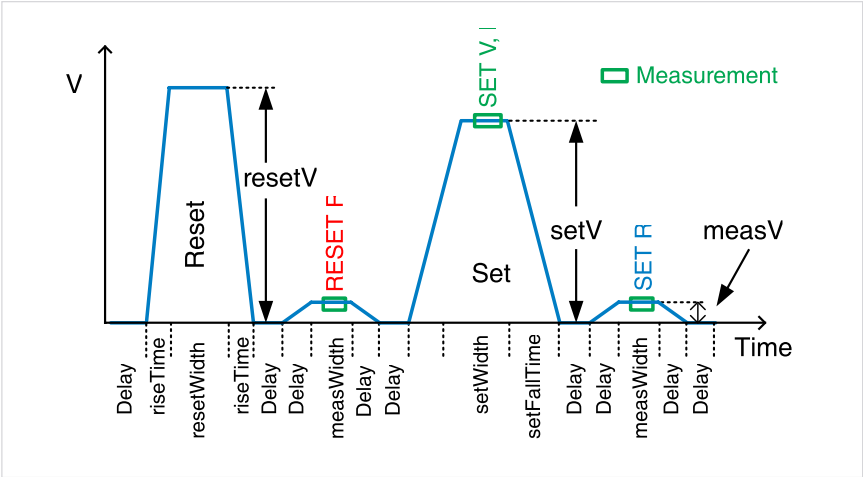


图 28. PRAM 波形定义。

为增强查看电阻变化的能力, >1MΩ 的值设成等于 1MΩ。这可以防止偶尔在量程噪底上进行电流测量时会引起很大的 R 值 (5MΩ ~ 几百 MΩ)。注意, 脉冲顶部测量的大小参数 (setR_size, resetR_size, setV_size, setI_size) 都必须设置成相同的值 (setR_size = resetR_size = setV_size = setI_size)。类似的, 对采样波形阵列, 大小必须设置成相同的值 (VForce_size = IMeas_size = Time_size)。

表 8. pramDurance 模块中的参数。

参数	范围	说明
<i>riseTime</i>	20ns ~ 10ms	RESET 脉冲的上升时间和下降时间
<i>resetV</i>	-10V ~ +10V	RESET 脉冲的电压高度
<i>resetWidth</i>	20ns ~ 1s	RESET 脉冲的脉冲顶部宽度
<i>measV</i>	-10V ~ +10V	测量 V 脉冲的电压
<i>measWidth</i>	20ns ~ 1s	测量 V 脉冲的脉冲顶部宽度
<i>delayT</i>	20ns ~ 1s	脉冲之间的延迟时间及测量脉冲的上升 / 下降时间
<i>setWidth</i>	20ns ~ 1s	SET 脉冲的脉冲顶部宽度
<i>setFallTime</i>	20ns ~ 10ms	SET 脉冲的下降时间
<i>setV</i>	-10V ~ +10V	SET 的电压高度
<i>Irange1</i>	100nA ~ 10mA	RPM1 的电流测量范围 (RPM1 强制电压)
<i>Irange2</i>	100nA ~ 10mA	RPM2 的电流测量范围 (RPM2 测量电流)
<i>max_loops</i>	1 ~ 10 ¹²	应用到测试器件的最大 Reset+Set 波形数量
<i>setR_size, resetR_size, setI_size, iteration_size</i>	2 ~ 10,000	返回的测量的阵列大小。所有大小必须设置成相同的值。

FeRAM 材料测试

铁电非易失性内存表征项目拥有 FeRAM (或 FRAM) 和独立式 (1C) 器件中使用的两端子铁电材料的多项测试, 如图 29 所示。图 30 显示了连接图。为获得最佳测量, 连接使用“优化测量”部分描述的源高测量低方法。

设置 pramDurance 模块中的参数

表 8 列出了 pramEndurance 模块的输入参数。这个模块对 PRAM 单元进行压力测试, 它应用 RESET+SET 波形 (图 28) max_loops 次, 测量 RESET 和 SET 电阻。压力 / 测量周期数量由 iteration_size 值确定, 其在 max_loops 内部以 log10 间隔发生。

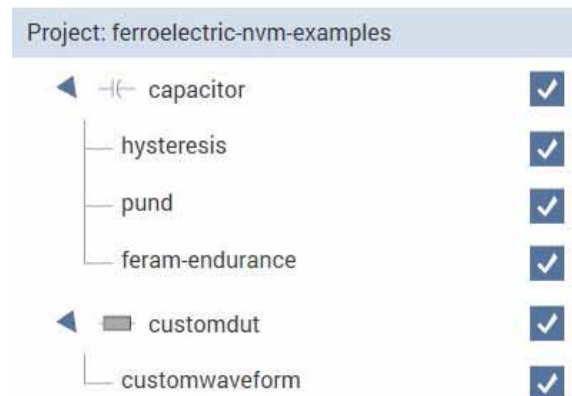


图 29. FeRAM 器件测试。

这些测试要求以下硬件：

- 4200A-SCS
- 一个 4225-PMU 及两个 4225-RPM

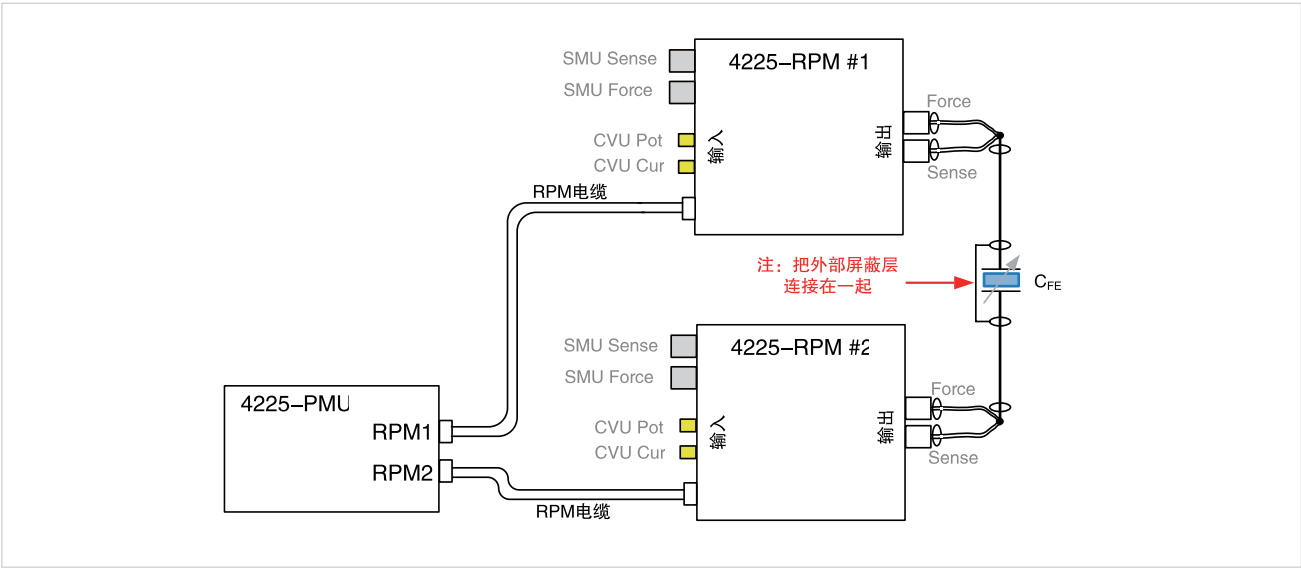


图 30. FeRAM 测试连接图。注意 FeRAM 测试不使用 SMU 或 CVU。

FeRAM 内存效应依赖电容器中的电荷存储，但使用铁电层，而不是典型电容器的电介质层。FeRAM 内存机制基于铁电材料中的偏振位移^[9, 10, 11, 12]。铁电材料在应用的电场 (E) 和偏振 (P) 之间存在着强烈的非线性相关关系。在电场达到临界水平时，晶相结构内部的离子从一种状态位置移动到另一个位置。这种位移会伴随着铁电域墙壁位移。在电气上，它用磁滞图表示 (图 32)，显示电场和偏振之间的相关性。一种状态与另一种状态之间的切换由磁滞面积表征，其表示在再偏振过程中移动的电荷数量。

表征铁电电容器的挑战在于，基础特点是铁电材料偏振状态开关，这要求在变化时测量电容器上的偏振电荷。一般来说，测试中会使用负载电容器、脉冲发生器和示波器，通常在 Sawyer-Tower 电路中进行。在这种方法中，可以使用示波器或采样器，透过负载电容器测量瞬态电压，这代表着流进 FE 材料中的电荷。但是，这种方法有几个缺点。

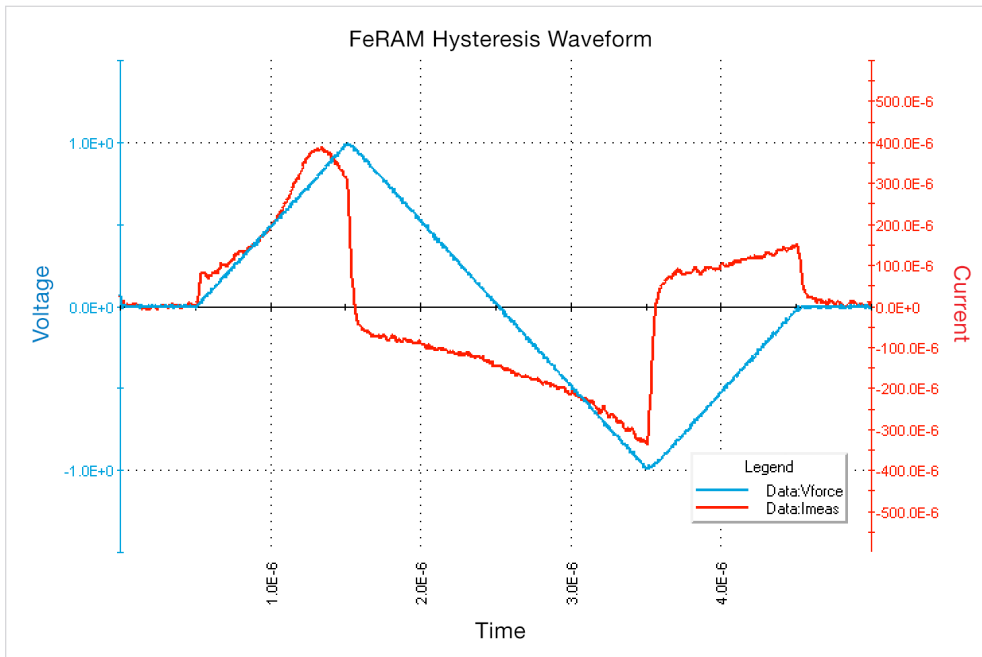


图 31. 4225-PMU 及 4225-RPM (用户模块 doubleSweepSeg) 生成和测量的磁滞波形。这个图显示了应用到 FE 电容器的电压波形 (蓝色)。红色曲线显示了电流流动。图 32 显示了典型的磁滞电荷相对于电压关系曲线。

