

# SRAM失效分析

谢凯翔  
(是德科技)

## 1 引言

目前,能探测极窄线宽的纳米探针技术取得了许多进展,从而能表征集成电路内单个器件的电气特性。这篇文章将介绍如何用 B1500A 半导体器件分析仪进行这类测量,我们通过 SRAM 失效分析说明这项技术。

常规存储器失效分析是用逻辑测试仪探测有失效的比特位,然后用扫描电子显微镜 (SEM, scanning electron microscope) 和透射电子显微镜 (TEM, transmission electron microscope) 进行实际观察和判断造成失效的成因。但 SEM 和 TEM 都属破坏性的测试,只能在若干可能失效位置中观看其中一个点。这就大大限制了定位失效具体成因的能力。此外,对于非常小的残留物或异常掺杂密度造成的电性失效,也难以采用传统的物理观察技术来发现,因此需要增加一些其它类型的电气测试。

常规器件电气测试方案需要把器件放在带探针测试点的 TEG (测试元件组) 中,而这一 TEG 则通常放在晶圆片上芯片间的切割道中。显然,这种方法不能在实际芯片内的失效位置上进行电气表征。目前,利用扫描探针显微镜 (SPM) 技术的纳米探测已能使用压电致动器达到纳米级 (9-10 nm) 的探测水平。而本文介绍的是一种新的失效分析技术,这项技术使用一种通用的纳米探针,来自日立高科技公司制作的 N-6000 精细结构器件表征系统,以

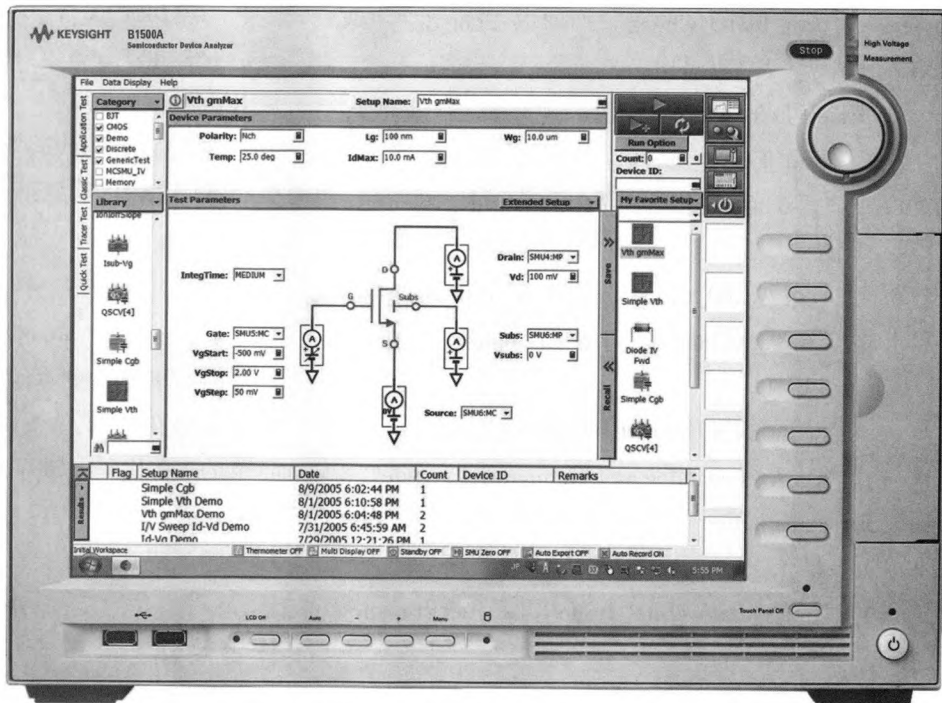


图 1 是德科技 B1500A 半导体器件分析仪

及 Keysight B1500A 半导体器件分析仪。N-6000 可以直接接触集成电路内的器件,从而有助于弥补物理和电气失效分析技术之间的差异。

## 2 纳米探针的优势及测试挑战

通过选择适当的预处理技术,就可以用纳米探针测量失效器件中的单个晶体管 and 连线,它们就如同是标准 TEG 中的被测器件(见图 2)。这是一个革命性的飞跃;但纳米探针也带来与其自身相关的挑战,由于存在热膨胀和压电致动器的“滑动”,因此难以在长时间内保持良好的电气接触。

