



# 使用电压斜坡和电流斜坡 技术评估氧化物可靠性

应用文档



# 使用电压斜坡和电流斜坡 技术评估氧化物可靠性

## 前言

氧化物完整性是一个重要的可靠性问题，特别对于今天大规模集成电路的 MOSFET 器件，其中氧化物厚度已经缩放到几个原子层。JEDEC 35 标准 (EIA/JE SD 35, Procedure for wafer-level Testing of Thin Dielectrics) 描述了通常用于监测氧化物完整性的两种晶圆级测试技术：电压斜坡 (V-Ramp) 和电流斜坡 (J-Ramp)。这两种技术都为氧化物评估提供了快速反馈。

用于监测氧化物击穿的仪器必须具备以下能力：

- 精确的电压和电流施加及测量能力
- 精确的步长时间控制
- 自动化设备参数提取
- 先进的数据分析技术

本应用文档描述了如何使用 Keithley 4200-SCS 半导体表征系统进行氧化物可靠性测试。

## 电压斜坡和电流斜坡测试技术

电压斜坡测试采用线性电压斜坡，电流斜坡测试采用不断增加的对数电流斜坡，直到氧化物击穿。电压斜坡测试在低氧化物电压下开始，因此它能够更好地检测低电场故障，但在高电场下提供的分辨率较差。电流斜坡测试是不同的，它从一个相对较高的氧化物电压开始，所以它提供了较差的低电场分辨率，但在高电场下有更好的分辨率。这种分辨率的差异使得电压斜坡测试经常被用于确定较大的测试结构故障，而电流斜坡试验通常用于较小的测试结构，其中氧化物失效模式预计是固有的。

## V-Ramp 试验程序

图 1 说明了电压斜坡测试过程。该序列以一个预试开始，以确定初始氧化物的完整性。在预试期间，施加恒定电压 ( $V_{use}$ ) 并测量氧化物泄漏电流。如果氧化物被确定为“良好”，则对设备施加一个线性电压斜坡，直到氧化物失效。

氧化物失效是通过预期值数十倍增加的电流或超过指定限流的氧化物电流来检测。在  $V_{use}$  上进行的测试，用于确定被测测试设备的最终状态。提取的电压斜坡测量参数包括：击穿电压 ( $V_{BD}$ ) 和击穿电荷 ( $Q_{BD}$ )。

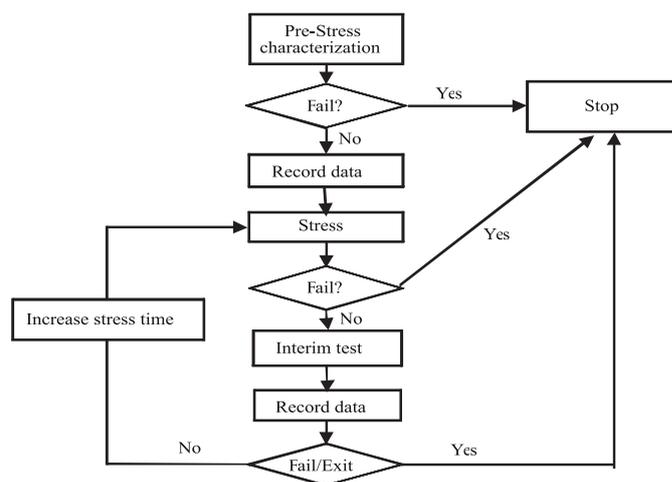


图 1 电压斜坡测试流程图

## 电流斜坡法测试流程

图 2 是电流斜坡测试方法的过程。该过程从氧化物完整性的预试开始。在这个预试中，施加恒定电流（通常为  $1\mu A$ ），并测量氧化物的电压。如果器件“良好”，则增加对数阶跃电流，由  $I_{porser} = I_{prev} * F$ （其中  $F < 3.2$ ）给出，直到氧化物失效。当氧化物上施加的电压从之前测量的电压 ( $V_{prev}$ ) 下降 15% 或以上，或超过电荷极限时，就会检测到氧化物故障。应力后的恒定电流测试用于评估被测测试设备的最终状态。提取的电流斜坡氧化物击穿参数包括击穿电压 ( $V_{BD}$ ) 和击穿电荷 ( $Q_{BD}$ )。

