

用 4200A-SCS 参数分析仪进行 晶圆级可靠性测试

应用指南



KEITHLEY
A Tektronix Company

Tektronix

介绍

每个芯片上更多器件和更快时钟速度的不断发展，推动了几何形状缩小、新材料和新技术的发展。由于更脆弱、功率密度更高、器件更复杂和新的失效机制，所有这些因素都对单个器件的寿命和可靠性产生了巨大的影响，曾经寿命为 100 年的器件的生产工艺现在可能只有 10 年的寿命，这与使用这些器件的预期工作寿命非常接近。较小的误差范围意味着，必须从一开始就考虑器件的寿命和可靠性，从设备开发到工艺集成再到生产不断进行监控，即使是很小的寿命变化，对今天的设备来说也可能是灾难性的。

虽然可靠性测试在封装器件级进行，但许多 IC 制造商正在转移到晶圆级测试，包括需要在上游制造过程中进行进一步测试。晶圆级可靠性 (WLR) 测试还消除了由于封装器件故障而造成的大部分时间、生产能力、资金和材料损失。因为晶圆可以直接从生产线上拉下来进行测试，而无需等待器件封装，这一过程可能长达两周，所以周转时间明显缩短。在器件和 WLR 测试中，大部分测试是相同的，所以相对容易能够迁移到晶圆级测试。

WLR 测试的应力测量技术

应力测量测试是一种通常用于评估半导体器件工作寿命和失效机制的技术。该测试侧重于典型故障率浴盆曲线右侧的故障 (图 1)，即与制造故障无关的故障。

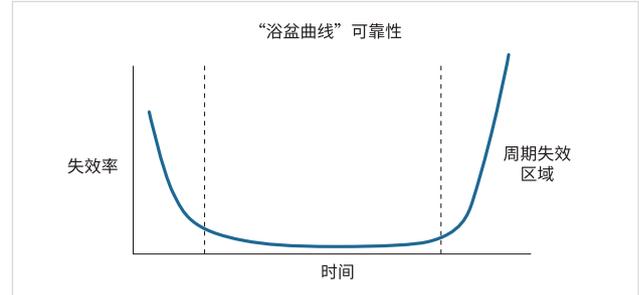


图 1. 典型的半导体可靠性曲线

应力测量测试可以快速生成外推曲线，以预测器件的使用寿命，此类数据用于评估器件设计和监控制造过程。由于典型的设备寿命是以年为单位测量的，因此需要技术来加速测试，最有效的方法是对设备进行过度应力测试，测量运行的关键退化趋势，并将数据外推到整个使用寿命。

