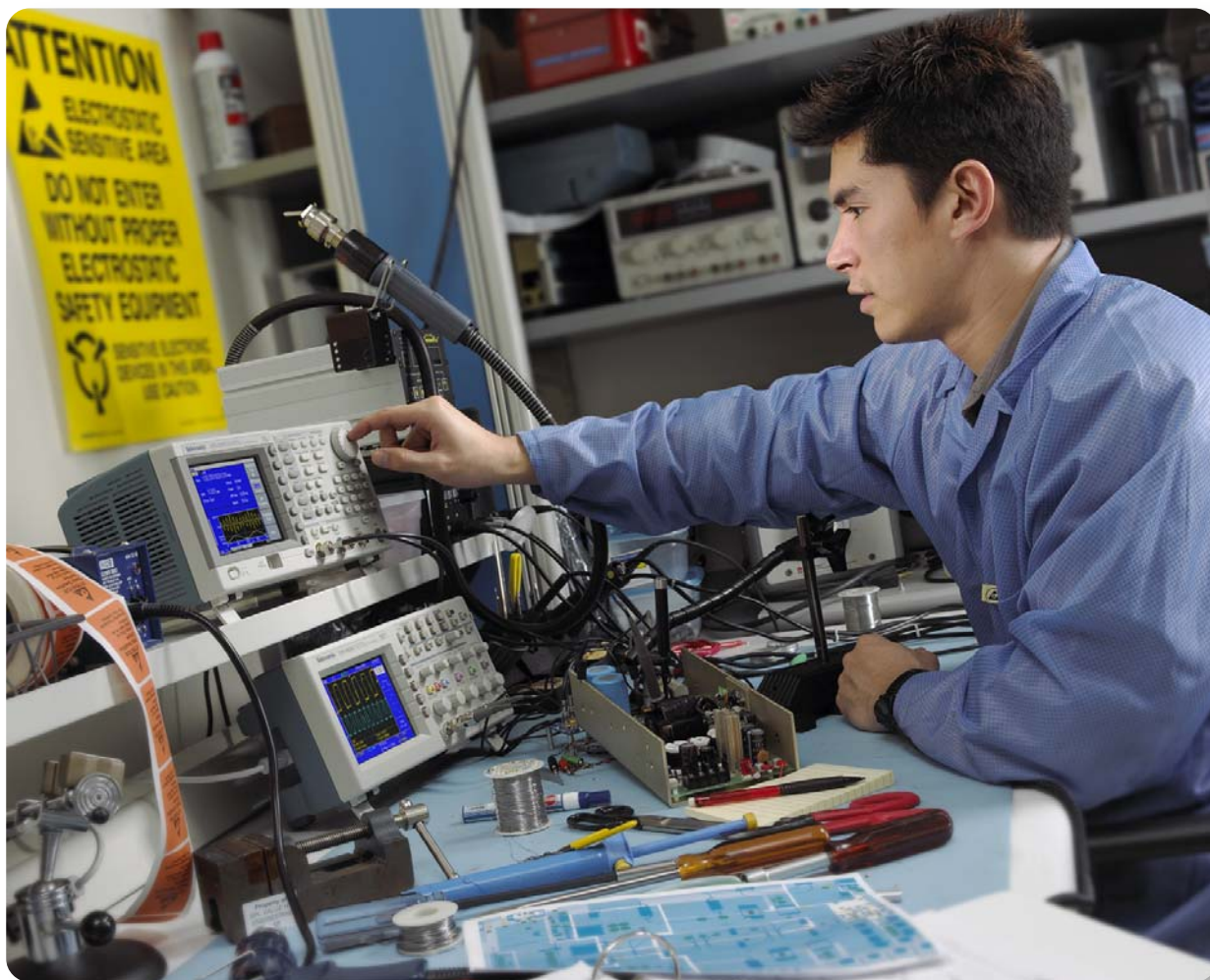


## 半导体器件检定测试需要灵活的激励信号



半导体遍布于各个领域。它们是当前通信系统和计算系统的基本构件，它们是消费电子产品和航空技术的基础，它们支持工业系统、环境控制等等。在本应用指南中，我们将考察称为信号源的测量仪器怎样帮助您精确地测试某些基本半导体设备的性能特点。本文适用于开发新型半导体设备的设计人员及在最终产品中应用这些半导体设备的工程师。

### 什么是半导体器件检定测试？

在一系列详尽的布局和建模流程后，新型半导体器件的“第一个硅”原型铸造完毕，但其是否能够实现预期的性能呢？累积内部容限和不能预见的电路单元之间的交互仍会影响设备的预计性能。因此，必须对设备进行测试，确定其是否满足基本设计规范。这一步称为设计检验或检定，它验证设计在功能上能够正常运行。

## 半导体器件检定测试需要灵活的激励信号

### ► 应用文章

第二个、也是更加完善的一套检定测试是确定设备的“发展空间”和工作余量。本应用指南将主要介绍检定，即测量设备的实际性能极限。一旦知道这些极限达到令人满意的水平，那么可以指定制造容限，确定成品率目标，印刷产品资料。相反，检定结果差则要求把设备发回设备部门，启动另一轮流程。检定测试在半导体设计流程中发挥着关键作用。

