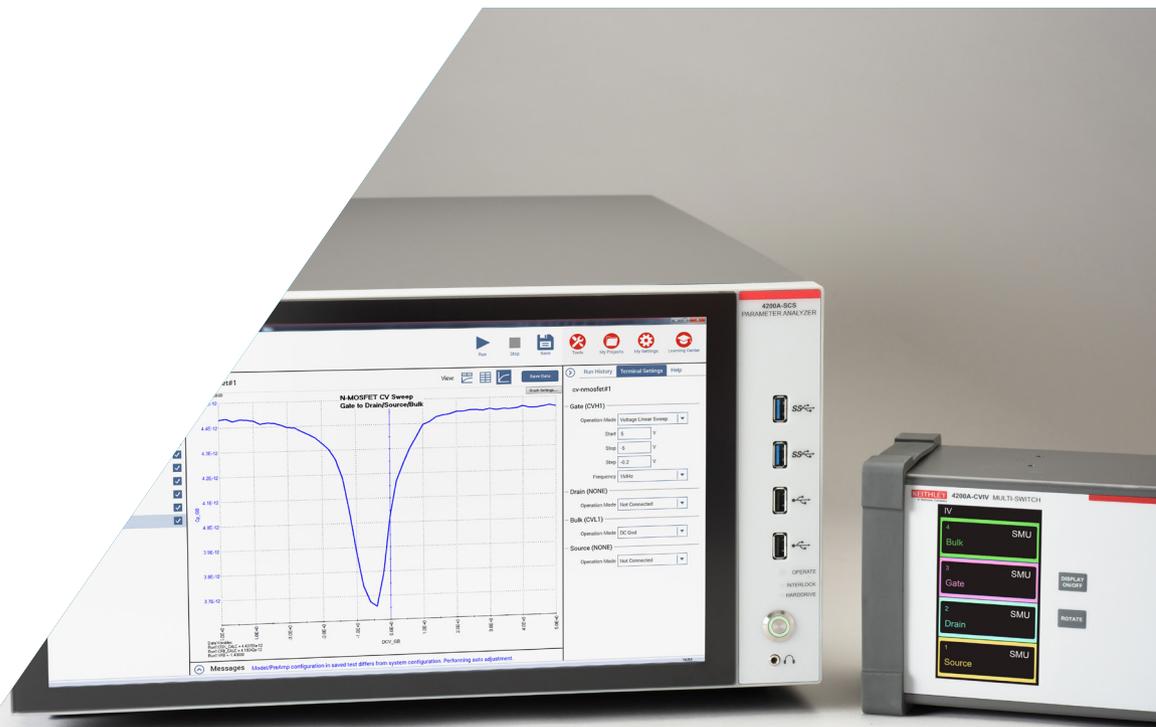




用4200-SCS监测MOSFET器件的通道热载流子(CHC)退化

白皮书



用 4200-SCS 监测 MOSFET 器件的通道热载流子 (CHC) 退化

前言

在现代 ULSI 电路中通道热载流子 (CHC) 诱导的退化是一个重要的与可靠性相关的问题。载流子在通过 MOSFET 通道的大电场加速时获得动能。当大多数载流子到达漏极时，热载流子（动能非常高的载流子）由于原子能级碰撞的冲击电离，可以在漏极附近产生电子-空穴对。其他的可以注入栅极通道界面，打破 Si-H 键，增加界面阱密度。CHC 的影响是器件参数的时间相关的退化，如 V_T 、 I_{DLIN} 和 I_{DSAT} 。

这种通道热载流子诱导的退化（也称为 HCI 或热载流子注入）在 NMOS 和 PMOS 器件上都可以看到，并会影响所有区域的器件参数，如 V_T 、亚阈值斜率、 I_{d-on} 、 I_{d-off} 、 I_g 等。每个参数随应力时间的退化速率取决于器件的布局 and 所使用的工艺。

