

# 测试系统是开启纳米技术实际应用之门的钥匙

Sergei Skarupo  
Nanomix公司

为确保高可靠性，Nanomix公司对基于碳纳米管技术的FET进行了晶圆级测试，在模拟使用条件下对封装的纳米管传感器进行了测试。

## 传感器的生产

位于加州埃默里维尔市的Nanomix公司是最先面向市场推出纳米电子探测设备的公司，并不断开发它的Sensation™碳纳米管（CNT）技术实现高附加值诊断与监测应用。目前该公司的产品包括呼吸气体监测设备和用于各种应用的液体介质生物分子探测器。

极具代表性的是，Nanomix传感器是基于采用化学汽相沉积工艺和某些特殊方法在6英寸晶圆上制备的CNT网络FET制成的。有时候采用了柔性衬底和喷涂工艺。CNT网络上喷涂了一层功能层，与感兴趣的化学或生物分析物相互作用。功能层和分析物之间的相互作用会使FET的电气特征产生可测量的变化。如图1所示。利用CNT的纳米级直径及其化学和电气特性可以进行超灵敏的探测。最终形成的传感器不但尺寸精巧，而且功耗极低。

在生产过程中，我们需要在晶圆级进行测试以评测FET的基本特征。在FET功能形成后，将封装后的器件暴露给目标分析物，然后分析它们的探测特征。

## 晶圆级测试

在晶圆级测试中，我们要在生产各个阶段进行 $I_d-V_d$ 和 $I_d-V_g$ 测量。这些测试工作要在真正的器件和特殊的测试结构上进行。测试设备包括一台半自动探测器——吉时利2400型数字源表、带7011C多路复用卡的7002型开关矩阵和一台用于控制测试序列的PC机。

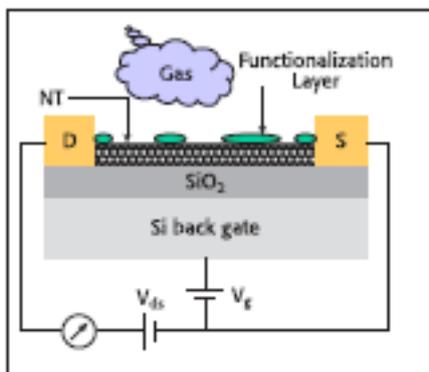


图1. 气敏元件中CNT网络FET的电气结构图

在晶圆探测器上进行测试不需要暴露给目标分析物。分析测试结果，例如晶圆图上某些特征的渐变情况，有助于开发过程不同阶段的精细调节。在生产过程中可以采用一种QC测试法进行晶圆处置和管芯选择。

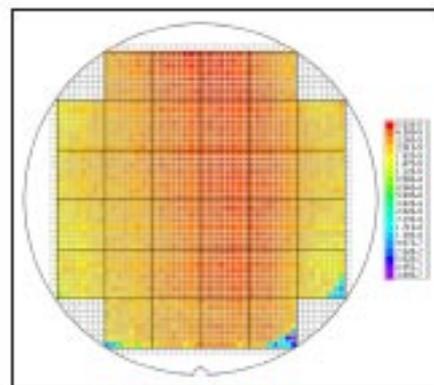


图2. 晶圆图的例子。用户可以点击该图查看某个特殊器件的 $I-V$ 曲线和计算出的特征值。

一般而言，FET的某些特征，例如 $G_{min}$ 、 $G_{max}$ 、跨导等，是根据原始 $I_d-V_g$ 数据计算出来的。然后将这些原始数据和计算出的特征值上载到一个生产数据库中。工程技术人员可以利用专门的软件从该数据库中产生直方图和交互式晶圆图（如图2所示），对晶圆图进行一致性检查，对比晶圆上不同类型的器件。如果需要，还可以对多个晶圆或一个晶圆内进行统计分析。

## 传感器封装测试

我们还可能需要在环境试验箱中对封装后的CNT网络FET和使用这些FET的化学传感器进行测试。

通常情况下，分析物混合气体是利用Nanomix开发定制的一种气体传送系统（GDS）通过安装在测试夹具板上的特殊气管进行供应的。待测器件（DUT）具有各种封装配置。DUT的数量可以从一个到上百个不等。在将器件装上适当的测试夹具之后，它

们就被暴露给分析物，然后在测试过程中改变环境条件。这一过程也可能需要利用其它参考传感器进行监测。

根据所执行的测试类型，DUT可能需要不间断偏压，通常在5mV到500mV之间。根据设计与制造方法，器件电导的范围可能从1微西门子到100毫西门子。

在研发测试情况下，主要目标是通过对所测参数的统计分析，对传感器进行特征分析，对不同的制造方法进行直接对比。在研发和生产过程中，主要的测试目标是实现多器件高产能测量。