从简单的模拟运算放大器到高速数字电信交换机或CPU，几乎每种新型半导体设计都要求检定测量。全面的测量体系同时涵盖了模拟参数和数字参数，其中包括模拟领域中的最大频率 (Fmax)、门限电压、灵敏度、增益、转换速率和稳定时间；数字领域的建立时间/保持时间、畸变容限及抖动和偏移。

检定测试程序中既可以包括称为极限测试的第三层测量，也可以作为单独的步骤。在极限测试中，设备要经受信号畸变、定时冲突、幅度错误、温度变化和其它极具挑战性的异常条件的测试，其目标是检测到可能会发生的问题，比如，一个输入缓冲器达到技术指标要求，但在输入瞬态峰值时会失效。如果预先了解这些条件，那么可以找到解决方案，防止成本高昂的召回工作。

众所周知的复杂度和工作频率提高一直是半导体技术演进的一个重要因素。这给最终用户带来了巨大的好处，但也给试图检定测试新器件的设计人员或测试工程师带

来了挑战。最重要的是，由于复杂性和速度不断增长，工程师必须找到能够全面满足被测设备需求、而又经济高效的测量解决方案。

本文其余部分将专门介绍信号源在半导体测量应用中的使用。在相应的地方，我们将概括介绍示波器在测试中的作用。如需与示波器应用有关的更多信息，请访问网址 [www.tektronix.com](http://www.tektronix.com)，从 Product Portfolio 菜单中选择 "Oscilloscopes"，然后在主要标题下点击 "Find By Application"。

### 信号源的基本描述

#### 什么是信号源？为什么需要信号源？

“信号源”一词涵盖了函数发生器、脉冲发生器、RF源、任意波形发生器等等。信号源通常用于各类测量应用中。一般来说，它提供了属性已知的受控信号。该信号对新设计的电路单元执行测试，其通常作为将要集成到设计中的器件的代用品。众所周知，对“激励”信号的响应则可以衡量电路的性能。

为检定半导体，信号源必须能够提供各种波形，包括模拟波形和数字波形。结果，函数发生器已经成为检定实验室的必备仪器。这些经济的仪器可以选择一系列函数（基于数学算法的波形），包括正弦波、方波、脉冲波、三角波等等。

任意波形发生器则要更加灵活，其称为 "arb" 或 AWG。这种多功能工具可以复现任何想得到的波形，甚至模拟示波器采集的信号。数字取样是 AWG 的底层结构。

第三种信号源结构弥补了函数发生器和 AWG 平台之间的空白。这是任意波形/函数发生器 (AFG)，顾名思义，即具有任意波形功能的函数发生器。AFG 提供了半导体检定所需的基本功能和通用性。AFG 的成本低于 AWG，但性能也低于 AWG，它同时采用取样技术和直接数字合成技术 (DDS，参见侧栏)，生成无数种波形、瞬变和人为失真。

### 选择信号源

每个工程师都知道信号源“主打”指标的重要性，如带宽、精度、幅度分辨率和内存深度。

但“辅助”功能也发挥着作用。DUT 是否要求全面检定其对脉冲边沿变化的影响？如果是，那么最好选择一部允许独立编程上升时间/下降时间的仪器。您是否要测试通信设备？内置调制器可以加快 AM, FM, PM, FSK 或 PWM 的测量速度。类似的，集成式噪声发生器适用于许多测试，包括信噪比、频响等。

用户界面功能也是一个基本考虑因素。新出现的 AFG 类型提供了大型彩色显示器，汇总了目前有效的所有设置，甚至显示生成的波形的图形表示。除这种高度可读的显示屏外，系统还要提供一系列快捷键和高级菜单，简化和加快了仪器操作。新用户可以迅速学习使用仪器，资深的测试工程师则可以更快地完成更多的工作。

软件波形开发工具可以加快复杂的任务，协助编制文档和进行流程控制。随着 PC 与台式仪器相连成为主流，强健的波形创建软件包必不可少。

### 应用实例

注意：在下面的应用实例中，泰克 AFG3000 系列仪器将提供所有必要的激励信号。我们将使用缩写 "AFG"，表示 AFG3000 系列中的相应型号。

### 检定比较器性能

模拟比较器是连接模拟环境和数字环境之间的基本单元。在 "+" (非反向) 输入上检测到的模拟电压高于 "-" (非反向) 输入上的门限电压时，比较器的输出会切换到预先定义的二进制值。比较器的简单性，使其成为当前电子系统中最常用的器件之一。