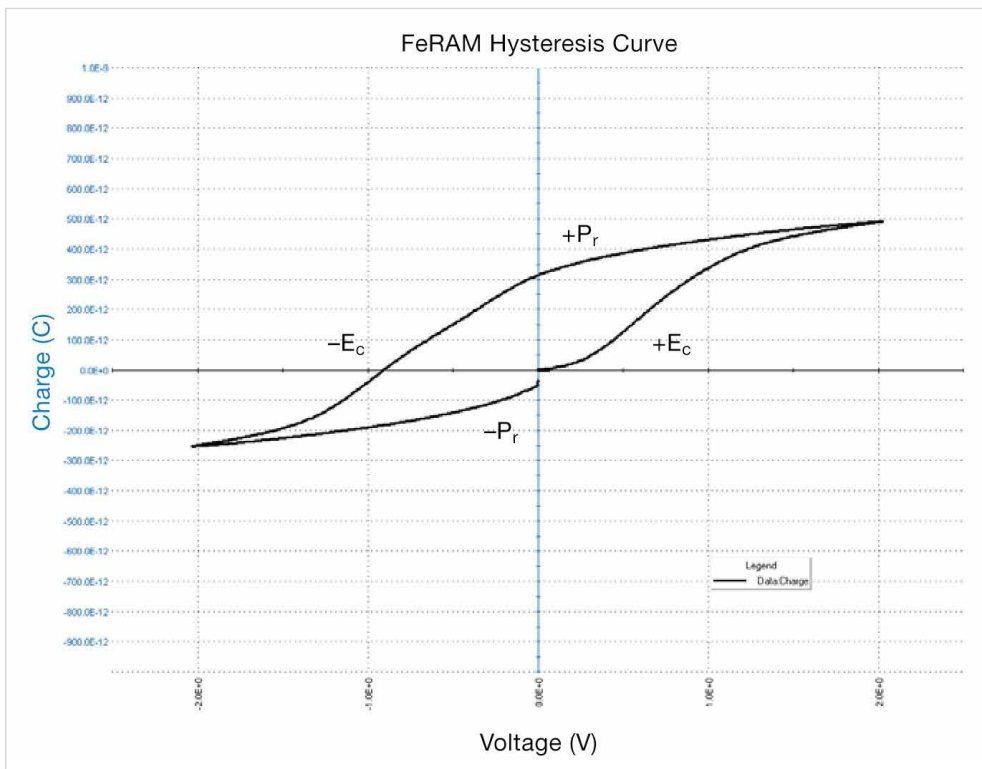


图 32. 4225-PMU 及 4225-RPM (用户模块 double SweepSeg) 生成和测量的磁滞曲线。这个图显示了透过材料的电压变化时极性电荷变化。 E_c 是矫顽磁场, P_r 是剩余极化, 这些都是表明 FeRAM 性能的关键参数。良好的非泄漏器件上正确的测试参数应显示完整的环路, 起点和终点都在 0V。

与 FE 电容相比，负载电容必须相对较大，以保证透过负载电容器的电压下跌不明显，否则必须应用一些略微不令人满意的假设，获得透过 FE 单元的电压。但是，这种大的负载电容意味着传感电压相当小。这种小的电压使用示波器或模数转换器是很难准确测量的。PMU+RPM 解决方案不要求负载电容器方法，因为它直接同时测量电流和电压，因此可以准确确定总电荷。电荷从高速电流测量中计算得出，电流在测量期间以一致的方式采样，得到高速电荷测量。注意，报告的值是电荷，而不是每单位面积电荷。然而，通过使用 Formulator，可以从提供的电荷值中简便地计算出每单位面积电荷。

FeRAM 单元在很大程度上与 PCRAM 和其他 NVM 材料一样，要求成形步骤或流程，然后单元才会显现可复现的开关特点。可以使用 PUND 或 FERAM 耐受性测试，应用成形脉冲。在成形要求的脉冲数量较小时，

PUND 测试是合适的；而在要求的脉冲数量较多时，最好进行耐受性测试。磁滞曲线可以指明测试器件是否充分成形（参见图 32 中 0V 处的缺口）。

PUND 测试表征铁电材料中的极性变化。之所以称为 PUND，是因为顺序应用四个脉冲：

正 (Positive)，上 (Up)，负 (Negative)，下 (Down) (图 33)。注意两个上脉冲 (红色 P 和红色 U) 之间的电流形状变化，两个下脉冲 (红色 N 和红色 D) 类似。第一个脉冲要求额外的电荷 / 电流改变偏振 (红色 P 或红色 N)，第二个脉冲只有电容充电 (红色 U 或红色 D)。这两个脉冲之差 (P-U 或 N-D) 代表着偏振电荷或内存效应。 P_{sw} 是脉冲期间的偏振变化 ($P_{sw} = \text{红色 P} - \text{红色 U}$)。 Q_{sw} 是来自两个极性的两个电荷的平均数 (两个上脉冲和两个下脉冲， $Q_{sw} = ((\text{红色 P} - \text{红色 U}) + (\text{红色 N} - \text{红色 D})) / 2$)。除基础器件和材料表征外，PUND 测试还用来为耐受性测试确定正确的电压和定时。

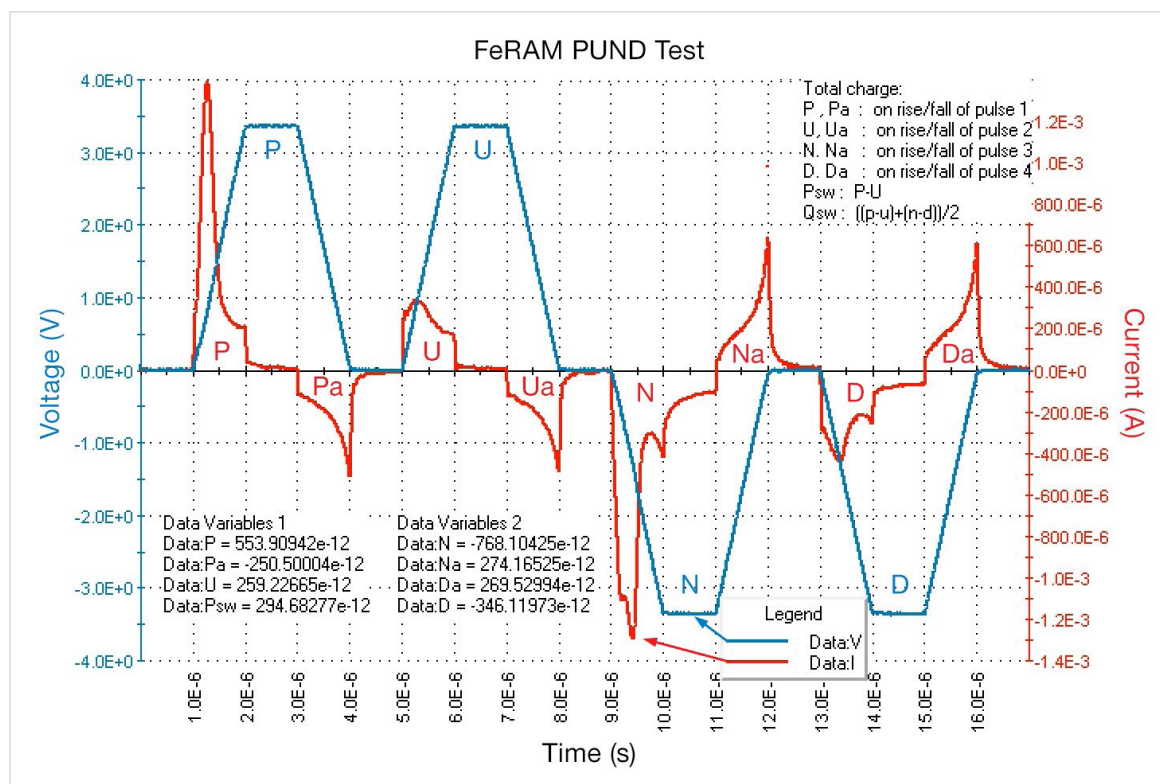


图 33. 4225-PMU 及 4225-RPM (用户模块 pundTest) 生成的测量的 PUND 波形。这个图表显示了应用的电压脉冲及电流响应。P、U、N 和 D 值都从电流波形中提取得出。

耐受性测试显示偏振电荷随着应用的脉冲数量提高而下降。对某些器件，偏振电荷在初始脉冲压力过程中可能会略微提高，然后在压力数量大大提高时下降^[13]。图 34 显示了 Q_{SW} 和 P_{SW} 范例结果。 Q_{SW} 在 1100 万周期开始劣化。劣化开端与脉冲幅度强相关，因此不同的材料和 PUND 电压会提供明显不同的劣化曲线。图 35 显示了 P、U、N、D 的电荷变化，决定了图 34 中所示的数据。

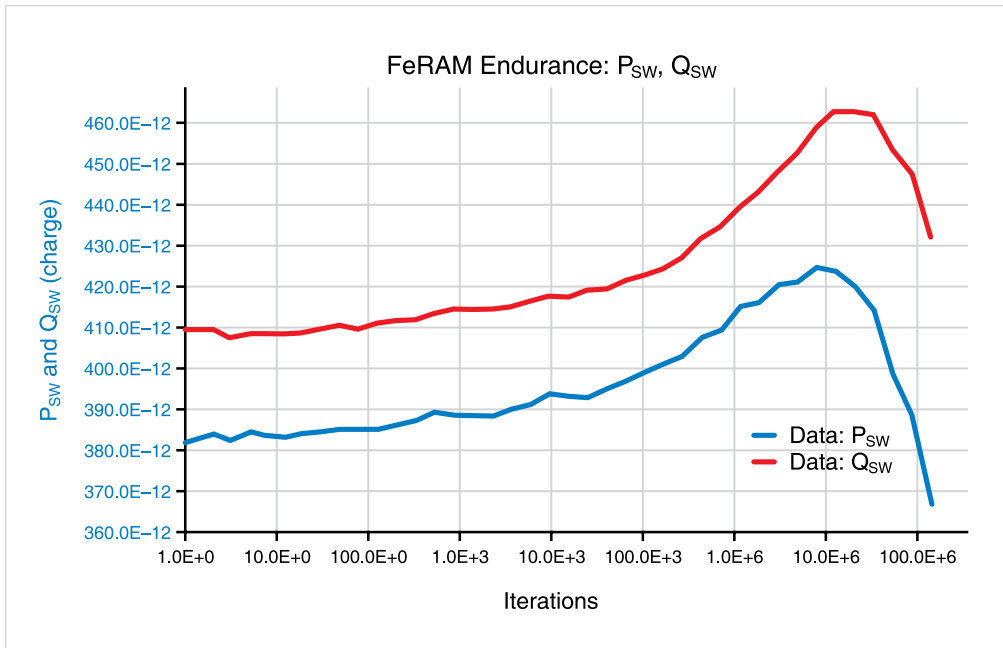


图 34. FeRAM 耐受性，显示 P_{SW} 和 Q_{SW} 劣化 (用户模块 pundEndurance)。某些 FeRAM 耐受性曲线只显示 Q_{SW} 。这些数据是由 4225-PMU 及 4225-RPM 获得的。