以图 2 为例，曲线的右下方部分 (收集的数据) 是在高应力条件下生成的数据，这个数据生成一条线，可用于预测正常工作条件下的设备寿命 (曲线左上部分)。

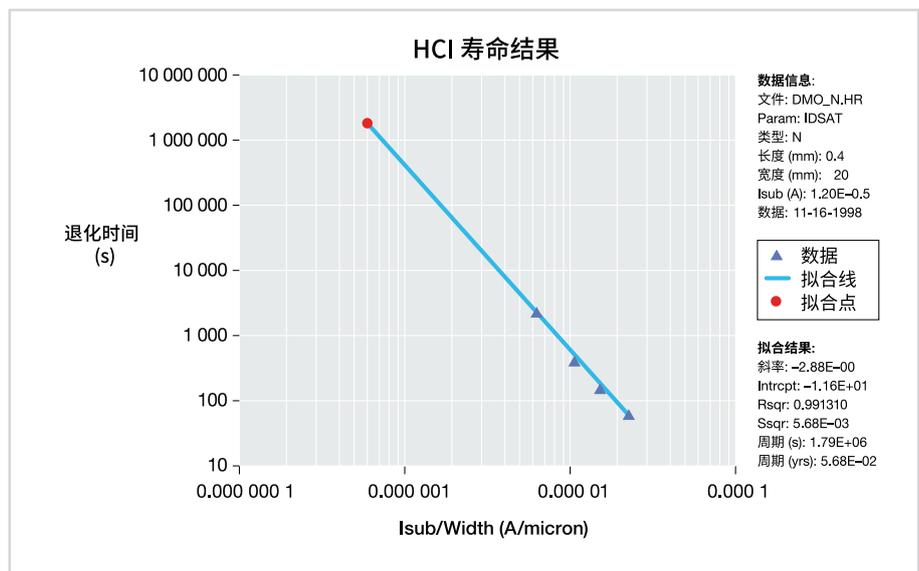


图 2. HCI 测试的寿命可靠性外推

经常使用应力测量技术的 WLR 测试包括热载流子注入 (HCI)^[1] 或沟道热载流子 (CHC)、负偏置温度不稳定性 (NBTI)^[2]、电迁移率^[3]、时间相关介电击穿 (TDDB)^[4] 和电荷击穿 (QBD)^[5] 测试。这些测试已成为主流 CMOS 器件开发和工艺控制的关键。

WLR 测试仪器趋势与要求

现在新器件和材料需要修改这些已建立的测试，并要求仪器功能可以实现这些新技术。

可靠性测试已经发展到适应新设备和材料的需要。虽然 HCI 仍然是一个重要的可靠性问题，但工程师现在必须关注 PMOS 的 NBTI^[6]，高 k 栅极晶体管的电荷捕获^[7]，以及 NBTI、TDDB 和 HCI 之间的交叉效应，例如 NBTI 增强热载流子^[8]，TDDB 增强 NBTI^[6]。为了应对这些新现象，测量方法已经从直流应力和测量发展到现在同时使用直流和脉冲应力来研究退化效果。此外，仪器仪表表现在包括更全面的器件表征套件，其中包括直流 I-V、交流 C-V、电荷泵和电荷捕获。总结了一些 WLR 测试趋势。

	传统仪器	新仪器
主流的器件退化衡量指标	HCI 电荷捕获	HCI NBTI/PBTI NBTI-HCI TDDB-NBTI 电荷捕获
方法论	DC 应力	脉冲 /DC 应力
	DC 测量	综合表征 (I-V, C-V, CP)

表 1. 最近的晶圆级可靠性测试趋势

这些不断变化的测试要求工程师找到高效合适的设备和适合工艺开发的仪器。所选择的工具应该采集应力引起的参数退化的所有相关数据，并且能灵活适应非传统的 WLR 测试，例如应力 C-V、NBTI 等等。

这个工具还应该是可扩展的，这样就不需要每次出现新的测试问题都去购买一个全新的系统。这个工具应该易于理解，这样工程师就可以把宝贵的时间集中在分析数据上，而不是学习使用测试系统。

在功能方面，一个现代化的可靠性测试台必须提供以下几点：

- 在不影响准确性和外推寿命的情况下，硬件和软件能加速测试。
- 控制半自动或自动探针台和温控托盘。
- 控制仪器、探头、托盘，创建测试、执行测试、管理数据。
- 可更改应力序列，以应对新材料测试和失效机制。
- 分析软件，提供易于提取的测试参数和绘图工具。

4200A-SCS 和 4225 -PMU 超快脉冲 I-V 的功能

4200A-SCS 是一款模块化、完全集成的参数分析仪，具有晶圆级可靠性测试功能。该系统允许对半导体器件和测试结构进行直流 I-V，脉冲 I-V 和 C-V 表征，先进的数字扫描参数分析仪结合了亚微米的测试速度和精度。4200A-SCS 可以提供多达 9 个插槽，用于支持源测量单元 (SMU)，电容电压单元 (CVU) 和脉冲测量单元 (PMU)，可以通过 GPIB、以太网或 RS-232 连接来控制其他外部仪器，如开关矩阵、LCR 仪表和探针台。该软件包括一个测试序列管理器、交互式测试设置界面、类似 excel 的数据表格、绘图功能。在交互式手动模式 (用于开发期间的单个测试操作) 或更自动化的生产用例中，它使用起来更灵活。

4225-PMU 超快脉冲 I-V 模块是 4200A-SCS 的单槽仪表卡。它有两个通道，每个通道都有脉冲产生和脉冲测量的功能，并且会实时测量电流和电压。该模块是超高速 I-V 的核心硬件。