为了简化测试和分析过程，DUT按测试组进行排列，这种技术在实验设计中称为分块。一个测试组可能由名称相同的器件组成，或者正好相反，某些器件可能故意不同。器件的识别信息（例如晶圆、管芯位置、封装引脚、功能类型等）只录入一次，用于该测试组的所有实验。一个组中的所有器件都置于相同的测试和存储条件，以及相同的测试序列，这有助于减少错将未知因素作为器件之间固有差异的可能性。

## 原始测试系统设计

最初，Nanomix的测试系统是由定制设计的DUT夹具、板载多路复用器和电流前置放大器构成的，所有组件通过ADC和DAC板互连在一起。测试控制是由一台运行LabView的PC机实现的。

但是，这种测试夹具尺寸太大，太复杂，难以维护和排除故障，只支持40针的DIP封装，在高于室温的情况下无法可靠工作。在利用多路复用方式进行测量时，在所有器件上维持恒定的偏压是不可能的。此外，这种系统的量程十分有限，分辨率不够高，循环次数过多。由于测试复杂并且需要快速适应变化的需求，因此测试控制也变得十分困难。这样一来，要想在工作过程中改变测试就需要维护多个软件版本。

## 新型测试系统改进了所有测试参数

为了克服这些局限性，Nanomix开发出了一种称为Zephyr的自动测试系统。之前我们面临的一个主要挑战是处理多种封装类型和测试条件所需的灵活性。采用了简单的无源测试夹具容纳几种不同类型的DUT封装。这些通过1.5m长的DB25双绞线与测试系统相连，可以将夹具放进环境试验箱中。（测试夹具和线缆比较便宜，容易制作。）通过这种硬件，可以单独对DUT进行加热或冷却。



图3. 一种Zephyr测量系统的安装示意图

Zephyr系统的一个重要优势在于它的灵活性。它能够根据测试的需要结合不同的测量设备配置来使用。一种典型应用（如图3所示）采用了带两块多路复用卡的吉时利开关矩阵，一个是2400型SMU，另一个是2602型数字源表，和一个定制的触发链接适配器。更复杂的测试，或者涉及更多数量DUT的测试，可以采用更多的开关矩阵、开关和SMU。

测试执行软件是由与平台无关的Java语言编写而成的（当前的版本只包含串口和GPIB的Windows驱动，但增加新的驱动也是十分方便的）。这种软件支持多个厂商的仪器。测试序列采用一种基于XML的专用脚本语

言编程。利用系统提供的模板，用户可以在具有自动完成、语法检查等功能的编辑器中编写脚本文件。脚本文件也可以是源控制的，从而可以追踪变化，或者在必要的时候回到较早的版本。

Zephyr软件的灵活性归因于下列特性之间的松耦合性：

测试脚本决定了所有开关和测量操作的顺序和时序，包括DUT和标准测量，以及加热控制器和某些气体传送系统的控制功能。这种方式称为专用领域编程语言（domain-specific programming language）。

无需修改脚本本身，对于每次测试运行和每次安装，都可以修改测试脚本的设置，例如器件地址、电压电平、测试持续时间、测量频率等。

仪器控制功能提供了由所有脚本共享的通信接口的低级实现。支持多个厂商的仪器。所有仪器适配器使用相同的应用编程接口（API），使得只需对脚本进行很小的改动（如果需要）就可以实现仪器之间可互换。其中一种这样的仪器适配器采集GDS的目标值。

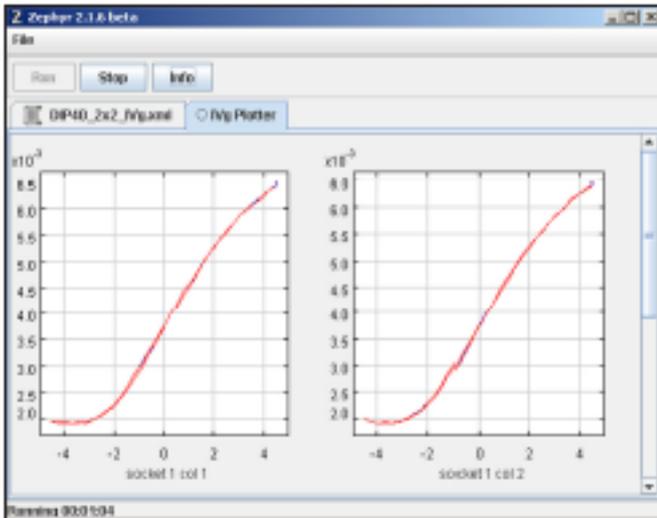
利用该软件很容易实现DUT和测试组的识别。应用可以使用测试组数据将脚本中指定的普通测量名称转换为特殊器件名称。