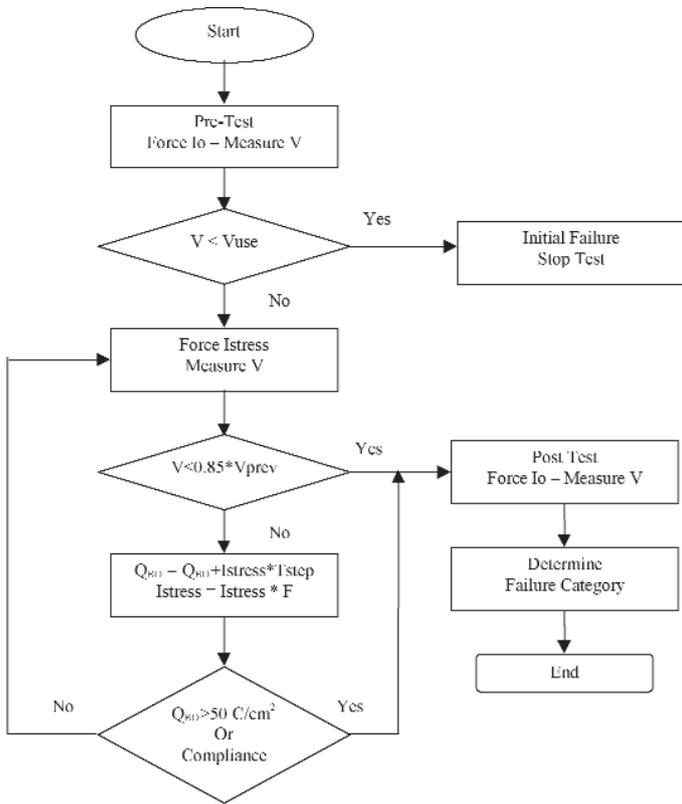


图 2. J-Ramp Flowchart

## 电压斜坡法和电流斜坡法测试的差异

在实施任何一种测试程序时，都可能会出现潜在的测量困难。电压或电流阶跃时间必须均匀和精确，以准确地确定  $Q_{BD}$  和  $V_{BD}$ 。在实践中，由于与外部控制器计算机时钟相关的分辨率和精度限制，这个步长时间可能难以控制。此外，一些仪器效应，如范围的变化，可能产生不可预测的步长时间的变化。

## 使用 Keithley 4200-SCS 的电压斜坡和电流斜坡测试

### 4200 电压斜坡测试

4200-SCS 内置的测试序列器和交互式测试模块 (ITM) 功能简化了电压斜坡和电流斜坡测试算法的实现。图 3 显示了项目导航器窗口和电压斜坡模块定义选项卡中的电压斜坡测试序列。“项目导航器”窗口显示测试顺序，从预测试开始，然后是氧化物衰退的线性电压斜坡（如 V-Ramp 模块定义选项卡中的定义）。后测试确定了最终的设备状态。

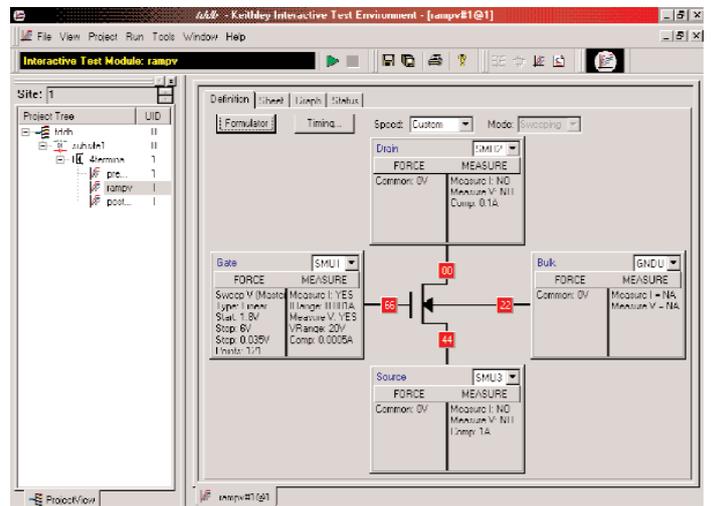


图 3. 电压斜坡项目测试顺序和测试定义

ITM 定义选项卡便于指定源连接、施加信号、测量选项和设置时间信息。在图 3 所示的电压斜坡法测试中，栅极的源表 (SMU1) 被设置为从 1.8V 到 6.0V 的线性电压扫描，电压步长为 0.035V。电压步长基于 JEDEC 35 标准的 0.1mV/cm 最大电压步长高要求 (3.5nm 氧化物厚度)。指定一个固定的电压源和电流测量范围可以最小化自动定位对电压阶跃时间的影响。