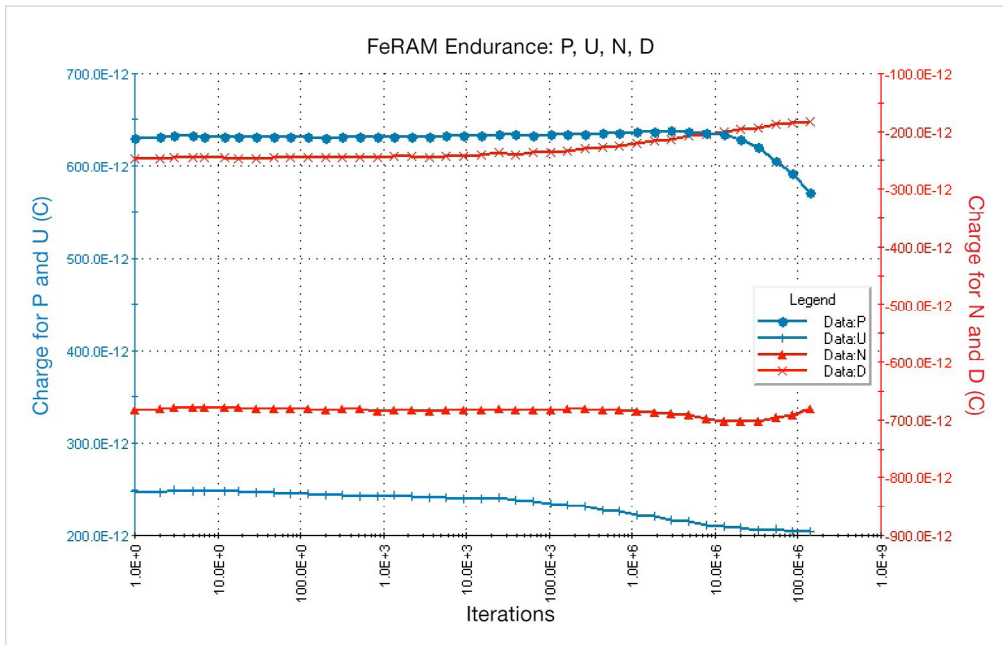


图 35. FeRAM 耐受性，显示了 P、U、N、D 值劣化 (用户模块 pundEndurance)。这些数据用来创建图 34 中的数据。这些数据是由 4225-PMU 及 4225-RPM 获得的。

FeRAM 测试模块

铁电材料或器件测试模块有三个：doubleSweep，pundTest，pundEndurance。

设置 doubleSweep 模块中的参数

这个模块与 PRAM 测试 iv-curve 中使用的模块相同。但是，PRAM 测试只使用其中一个 V 形脉冲，而 FE 电容器磁滞测试则使用两个脉冲（图 27 显示了定义，图 31 和图 32 显示了 FeRAM 测试结果）。表 6 列出了 doubleSweep 模块的输入参数。

设置 pundTest 模块中的参数

这个模块应用构成 PUND 测试的 4 个脉冲，表 9 和表 10 简要介绍了其参数。这项测试使用两个 4225-RPM 连接到 4200A-SCS 机箱中第一个 4225-PMU（图 30）。RPM1 输出电压脉冲，测量应用的电压。RPM2 测量流经测试器件的电流。返回的值包括电压（来自 RPM1）、电流（来自 RPM2）和时间阵列。此外，还会返回每个脉冲跃变的电荷。图 36 显示了脉冲参数定义。

表 9. pundTest 模块中的输入参数。

参数	范围	说明
V_p	-10V ~ +10V	4 个 PUND 脉冲的电压电平。第一个和第二个脉冲是 $+V_p$ ，第三个和第四个脉冲是 $-V_p$ （图 36）
t_p	20ns ~ 1s	每个脉冲顶部的宽度
t_d	20ns ~ 1s	每个脉冲之间的延迟时间
trf	20ns ~ 10ms	所有脉冲的脉冲跃变时间
I_{range1}	100nA ~ 10mA	RPM1 的电流测量范围（RPM1 强制电压）
I_{range2}	100nA ~ 10mA	RPM2 的电流测量范围（RPM2 测量电流）

表 10. pundTest 模块中的输出参数。

参数	类型	说明
V	双阵列	PUND 波形电压测量阵列
I	双阵列	PUND 波形电流测量阵列
t	双阵列	PUND 波形时间标记阵列
P	双	脉冲 1 上升沿上的总电荷
P_a	双	脉冲 1 下降沿上的总电荷
U	双	脉冲 2 上升沿上的总电荷
U_a	双	脉冲 2 下降沿上的总电荷
N	双	脉冲 3 上升沿上的总电荷
N_a	双	脉冲 3 下降沿上的总电荷
D	双	脉冲 4 上升沿上的总电荷
D_a	双	脉冲 4 下降沿上的总电荷
P_{sw}	双	偏振电荷，定义为 $P - U$
Q_{sw}	双	平均偏振电荷： $((p-u)+(n-d))/2$
pts	双	记录的总点数

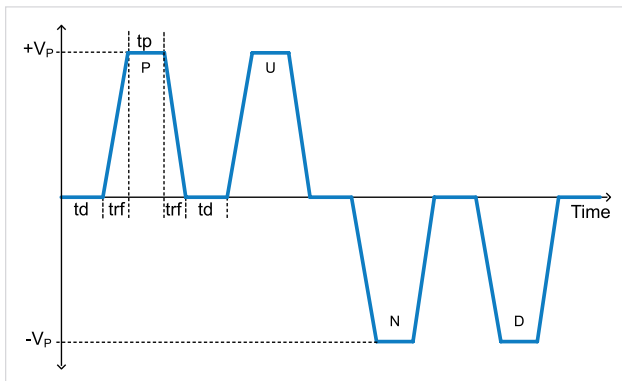


图 36. pundTest 的脉冲波形参数。

设置 pundEndurance 模块中的参数

这个模块是一项压力 / 测量测试，对测试器件应用构成 PUND 测试的 4 个脉冲 max_loops 次，表 11 和表 12 简要介绍了相关参数。在应用压力 PUND 波形 max_loops 次时，测量间隔数量由 fatigue_count 设置。每项测量之间的压力波形数量在 log10 基础上计算。返回的参数与 pundTest 类似，图 36 显示了脉冲参数定义。

表 11. pundEndurance 模块中的输入参数。

参数	范围	说明
V_p	-10V ~ +10V	4 个 PUND 脉冲的电压电平。第一个和第二个脉冲是 $+V_p$ ，第三个和第四个脉冲是 $-V_p$
V_{fat}	-10V ~ +10V	疲劳波形两个脉冲的电压脉冲电平。第一个脉冲是 $+(V_p)$ ，最后一个脉冲是 $-(V_p)$
T_p	20ns ~ 1s	每个脉冲顶部的宽度
t_d	20ns ~ 1s	每个脉冲之间的延迟时间
trf	20ns ~ 10ms	所有脉冲的脉冲跃变时间
I_{range1}	100nA ~ 10mA	RPM1 的电流测量范围 (RPM1 强制电压)
I_{range2}	100nA ~ 10mA	RPM2 的电流测量范围 (RPM2 测量电流)
$pts_per_waveform$	10 ~ 10,000	每个 PUND 测量波形的测量点数
max_loops	1 ~ 10^{12}	对测试器件应用的压力波形总数
$fatigue_count$	2 ~ 100	max_loops 期间的测量间隔数

表 12. pundEndurance 模块中的输出参数。

参数	类型	说明
Iteration	整数: 1 ~ 100	测量间隔数，必须大于等于 fatigue_count
P	双	脉冲 P 上升沿上的总电荷
P_a	双	脉冲 P 下降沿上的总电荷
U	双	脉冲 U 上升沿上的总电荷
U_a	双	脉冲 U 下降沿上的总电荷
N	双	脉冲 N 上升沿上的总电荷
N_a	双	脉冲 N 下降沿上的总电荷
D	双	脉冲 D 上升沿上的总电荷
D_a	双	脉冲 D 下降沿上的总电荷
P_{sw}	双	偏振电荷，定义为 $P-U$
Q_{sw}	双	平均偏振电荷: $((p-u)+(n-d))/2$

ReRAM 和 CBRAM 测试

如前所述，ReRAM 和 CBRAM 都属于 Redox 内存 [14]。ReRAM 和 CBRAM 一般都在 DC 领域中使用 SMU 仪器测试，但 SMU 仪器可能并不是某些内存类型的最佳测试仪器。

在传统 ReRAM 测试设置中，为在开始时创建或形成低电阻状态，可以使用 SMU 仪器电流一致性功能，限制成形或重设操作期间流经测试器件的最大电流。最好限制电流数量，降低单元上的压力，并改善开关流程质量。但是，SMU 仪器中的一致性电路并不是即时的，需要用几微秒到几毫秒才能全面操作。在电路激活前，流经的电流数量并不是完全已知或可控。电流一致性的实际瞬态响应及测试器件阻抗变化与 SMU 仪器反应之间的详细相互作用非常复杂，了解起来并不容易。

脉冲 I-V 表征通过严格控制应用到测试器件的电压信号定时，改善了这种情况。可以使用电阻非易失性内存表征项目中的测试，来表征 ReRAM 和 CBRAM。

项目中显示了 ReRAM 器件结果。ReRAM 内存器件是两端子器件，有一个“低”侧和一个“高”侧。透过氧化物应用一个电压脉冲，根据主流资料，这会产生导电丝。导电丝产生过程称为“成形”，被视为决定 ReRAM 开关特点的最重要方面。成形通常使用 DC 电压扫描，并启用电流限制完成。

将发生下面的流程，也是公认的流程。在电压上升时，电场会成长。在充分成长后，导电丝开始通过材料从一个电极向相反的电极成长。一旦发生，限流会启动和中止导电丝部分的进一步成长。器件电阻会从高电阻下跌到低电阻，如从几兆欧姆下跌到几千欧姆。按这种解释推断，限流启动速度可能对 ReRAM 成形非常重要，所以值得额外表征。但业内对此还没有达成

共识，因为 DC (SMU 仪器) 限流速度相对较慢，约为 $100\mu\text{s}$ 。

在解决这个问题时，理想的解决方案是设计一种结构，在晶圆上直接带有限流控制晶体管，这可以保证最小寄生电容和最小响应时间。但是，如果晶圆上没有限流功能，那么最好同时使用 SMU 仪器限流和 4225-RPM 限流，以便更好地了解成形机制。

在成形后，应用的 RESET 脉冲会改变结构电阻，从低电阻变成高电阻。这被视为是其中一个电极周围的导电丝毁坏引起的。ReRAM 结构可以是对称的或极性的。极性器件要求特定极性的成形脉冲，有非对称材料布局。对极性器件，Forming (和 Set Pulse) 的极性与 Reset 脉冲相反。