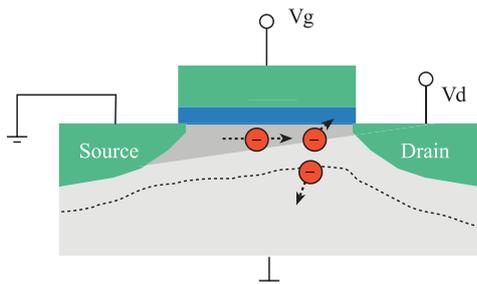


图 1. 通道热载流子退化

CHC 退化测试的过程

一个典型的通道热载流子测试过程包括一个被测试器件 (DUT) 的预应力表征，然后是一个应力和测量回路^[1](图 2)。在这个回路中，器件承受的电压高于正常工作电压的压力。器件参数包括 I_{DLIN} 、 I_{DSAT} 、 V_T 、 G_m 等，在应力之间进行监测，并将这些参数的退化绘制为累积应力时间的函数。在进行此应力和测量回路之前，将测量同一组器件参数作为基线值。

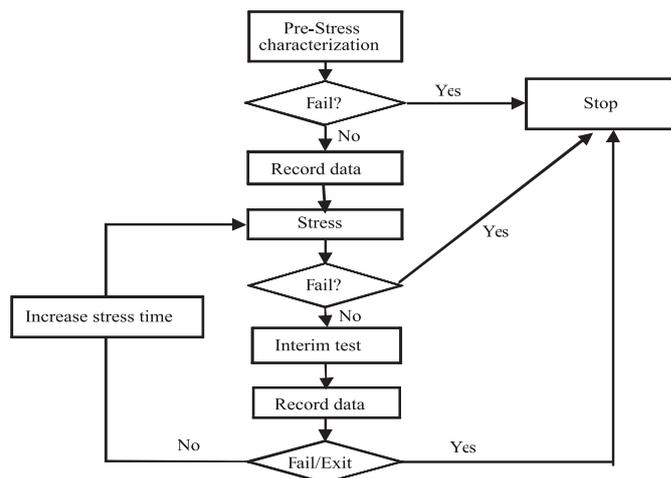


图 2 典型的 CHC 测试过程

应力条件是基于最坏情况下的退化条件，这对于 NMOS 和 PMOSFET 是不同的。通常，对于漏极电压应力，它应小于源极漏极击穿电压的 90%。然后，在漏极应力电压下，栅极应力电压因晶体管类型和栅极长度而不同。表 1 显示了使用不同技术^[2]创建的 NMOS 和 PMOSFET 的最坏情况退化条件。

器件	$L \geq 0.35\mu m$	$L < 0.25\mu m$
N-MOSFET	$V_g(\max I_{sub})$	$V_g(\max I_{sub})$ or $V_g=V_d$
P-MOSFET	$V_g(\max I_g)$	$V_g=V_d$

表 1. NMOS 和 PMOS FETs 的最坏情况应力条件

使用 4200-SCS 半导体表征系统上的交互测试模块 (ITMs) 可以很容易地确定最坏情况下的应力条件。

器件连接

在单个晶体管上执行 CHC 测试很容易。然而，每个 CHC 测试通常需要很长时间才能完成，所以希望有许多 dut 并行施加压力，然后在应力之间按顺序进行表征，以节省时间。为了实现这一点，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。图 3 显示了针对多个 DUT 的典型 CHC 测试的硬件配置。4200-SCS 提供了应力电压和测量能力，而开关矩阵支持并行应力和多个器件的顺序测量。

根据被测器件的数量，使用可容纳一个矩阵开关（12个器件引脚）的 708 主机，或者使用最多 6 个矩阵开关（最多 72 个引脚）的 707 主机。不同门和漏极应力值的总数受到系统中 SMU 数量的限制。图 4 说明了使用 8 个 SMU（总共 8 个不同的漏极和栅极应力偏差）加上一个接地单元（接地端子）并联 20 个晶体管对器件进行压力测试的连接图。