测量能力对于表征 NBTI 和 PBTI 在 us 内的退化至关重要，要为 DIR (Designed-In Reliability) 进行更精确的寿命测量，支持器件和电路设计建模。它集成了具有高速电压和电流测量能力的双通道波形发生器，更大的测量 buffer 以及一个实时测试执行引擎。

RPM 远程放大器 / 开关是 4225-PMU 的可选配件。它很小，可以放在被测器件 (DUT) 附近，有很多表征时间分辨可靠性测试所必需的低电流测量范围。通过将 RPM 放在靠近 DUT 的脉冲源，4225-RPM 有助于最大限度地减少电缆长度和电缆寄生效应，以提供更好的脉冲形状和更高的速度测量。

此外，4225-RPM 可以在 4200A-SCS 的源测量单元 (SMU) 和多频电容电压单元 (CVU) 信号之间切换，允许高分辨率直流 DC 测量和 CV 测量，而无需重新布线脉冲源和测量测试。

如果既需要脉冲源又需要脉冲测试可以用 4225-PMU；如果需要脉冲源但不需要脉冲测量，可以用 4220-PGU 脉冲卡。具有脉冲源测量能力的一个典型配置：4200A-SCS、4 个 SMU、2 个 4225-PMU 和 4 个 4225-RPM 组成，此系统就具备了四个 SMU 和四个脉冲 I-V 通道 (脉冲源和测量)，RPM 允许在脉冲和 SMU 测试资源之间切换。该四通道系统为一个四端子测试装置或在两个测试装置上测量两个端子 (例如，栅极和漏极) 提供直流或脉冲源和测量。

对于前沿硅基器件的超快速 BTI (偏置温度不稳定性) 测试，可用 4200-BTI-A 工具包^[9]，由一个 4225-PMU、两个 4225-rpm，以及自动表征套件 (ACS) 软件组成。除了晶圆 mapping 功能外，ACS 还包括动态测试和其他测试范例，以最大限度地减少非应力时间，以降低 BTI 表征行为的硅器件固有的恢复效应。有关更多信息，请参阅标题为“超快速 BTI 封装”的技术文档。

使用 Clarius 软件进行 WLR 测试

4200A-SCS 系统提供的标配软件 Clarius 包括一组用于 WLR 测试的项目。这些项目包括一个具有可配置的测试级和项目级的应力测量循环，以及一个用于在晶圆上每个 site 上进行测试的循环项目^[10]。图 3 显示了 HCI 范例项目。该图显示了某一个特定的参数随时间推移而被测试，每个点代表一个应力周期后不同的测量。左边的窗口是测试序列，显示了测试的顺序和项目的整体结构。在 Clarius 项目库中中有几个用于 WLR 测试的项目，包括：

- 热载流子注入 (HCI)
- 负温度偏置不稳定性 (NBTI)
- 电迁移了 (EM)
- 电荷击穿 (QBD)

热载流子注入 (HCI) 退化

在现代 ULSI 电路中，HCI 退化是一个相当重要的可靠性问题。电荷载流子在 MOSFET 通道上被大电场加速时获得动能。虽然大多数载流子到达了漏极，但热载流子 (具有非常高动能) 由于撞击电离可以在漏极附近产生电子——空穴对，这是原子级别的碰撞。另一些则可以注入栅极通道界面，破坏 Si-H 键，增加界面陷阱密度。HCI 的影响是器件参数的时间相关性退化，如阈值电压 (VT)，线性和饱和区域的漏极电流 (IDLIN 和 IDSAT) 和跨导 (Gm)。

典型的 HCI 测试程序包括对 DUT 进行预应力表征，然后是应力和测量循环^[11] (图 4)。在该循环中，器件在高于正常工作电压的电压下工作。在应力之间监测器件参数，并将这些参数的退化绘制为累计应力对时间的曲线 (图 2)。在进行该应力和测量循环之前，相同设备的测量参数作为基准值。



