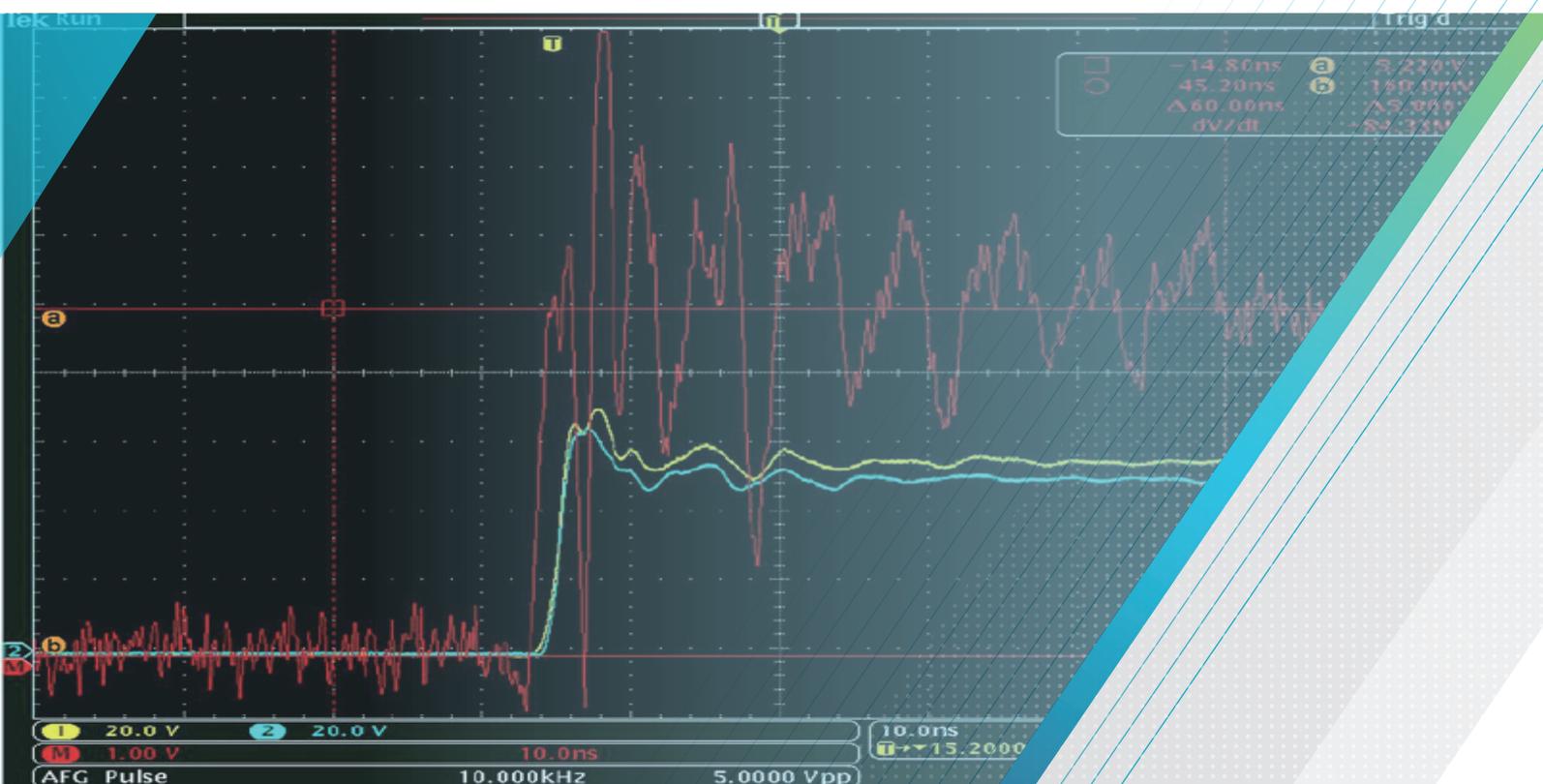


# 优化宽禁带材料器件的半桥和门驱动器设计

处理电源工程师面临的测量挑战小贴士：  
信号从测试点到示波器的连接

Wilson Lee, 泰克科技公司



## 优化宽禁带材料器件的半桥和门驱动器设计

现代宽禁带功率器件 (SiC, GaN) 上的开关晶体管速度越来越快, 使得测量和表征成为相当大的挑战, 在某些情况下几乎不可能实现。隔离探测技术的出现改变了这种局面, 通过这一技术, 设计人员终于能够放心地测量以前回避的半桥和门驱动器波形。通过详细了解相关挑战, 并使用适当的探测技术, 电源工程师可以更加迅速、高效地表征和优化其设计。