线性电压斜坡率在 ITM 时间设置对话框进入屏幕中指定 (图 4)，通过点击图 3 中所示的 timing 按钮打开。通过选择自定义速度选项和指定 A/D Integration 时间 (16.6 ms)，可以精确地控制 SMU 的测量时间。Sweep delay 是指测量前每一步的延迟。在这种情况下，选择 sweep delay (83 ms)，使步长时间为 100ms (83 + 16.6)，产生 1mV/cm\*s 的电压斜坡速率，这符合 JEDEC 35 标准的 1mV/cm\* 的最大斜坡速率要求。0.2s 的第一个点的建立稳定时间，发生在第一个电压步长上，允许在电压扫描开始之前的电流稳定。检查 ITM timestamp 启用功能，以便在每个电压步骤中保存精确的定时信息。该特性在确定 QBD 和验证步进定时精度时非常有用。对该数据的分析显示，电压步长时间平均为 99.5 ms (期望值为 99.6 ms)，标准差为 ± 0.062ms。

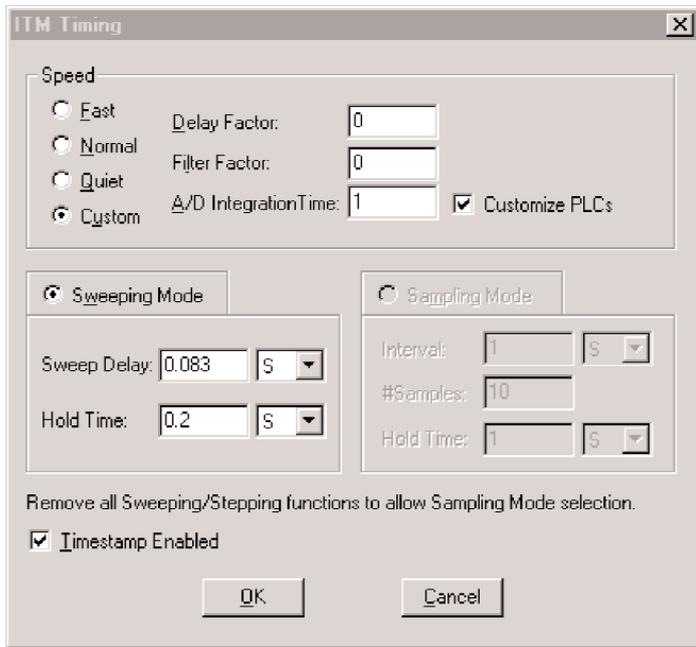


图 4. 电压斜坡测量和定时控制

## 4200-ACS 电压斜坡数据分析

4200-SCS 具有强大的高级数据分析能力，可以很容易地提取氧化物击穿参数。通过单击“definition”命令按钮，从 ITM 定义选项卡激活此分析功能（参见图 3）。公式对话框输入屏幕（未显示）包含许多用于数据分析和提取的功能。公式从电压斜坡测量的栅电流 ( $I_G$ ) 和栅电压 ( $V_G$ ) 数据中自动提取击穿电流 ( $I_{BD}$ )、击穿电压 ( $V_{BD}$ )、击穿电荷 ( $Q_{BD}$ ) 和击穿时间 ( $T_{BD}$ ):

$$QSUM = INTEG(TIME, IG)$$

$$FAILCURRENT = 0.5E-3$$

$$COLBD = COND(ABS(IG), ABS(0.98 * FAILCURRENT), 0, 1)$$

$$ROWBD = FINDD(COLBD, 1, FIRSTPOS(COLBD)) - 1$$

$$IBD = AT(IG, ROWBD)$$

$$VBD = AT(VG, ROWBD)$$

$$QBD = AT(QSUM, ROWBD)$$

$$TBD = AT(TIME, ROWBD)$$

QSUM 方程使用积分 (INTEG) 公式函数得到氧化物电荷。氧化物失效电流在第二个方程中规定了失效电流。使用条件 (COND) 和 Find Down (FINDD) 函数的方程确定了 4200-SCS 模型内置电子表格中行 (ROWBD) 的位置，该电子表格与微软® Excel 兼容。ROWBD 在 AT 公式函数中提取 IBD、VBD、QBD 和 TBD。一旦被提取出来，参数就可以自动显示在 4200-SCS 的图形选项卡上。图 5 显示了典型的 4200-SCS 电压斜坡数据，并从 3.5nm 的氧化物中提取了击穿参数。