图 3. 实时数据显示的 HCI 测试

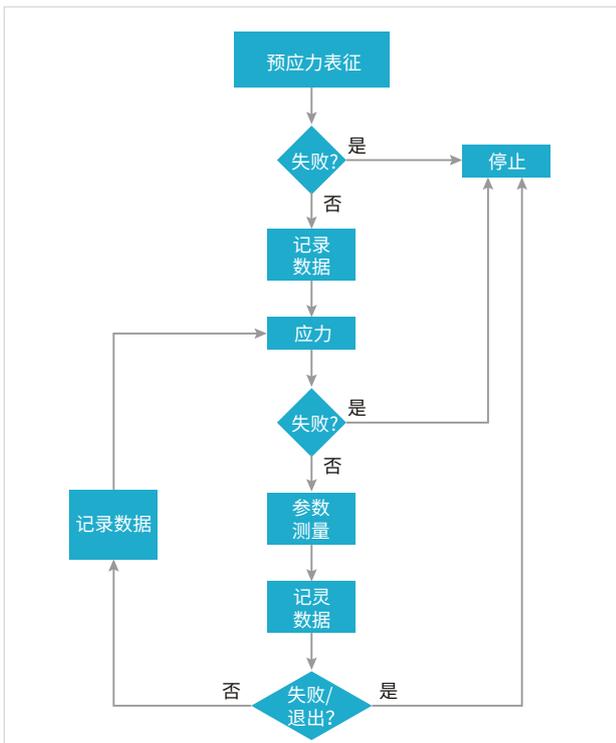


图 4. HCI/NBTI/EM 测试的流程

热载流子的监测参数有：Vr、Gm、IDLIN、IDSAT、IDLEAK。这些参数在应力前进行初步测量，并在每个累积时间的应力后重新测量。IDLIN 是器件工作在线性区域测量到的漏极电流；IDSAT 是器件工作在饱和区时测量的漏极电流。Vr 和 Gm 可以使用恒流或外推方法来确定。外推法中，VT 由 IDS -VGS 曲线的最大斜率确定。图 5 显示了 Clarius 中的项目 hci-1-dut 进行的测试。4200A-SCS 的公式编辑器工具大大简化了提取这些参数的过程。内置的函数包括微分来获取 Gm，用一个 MAX 函数来获得最大 Gm (gnext)，以及一个最小二乘线拟合函数来提取 Vr (Vtext)。计算这些参数的公式可以在 4200A-SCS 提供的 HCI 项目中找到，也可以在测试库中找到相应的测试。图 6 显示了 Formulator 的自动数据分析能力。