半桥电路 (图 1) 广泛用于功率电子领域的多种应用, 是现代设计中有效转换电能使用的基本电路。但是, 只有在半桥、门驱动器和布线正确且优化设计时, 这种电路的优势才能得到实现。在测量结果与预期结果不一致时, 可能很难提取与被测器件有关的有意义的细节。更糟糕的是, 基于探头位置和其他因素, 波形可能会明显变化, 最终会让设计人员得不偿失。

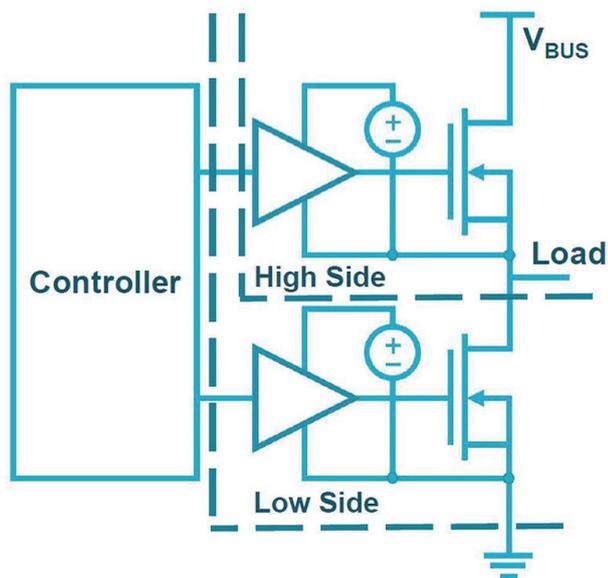


图 1. 半桥电路广泛用来在现代设计中高效转换电能。

效率和功率密度要求经常会随着应用设计要求变化, 如是否要优化性能价格比。在功率密度中改善能效的要求, 决定着设计的拓扑结构, 进而影响着要考虑的测量设备和技术。表 1 汇总了半桥和门驱动器最重要的指标和测量。

表 1. 门驱动器和半桥配置最重要的测量。

Important Metrics and Measurements	
<b>Gate Drivers</b>	<b>Half Bridge</b>
<b>Voltage Characteristics</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• High side and low side</li><li>• Input, output, and supply voltages</li><li>• Absolute maximum and threshold</li><li>• Common mode transient immunity</li></ul>	<b>Voltage Characteristics</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Large dv/dt</li><li>• High side and low side <math>V_{GS}</math> and <math>V_{DS}</math></li><li>• Absolute maximum and threshold</li></ul>
<b>Current Characteristics</b>	<b>Current Characteristics</b>
<b>Timing</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Rise and fall times</li><li>• Propagation delay</li><li>• Dead time</li><li>• Channel to channel delay</li></ul>	<b>Timing</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Rise and fall times</li><li>• Propagation delay</li><li>• Dead time</li><li>• Channel to channel delay</li></ul>
<b>CMTI</b>	<b>Double Pulse Testing</b>

准确进行功率测量离不开测量系统在多个方面的性能, 包括电压处理、共模抑制、连接能力、温度处理能力、测量非常小的电流的能力。尽管功率设计要求日新月异, 但测试测量技术的实际发展一直有些滞后。在某些情况下, 设计人员不得已开发定制测量解决方案, 或只能近似获得部分测量, 忽视可能的优化。

在最基础的层次上, 这些测量使用示波器及一套相应的探头执行。在进行准确可靠的功率测量方面, 示波器几乎不成问题。而最大的挑战是从测试点到示波器获得信号。因此, 选择适当的探头完成工作至关重要, 不管是无源探头还是单端探头, 是传统高压差分探头、电流探头还是隔离探头。

### 单端探头 – 低压侧测量

大多数示波器都会配有一套无源或单端探头。这些探头只能准确地测量以示波器地电平为参考的信号, 且限于进行低压侧测量。通过隔离示波器, 或使用一对探头进行伪差分测量 (参见后面的讨论), 您可以使用无源探头执行高压侧测量, 但一般不推荐采用这种方法。

## 优化宽禁带材料器件的半桥和门驱动器设计

在考虑某项测量任务需要多高的探头性能时，人们一般会把重点放在带宽上。传统思维认为，带宽越高，性能就越高。的确，带宽是一个重要指标，它决定了可以测量正弦波峰值幅度的最高频率。但实际上，您并不是在频域中测量正弦波，而是要显示和测量信号随时间变化，也就是在时域中测量信号。