多种因素影响着比较器的效力：

- 它能否精确检测门限，正确作出响应？
- 它能否作为切换门限附近的输入电压作出反应？
- 它怎样处理占空比变化、低速上升时间和其它信号问题？

这些只是检定测量时必须回答的部分问题。在下面的说明中，我们将采用 AFG 和泰克 TDS5000 系列示波器外加两个 10X 示波器探头。

## 半导体器件检定测试需要灵活的激励信号

### ► 应用文章

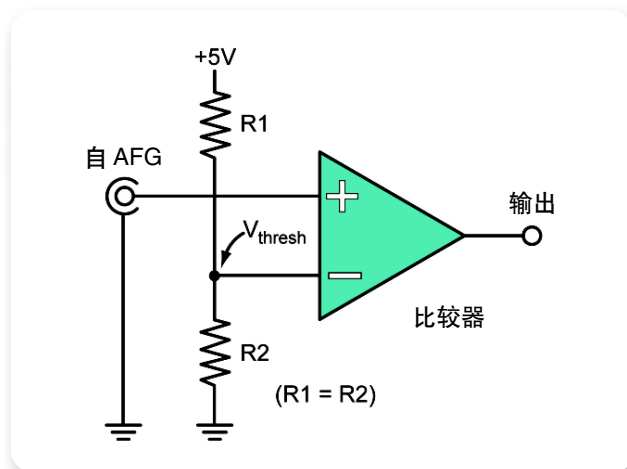
#### 被测设备

本例中的被测设备 (DUT) 是一种带宽相对较低的“通用”模拟比较器，但这里介绍的测试适用于任何类似的设备，而不管其带宽是多少。图 1 是设备测试夹具简化的示意图。

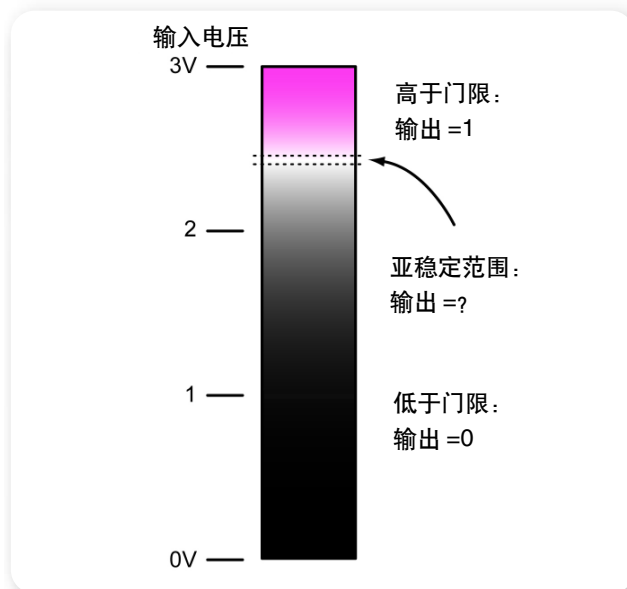
#### 测试亚稳定性和门限特点

第一项检定测试将确定设备输出在动态变化的激励信号下在什么电压时切换。比较器的非反向输入查找大于由 R1 和 R2 构成的电压分路器设置的  $V_{\text{thresh}}$  值。由于图 1 中的两个电阻器拥有相同的值，电源电压是 +5V，本例中的门限电压是 +2.5 V。因此，当输入电压在某个指定容限范围内超过该值时，比较器输出应该切换。常用作法是在开始时使用可变 DC 电源测量这个参数，但 AC 条件可能会产生明显不同的结果。因此检定程序负责确认比较器的动态切换性能，确定容限。

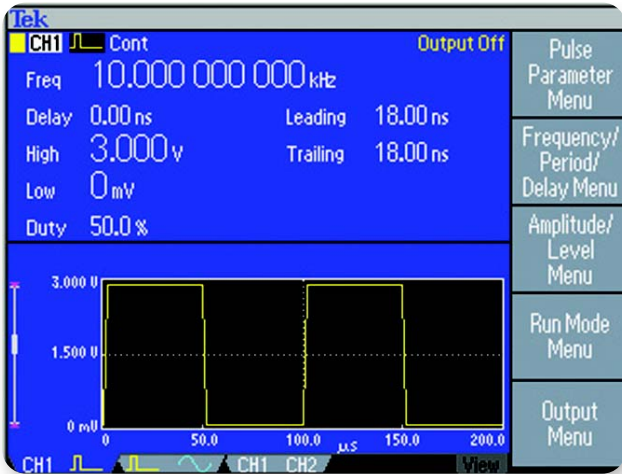
测试中把 10 kHz 脉冲应用到比较器的非反相输入，改变幅度，直到输出变成亚稳定状态。亚稳定性是指输出不可预测的门限“不确定”条件。比如，输出可以在在一个周期中的 2.48V 时切换，但不能在下一个周期中同一位置切换。其目标是确定一个保护频段规范，帮助设计人员明确亚稳定性范围。图 2 显示了亚稳定性与一小段输入电压范围的关系。