图 37 显示了 ReRAM 测试使用的测试。表征测试是一项标准测试，其中会测试 ReRAM 器件，检验其是否有效及是否能用。

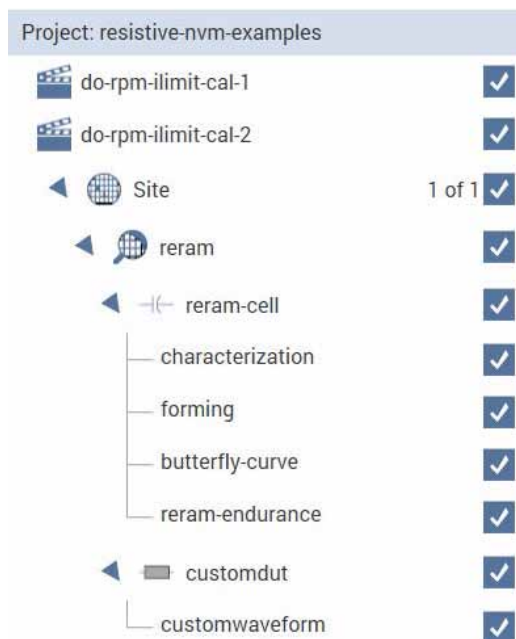


图 37: ReRAM 项目测试截图。

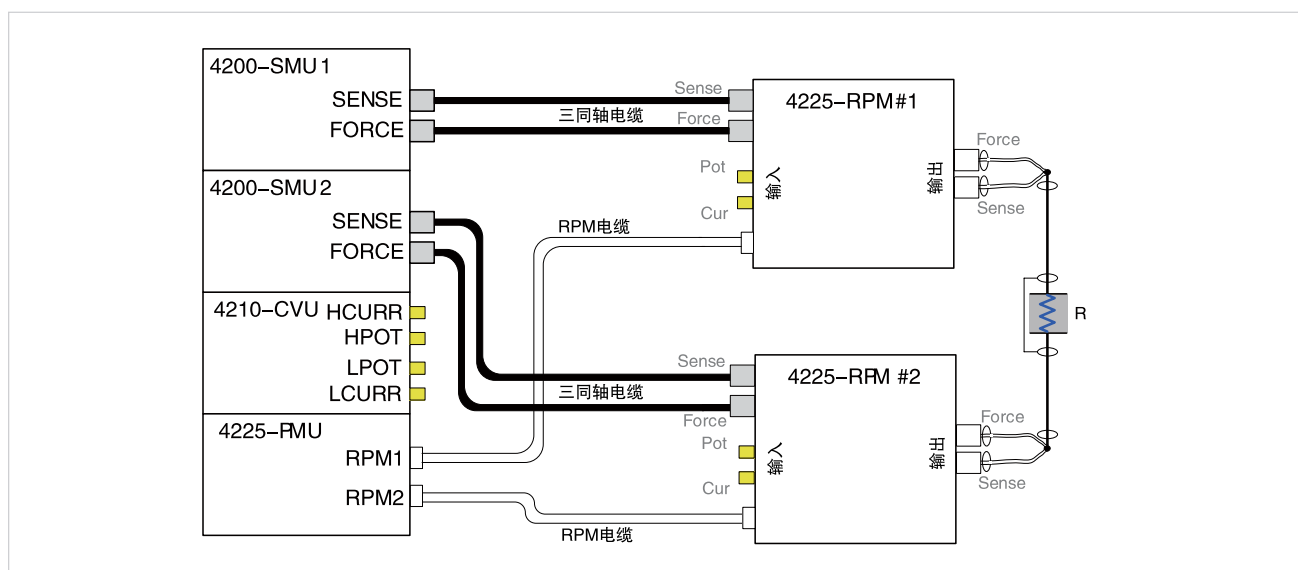


图 38. 两端子 ReRAM 器件连接图。

成形和蝴蝶曲线测试是一个 Set/Reset 序列。reram-endurance 测试是一项耐受性测试。图 38 显示了两端子 ReRAM 器件的连接图，同时显示了脉冲和 SMU 仪器连接。注意如果有一个卡盘或背面连接，请把 RPM #1 连接到这个端子上。

在图 39 中，蓝色曲线使用左面的 y 轴，显示应用到 ReRAM 器件的瞬态电压。红色曲线使用右面的 y 轴，是电流响应。注意 x 轴是时间，在几百微秒。电压幅度是 $\pm 2.3\text{V}$ 。相同的数据也绘制成电流相对于电压关系图，如右面所示。电流与偏置呈指数相关，说明器件还没有成形，可以用来表征。

这些数据使用一个 PMU 和两个 RPMs，并使用测试例程 reramSweep 收集。还可以配置成使用 SMU 仪器收集类似数据。使用 PMU 及 RPM 进行测试与使用 SMU 仪器进行测试有多项主要差异。首先，

SMU 仪器扫描需要的时间明显要长，会长达几秒，而 PMU+RPM 扫描会很快，只有几百纳秒。第二，RPM 限流的速度要比 SMU 仪器快得多。SMU 仪器电流一致性“占用时间”约为 $100\text{--}500\mu\text{s}$ ，具体视特定配置和 SMU 仪器型号而定，而 RPM 限制最快可达几百纳秒，要快大约三个量级。位于晶圆上的控制晶体管在能量控制上要更快更好，但 RPM 限流较 SMU 仪器测试提供了多项研究上的优势。使用 PMU+RPM 提供了相关信息，有助于解决过渡到增加晶圆限流功能时的复杂性及可能的高成本问题。脉冲方法的另一个优势是使用第二条 PMU+RPM 通道，避免电容充电效应，其会在低侧或脉冲传送相对侧测量流经测试器件的电流（图 50）。更快的限流功能也适用于恒定电压压力测试 (CVS)。传统上，CVS 是使用 SMU 仪器执行的，但也可以使用 PMU+RPM 方法完成。