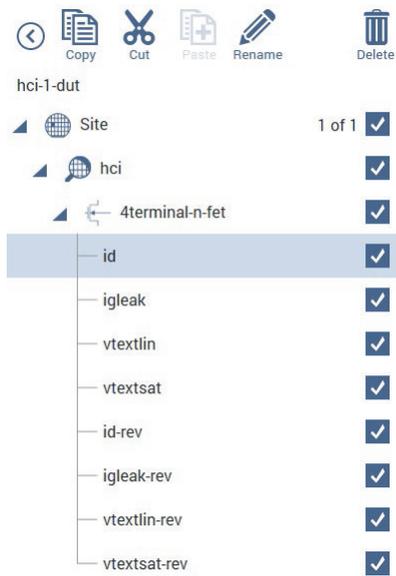


图 5. 在 Clarius Hci-1-dut 项目中的 Hci 测试

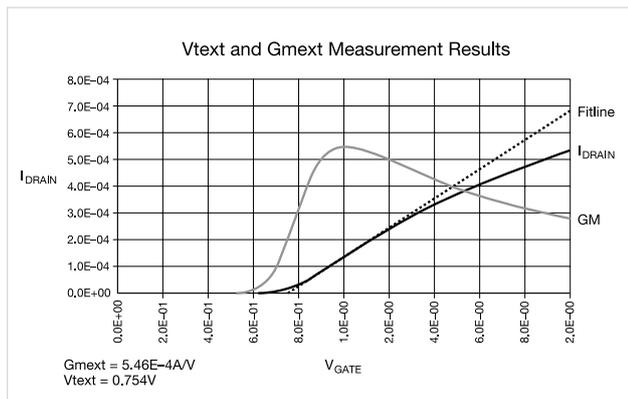


图 6. 4200A-SCS 中典型的 VT 和 Gm 测量结果

在单个晶体管上很容易执行 Hci 测试，但是每次 Hci 测试通常需要很长时间才能完成，因此希望有许多 DUT 并行受力，然后在应力之间顺序表征以节省时间。这个测试过程需要一个开关矩阵来处理并行应力和应力之间的顺序测量。4200A-SCS 提供应力电压并测量，而开关矩阵可以实现多个设备的并行应力和顺序测量。图 7 显示了用 8 个 SMU(总共有 8 个不同的漏极和栅极应力偏置) 加上一个接地单元 (用于接地端子)，以并行地对 20 个晶体管施加应力。表 2 列出了测试库中可用的 Hci 测试模板。

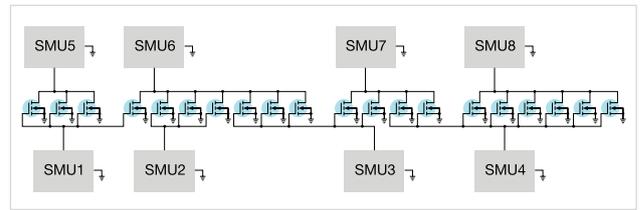


图 7. Hci 和 NBTI 测试中用 8 个 SMU 对 20 个器件并行施加应力，单独的地用来做公共端口

项目	描述
<i>Hci-1-dut</i>	四端口 n-MOSFET 的 Hci 项目。在两个连续应力之间监测参数：IDLIN、IDSAT、I _g 、VT 和 G _m ，在正向（正常运行条件）和反向（反向源和漏偏置）条件下进行测量。Subsite 中设置为 DC 电压应力。
<i>Hci-4-dut</i>	两个四端 n-MOSFET 器件和两个四端 p-MOSFET 器件与一个开关矩阵的 Hci 项目。在两个连续应力之间监测参数：IDLIN、IDSAT、I _g 、VT 和 G _m ，在正向（正常运行条件）和反向（反向源和漏偏置）条件下进行测量。Subsite 中设置为 DC 电压应力。如果测试的设备少于 4 个，则项目树中不需要的器件就不勾选，也可以根据器件修改测试项。
<i>Hci-pulse</i>	类似于 hci-1-dut，此项目使用交流应力。

表 2. 在 Clarius 中的 Hci 测试库

负温偏不稳定性 (NBTI)

NBTI 是 PMOS 晶体管中存在问题的一种失效模式，随着阈值电压持续下降，新材料被引入栅极以保持设备级性能，但却让 NBTI 变得更糟。NBTI 的退化是通过阈值电压的时间变化来测量的，并与在高温下的负偏置应力下较慢的运行、更多的漏电和更低的驱动电流有关。

NBTI 测试通常是一个应力测量序列循环。在应力期间，栅极施加负偏置电压，晶体管的其余端子接地。在两个连续应力之间，在正常工作条件^[12]下测量漏极电流。漏极电流或阈值电压的退化被绘制为应力——时间的函数。所有的应力电压和后续的测量都是在高温下进行的 (例如，135° C)。NBTI 的工艺流程与 Hci 类似，如表 4 所示。

由于 BTI 中的恢复效果，使用 4200A-SCS 的 SMU 的可用应力测量特性可能无法对设备退化提供足够的分析。4200A-SCS 中的选件 (4200-BTI-A) 提供了超快速激励和测量，以表征 BTI 在现代半导体器件上的退化和恢复效果。



图 8. 4200A -SCS 的 NBTI -1-dut 项目中包含 NBTI 测试

图 8 所示的项目包括控制托盘温度的操作，在托盘达到指定温度之前，子循环测试不会启动。在第一次循环中先对器件预应力再进行特性测试，再次进行测试之前，对器件进行规定时间的电压应力循环。子循环完成后，最后一步冷却托盘。