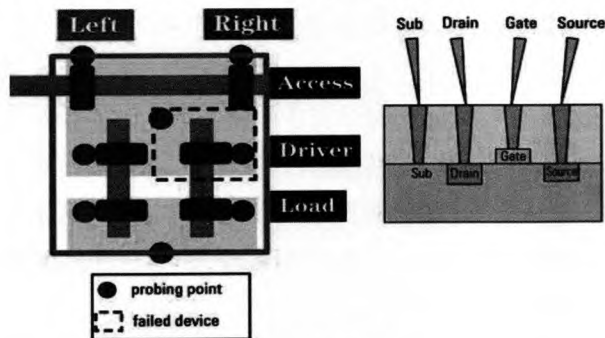


图 2 使用纳米探针探测 SRAM

B1500A 半导体器件分析仪有能力应对这些挑战,在建立了良好的电气接触后,B1500A 的 Easy-EXPERT 软件能在短时间内快速运行一项或多项应用测试。

接下来将介绍如何用 B1500A 和纳米探针,利用 NEC 电子公司提供的数据对 SRAM 进行失效分析。

## 3 使用纳米探针 +B1500A 进行 SRAM 失效分析

SRAM 失效分析的第一步是用逻辑测试仪找出有疑问比特位的位置。但逻辑测试仪无法确定 SRAM 单元中的 6 个晶体管到底是哪一个晶体管有缺陷。传统失效分析的下一步是在 SRAM 单元内估计有缺陷的晶体管位置,用 TEM 对 SRAM 进行有

破坏性的分析。

即便如此,有时仍不能确定 SRAM 的失效原因,这说明物理分析和电气分析能力上存在着差距。如图 2 所示,纳米探针能直接探测被怀疑 SRAM 单元中的 6 个晶体管,并对其进行单独的电气评估,从而有助于弥补物理测量和电气测量的差距。当然,为进行这种类型的分析,必须去除表层,从而能单独接触每一个晶体管。这类似于用 TEM 和 SEM 进行传统失效分析的过程。如上所述,在使用纳米探针时,可以用非常短的时间进行电气测量。因此 B1500A 是非常适合用于这种情况下测量的仪器,因为它提供大量的应用测试,能通过简单的参数设置进行测量,并且测量速度快。

图 3 是用 B1500A 和纳米探针测量失效 SRAM 存储器单元 6 个晶体管的  $I_d-V_d$  曲线。图 (a) 是接入晶体管,图 (b) 是驱动晶体管,和图 (c) 是负载晶体管。实线表示左晶体管,虚线表示右晶体管。从这些图可很容易确定 SRAM 比特位的失效原因是右侧驱动晶体管有缺陷。

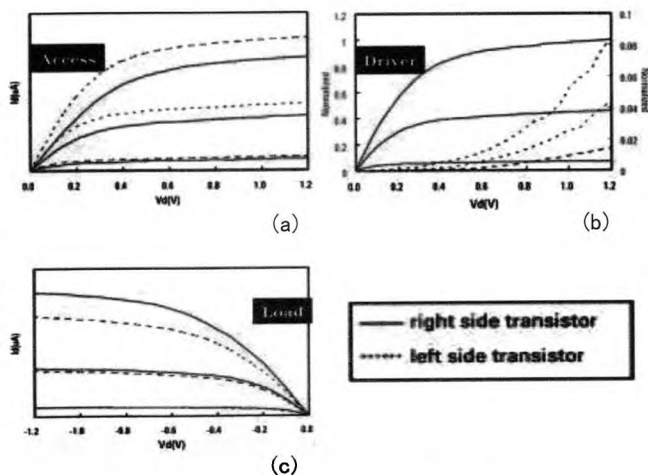


图 3 纳米探针和 B1500A 测量的 I-V 曲线

为了对有失效的晶体管进行更详细的分析,需要通过变换源极 (S) 和漏极 (D) 测量晶体管。图 4 (a) 是正常晶体管的特性。图 4 (b) 是明显有缺陷的晶体管的特性。图 4 (c) 是反转晶体管的源极/漏极所进行的测量(注意:使用 B1500A 能非常容易地执行这项测量,并且不需要变动任何设备连

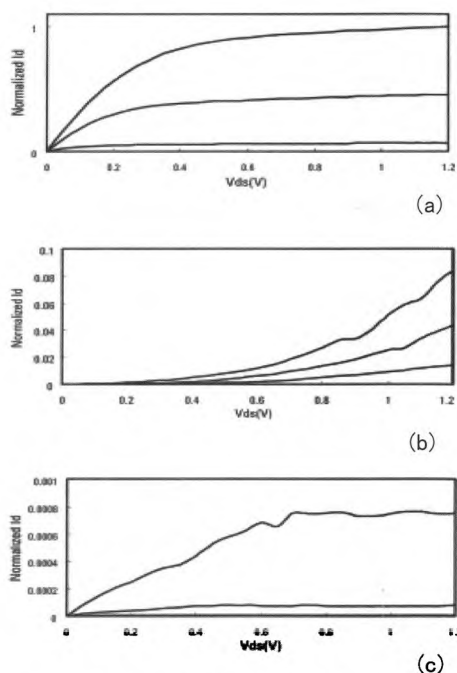


图4 对掺杂轮廓缺陷的失效分析数据

接)。在 S/D 正向情况下,电流只比正常值低一位,并且 I-V 曲线呈下降趋势。反之,在 S/D 反向情况下,虽然 IV 曲线呈上升趋势,但流过的电流还不到正常值的 1/1000。