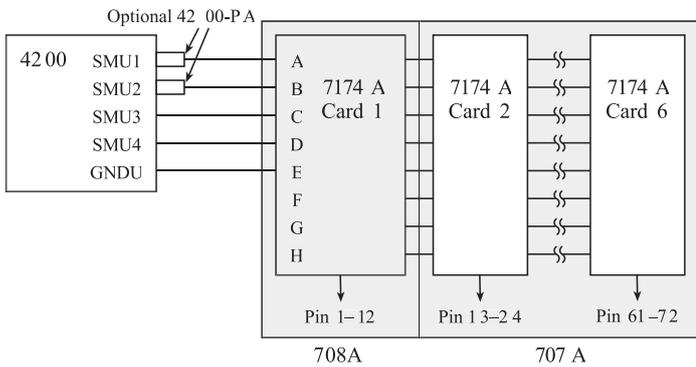


图 3. 硬件配置连线图

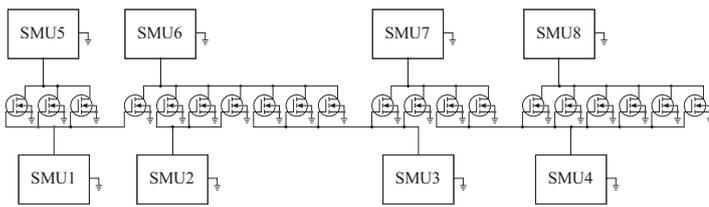


图 4. 使用 8 个 SMU 并行施加压力 20 个器件的示例。公共端子使用单独的接地单元 (GNDU)。

确定器件参数

被监测的热载流子参数包括 V_{TH} 、GM、 I_{DLIN} 和 I_{DSAT} 。这些参数在应力之前首先测量，并在每个累积应力时间后重新测量。 I_{DLIN} 是器件在线性区域测量漏极电流，而 I_{DSAT} 是器件在饱和区域测量漏极电流。 V_{TH} 和 GM 可以用恒流法或外推法来确定。在外推法中， V_{TH} 是由 $I_{DS} - V_{DS}$ 曲线的最大斜率来确定。

4200-SCS 的公式生成器工具大大简化了这些参数的提取。内置函数包括微分获得 GM，MAX 函数获得最大的 GM (Gmext)，以及最小二乘线拟合函数提取 V_{TH} (Vtext)。计算这些参数的公式可以在 4200-SCS 提供的 HCI 项目中找到，并在测试库中的相应的测试中找到。这些公式的一些例子包括：

$$GM = DIFF(DRAIN1,GATEV)$$

$$GMEXT = MAX(GM)$$

$$VTEXT = TANFITXINT(GATEV, DRAIN1, MAXPOS(GM))$$

最后一个公式 (VTEXT) 是 ID-VG 曲线在最大 GM 点处的切线拟合的 x 截距。图 5 说明了公式编辑器的界面。

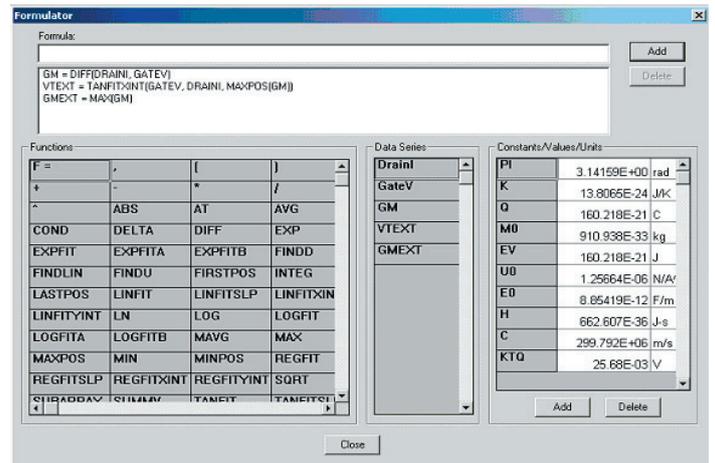


图 5. 4200-SCS 的公式编辑器界面

一旦这些参数从各个测试中计算出来，它们就可以通过选中“输出值”选项中的复选框来导出，以监测应力时间的退化。对于每个测试，都可以选择一个遵从性退出选项，允许系统跳过该器件，或者在器件出现故障时停止整个 CHC 测试。有关这些选项的更多详细信息，请参阅完整的 4200-SCS 参考手册。