在并联方案中，最多可对 20 个设备施加电压压力。图 7 显示了 20 个并联设备在电压和漏极下承受压力的范例。

Clarius 项目树中提供的 NBTI 测试范例见表 3。

项目	描述
nbt1-1-dut	四端 p-MOSFE 的 NBTI 项目。 两个连续应力之间监测的参数：IDLIN、IDSAT、I _g 、VT 和 G _m ，配置为应力循环。 控制托盘温度。

表 3. Clarius 中的 NBTI 测试库

超快 BTI 工具包

偏置温度不稳定性测试可能需要高灵敏、高速测量以获得准确表征。假设所有其他因素都是恒定的，测量物理学很大程度上定义了测量速度和灵敏度之间的关系。在进行亚 ms 级测量时，必须考虑到所有噪声源，对于亚 us 级的应用，量子效应也不容忽视。4200-BTI-A 工具包为超快速 BTI 测试提供了测量速度和灵敏度的最佳组合。该工具包中的 4225-PMU 能够在应力去除后 30ns 内开始测量 BTI 退化，并使用 ID-VG 扫描方法测量小于 1 μs 内的晶体管 VT。两个 4225- RPM 远程放大器 / 开关模块可以在直流 I-V(通过 SMU 实现) 和超快速 I-V 测量之间自动切换，无需重新布线，并通过最大限度地减少电缆寄生效应和增加低电流灵敏度来提高单脉冲源和测量性能。该软件包还包括超快速 BTI 软件测试模块和自动化表征套件 (ACS 软件)，可以轻松定义应力定时、应力条件和单点 ID、on-the-fly (OTF) 或 ID-VG 扫描时候进行宽范围测量。测试模块允许测量恢复效果和退化，还提供应力前和应力后测量选项，包括 4200A-SCS 的直流 SMU 仪器，用于高精度低电平测量。

电迁移

电迁移是由电流引起的材料移动现象，是金属化过程中主要的可靠性问题。等温电迁移试验是对微电子金属化进行的加速电迁移试验。在等温测试中，需要保持被测线的恒定平均温度。

这个过程通过改变应力电流来实现的。通过改变传递给线路的焦耳热量（基于 JESD61A-01 标准^[13]）

em-const-i 范例项目如图 9 所示。子循环 (em) 配置为使用单个设备（金属线）上的电流应力进行。

该项目包括控制托盘温度，在托盘达到指定温度之前，子循环不会运行。在第一次预应力后对器件进行特性测试，再次执行测试之前，在对器件进行指定时间的电流应力。循环完成后，最后一步冷却托盘。

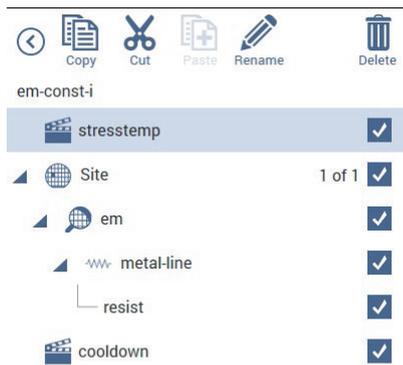


图 9. em-const-i 项目中包含的电迁移测试

em-const-i 项目可以修改，以测试其他器件。测试系统中的每个 SMU 都可以对设备进行电流—应力测试。因此，如果测试系统中有 8 个 smu，则最多可以对 8 个 smu 进行应力测试，如图 10 所示，电迁移率测试库中可用的测试模板见表 4。

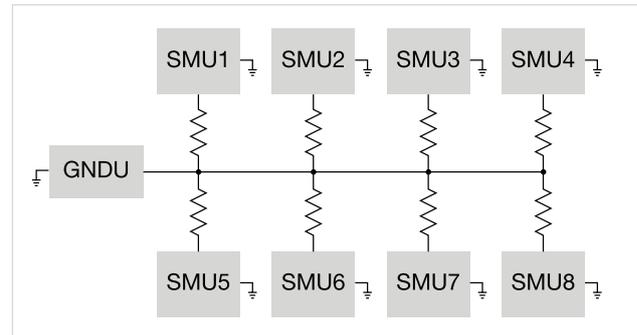


图 10. 8 个设备受到 8 个 SMU 的电流压力

项目	描述
em-const-i	使用恒定电流在一个金属线（电阻器）上进行电迁移项目。 在某个托盘温度下，施加应力电流并测量电压，计算电阻。 子循环配置为使用电压应力进行。 控制托盘温度。