把测量结果与模拟结果想比较,可推测失效晶体管左电极下面的砷(As)掺杂密度不在规定水平。下一步骤是查看可疑晶体管的断面 TEM 图像。图 5(b)为 EDX(能量色散 X 射线谱仪)提供的砷掺杂各向异性轮廓图,此图证实失效成因的假设。仅使用常规断面 TEM 观察不能完成这种类型的详细分析。表明 B1500A 和纳米探针的组合是比单独采用常规失效分析技术更为强大的解决方案。

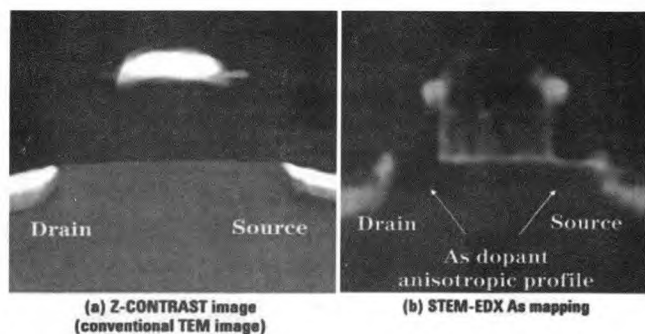


图5 异常 NMOS 断面

## 4 在 B1500A 中自定义 SRAM 失效分析程序

B1500A 半导体器件分析仪 EasyEXPERT 软件的标准配置包括 150 多种应用测试。这些应用测试支持大部分基本 I-V 测量需要。此外,还可通过基于 GUI 的内置测试开发环境,容易地修改所提供的应用测试,建造新的应用测试,并构成应用测试串(包括支持条件分支)。

图 3 中的数据是 Id-Vd 测量结果。当使用 I-V 测量评估 SRAM 中的 MOS 晶体管时,通常进行的是 Id-Vd 测量或 Id-Vg 测量。

如前所述,在明确了有失效的 SRAM 单元后,接着要确定单元中 6 个晶体管究竟是哪一个晶体管坏了。一种方法是对单元中的每一个晶体管作电气表征,这可用纳米探针进行。同样重要的是,在两个方向上(调转源极和漏极)测量晶体管,把实际器件性能与模拟的器件性能相比较,因为这样做能够暴露生产流程中的问题。

有几种实现上述测量的可选方法。一种选择是为反转的源极和漏极建立两套单独的应用测试,然后对每一个晶体管进行这两套测试。这种方法的缺点是把时间浪费在了不必要的测量上。第二种选择是首先对每个晶体管进行标准晶体管测量,然后对被怀疑的晶体管进行反转源极和漏极的第二次测试。这种方法的问题是如果手工执行也许要花费大量时间,因为在完成测试前有可能难以保持电气接触。第三种选择(类似第二种)是首先对每一个晶体管进行标准测量,然后人工切换可疑晶体管的连接,并重复进行这些测试。虽然这种方法不需要建立第二套测试,但人工切换却需花费更多的时间。使用 B1500A 的 EasyEXPERT 软件,能极为容易地改变源极和漏极的 SMU 设置。这意味着它能方便地变更工作不正常晶体管的源极和漏极设置,用最短的时间完成所需要的测量。

图 6 是 SRAM 失效分析应用测试流程图例子。该程序的要点为:

1. 选择需要的测量测试 (Id-Vd, Id-Vg 测量, 或这两种测量)
2. 设置积分时间
3. 设置图形屏幕的 X 轴
4. 指定 SMU 的源极和漏极 (设置通道)
5. 进行测量 (Id-Vd 测量或 Id-Vg 测量)

6. 在检查测量结果后,在消息对话框中选择下一步骤

- 1) 在切换源极和漏极后测量 (重复上面的 4 和 5)
- 2) 结束

注意: 如果在上面的步骤 1 中选择 Id-Vd 和

Id-Vg 这两种测量, 那么在 Id-Vd 测量后会重复进行步骤 2 至 6 来做 Id-Vg 测量。

图 7 示出应用测试定义主窗口和扩展设置屏幕。可在主窗口中选择测量项目, 设置用于晶体管每一端的通道, 以及设置测量条件。在 EasyEXPERT 主窗口设置这些参数后才可进行测量。