设置应力条件

在 4200-SCS 软件的吉时利测试环境交互 (KTEI) 5.0 版本中增强的功能之一是项目树结构中可以增加一个应力循环，可以施加电压和电流应力。用户可利用应力循环在预设时间上设置直流应力。每个周期的应力时间可以以线性或对数的方式进行设置 (见图 6)。该特性用于 CHC/HCI、NBTI、EM (电迁移率) 和电荷捕获应用，以提供恒定的直流应力 (电压或电流)。在应力 / 测量模式下，用户可以为被测器件的每个终端设置应力条件 (图 7)。在每个应力周期之后，4200-SCS 经过一个测量序列，其中可以包括任意数量和类型的用户定义的测试和参数提取。这些参数随时间的退化情况被绘制在应力图中。4200-SCS 的“工具包”体系结构为用户在创建测试序列和压力测量方面提供了巨大的灵活性。

对于关键参数，可以设置一个目标退化值 (图 7)。一旦该参数的退化超过了目标值，特定的测试将停止。通过消除不必要的压力和测量故障器件上的周期，将会节省了大量的时间。

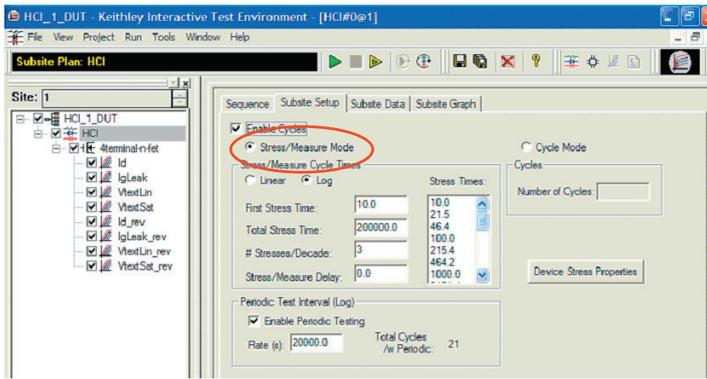


图 6. 应力循环设置页面

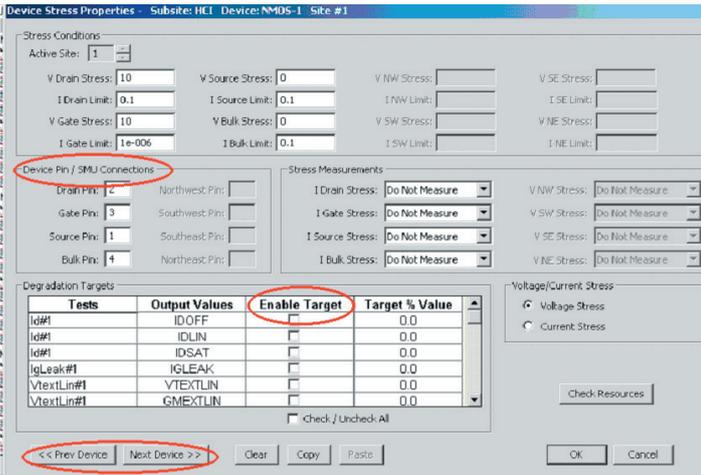


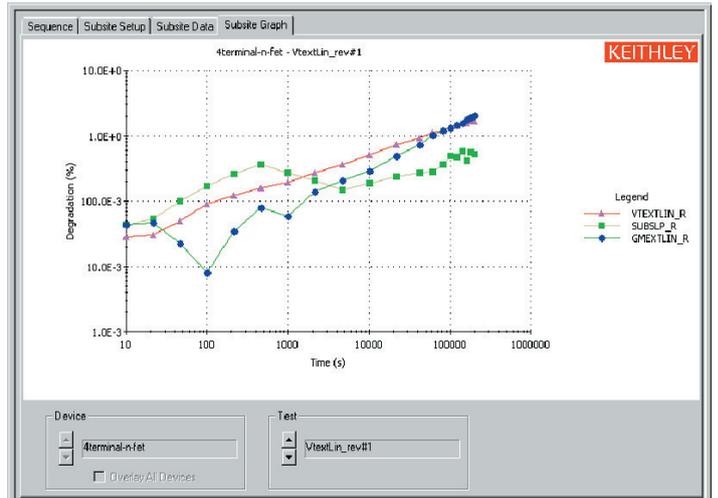
图 7. 器件应力 / 引脚连接 / 退化目标值设置窗口

如果项目中定义了多个 DUT，则可以使器件压力设置窗口中的“上一个器件”和“下一个器件”按钮在器件之间进行切换 (图 7)。“复制”和“粘贴”按钮可以用于将压力设置从一个器件复制到另一个器件中，而不需要在所有输入字段中重新输入所有信息。由于多个器件在不同的应力配置中并行施加应力，因此很难将所需的不同应力的数量和可用于应用它们的 SMU 的数量联系起来。按下“检查资源”按钮，可以很容易地确定是否有足够的 SMU 来处理所有涉及的压力，并查看这些 SMU 是如何分配给每个不同的压力的。如果开关矩阵连接到系统上，并且如果终端上的应力为 0V，则默认使用接地单元。