► 图 1. 比较器测试夹具。



► 图 2. 亚稳定范围是比较器输出可能不能预测的很窄的电压频段。



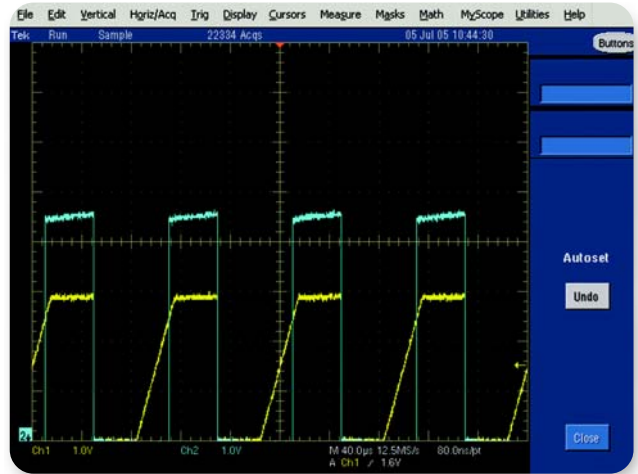
► 图 3. 设置 AFG，测量比较器门限精度。

图 3 显示了检定门限精度使用的波形设置。

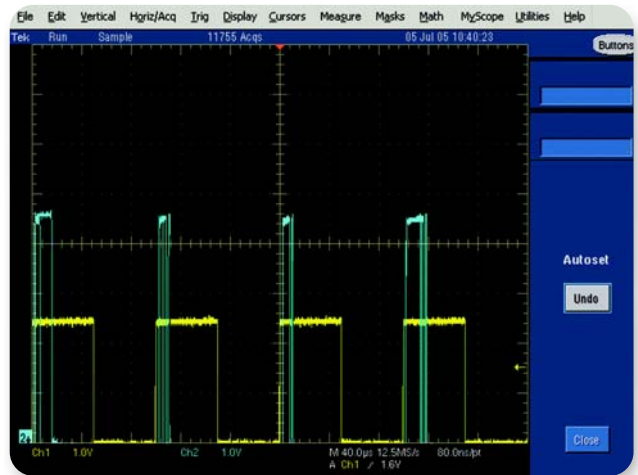
信号源是泰克 AFG3000 系列任意波形/函数发生器。通过显示所有相关数字设置及波形和幅度电平表示, 该仪器的大型彩色屏幕简化了设置程序。脉冲周期的频率是 10 kHz。在每个正向脉冲边沿越过 2.5 V 门限时, 比较器将切换到逻辑 "1", 负向边沿在相同的门限电压上则会导致输出切换到逻辑 "0"

图 4a 检验了这一基本功能。这里, 示波器的两条通道分别监测比较器的输入和输出。输入轨迹是黄色的轨迹, 输出轨迹是蓝色的轨迹。比较器的输出与输入信号步调一致。

为确定亚稳定点, 只需降低输入信号的幅度, 直到比较器输出开始错误地切换, 如图 4b 所示。



► 图 4a. 蓝色输出轨迹证明比较器切换与输入 (黄色轨迹) 步调一致, 与预期相符。



► 图 4b. 输入幅度 (黄色轨迹) 已经降低, 以确定输出切换开始发生错误的点。

## 半导体器件检定测试需要灵活的激励信号

► 应用文章

### 占空比变化

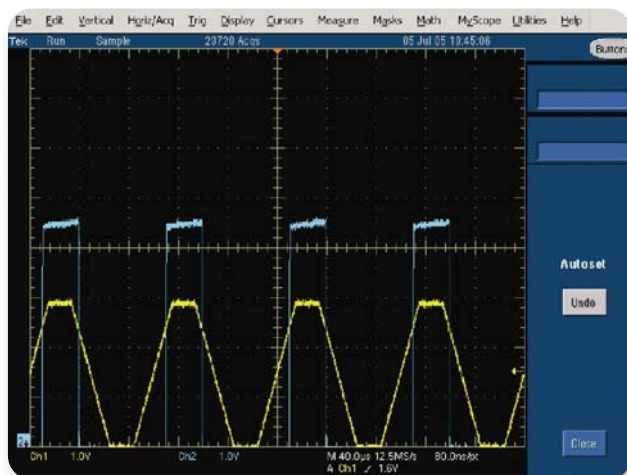
输入信号的占空比通常是在门限方面影响比较器亚稳定行为的因素之一。使用AFG的“Duty/Width”功能，可以简便地检定这一现象。一旦使用此前的步骤确定了基本门限，那么把门限设置到该水平，降低占空比，直到重新出现亚稳定情况。可能只有到占空比接近99%时，问题才会出现。这时，提高输入电压，直到输出稳定，使用示波器测量该电压。这就是真正的门限值。

### 边沿转换时间变化

通过调节输入信号的斜率(上升时间和下降时间)，可以进一步查看比较器的门限行为。AFG的脉冲模式允许独立设置上升时间和下降时间。把占空比向回设置到50%，把边沿转换时间提高到25微秒。注意对比较器输出上的脉宽影响：其要远远窄于图5中的脉宽。

### 检定放大器或滤波器性能

每种新型半导体放大器和滤波器设计都有传输频带特点，必须测量这些传输频带特点，以保证产品符合设计目标。大多数放大器是为在与其应用相适应的频率范围上提供线性响应而设计的(不管是次音频应用还是RF应用)。类似的，滤波器是为接纳预先确定的频段，降低或抑制所有其它频段而设计的。这两类器件一般都有线性频率范围，在相对于幅度的频率图上，其看上去相对“平坦”。在这一范围的任何一端，都有稳定下降的幅度



► 图5. 提高输入转换时间导致比较器输出变化。

响应。放大器或滤波器响应比峰峰幅度低-3 dB的点决定着带宽边界。在确定频率边界时，大多数设计人员使用“扫描”正弦波信号，作为激励源。从示波器上看，在输入信号扫描通过器件的传输频带时，放大器或滤波器输出信号包络将表现出最高的输出，在所有其它频率上则会逐渐下降。