下面详细介绍了脉冲跃变过程中电容充电效应。

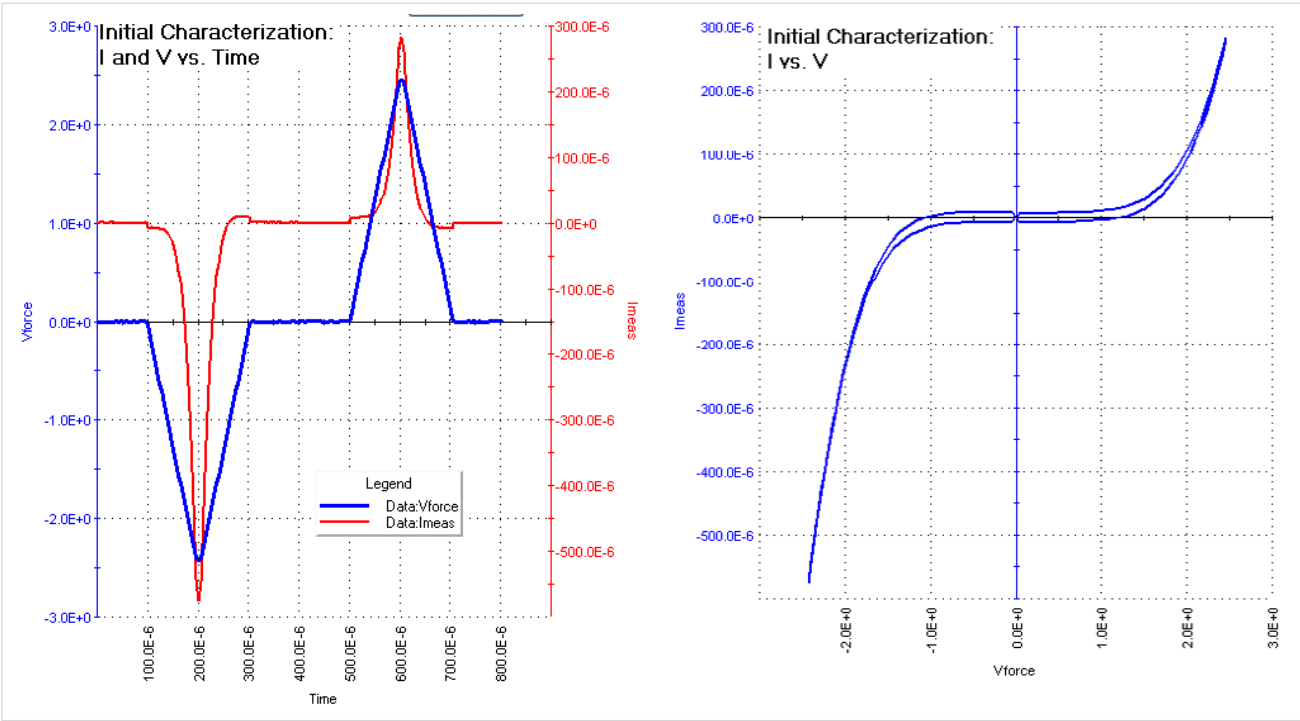


图 39. ReRAM 结构表征测试。

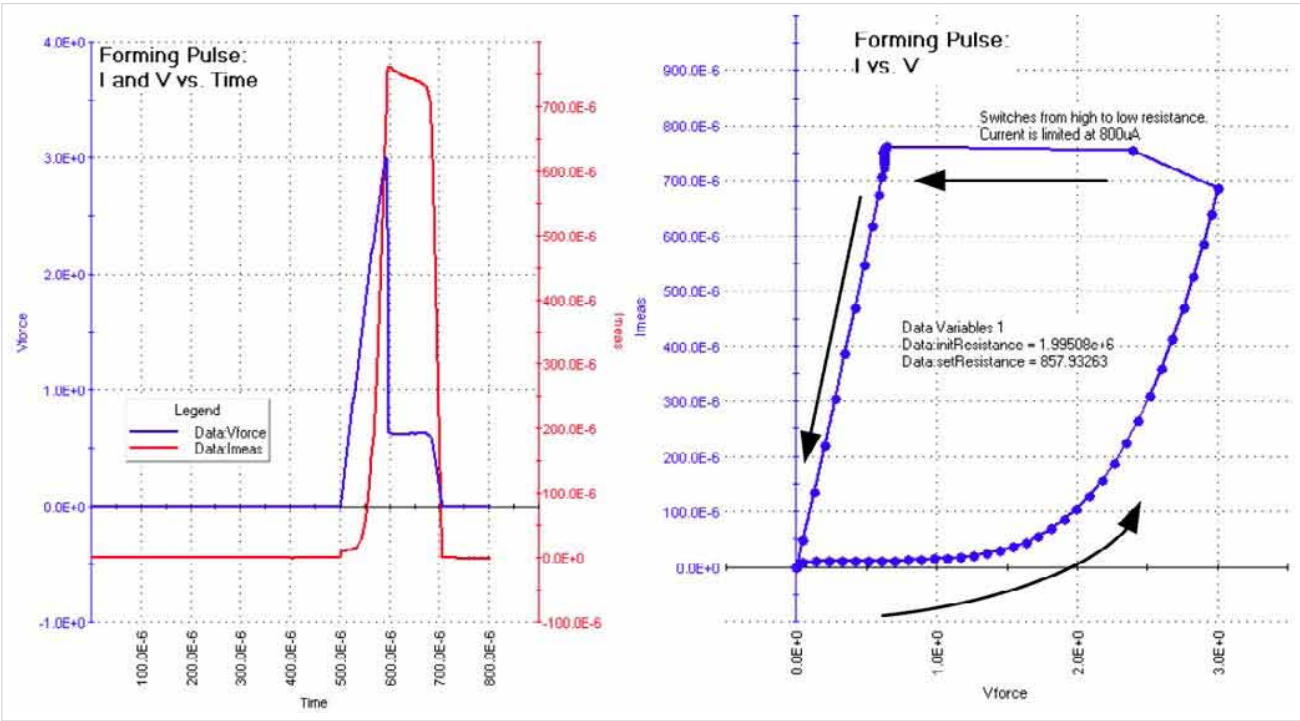


图 40. ReRAM 成形。

图 40 的两个图显示了 ReRAM 成形结果。左图是电压和电流瞬态信号 (V 和 I 相对于时间关系), 右图是相同的数据绘制成电流相对于电压关系。在电压到达某个值时, 电流会呈指数级增长。在细丝建立时, 器件会切换到低电阻状态, 限流会防止细丝进一步成长。成形使用 PMU+RPM, 在启用限流的情况下进行。ReRAM 领域中大多数研究人员使用的标准测试配置, 是使用 DC 仪器、SMU 仪器及电流一致性测试。成形使用 PMU+RPM 进行, 能够在成形过程中测量电流和功率瞬态信号, 这与 SMU 仪器方法不同, 在使用 SMU 仪器成形时, 会完全隐藏工艺的细节。据主流资料, 成形工艺主要受到限流值及其激活速度控制。右

图显示了相同的数据, 但绘制的是电流相对于电压关系。增加的箭头显示了曲线的时间进度, 可以与左面基于时间的图进行对比。

我们把表征和成形使用的相同的测试例程应用到已经成形的器件, 收集“蝴蝶”曲线, 如图 41 所示。如前所述, 左图显示了电流和电压瞬态信号 (I 和 V 相对于时间关系)。右图是蝴蝶翅膀形状的电流相对于电压关系图。例程 reramSweep 相同 [使用固定宽度字体] 但测试条件不同, 可以同时获得 DC (SMU 仪器) 数据和脉冲 (PMU) 数据。这可以在 ReRAM 表征的 DC 和脉冲模式之间方便地切换。

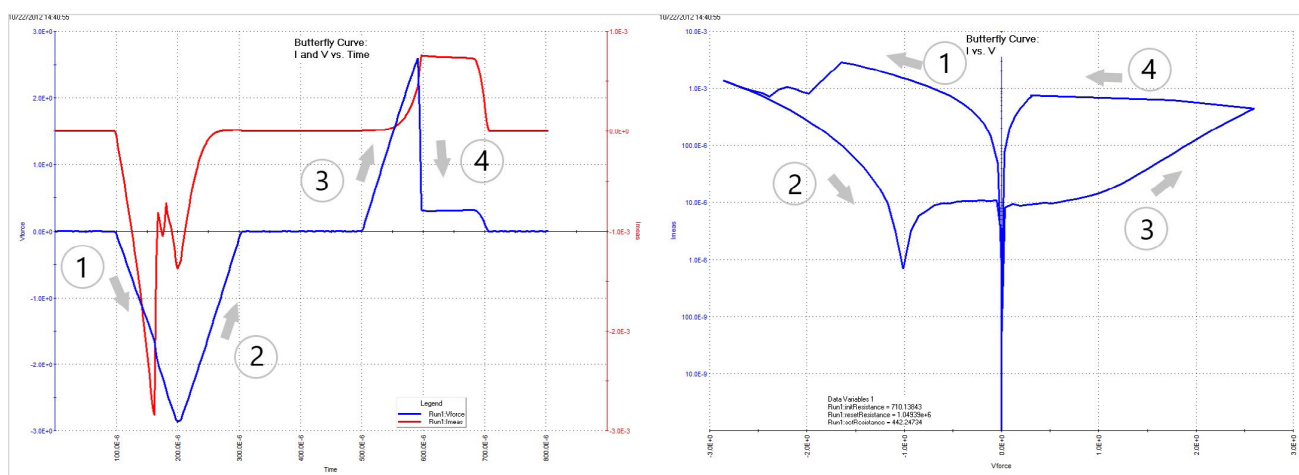


图 41. ReRAM “蝴蝶”曲线。

蝴蝶曲线的左翼是电阻从低电阻状态切换到高电阻状态时的 RESET 跃变, 注意没有启用限流功能。电压极性与成形和 SET 使用的极性相反。在 RESET 过程中, 通常假设导电丝从一个电极到另一个电极会失去连续性, 但这会影响一小段细丝。SET 流程与成形流程非常类似, 它使用相同极性的脉冲, 从一个电极到另一个电极重建导电丝的连续性。由于 SET 偏置不一定长成整个细丝, 而只需重建连接, 所以它要求的偏置要

低于成形流程。SET 程序与成形类似, 要求使用限流功能, 但电流较低。

为 ReRAM 测试选择测试参数时, 包括成形、SET 和 RESET, 应在初始成形和表征时遵守一个逻辑进程。

1. 首先, 在任何成形前, 都要先检验器件是良好的, 表现出非线性 I-V 相关性 (图 39)。在这个初始预选过程中, 应注意使用的电压要低于成形、SET 和 RESET 电压。

- 成形是一个关键流程 (图 40)。应选择最大偏置值，触发细丝生长。同时，限流应足够小，从而防止细线变得太稳定。如果导电丝太稳定，那么多大的 Reset 偏置量都没法断开细丝，在细线中也无法实现充分的电场。RESET 脉冲的电压偏置值应刚好足够断开细丝。
- 与成形类似，SET 偏置的限流应刚好足够重连细丝，但不会太大，而防止在下一个 SET/RESET 周期中“断开”。成形 /SET 和 RESET 参数的选择有点麻烦，要求充分考察，以临界方式控制 ReRAM 器件的耐受性。耐受性定义为 LOW 和 HIGH 电阻状态充分不同时的最大 SET/RESET 周期数。

图 42 提供了一个 ReRAM 结构的耐受性测试实例。ReRAM 耐受性测试与 PRAM、闪存和 FeRAM 耐受性测试类似。在电阻内存中，控制参数是电阻，有高和低两种状态。低电阻对应的状态是导电丝成形并透过氧化物连接相反电极。高电阻对应的状态是一小段细线向回转换到高电阻材料。成形、SET 和 RESET 流程的选择决定着低电阻状态要过多少个周期才能变得与较高电阻状态区分不开，这是确定器件耐受性周期最大周期数的其中一种方式。

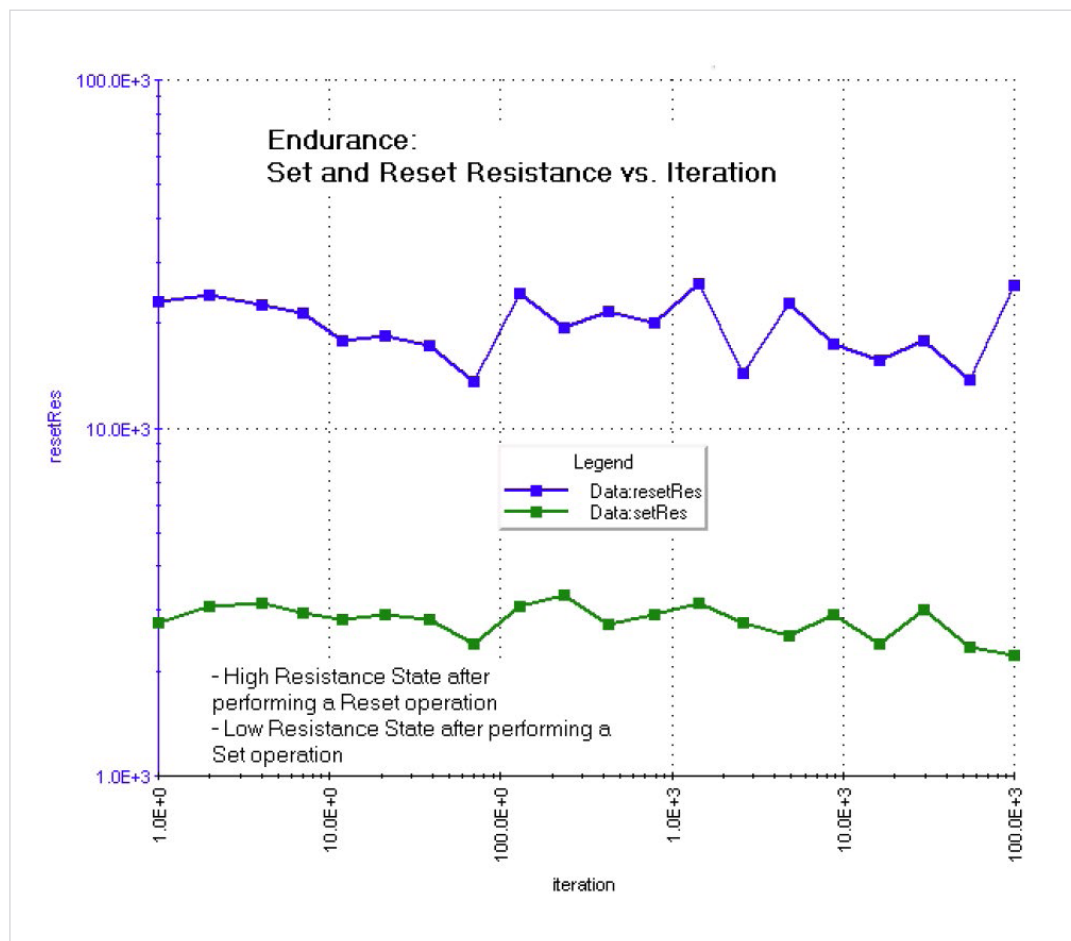


图 42: ReRAM 耐受性测试。

设置 reramSweep 模块中的参数

reramSweep 模块用来执行双扫描，平坦部分在每次扫描的峰值处。在测试 ReRAM 器件时，用户为两个峰值选择相应的值，可正可负，然后设置定时 (图 43, 表 13)。既可以使用 SMU 仪器，也可以使用 PMU 及 2 个 RPM，具体视 useSmu 参数设置而定。器件的 Low 低侧 (图 38) 需要使用 RPM 连接到 PMU

通道 1。如果在 DUT 与基底之间有连接，“Low”低侧是指连接到衬底偏置电位、基底或卡盘的那一侧。SMU1 还连接到通道 1, RPM1。SMU2 连接到通道 2 RPM。电压偏置应用到通道 1，通道 2 保持在虚拟接地电位，然后在通道 2 上测量电流。