脚本并不显式地处理数据输出；相反，应用将测量数据发送给各个激活的数据输出组件，再按照特定的格式保存或显式相应的数据。这些组件也使用某种API，并且可由用户控制。某些测试用到了吉时利2600系统内置的测试脚本处理器（TSPTM）。TSP脚本是基于一种广泛使用的编程语言，大小可以从只有几条命令到一大批定义复杂的测试函数。注意，这些脚本与上述Zephyr脚本完全不同。但是，如果需要，我们也可以在使用的Zephyr软件的吉时利2600系统上加载并执行TSP脚本。

该软件增加的最新功能是能够在不增大Zephyr测试脚本复杂性的前

提下测量器件的I-V特征（如图4所示）。在实现这一功能时，增加了一个返回特殊类型测量结果的虚拟仪器（或者按Zephyr术语称为仪器适配器），再由相应的输出组件处理这些测量结果。在后台，这些适配器在测试开始的时候向吉时利2602上加载定制的TSP脚本。对于每个来自于Zephyr脚本的测量请求，适配器调用在加载脚本中定义的一个函数，转换返回的数据给输出组件进行进一步处理。这样，一种新型的测量就可以充分利用硬件功能，无缝集成到系统之中。

图4. Zephyr应用屏给出了实时I-Vg关系图输出分量标在最显著的



位置

目前大约有10个Zephyr脚本已经投入了使用。例如，其中一个脚本用于直流测量，通过典型设置，可以实现每500ms测量16个器件反复执行数小时。测试持续时间或循环数量可由操作者根据特定任务的需要进行设置。通过利用开关矩阵和SMU功能，Zephyr系统大大提高了测试产能。对于某些可以利用老系统实现的应用，这一循环时间缩短了三倍，低电导精度至少提高了两个数量级，分辨率至少提高了一个数量级。

在基于吉时利2602并设置为NPLC的当前系统的基准器件测试中，受噪声限制的分辨率优于250pA，即50mV下为5纳西门子。低电导器件的测量精度好于这些值。对于低电阻器件，测量精度取决于线缆和继电器接触电阻，大约为1.5欧姆。

这些特征指标对于本例是足够的，但是在必要的情况下可以改进。例如，通过采用四线连接可以大大提高低电阻的测量精度，这可能需要一个特殊的夹具和两倍长的线缆。通过增加一个到测试夹具的短路，并在脚本中增加自动修正的程序，可以大大提高测量精度。屏蔽夹具连接线和夹具本身可以进一步减少噪声。三轴连接可用于极低电导的器件测量。

## 结束语

Zephyr已经投入应用近两年了，Nanomix认为它是一种高可扩展的、灵活的测试系统。当前，Zephyr有多种具有不同配置的安装方式。如本文所述，该系统是用于测试封装器件的。但是，Nanomix在其今后的版本中计划支持晶圆级测试和自动探测控制功能。这将替代原来的软件，并支持自动探测测量系统从吉时利2400系列升级到2602，进一步缩短测试循环时间。

2007年2月，Nanomix质量管理体系通过了ISO 9001:2000和ISO 13485:2003认证。依赖简单的测试夹具设计、标准的测量设备、源控制的测量软件和脚本，使得Zephyr测量系统的验证和整个公司的认证得以通过。

尽管该系统得到了广泛应用，但是它仍然是一项进行中的工作。Zephyr软件计划作为一种开源软件在<http://zephyr.sourceforge.net>上发布。我们欢迎所有对该项目感兴趣的用户积极使用该软件并参与对它的改进。

## 致谢

本文作者要衷心感谢Nanomix公司平台开发部的Ying-Lang Chang博士、Nanomix公司产品研发部高级主管Jean-Christophe Gabriel博士、Nanomix公司市场与销售部的Bill Perry、Nanomix公司质量与管理事务部的Matthew Powell和吉时利仪器公司主管纳米技术市场营销的John Tucker，感谢他们帮助审阅本文。

该材料的基本工作得到了美国国家自然科学基金（No. 0450648）的部分支持。

## 作者简介

Sergei Skarupo是Nanomix公司的高级软件工程师。他曾在基辅工学院学过电气工程专业。作为软件工程师，他曾参与开发和支持各种医疗、Internet、分析、实验测量和其他一些应用。他是Zephyr软件的主要设计者，目前致力于扩展该软件的功能和几种其它的软件应用，以及研发呼吸监测设备。作者通信地址为5980 Horton Street, Ste 600, Emeryville, CA 94608, 510-428-5337, e-mail: sskarupo@nano.com。



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](mailto:china@keithley.com)

网址: [www.keithley.com.cn](http://www.keithley.com.cn)