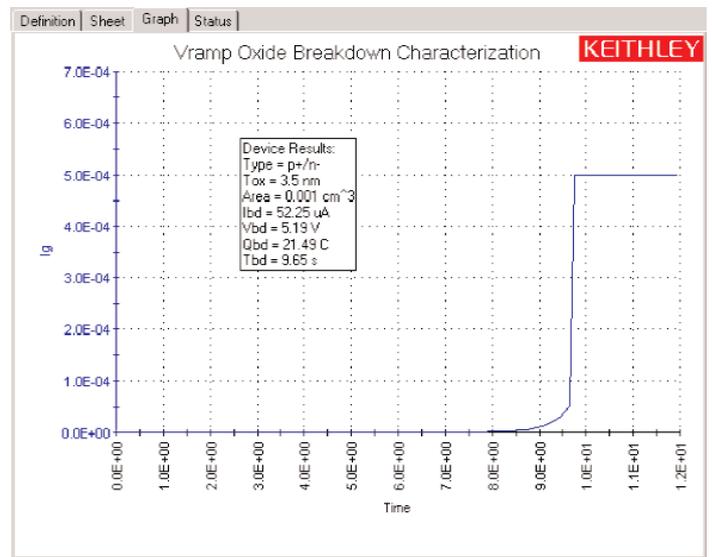


图 5. 典型的 4200-SCS 电压斜坡测量结果

## 4201-SCS 电流斜坡法测试

图 6 显示了在项目导航器窗口和电流斜坡测试模块定义选项卡中的电流斜坡测试序列。电流斜坡测试序列首先在恒定电流下验证初始氧化物完整性，然后是对数电流斜坡到氧化物击穿，最后确定了最终的器件状态。

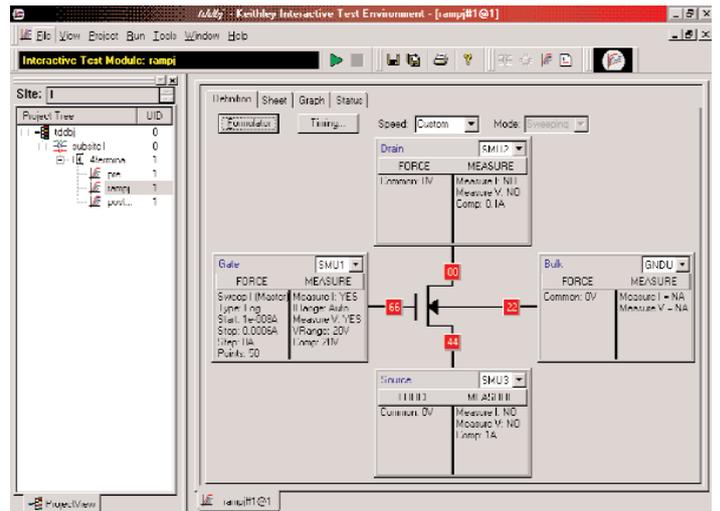


图 6. 电流斜坡法项目测试顺序和测试定义。

图 6 中的 ITM 定义选项卡指定了电流斜坡法的测试条件。在这种情况下，栅极源表 (SMU1) 被指示施加从 10nA 到 0.6 mA 的对数电流扫描，其中电流扫描中的步数为 50 ( $F = 1.25$ )。指定一个固定的电压测量范围可以尽量减少自动定位对步长时间的影响。与电压斜坡测试一样，通过选择 ITM 中的 timing 自定义速度选项，并指定 A/D integration 时间、sweep delay、hold time 和 timestamp 已启用的特性，可以精确地控制 SMU 的步长时间（参见图 4）。JEDEC 标准 35 规定当前斜坡率为 110 年 /500 毫秒。

## 4201-SCS 电流斜坡法数据分析

与电压斜坡法测试一样，该公式器可以自动提取电流斜坡氧化物击穿参数 ( $I_{BD}$ 、 $V_{BD}$ 、 $Q_{BD}$  和  $T_{BD}$ )。这些方程是：

$$QSUM = \text{INTEG}(\text{TIME}, \text{IG})$$

$$\text{FAILRATIO} = 0.85$$

$$\text{RATIO} = \text{DELTA}(\text{VG}) / (\text{VG} - \text{DELTA}(\text{VG}))$$

$$\text{COLBD} = \text{COND}(\text{RATIO}, \text{FAILRATIO} - 1, 0, 1)$$

$$\text{ROWBD} = \text{FINDD}(\text{COLBD}, 1, \text{FIRSTPOS}(\text{COLBD})) - 1$$

$$\text{IBD} = \text{AT}(\text{IG}, \text{ROWBD})$$

$$\text{VBD} = \text{AT}(\text{VG}, \text{ROWBD})$$

$$\text{QBD} = \text{AT}(\text{QSUM}, \text{ROWBD})$$

$$\text{TBD} = \text{AT}(\text{TIME}, \text{ROWBD})$$

QSUM 方程决定了氧化物的电荷。第二个方程指定了氧化物故障比，它对应于测量的氧化物电压下降 15%。比值方程决定了最近测量的 VG 与之前测量值的比值。接下来的两个方程使用 COND 和 FINDD 公式函数来确定分解数据 (ROWBD) 的行位置。最后四个方程使用 AT 公式函数自动提取击穿参数 ( $I_{BD}$ 、 $V_{BD}$ 、 $Q_{BD}$  和  $T_{BD}$ )。图 7 显示了典型的模型 4200-SCS 电流斜坡数据和提取的 3.5nm 氧化物的击穿参数。