图 8a 显示了一个单独的数据表 (图 8a)，它可以合并到相应的应力设置窗口中，以保存有关周期指数、应力时间和从应力之间的测量中提取的监测参数的信息，如 ID 和 VT。数据将以 Excel 文件格式 (.xls) 自动保存在项目目录中，将数据以文本或 Excel 文件的形式导出到其他位置。如果系统处于应力 / 测量模式，监测参数相对于预应力测量的退化会自动计算，并可以绘制在图 8b 中。有关更多压力测量的信息，在 KTEI 5.0 软件中提供的功能，请查阅完整的 4200-SCS 参考手册。

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
	Cycle Index	Stress Time	Id#1 IDOFF	% Change IDOFF	Target Value	Id#1 IDLIN	% Change IDLIN	Target % Value	Id#1 IDSAT	% ChaL IDSA
1	1	0.00	2.2961E-6	0.0	0.0	206.6173E-6	0.0	2.3084E-3		
2	2	10.00	2.2962E-6	0.0	0.0	206.6067E-6	0.0	2.3079E-3		
3	3	21.54	2.2969E-6	0.0	0.0	206.6530E-6	0.0	2.3075E-3		
4	4	46.42	2.2961E-6	0.0	0.0	206.6623E-6	0.0	2.3065E-3		
5	5	100.00	2.2969E-6	0.0	0.0	206.6729E-6	0.0	2.3050E-3		
6	6	215.44	2.2962E-6	0.0	0.0	206.7419E-6	0.1	2.3030E-3		
7	7	464.16	2.2973E-6	0.1	0.1	206.8341E-6	0.1	2.3014E-3		
8	8	1000.00	2.2984E-6	0.1	0.1	206.7077E-6	0.0	2.3020E-3		
9	9	2154.43	2.2995E-6	0.2	0.2	206.6199E-6	0.0	2.3018E-3		
10	10	4641.59	2.2998E-6	0.2	0.2	206.3669E-6	0.1	2.3022E-3		
11	11	10000.00	2.3015E-6	0.2	0.2	206.2490E-6	0.2	2.3029E-3		
12	12	21544.36	2.3024E-6	0.3	0.3	205.7325E-6	0.4	2.2985E-3		
13	13	41544.36	2.3025E-6	0.3	0.3	205.1181E-6	0.7	2.2966E-3		
14	14	61544.36	2.3035E-6	0.3	0.3	204.6049E-6	1.0	2.2942E-3		
15	15	81544.36	2.3041E-6	0.3	0.3	204.3178E-6	1.1	2.2913E-3		
16	16	101544.36	2.3045E-6	0.4	0.4	203.9769E-6	1.3	2.2887E-3		
17	17	121544.36	2.3049E-6	0.4	0.4	203.6177E-6	1.5	2.2881E-3		
18	18	141544.36	2.3055E-6	0.4	0.4	203.5094E-6	1.5	2.2869E-3		
19	19	161544.36	2.3064E-6	0.5	0.5	203.0629E-6	1.7	2.2868E-3		
20	20	181544.36	2.3067E-6	0.6	0.6	202.8061E-6	1.8	2.2845E-3		
21	21	200000.00	2.3100E-6	0.6	0.6	202.4961E-6	2.0	2.2837E-3		

a)



b)

图 8. a) 应力数据表存储所有应力信息，包括应力期间的测量结果和应力之间测量的选定参数。b) 退化百分比数据作为应力时间函数的图

建立 CHC 项目

下面的步骤概述了构建 CHC 项目的典型过程。有关每个步骤的详细信息，请参考完整的 4200-SCS 参考手册。

1. 创建项目结构
 - a. 确定开关矩阵是否可用
 - b. 确定是否有足够的 SMU 可用
 - c. 构建项目结构
2. 在应力之间建立测试
 - a. 如果使用了开关矩阵，进行开关连接。
 - b. 使用交互式测试模块 (ITMs) 构建新的测试