表 13. reramSweep 模块中的输入参数列表 (参见图 43)。

参数	范围	说明
<i>riseTime</i>	2e-8s ~ 33 ms	电压上升到 SET 或 RESET 电压所需的时间。这个值受到转换速率限制。如果想达到最慢的上升时间，必需使用更高的电压。
<i>widthTime</i>	2e-8s ~ 1s	脉冲顶部在全部电压时等待的时间
<i>delayTime</i>	20 ns to 1 s	SET 脉冲和 RESET 脉冲之间的时间
<i>compliance</i>	1 或 2	在哪条 SMU 仪器通道上进行电流一致性测试
<i>resetV</i>	-20V ~ 20V	重设脉冲的峰值电压。对 ReRAM 器件，这个值应为负。
<i>setV</i>	-20V ~ 20V	设置脉冲的峰值电压。对 ReRAM 器件，这个值应为正。
<i>Irange</i>	RPM: 100nA ~ 10mA SMU: 10 pA ~ 1A	电流测量范围。SMU 仪器有更多的范围，自动量程也接受 0。
<i>resetIcomp</i>	-100mA ~ +100mA	请注意，RESET 过程中 PMU 和 SMU 仪器控制都使用这个变量。如果它设为 0，那么将不会应用电流限制。如果 useSmu = 1，并使用 SMU 仪器执行扫描，且电流限制为 0，那么将使用自动量程。在电流限制不为零且 useSmu = 1 时，SMU 仪器设置在固定电流范围。
<i>setIcomp</i>	-100mA ~ +100mA	请注意，SET 过程中 PMU 和 SMU 仪器控制都使用这个变量。如果它设为 0，那么将不会应用电流限制。如果 useSmu = 1，并使用 SMU 仪器执行扫描，且电流限制为 0，那么将使用自动量程。在电流限制不为零且 useSmu = 1 时，SMU 仪器设置在固定电流范围。
<i>resTestV</i>	-10V ~ +10V	用来测量器件电阻的 SMU 仪器电压。
<i>takeRmeas</i>	0 或 1	是否获得电阻测量。1 表示是，获得电阻测量；0 表示否，不获得电阻测量。
<i>useSmu</i>	0 或 1	是否使用 SMU 仪器获得 DC 测量，而不是使用 PMU+RPM 进行脉冲传送测量。1 表示是，使用 SMU 仪器；0 表示否，不使用 SMU 仪器，而是使用 PMU。
<i>numIter</i>	1 ~ 100	这个参数应设为 1。
<i>Vforce_size</i> <i>Imeas_size</i> <i>Time_size</i>	10 ~ 10000	这三个值应相同，表示输出阵列中的项目数。

表 14. reramSweep 模块中的输出参数列表。

参数	说明
<i>Vforce</i>	强制电压阵列
<i>Imeas</i>	测量电流阵列
<i>Time</i>	测量次数阵列
<i>resetResistance</i>	重设脉冲后 DUT 的电阻
<i>setResistance</i>	设置脉冲后 DUT 的电阻
<i>initResistance</i>	任何脉冲前 DUT 的电阻

设置 reramEndurance 模块中的参数

reramEndurance 例程用来执行一系列双扫描 (SET+RESET)，使用的参数与 reramSweep 例程中描述的单扫描相同。为测试 ReRAM 器件，为两个峰值选择相应的值，可正可负，然后设置要实现的定时。选择要运行双扫描的次数 (max_loops) 及获得测量的频次 (fatigue_count)。这个例程将使用 log10 方法

在脉冲总数 (max_loops) 中确定测量总数 (fatigue_count) 的分布间隔。例如，如果 max_loops = 10000 和 fatigue_count = 4，那么在对测试器件应用 10 个、1000 个、1000 个、10000 个 SET+RESET 脉冲后，将进行 RSET 和 RRESET 测量。

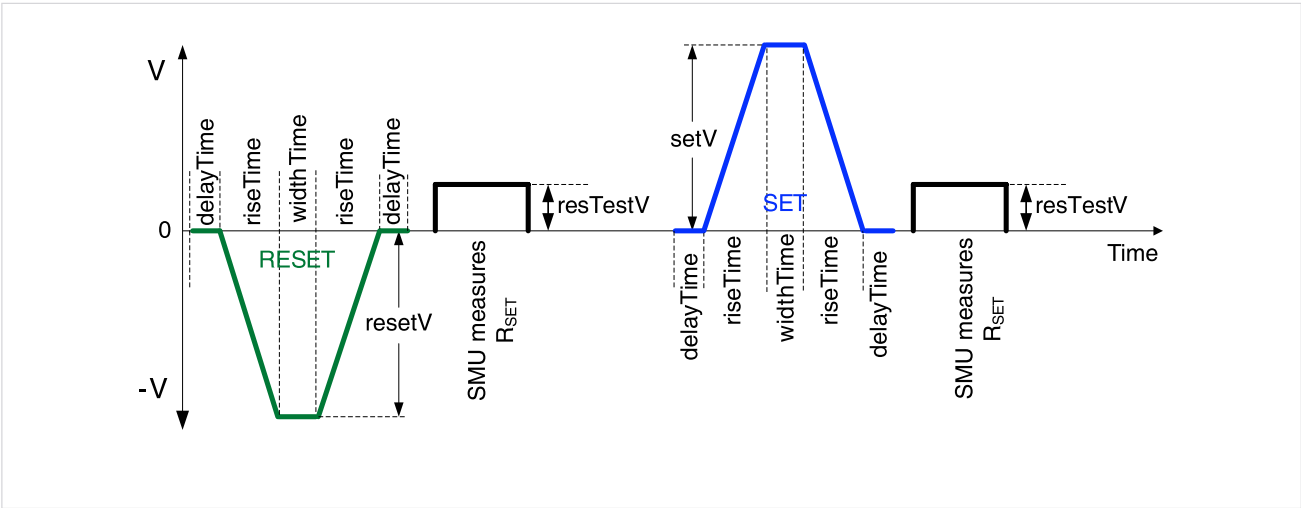


图 43. reramSweep 和 reramEndurance 测量的脉冲波形。

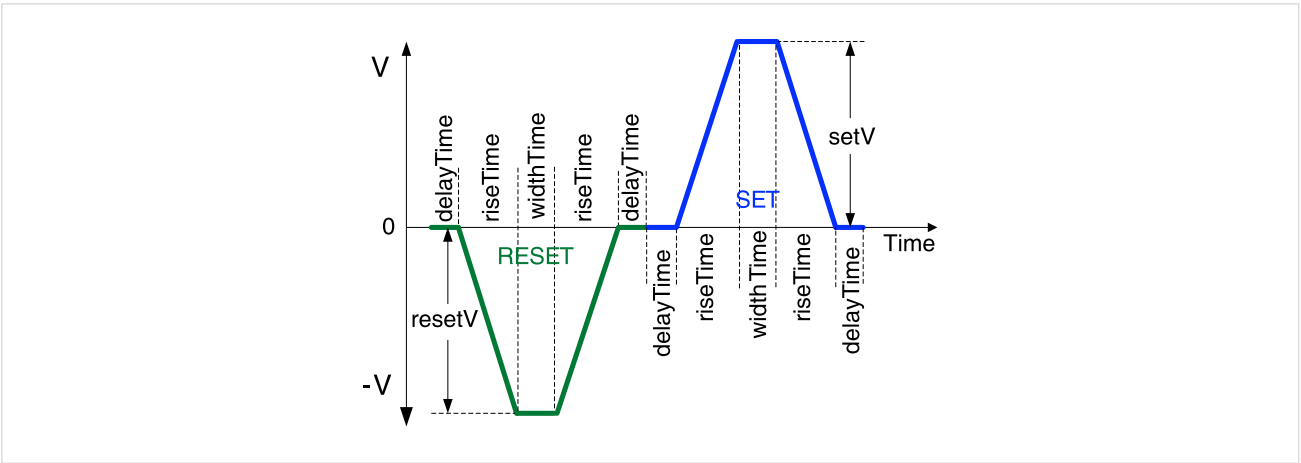


图 44. 压力 reramEndurance 的脉冲波形参数。

RPM 限流校准

脉冲限流功能由 4225-RPM 提供。RPM 到 DUT 的距离短，最大限度地缩短了寄生电容及电流限制激活并有效所需的时间。如上所述，这个时间比典型 DC SMU 仪器的电流一致性激活时间小约三个量级。RPM 限流功能要求初始校准和定期校准。在使用 4225-RPM 的限流功能前，必须先手动进行校准，这可以通过调用例程 Do_RPM_ILimit_Cal (从用户程序库 RMP_ILimit_Control) 来实现。项目树顶部的 ReRAM 和 PRAM 项目中包括这项测试。

注意 4225-RPM-LR 没有限流功能。如果在 4225-RPM-LR 模块上执行限流校准或设置限流，那么会导致错误。

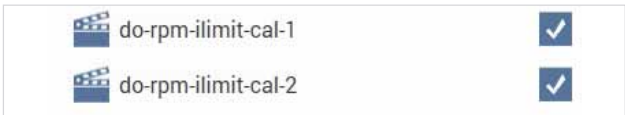


图 45. ReRAM 项目树中的 RPM 电流限制测试。

这里显示了调用两次，来校准两个 RPMs (图 45)。为对 PMU1 的通道 1 执行校准程序，设置例程的输入条件，如图 46 所示，把 SMU2 连接到 RPM1 的强制输出连接器上。为校准通道 2 RPM，使用 do-rpm-ilimit-cal-2 测试 (图 45)，把 SMU1 连接到强制输出连接器 RPM2 上，使用 SMU1 设置参数 smuname。校准质量由称为 PosRsqr 和 NegRsqr 的两个关联系数确定。如果这些数字都接近 1.000，至少前 4 位或 5 位 =9 (图 47，显示 999.990E-3 或 999.999E-3)，那么校准被视为是成功的。校准将由于温度而产生漂移，因此为改善性能，推荐每天进行校准。限流范围是 ~10 μ A 到 10mA。