在这一应用实例中，我们将考查滤波器，测量输出幅度是峰到峰值70.71%的频率上限。这一程序同样适用于放大器测量。其要求的工具也是AFG及带探头的示波器。由于不需要监测DUT的输入信号，因此将只使用一条示波器通道。

## 扫描滤波器通带

按 AFG 的扫描模式键，会出现一个屏幕，其中显示所有基本波形设置，包括波形本身的表示。图6是这一屏幕。与前面一样，这些参数结合使用软键、前面板数字项目和滚轮进行设置。

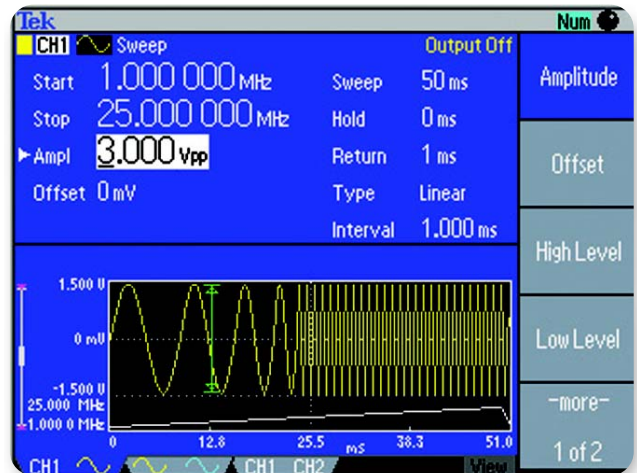
让我们仔细看一下屏幕底部附近的波形帧，它汇总了与生成的信号有关的所有显著细节：幅度；扫频终止点；稳定提高频率的“倾斜”的斜率；扫描的总长度（时间）。注意扫描末尾的返回时间（1 ms）；该信号复位到开始频率、开始新扫描的点。

通过 DUT 馈送信号得到图7所示的结果。这里，示波器触发点就位于格线的左边边沿，水平范围设为显示一个完整的扫描。根据波形，滤波器抑制了扫描范围中最低的频率，但其响应随着扫描前进迅速提高。然后是范围广泛的平坦响应，然后在扫描频率提高到某个点之上时衰落。这个衰落响应区域是感兴趣的区域，因为在向下趋势的某个点上，它越过了 -3 dB 点。

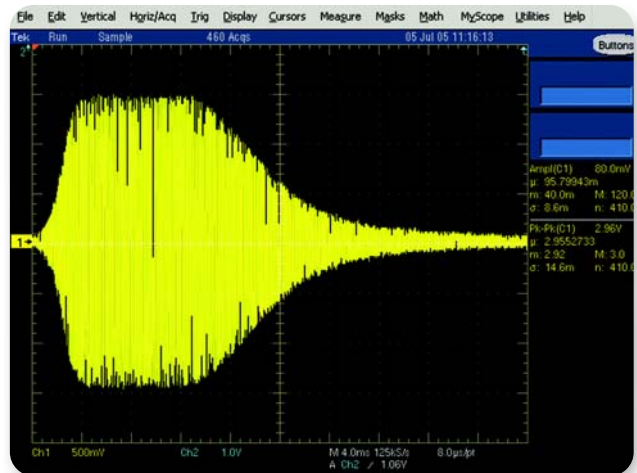
## 追踪 -3 dB 点

信号源与示波器的某些自动测量功能相结合，将帮助我们找到 -3 dB 点：

- 进行测量的第一步是保证确切知道最大的峰到峰输入电压。大多数现代示波器有自动 P-P 测量模式，在屏幕上显示波形。使用这种模式，调节 AFG 的信号幅度，直到滤波器输出上测得的幅度与希望值完全匹配，在本例中是 3.00 V 峰到峰。



► 图6. 设置进行滤波器/放大器检定。注意波形窗口中的“频率”扫描”。



► 图7. 扫频导致被测设备的输出信号幅度变化，揭示特性频响包络。

## 半导体器件检定测试需要灵活的激励信号

### ► 应用文章

- 3 Vp-p 正弦信号的 -3 dB 点等于 70.71% 或 2.12 V。
- 提高 AFG 扫描的开始频率，直到测得的幅度是 2.12 V。显示的频率结果代表着 -3 dB 点。

这三个简单步骤对任何模拟放大器或滤波器生成了最重要的检定结果之一。通过定义这个基本参数，可以观察与 DUT 频响有关的进一步细节。通过使用 AFG 的连续模式(其输出单频率波形)，可以在已知的 -3 dB 点上设置基本频率，以非常小的增量手动改变频率，同时在示波器上观察影响(必需加快示波器的时基设置速度，只查看 DUT 输出波形一个或两个周期)。

在本例中，AFG 的用户界面和结构优势在高效完成工作中发挥着关键作用。扫描设置程序可以简便地定义所需的激励信号，显示屏一目了然地确认波形特点，同一屏幕上的数字参数则迅速准确地提供幅度、频率等相关信息。滚动旋钮加快了 -3 dB 频率的搜索工作。