表 4. Clarius 中的电迁移项目说明

击穿电荷 (Q_{BD})

QBD 项目包括 ramp-v 测试和 ramp-i 测试。这些测试遵循薄电介质晶圆级测试的 JESD35-A 标准程序^[14]。本项目 (图 11) 不使用子循环。

- *ramp-v*: 电压斜坡试验。该测试用电容器或栅极氧化物上倾斜电压应力来表征低电场下电介质的缺陷。
- *ramp-j*: 电流密度斜坡测试。该测试用电容器或栅极氧化物上的倾斜电流应力来表征高电场下电介质的缺陷。

该测试还能够实现有界的“l-Ramp”测试，前提是将电流设置为斜坡上升到指定水平，然后保持直到击穿。有界的“l-Ramp”测试提供了可重复的电荷击穿 (QBD) 测量。击穿电荷项目描述见表 5。



图 11. QBD 项目中包含的 QBD 测试

项目	描述
qbd	栅极介电层 (电容器) 上的 qbd 项目。它包括两个 qbd 测试: ramp-v 和 ramp-j。 Iv 测试是在正常工作条件下进行 I-V 测量, 以获得 ramp-v 和 ramp-j 测试的输入参数。

表 5. 项目库中的击穿电荷测试库

结论

不断发展的设计尺度和新材料使得可靠性测试比以往任何时候都更加重要，这也推动了对可靠性测试和建模的需求进一步向上游发展，特别是在研发过程中。仪器制造商正在使用更快、更敏感、高度灵活的新型可靠性测试工具来应对，以帮助降低测试成本并缩短上市时间。Keithley 的 4200A-SCS 参数分析仪和工具包提供了快速测试所需的硬件和软件以及完整的器件特性和可靠性测试。

参考文献

1. E. Takeda, C.Y. Yang, A. Miura-Hamada, “Hot-carrier effects in MOS devices,” Academic Press, 1995.
2. D.K. Schroder, J.A. Babcock, “Negative bias temperature instability: Road to cross in deep submicron silicon semiconductor manufacturing.” J. Appl. Phys., vol. 94, no. 1, 2003.
3. K.N. Tu, “Recent advances on electromigration in very-large scale-integration of interconnects,” J. Appl. Phys., vol. 94, no. 9, 2003.
4. R. Moazzami, J.C. Lee, C. Hu, “Temperature acceleration of time-dependent dielectric breakdown,” IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 36, no. 11, 1989.
5. P.P. Apte, K.C. Saraswat, “Correlation of trap generation to charge-to-breakdown (QBD): a physical-damage model of dielectric breakdown,” IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 41, no. 9, 1994.
6. M.A. Alam, S. Mahapatra, “A comprehensive model of PMOS NBTI degradation,” Microelectronics Reliability, vol. 45, issue 1, 2005.
7. G.D. Wilk, R.M. Wallace, J.M. Anthony, “High-κ gate dielectrics: Current status and materials properties considerations,” J. Appl. Phys., vol. 89, no. 10, 2001.
8. B.S. Doyle, B.J. Fishbein, K.R. Mistry, “NBTI-enhanced hot carrier damage in p-channel MOSFETs,” IEDM, 1991.
9. [Ultra-Fast NBTI/PBTI Package for the 4200A-SCS Data Sheet.](#)
10. 4200A-SCS Semiconductor Characterization System Reference Manual.
11. JEDEC Standard 28-A, “Procedure for Measuring N-Channel MOSFET Hot-Carrier-Induced Degradation Under DC Stress,” 2001.
12. JEDEC Standard 90, “A Procedure for Measuring P-Channel MOSFET Negative Bias Temperature Instabilities,” 2004.
13. JEDEC Standard 61A.01, “Isothermal Electromigration Test Procedure,” 2007.
14. JEDEC Standard 35-A, “Procedure for the Wafer-Level Testing of Thin Dielectrics,” 2001.



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

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。

012819 SBG 1KC-61526-0