	Do_RPM_ILimit	PosRsqr	NegRsqr
1	0	999.990E-3	999.996E-3

图 47. RPM 限流校准好的结果实例，如 Sheet 中所示。

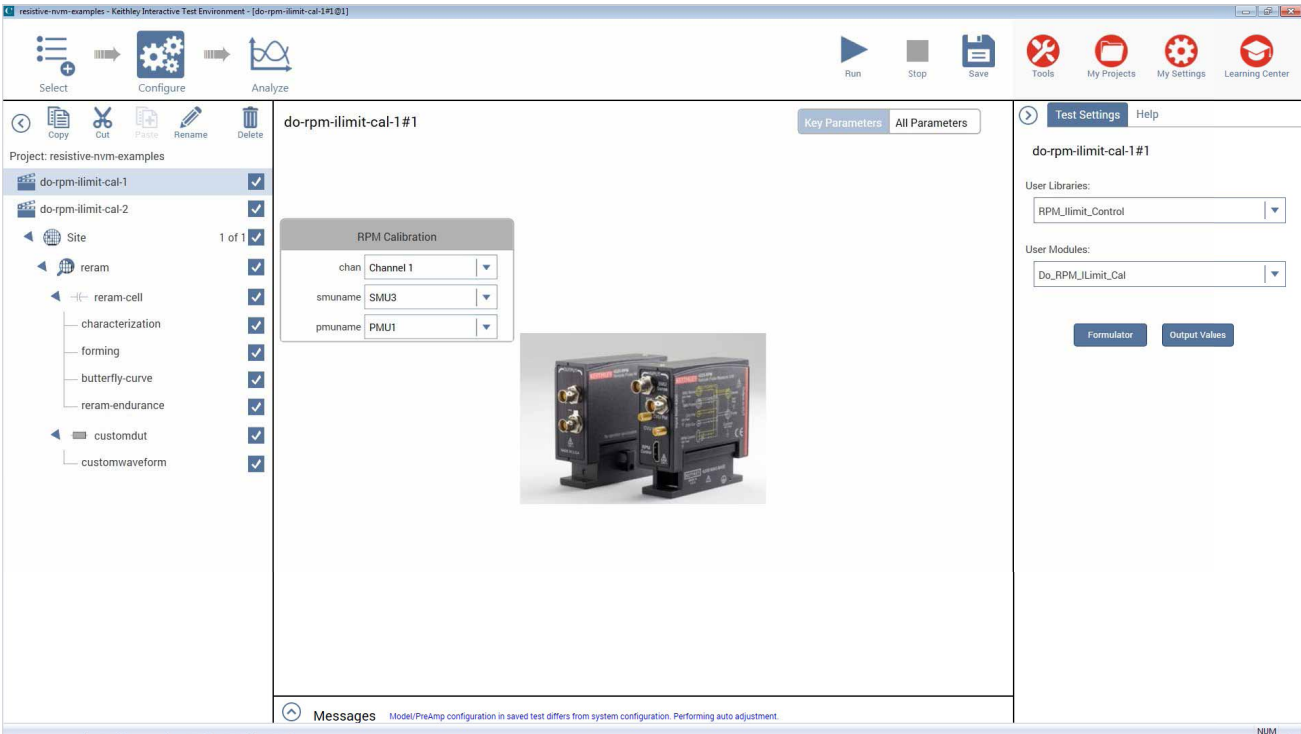


图 46. PMU 通道 1 RPM 限流校准设置。

表 15. reraEndurance 模块中的输入参数列表 (参见图 43 和图 44)。

参数	范围	说明
riseTime	4e-8 ~ 1e-2s	电压上升到最终值所需的时间
widthTime	4e-8 ~ 1e-2s	脉冲顶部全部电压时等待的时间
delayTime	4e-8 ~ 1e-2s	两个脉冲之间及扫描之间的时间
useSmu	0 或 1	应保持在零，用于调试目的
compliance	CH 1 或 2	在哪条 SMU 仪器通道上进行电流一致性测量
resetV	-20 ~ 20V	重设脉冲的峰值电压。对 ReRAM 器件，这个值应该为负
setV	-20 ~ 20V	设置脉冲的峰值电压。对 ReRAM 器件，这个值应该为正
Irange	0 ~ 0.2	电流测量范围
resetIcomp	-100mA ~ +100mA	请注意，RESET 过程中 PMU 和 SMU 仪器控制都使用这个变量。如果它设为 0，那么将不会应用电流限制。如果 useSmu = 1，并使用 SMU 仪器执行扫描，且电流限制为 0，那么将使用自动量程。在电流限制不为零且 useSmu = 1 时，SMU 仪器设置在固定电流范围。
setIcomp	-100mA ~ +100mA	请注意，SET 过程中 PMU 和 SMU 仪器控制都使用这个变量。如果它设为 0，那么将不会应用电流限制。如果 useSmu = 1，并使用 SMU 仪器执行扫描，且电流限制为 0，那么将使用自动量程。在电流限制不为零且 useSmu = 1 时，SMU 仪器设置在固定电流范围。
resTestV	0.1 ~ 2V	测量 DUT 电阻时的电压。这应该远远小于设置电压和重设电压，以免设置或重设 DUT。
max_loops	1 ~ 10 ¹²	输出对测试器件进行压力测试的脉冲数量。设置 fatigue_count 确定 max_loops 数量的脉冲波形内部测量间隔数量。
fatigue_count	2 ~ 100	使用对数间隔在 max_loops 测试过程中测量的次数。例如，如果 max_loops = 1000 且 fatigue_count = 4，那么将在对测试器件应用 1、10、100、1000 个 SET+RESET 脉冲波形后测量 SET 和 RESET 电阻。

表 16. reraSweep 模块中的输出参数列表。

参数	范围	说明
reset	电阻	重设脉冲后 DUT 的电阻
set	电阻	设置脉冲后 DUT 的电阻
init	电阻	任意脉冲前 DUT 的电阻

nvm 用户程序库的状态和错误代码

在调试错误时，可以先从下面的错误代码入手 (表 17)，另外查看调试日志文件 (C:\nvmllog.txt)。

表 17. nvm 用户程序库的错误代码和说明。

代码	说明
1	测试运行成功
-10	不能初始化 NVM 结构
-20	返回阵列大小不同，或 iter_size 小于 fatigue_count
-40	其中一条通道上的电流范围太大，应为 10mA (10e-2) 或以下
-50	pg2_init 中错误
-60	pulse_load 中发生错误
-70	pulse_ranges 中发生错误
-80	pulse_burst_count 中发生错误
-90	pulse_output 中发生错误
-100	pulse_standby 中发生错误
-110	pulse_sample_rate 中发生错误
-120	Set_RPM_ICompliance 中发生错误
-130	seq_arb_sequence 中发生错误
-140	pulse_exec 中发生错误
-150	pulse_fetch 中发生错误
-160	没有返回点
-170	seg_arb_waveform 中发生错误
-210	结束测试时发生错误
-220	测量过程中发生错误

优化测量

由于 4225-PMU 和 4225-RPM 为每项脉冲波形测试提供波形，所以与纯源脉冲系统相比，确定脉冲保真度大大简化。在初始设置过程中，可以使用脉冲波形确认正确的电压电平和定时响应及提取的值 (VT, SET R, 磁滞值, PUND)。

在测量时，测量窗口大小与噪底之间一直会有矛盾。测量时间越长，结果中的噪声越少。4225-PMU 和 4225-RPM 也适用于这一测量基础知识。但是，由于定时是一个主要参数，所以矛盾看得更清楚一些，因此更可控一些。

除噪声外，注意电流测量范围越低，响应越慢，这既适用于 SMU 电流范围，也适用于 4225-PMU 和 4225-RPM 范围。例如，4225-RPM 电流测量稳定到 10mA 范围 (最好情况是 100ns) 上的速度要比稳定到 100μA 范围 (最好情况是 750ns) 快得多。也就是说，有时使用较高的电流测量范围将允许更短的脉冲定时参数，因为稳定时间会更快，但代价是噪声会高一些。

脉冲跃变过程中的电容充电效应

图 48 显示了创建图 49 所示的波形使用的配置的简化的方框图。在脉冲跃变过程中，电流流动，在测试系统中充电和放电电容。这个电流不流经 DUT，但会从仪器流出，流入线缆，如图 48 所示。这个充电电流由 PMU+RPM 测量。图 49 显示了使用脉冲波形的电容充电效应。这种效应的公式如下：

$$I = C \, dV / dt$$

其中：

I 是电容充电电流。

C 是系统的电容 (即测量电路 “看到的” 电容)。

dV 是电压变化。

dt 是时间变化，在本例中是脉冲跃变或脉冲上升和下降时间。

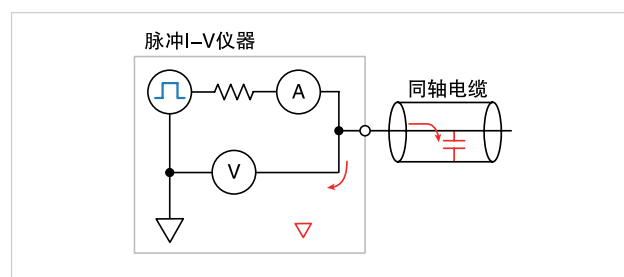


图 48. 脉冲 I-V 仪器方框图，显示了脉冲跃变过程中的电容充电电流。

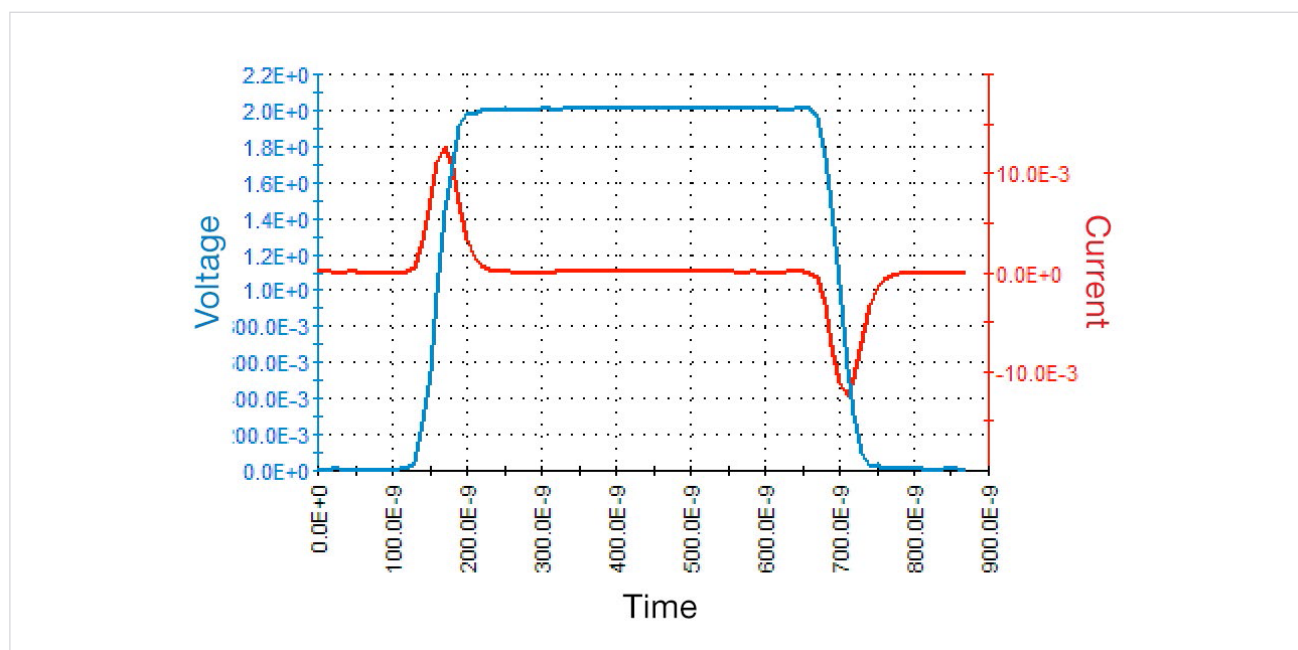


图 49. 电容充电效应。蓝色曲线是应用到同轴电缆短长度上的电压脉冲。红色曲线是得到的电流流动，是从应用的电压脉冲同一侧测得的（图 48 或图 50 中的通道 1）。充电效应是电压脉冲跃变过程中红色曲线的隆起部分。