### 检定运算放大器的转换速率性能

高速运算放大器(op amps)是当前使用的最常用的模拟器件。在电视机、机顶盒、视频广播设备、无线通信基站、光纤产品、全球定位系统、雷达系统、卫星接收机、售点终端、读卡机、条形码扫描仪及其它领域中都可以看到这些器件。

可以根据带宽、噪声和失真特点、功耗、增益变化性、输出功率、稳定时间和转换速率性能，为一定的应用选择相应的运算放大器。为确定这些参数，半导体制造商必须全面测量和检定设备。

定时特点对许多应用至关重要，转换速率在运算放大器的定时行为中发挥着关键作用。机顶盒和安全视频应用中的运算放大器需要很高的转换速率及超低失真。对驱动压电设备的运算放大器，及在商用喷墨打印机、超声波清洁剂及其它工业和医疗设备等应用中驱动异常精细的移动的运算放大器，转换速率和瞬时响应也是一个问题。

在信号迅速变化时，则需要考虑数据采集电路中的稳定时间。例如，在复用器切换通道时会发生这种情况。如果运算放大器作为复用器和模数转换器之间的缓冲器使用，运算放大器输出必须迅速稳定，然后模数转换器才能对信号取样。

运算放大器的瞬时响应或转换速率性能受到许多因素的影响，包括运算放大器自己的配置、电路板寄生信号及内部电流限制和节点电容。转换速率性能还可能依赖供电电压，因为更高的电压意味着更多的电流为内部电容提供电荷。



在某些情况下,运算放大器的瞬时响应对输入信号的上升沿和下降沿是不同的。为内部电容提供电荷所需的时间可能对两个边沿不同。这称为不对称的转换速率性能。这种特点有时会影响运算放大器是用于反相配置还是非反相配置中。

为优化使用运算放大器的电路,必须全面了解器件的转换速率性能。在知道物理边界、饱和点、过冲和稳定时间特点之后,可以优化增益和反馈电阻器,降低输入信号转换速率,或采取其它措施实现希望的电路行为。

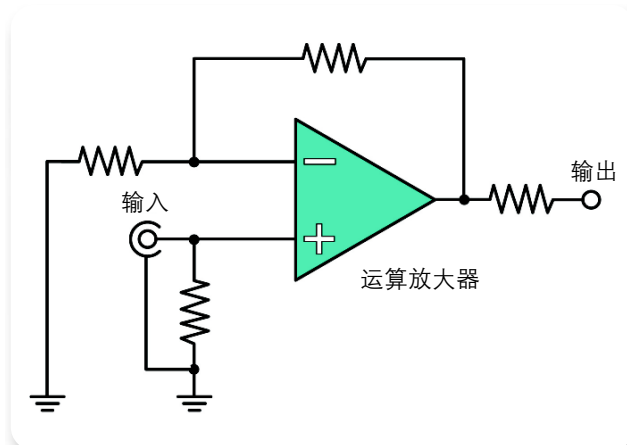
为检定运算放大器的转换速率性能,必需使用示波器测量瞬变响应输出,同时使用具有可变上升时间、可变下降时间和可变幅度的脉冲信号模拟输入。使用的信号源必须全面独立控制所有这些参数。泰克 AFG3000 系列信号源提供了这种灵活性及充足的带宽和精度,保证精确的结果。

### 模拟和检定运算放大器

下面的程序介绍了测量运算放大器转换速率特点的流程。图8是评测的运算放大器的简化示意图。这是针对视频行驱动器应用的 220 MHz 高速运算放大器。

### 脉冲信号驱动运算放大器

AFG 使用脉冲波驱动着运算放大器的非反向输入(在示意图上用"+"号标出)。连接到运算放大器输出的示波器测量瞬时响应。在 AFG 上选择脉冲功能时,画面会显示信号频率、幅度和脉冲占空比及前后沿时间,如图9所示。屏幕上脉冲波形的图形显示证实了已经选择的设置。



