

# 面向BTI特征分析的在运行中阈值电压测量

传统CMOS工艺缩放技术的发展正逐渐逼近极限，迫切需要采用新材料和新器件设计。随着这些新材料和新设计的出现，人们非常关注潜在失效机理，并需要进行更多的可靠性测试。诸如偏温不稳定性（N-BTI和P-BTI）等失效机理需要高速信号源和测量功能才能解析快速恢复效应。通过分析包括在运行中测量在内的各种测量技术，有助于利用合适的仪器实现有效的测量解决方案。

偏温不稳定性（Bias Temperature Instability, BTI）是指当MOSFET经受温度应力时阈值电压出现的不稳定现象。对于模拟应用，例如晶体管成对匹配，很小的阈值电压漂移都会导致电路失效。通过增大晶体管的面积可以减少多种影响FET匹配的工艺偏差，这使得BTI成为限制因素。

在CMOS缩放工艺和精确模拟CMOS技术中，监测并控制偏温不稳定性——包括负偏（NBTI）和正偏（PBTI）——的需求日益增大。当前NBTI的JEDEC标准将“测量间歇期间的NBTI恢复”视为促使可靠性研究人员不断改进测试技术的关键。实验数据表明，测量下降的时间斜率与测量

延迟和测量速度密切相关。

人们已经研究出几种测量技术，能够最大限度减少测量延迟，提高测量速度，同时监测工艺导致的BTI漂移。每种技术都各有优缺点。本文将分析其中一些技术，包括在运行中测量，并讨论有效实现BTI应用所需的测试仪器。

## 在运行中技术

BTI特征分析正逐渐成为半导体设计与制造中的一个关键测试项目。Denais等人曾介绍过一种方法，通过采用一种原本与VTH漂移相关的间接测量方法将测量间歇期间的恢复减至

最小。间歇式测量通过只用三项测量来减少“无应力（off-stress）”时间，如图1所示。几乎所有的参数测量系统都支持这种技术。但是，大多数GPIB控制的仪器都缺乏灵活性，并且受限于GPIB通信时间和仪器的内部速度。因此，器件在测量过程中仍会保持将近100ms的无应力时间。这些局限性会妨碍我们监测这100ms时间限制内的退化和恢复情况。

实现OTF技术最关键的要素是采用高速源测量单元，即SMU。这种高速SMU提供了多种重要功能。可能其中最重要的是快速连续测量速率，连续两次测量之间的时间间隔小于 $100\mu\text{s}$ ，这样就能够限制BTI效应。快速的源稳定时间也实现了最大的源测量速度，并且提高了测量产能。另外一个关键功能是微秒级分辨率的时标。这确保我们能够进行正确的时序分析，有助于提高精度。采用精密电压源能够满足低漏极偏压的需要，也有助于实现精确的测量。最后，采用大数据缓冲有助于确保连续监测器件退化和恢复情况。

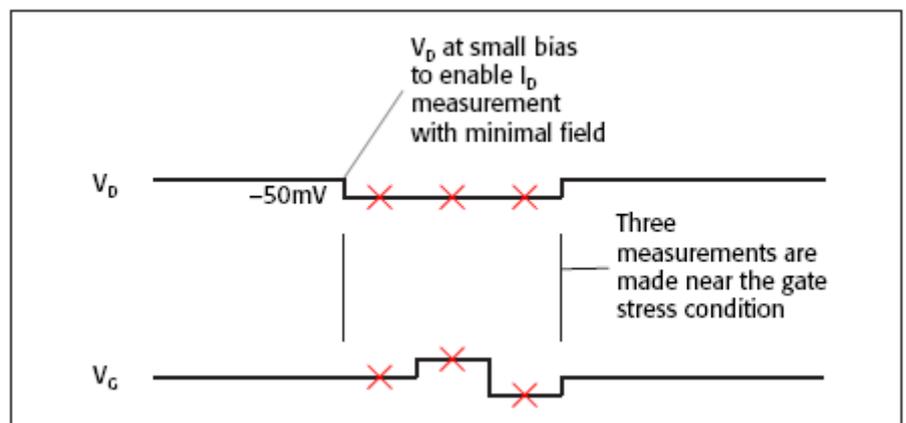


图1. 采用在运行中（OTF）技术大大缩短了无应力时间。与进行费力的ID-VG扫描（IDlin和IDsat）并提取VTH参数不同的是，OTF技术保持栅应力和漏极电压接近地电平。

## 常用的OTF技术

一种常用的OTF技术是只监测漏极电流，有时也称为唯ID技术。它在漏极上提供大小为25-100mV的小幅偏压，并连续测量漏极电流。这里，连续的采样速率是关键。

这种技术的一个优势是，在撤销应力后可以在很短的时间内捕捉到BTI机理的恢复动力（recovery dynamics）。实验表明恢复动力相比退化动力对工艺偏差表现出更大的可变性和灵活性。