这种效应是基础效应，不是具体实现方案的效应，因此测量高速电流的所有仪器都将测量这种效应。注意，脉冲顶部期间的测量不受影响，意味着脉冲 I-V 结果不受电容充电 / 放电的影响。以前一直没有看到这种电容充电效应，因为几乎所有波形测量都是纯电压测量。

根据公式，效应是由 dV/dt 和 C 引起的。一般来说，电缆的电容要大于 DUT 或仪器电容。通过使用较短的电缆，可以使电容达到最小，但仪器和互连中一直会有部分电容。通过降低电压，或提高上升时间和下降时间，可以降低 dV/dt 。降低电压通常并不是一种备选方案，因此这是表征需要的信号电平。在某些情况下缩短时间是可能的，但时间是瞬态表征的一个关键测试参数。

dV/dt 为解决电容充电效应提供了信息。在 DUT 的另一侧测量电流，远离应用的脉冲，是避免这种效应的关键。图 50 显示了连接设置。注意连接通道 2 的器件一侧的 dV/dt 对大多数情况基本上为 0。2 通道设置结果如图 51 所示。要注意在脉冲跃变过程中有没有看到充电或放电效应。这种方法有时称为在高侧进行脉冲传送（图 51 中的红色曲线），在低侧测量电流。注意高和低都是指透过器件的相对电压。

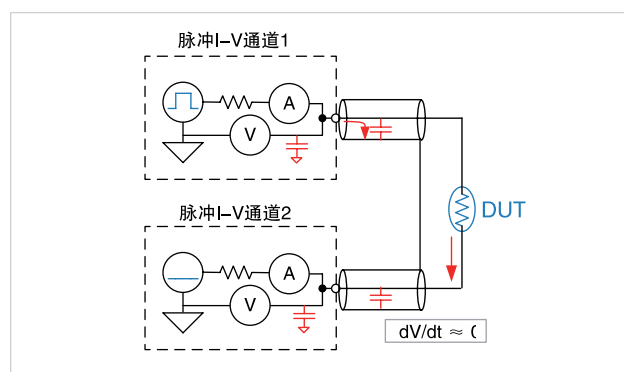


图 50. 两个脉冲 I-V 通道连接到两端子器件上的方框图。

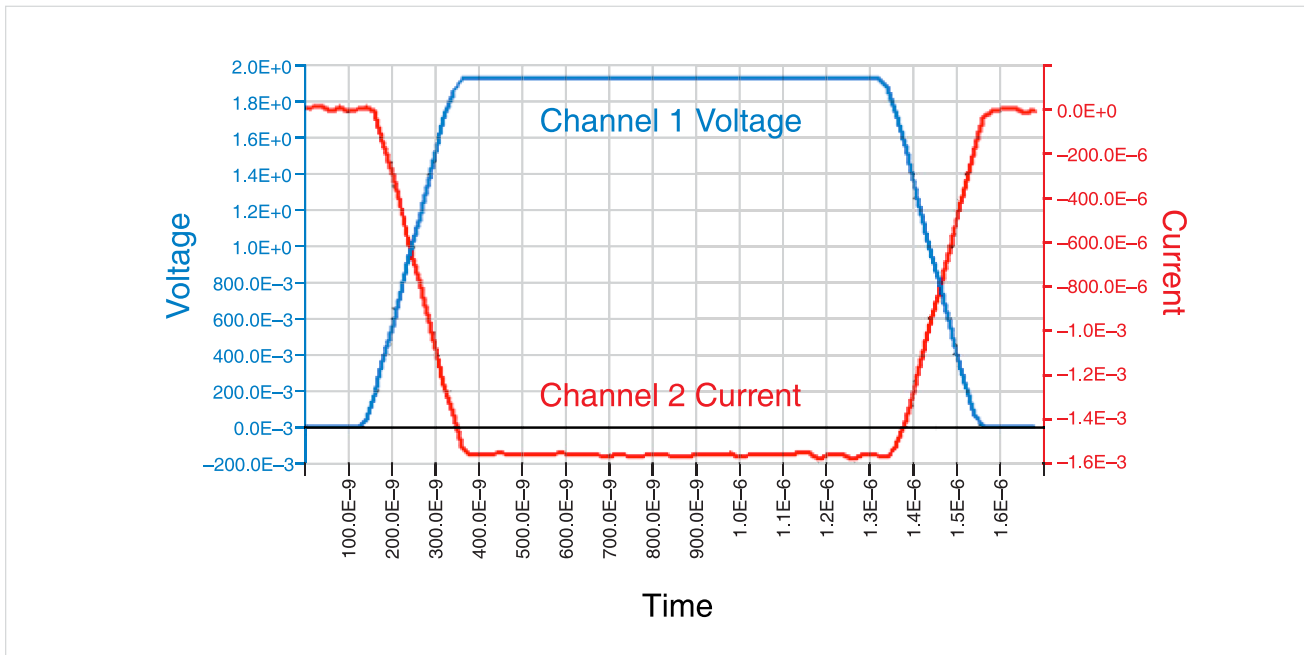


图 51. 图 50 所示的配置的脉冲 I-V 波形。在脉冲跃变过程中看不到电容充电电流，只看到电流流经电阻器 DUT。

测试设备

最低配置：

- 4200A-SCS
- 两个 SMU 仪器，可以是中等功率 (4200-SMU)，也可以是高功率 (4210-SMU)。注意只有闪存和 ReRAM 测试中才使用 SMU 仪器。
- 一个 4225-PMU 及两个 4225-RPM
- 选配：汇编程序，用来修改 nvm 用户模块 (订购编号：4200-Compiler)

参考资料

1. J. Hutchby 和 M. Garner, “选定新兴内存技术潜力和成熟度评估研讨会和 ERD/ERM 工作组会议 (2010 年 4 月 6-7 日)”, 半导体国际技术路线图, 2010 年 7 月 23 日。[网上] 网址: http://www.itrs.net/links/2010itrs/2010Update/ToPost/ERD_ERM_2010FINALReportMemoryAssessment_ITRS.pdf。[访问时间: 2011 年 9 月 26 日]
2. E. Harari, “非易失性内存行业 - 个人之旅”, 美国加州蒙特利第三届 IEEE 国际内存研讨会 (IMW) 上宣读, 2011 年, 第 1-4 页。
3. H. Yoo, E. Choi, H. Joo, G. Cho, S. Park, S. Aritome, S. Lee, S. Hong, “双控制栅及周围浮栅 (DC-SF) NAND 闪存单元可变 Vpass-Read 全新读取方案”, 美国加州蒙特利第三届 IEEE 国际内存研讨会 (IMW) 上宣读, 2011 年, 第 53-56 页。
4. M. Seo, B. Lee, S. Park, T. Endoh, “使用单独侧墙控制栅 (S-SCG) 实现高可靠性 MLC 操作的新型三维垂直 FG NAND 闪存单元阵列”, 美国加州蒙特利第三届 IEEE 国际内存研讨会 (IMW) 上宣读, 2011 年, 第 61-64 页。
5. “IBM 科学家演示计算机内存突破技术”, 2011 年 6 月 30 日。[网上] 网址: <http://www.zurich.ibm.com/news/11/pcm.html>。[访问时间: 2011 年 9 月 26 日]
6. T. Nirschl, J.B. Phipp, T.D. Happ, G.W. Burr, B. Rajendran, M.-H. Lee, A. Schrott, M. Yang, M. Breitwisch, C.-F. Chen, E. Joseph, M. Lamorey, R. Cheek, S.-H. Chen, S. Zaidi, S. Raoux, Y.C. Chen, Y. Zhu, R. Bergmann, H.-L. Lung, C. Lam, “2 位和 4 位多电平相变内存写入策略”, IEDM 2007. 第 461-464 页。
7. A. Pirovano, A. L. Lacaita, F. Pellizzer, S. A. Kostylev, A. Benvenuti 和 R. Bez, “硫族化物材料中的低场非晶相状态电阻和阈值电压漂移”, IEEE Trans. on Electron.Devicess, 第 51 卷, 2004 年 5 月, 第 714-719 页。
8. D.S. Suh, K.H.P. Kim, J.S. Noh, W.C. Shin, Y.S. Kang, C. Kim, Y. Khang 和 I.K. Yoo, “决定相变内存中 Ge₂Sb₂Te₅ 相位的临界熄灭速度”, IEDM 2006, 第 1-4 页。
9. G. R. Fox, R. Bailey, W. B. Kraus, F. Chu, S. Sun, 和 T. Davenport, “FeRAM 的电流状态”, Topics in Applied Physics, 第 93 卷, 2004 年, 第 139-148 页。
10. L. Hai, M. Takahashi, S. Sakai, “铁电 NAND 闪存单元的铁电栅场效晶体管精简”, 美国加州蒙特利第三届 IEEE 国际内存研讨会 (IMW) 上宣读, 2011 年, 第 175-178 页。
11. AIST 新闻稿, “1T FeRAM 发展: 实现超 GB 下一代半导体内存”, 2002 年 10 月 24 日。
12. J. S. Cross, S.-H. Kim, S. Wada 和 A. Chatterjee, “FeRAM 的 Bi 和 Fe 共掺杂 PZT 电容器表征”, Sci. Technol. Adv. Mater. 11 (4) (2010 年 8 月), 044402。
13. F. Chu 和 T. Davenport, “0.5 m FRAM 产品的耐受性性能” [网上] 网址: http://www.ramtron.com/files/tech_papers/F-RAM_Endurance.pdf。[访问时间: 2011 年 9 月 26 日]
14. R. Waser, R. Dittmann, G. Staikov 和 K. Szot, “基于 Redox 的电阻开关内存 - 阴离子机制、前景和挑战”, Adv. Mater. 2009, 21, 2632-2663。
15. “热成形改善基于 HfO_x 的低功率 RRAMs 的内存窗口和均匀性”, B. Butcher, G. Bersuker, K. G. Young-Fisher, D.C. Gilmer, A. Kalantarian, Y. Nishi, R. Geer, P.D. Kirsch, R. Jammy, 2012 年国际内存研讨会公报, 第 49-52 页。



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：www.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

泰克武汉办事处

武汉市洪山区文化大道555号
融创智谷二期B1栋7层05室
邮编：430072
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

KEITHLEY

A Tektronix Company

更多宝贵资源，敬请登录：WWW.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。

111320 SBG 1KC-60638-1