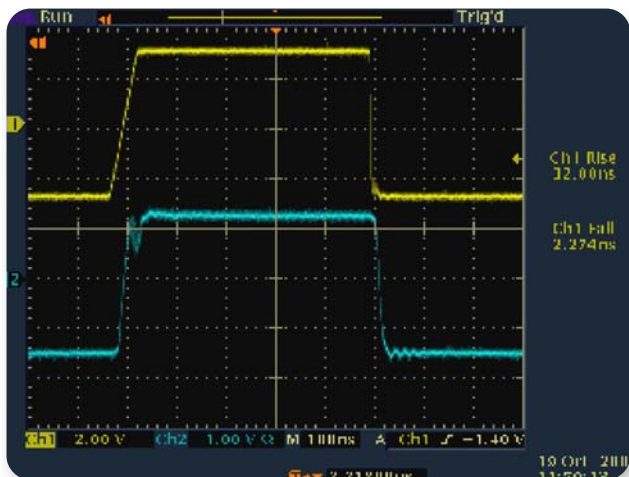
► 图8. 运算放大器 (op amp) 转换速率检定接线。



► 图9. 设置 AFG 进行转换速率测量。

## 半导体器件检定测试需要灵活的激励信号

### ► 应用文章



► 图 10. 在输入信号(黄色)的上升时间提高时, 运算放大器输出的上升沿开始振荡。

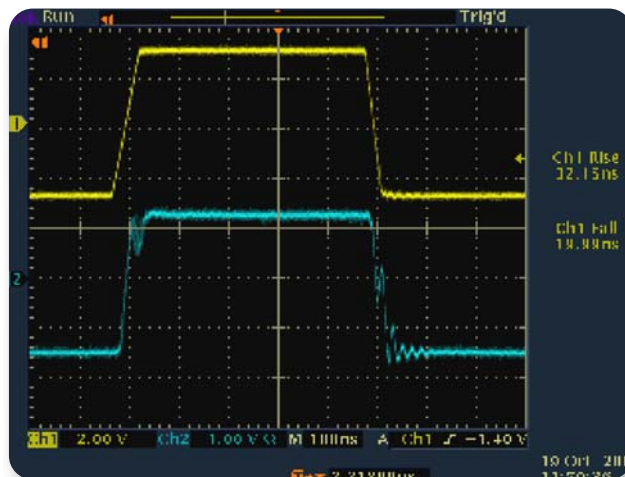
为检定运算放大器的转换速率性能, 改变前沿和后沿时间, 同时在示波器屏幕上观察运算放大器的输出信号(图 10)。AFG3000 允许独立处理两个边沿。在图 10 中, 到运算放大器的输入信号用黄色表示, 输出轨迹用蓝色表示。

先把后沿(下降沿)一直保持在 2.5 ns 不变。随着前沿(上升沿)的转换时间逐渐提高, 上升时间达到 32 ns 时输出开始振荡。

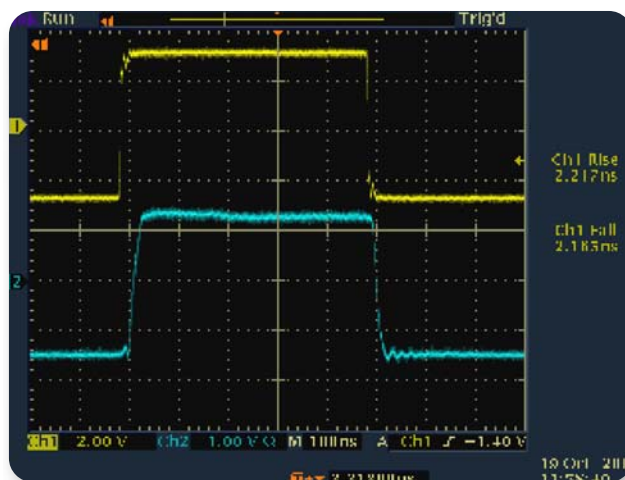
在保持前沿 32 ns 上升时间的同时, 缓慢提高后沿的下降时间。如图 11 所示, 在下降转换时间达到大约 20 ns 时, 运算放大器输出开始振荡。

很明显, 这个运算放大器拥有不对称的特点。如果已经假设运算放大器对两个边沿的响应完全相同, 那么您可能会错误地发出设备, 而其在最终使用时会由于前沿和后沿响应不同而失效。现在, 同时降低上升时间和下降时间, 观察波形。

在本例中, 在转换时间变短时, 输出稳定地变得“更加干净”。如图 12 所示, 在前沿和后沿设为 2.5 ns 时, 实现了最干净的瞬变响应。这是 AFG3000 可以生成的最



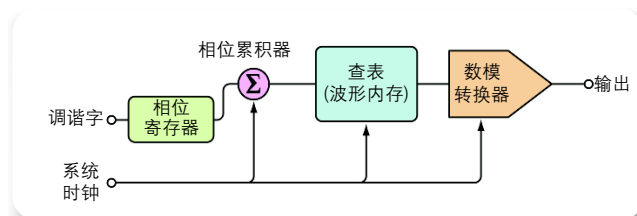
► 图 11. 提高下降时间。输出的后沿在某个点开始振荡。



► 图 12. 前沿和后沿都设为 2.5 ns 转换时间, 实现稳定干净

的输出。短的上升时间。这一检定测量的结论是, 这个运算放大器上的输入信号的上升时间必须低于 32 ns, 下降时间必须小于 20 ns。如果运算放大器预计系统输入超过这些值, 那么必须为这一工作选择不同的器件。可能的运算放大器特别适合满足您的信号环境需求。

本例说明了在处理前沿和后沿时了解运算放大器不同转换速率行为的重要意义。这也说明了能够独立改变边沿时间的信号源所具有的重要意义。



► 图 SB. 基于 DDS 的信号发生方案简化的方框图。

## 更仔细地考察直接数字合成

直接数字合成 (DDS) 是最新一代经济型高性能信号源平台背后的激活技术。DDS 是为生成模拟波形设计的一种真正的数字方法。它“捷变性”强，可以快速地从一种输出频率切换到另一种频率，并提供杰出的频率分辨率，而成本要低于传统任意波形发生器。