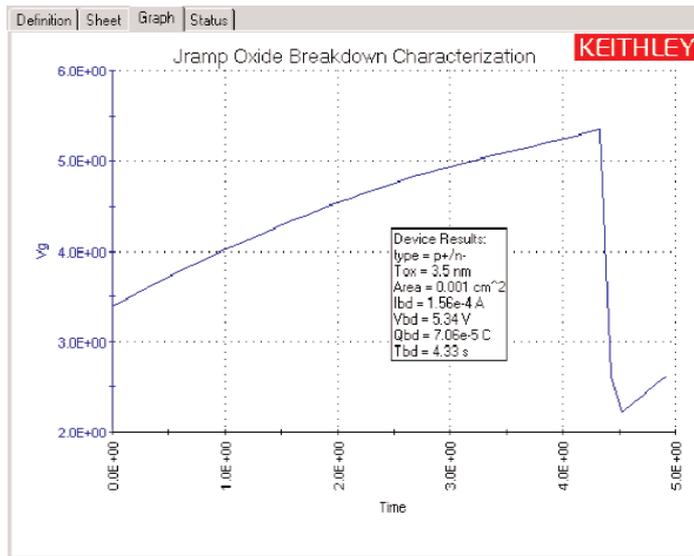


图 7. 典型的 4200-SCSJ 形斜坡测量结果

## 氧化物缺陷与超薄氧化物的表征

氧化物缺陷会在低电场下产生过多的隧穿电流。此外，超薄氧化物 (<6nm) 在低电场下表现出大量的直接隧穿氧化物电流。为了研究这些影响，有必要监测 fA 范围内的氧化物电流，这使得 4200-SCS 成为这种应用的测试仪器。图 8 显示了在 3.5nm 氧化物上获得的 4200-SCS 电压扫描数据，这是使用 SMU Quiet ITM 定时设置和自量程测量选项获得的。这些结果表明，4200-SCS 具有良好的低电流测量灵敏度。

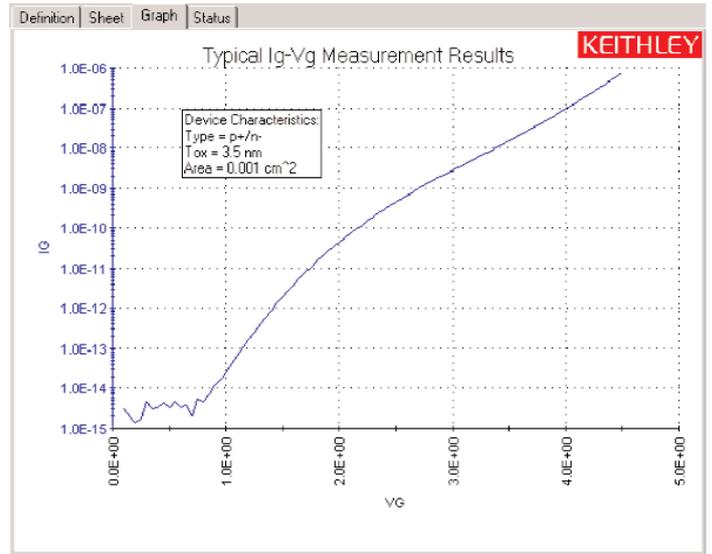


图 8. 典型的 4200-SCS I-V 测量结果

## 结论

4200-SCS 的快速、灵活和易于使用的测试环境提供了一个理想的方法来描述氧化物的可靠性。它内置的软件工具，如项目导航器、公式编辑器和与 excel 兼容的数据格式，极大地简化了创建测试序列和分析结果。自定义 SMU 定时控制和先进的源测量单元技术为测量灵敏度、精度和控制设定了一个新的行业标准。

## 参考文献

EIA/JESD35, JC-14.2 本文件中的小组委员会，1992 年 7 月，薄电介质的晶片水平测试程序。

**KEITHLEY**

Keithley Instruments, Inc.

28775 Aurora Road • Cleveland, Ohio 44139 • 440-248-0400 • Fax: 440-248-6168

1-888-KEITHLEY (534-8453) • www.keithley.com