## 5 总结

传统分析方法对许多失效机制 (如掺杂异常) 是难以探测的。但通过 Keysight B1500A 与纳米探针的结合, 就有能力探测集成电路中的单个晶体管, 并且像在常规 TEG 上测量器件那样容易。B1500A 的 EasyEXPERT 软件可随时变更 SMU 引脚设置, 与 EasyEXPERT 强大的应用测试序列能力一起, 即可快速和高效地在正反两个方向上对被怀疑的晶体管进行自动评估。在使用纳米探针时, 用极快速度执行这一电气测试是非常重要的, 因为电气接触只能保持一个很短的时间, 所以必须要在这一时间内完成测量。

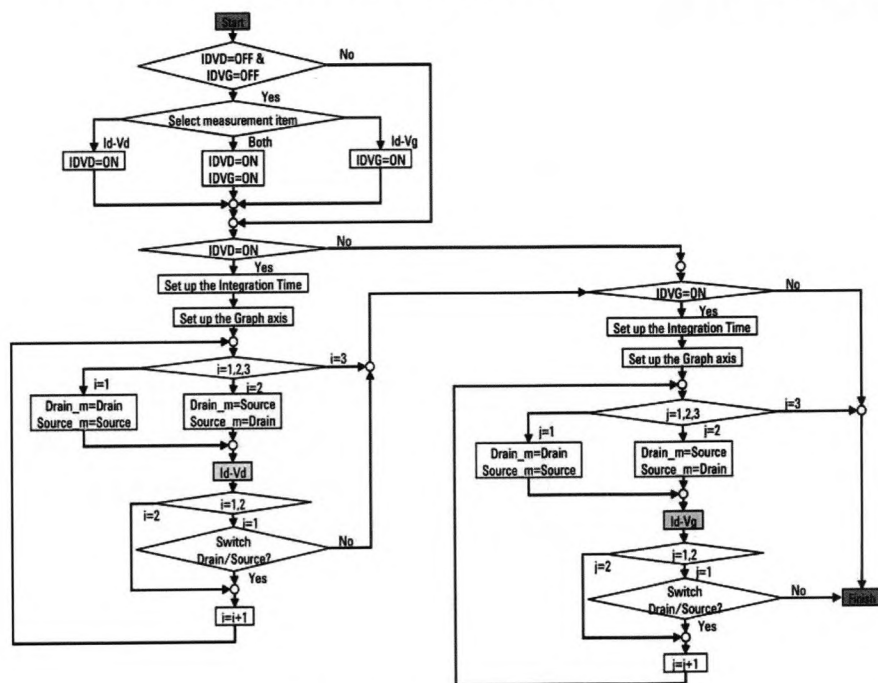


图 6 SRAM 失效分析的应用测试流程图

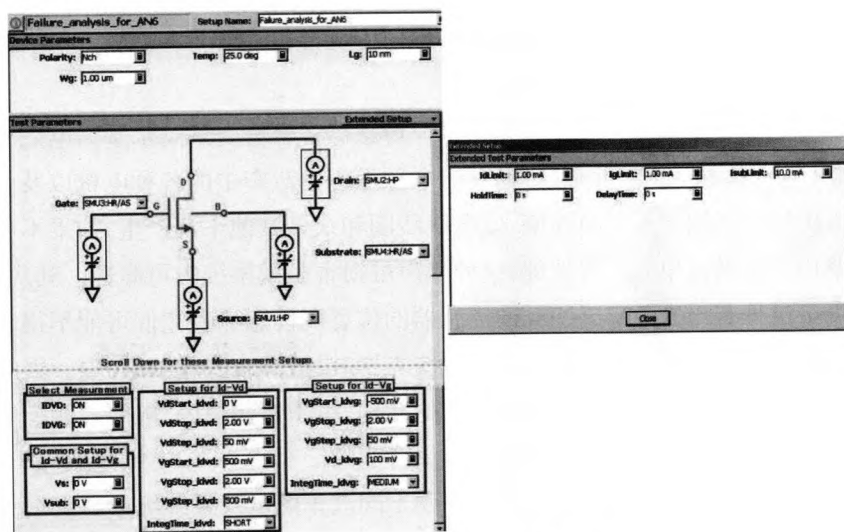


图 7 SRAM 失效分析应用测试主窗口和扩展设置屏幕