DDS 设备在结构上非常简单，它由相位累积器、查表 (内存) 和数模转换器 (DAC) 外加某些辅助功能组成。图 SB 是典型的 DDS 实现方案简化的方框图。

DDS 输出信号由输入的系统时钟 (固定频率)、外部频率寄存器中存储的二进制值及波形内存的内容构成。

频率寄存器提供了一个二进制数字，大多数行业参考资料中称之为“调谐字”。调谐字经局部缓冲器 (称为相位寄存器) 进入相位累积器。为创建信号，频率寄存器在每个时钟周期中在相位累积器内增加一个恒定的相位增量值。顾名思义，这个单元累积连续的输入值，当前值则作为查表使用的索引指针使用。

查表的属性是实现仪器整体功能的关键。单纯的函数发生器拥有固定选择的波形类型。除此之外，任意波

形 / 函数发生器 (AFG) 则为用户提供了可编程的内存空间，允许存储和复现定制波形。一旦从查表中已经读取相应的样点，DAC 会把二进制值转换成模拟电压。

尽管具有真正任意波形功能的 AWG 和基于 DDS 的 AFG 都依赖取样内存，但它们在确定输出频率的方式上有着明显的差异。AWG 一直线性读取内存，加快时钟速度，生成更高的输出频率。

相比之下，AFG 则保持固定的系统时钟频率。360 度波形周期扩展到波形内存的全部容量中 (在某些仪器中样点位置高达 131,072 个)。如果相位增量很大，AFG 会迅速跳过 360 度周期，读取每  $n$  个样点，提供高频信号。如果增量很小，相位累积器会采取更多的步骤，甚至会重复各个样点，完成 360 度，生成频率较低的输出波形。

DDS 结构提供了一系列关键性能优势。它把精确的数字控制的频率和相位调谐功能与无可比拟的频率捷变性和相位相干性结合起来。不断调谐的分辨率保证了在很宽的频率范围内实现可预测的输出信号特点。由于这些优势，基于 DDS 的信号生成工具可以用于无数种测量应用，包括半导体检定。

# 半导体器件检定测试需要灵活的激励信号

## ► 应用文章

### 总结

信号源是当前半导体检定流程的核心工具。为检定新兴 IC 设计的响应，首先必须有一个激励源。信号源使用帮助界定性能边界的信号来驱动被测设备。

一种新型的基于 DDS 的信号源提供了更高的性能、更高的生产效率(简便易用性)和更好的经济性。可以独立调节上升时间和下降时间等功能，为工程师提供了优秀的工具，可以在流程中提前发现设计问题，降低修订成本。幅度和频率精度保证了可重复的结果，信息丰富的用户界面则可以简便地解释这些结果。

本文中包括的应用实例只介绍了部分功能。对要求仪器提供完善的性能、并适用于各个设计人员工作台的应用，当前基于 DDS 的信号源也提供了首选的解决方案。

**泰克科技(中国)有限公司**  
上海市浦东新区川桥路1227号  
邮编：201206  
电话：(86 21) 5031 2000  
传真：(86 21) 5899 3156

**泰克北京办事处**  
北京市海淀区花园路4号  
通恒大厦1楼101室  
邮编：100088  
电话：(86 10) 6235 1210/1230  
传真：(86 10) 6235 1236

**泰克上海办事处**  
上海市静安区延安中路841号  
东方海外大厦18楼1802-06室  
邮编：200040  
电话：(86 21) 6289 6908  
传真：(86 21) 6289 7267

**泰克广州办事处**  
广州市环市东路403号  
广州国际电子大厦2807A室  
邮编：510095  
电话：(86 20) 8732 2008  
传真：(86 20) 8732 2108

**泰克深圳办事处**  
深圳市罗湖区深南东路5002号  
信兴广场地王商业大厦G1-02室  
邮编：518008  
电话：(86 755) 8246 0909  
传真：(86 755) 8246 1539

**泰克成都办事处**  
成都市人民南路一段86号  
城市之心23层D-F座  
邮编：610016  
电话：(86 28) 8620 3028  
传真：(86 28) 8620 3038

**泰克西安办事处**  
西安市东大街  
西安凯悦(阿房宫)饭店322室  
邮编：710001  
电话：(86 29) 8723 1794  
传真：(86 29) 8721 8549

**泰克武汉办事处**  
武汉市武昌区民主路788号  
白玫瑰大酒店924室  
邮编：430071  
电话：(86 27) 8781 2760/2831  
传真：(86 27) 8730 5230

**泰克香港办事处**  
香港铜锣湾希慎道33号  
利园3501室  
电话：(852) 2585 6688  
传真：(852) 2598 6260

#### 有关信息

泰克公司备有内容丰富的各种应用文章、技术简介和其他资料，并不断予以充实，可为从事前沿技术研究的工程师提供帮助。请访问泰克公司网站 [www.tektronix.com](http://www.tektronix.com)



© 2005 年 Tektronix, Inc. 版权所有。 全权所有。 Tektronix 产品，不论已获得专利和正在申请专利者，均受美国和外国专利法的保护。 本文提供的信息取代所有以前出版的资料。 本公司保留变更技术规格和售价的权利。 TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc. 的注册商标。 本文提及的所有其它商号分别为其各自所有公司的服务标志、商标或注册商标。 11/05 FLG/W0WW 76C-18660-0

**Tektronix**  
Enabling Innovation