- c. 使用公式器工具计算器件参数
 - d. 在合理条件下设置退出
 - e. 对于监测退化，导出监测的参数值
 - f. 重复步骤 b 到步骤 e，以监控更多的参数
3. 如果有多个 DUT，则重复步骤 2。
 4. 在子项目中，设置应力条件。
 - a. 设置压力时间
 - b. 设置器件应力条件
 - i. 应力电压
 - ii. 引脚连接
 - iii. 目标退化值
 - iv. 进入下一个器件
 5. 运行项目并检查退化数据

参数退化数据和原始测量数据在项目运行期间自动以 Excel 文件格式保存。因此，即使项目在完成前就停止了，也已经捕获了测量数据。应力之间的原始 I-V 曲线可以叠加在应力循环上，所以很容易看到 I-V 是如何作为应力时间的函数而退化的。图 9 显示了覆盖 21 个应力循环后的 Vgs-Id 曲线。

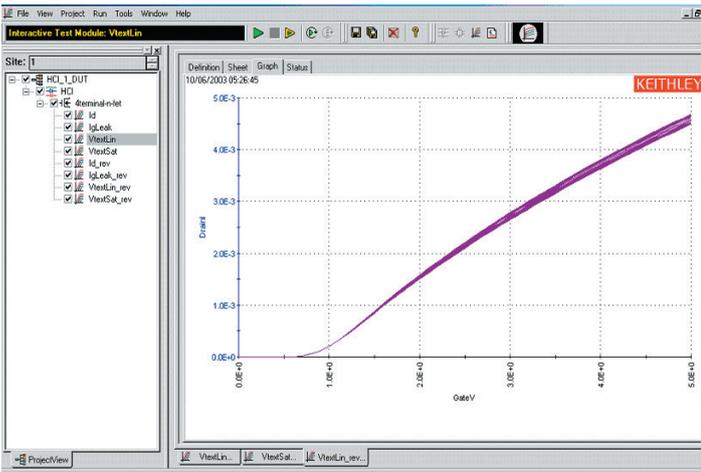


图 9. 多个应力的叠加数据图

图 10 是一个在晶圆片上测试五个位置的 CHC 项目的例子。4200-SCS 通过与市场上最常见的半自动探针台兼容的内置驱动程序控制探针台的移动。

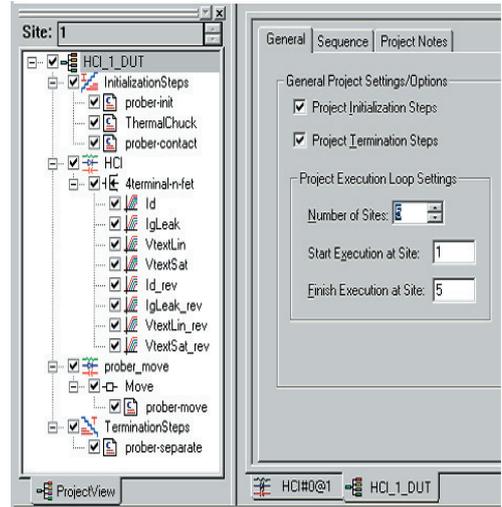


图 10. 晶圆级 CHC 测试的范例

结论

KTEI5.0 软件中增强的应力测量循环可以轻松设置 CHC 测试。结合交互式测试界面、公式工具和强大的图形功能，KTEI 5.0 软件使 4200-SCS 成为评估器件可靠性参数的理想工具，如 CHC 诱导的 MOSFETs 退化，以及它在器件表征中更为人知的的作用。

参考

- [1] JEDEC 标准 28-A, “Procedure for Measuring N-Channel MOSFET Hot-Carrier-Induced Degradation Under DC Stress”, 2001。
- [2] Vijay Reddy, “An introduction to CMOS semiconductor Reliability”, IRPS 教程, 2004 年。



Keithley Instruments, Inc.

28775 Aurora Road • Cleveland, Ohio 44139 • 440-248-0400 • Fax: 440-248-6168
1-888-KEITHLEY (534-8453) • www.keithley.com