另外一种OTF单点技术。它与唯ID技术十分类似，只是在线性区间内测量ID。这里的关键是通过缩短测量时间最大限度减小退化恢复时间。图3给出了一个OTF单点测量的例子。

某些研究人员可能关心的是很多OTF技术采用与所关注参数关联度太远的间接VTH测量技术。例如，将仅监测ID作为过渡性测量可能无法充分剖析实际的VTH漂移，因为其他一些参数漂移，例如由于界面态下降导致迁移率下降，可能由于VTH的变化而影响与此相关的ID。

OTF VTH方法只是通过扫描以 $g_{m-max}$ 为中心的几点来取代图1中Denais OTF方法的三项测量，如图2所示。其中提取的VTH比仅仅从三项测量中推导的VTH值更加精确。只是它的精度取决于测试系统的白噪声、信号源的稳定速度和测量集成率。

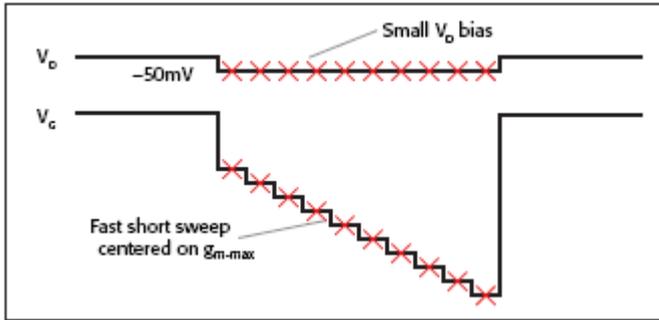


图2. VTH OTF采用以 $g_{m-max}$ 为中心的快速短VG扫描。这种技术能够在5.4ms内完成10点扫描并恢复应力条件。如果仅仅测量ID，这一时间可以缩短到3.8ms。

## 测试仪器解决方案

有很多种SMU测试仪可以用于实现各种BTI测量，它们各有优势。要获得更佳的BTI测量效果需要满足几个关

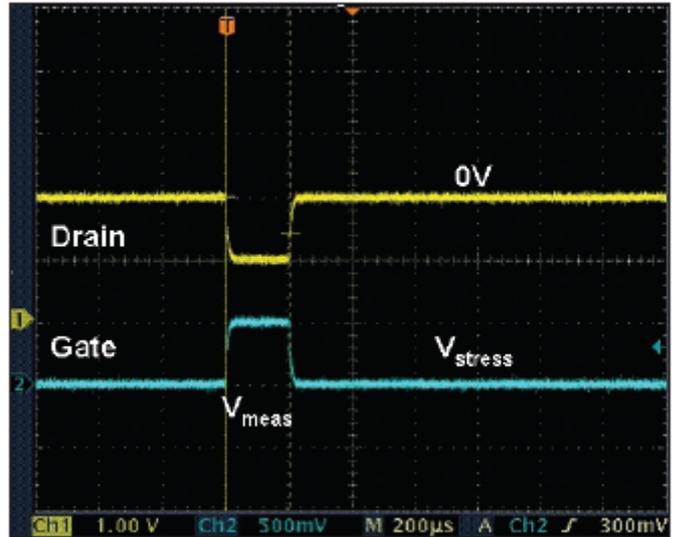


图3. 采用吉时利2600系列数字源表进行OTF单点测量时BTI测试结构上源极和漏极电压的示波器图像。该结构能够在200 $\mu$ s内测量并返回应力条件，比传统SMU的速度快得多。

键特征，包括源电压转换速率、信号源稳定时间、测量速度、测量可重复性以及测试序列的时间可重复性。

较早的SMU仪器往往需要几十毫秒才能提供一个新的定点电压，稳定到可接受的电平，进行精确的测量。这些SMU对于BTI测量而言作用十分有限。更先进的SMU能够在几百微秒内完成一个源-延迟-测量周期，比较早的设备快两个数量级。要想获得最好的结果，最好的SMU架构能够在多个通道上执行任意长度的源-延迟-测量周期而不会出现速度下降的问题。此外更为重要的是，即使在并行测试架构下每个器件都可以保持SMU时序。

这里所介绍的测量操作可以采用吉时利2600系列数字源表来实现。采用一台2612结合两个四象限源测量单元和一个嵌入式测试脚本处理器（TSP），就可以独立实现完整的BTI特征分析。

吉时利2600系列数字源表独特的架构能够在大约2ms之内完成Denais OTF过渡性测量并将测试结构恢复到应力条件。2600系统还具有90 $\mu$ s的连续采样间隔，最多可在仪器缓存中保存50000个数据点。此外，2600系列能够实现大约200 $\mu$ s的短时栅压中断。

## 结束语

不论采用何种方法，最好的BTI测量需要非常快速的信号源和测量协调能力。采用OTF技术若没有高速的源测量仪器就会使人对器件寿命预测的准确性产生怀疑。



美国吉时利仪器公司

全国免费电话：400-650-1334 / 800-810-1334

邮箱：china@keithley.com

网址：www.keithley.com.cn