因此，半桥和门驱动器测量中最应关注的性能指标是上升时间。上升时间可以从带宽中计算得出，但如果想可靠地了解测量系统的上升时间和全部时间响应，唯一的方式是使用阶跃信号来实际测量上升时间，这个阶跃信号要远远快于您测量的信号。

测量系统如果上升时间性能不足，那么就会出现阶跃响应畸变，如图 2 所示，包括非线性度、变圆和顶降。可能很难确认这些畸变是实际来自测量系统还是来自被测器件，只有通过表征测量系统才能找到真正答案。为避免这些测量误差，选择的探头的上升时间一定要快于被测器件的上升时间。

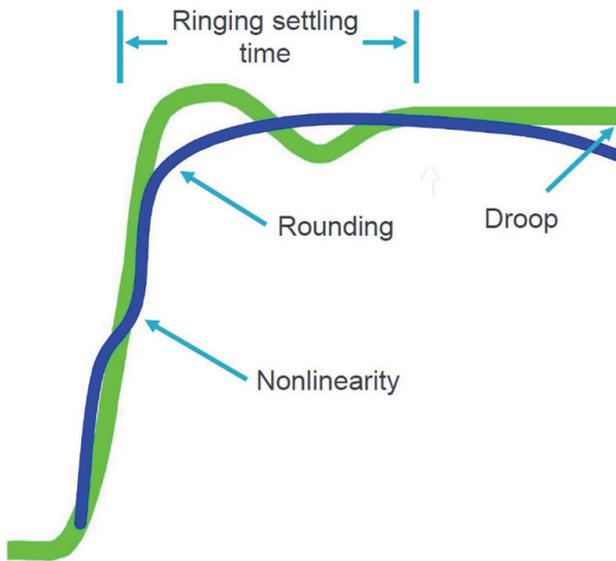


图 2. 在功率器件测量精度中，上升时间指标要比带宽指标更重要。

图 3 显示了快速探头的意义，其中使用 1 GHz 无源探头测量高速 FET 驱动器的低压侧，该驱动器的产品资料中显示上升时间 < 1 ns。由于这只探头的上升时间指标在 450 ps 左右，所以我们能够测量略高于 500 ps 的上升时间。如果进行这一测量时使用的探头上升时间较慢，比如 500 MHz 探头，那么波形前面拐角处的高频成分会变圆。

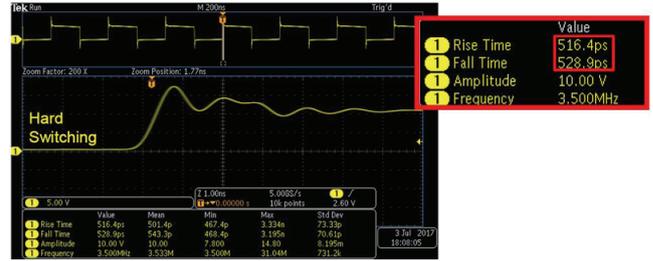


图 3. 由于 450 ps 上升时间指标，1 GHz 泰克 TPP1000 无源探头能够准确地测量高速 FET。

## 测量门驱动器电流

在测量门驱动器电流时，许多设计人员使用外加电流分流器，而不是电流探头，原因很简单，因为使用电流探头测量环路电感会影响电路。通常来说，设计中在门驱动器和门之间会已经串联了一个电阻器。为使插入阻抗达到最小，电流分流器的阻值会保持得非常低，所以经过电流分流器的电压下跌也会非常低。通过先测得经过电流分流器的电压下跌值，然后再除以电阻器的已知电阻，可以得出电流。

把电流分流器连接到低压侧上，通常意味着一个端子接地。放在低压侧与放在高压侧的主要差异，是放在低压侧会降低或有效消除共模电压，共模电压会在电流分流器的任意一侧同时同相出现。因此，一般推荐在低压侧放置电流分流器，特别是在高压情况下。在高流应用中，接地弹跳会显示为共模信号。

## 优化宽禁带材料器件的半桥和门驱动器设计

### 隔离示波器

打破接地环路的技术之一，是“隔离示波器”或隔离被测电路。浮地会打破与接地的连接，在理论上可以在两个测试点之间进行差分测量，因为示波器接地已经被破坏。这种方法本身就是危险的，因为它破坏了触电保护，还可能会损坏测量设备。

浮动测试可能适用于某些测量，特别是在非常低的频率上，但要注意如果没有低阻抗接地连接，来自示波器的放射辐射和传导辐射可能会以噪声形式干扰测量。另外注意，在较高频率中断接地时，可能并不会中断接地环路，因为“浮动”电路会一直通过大的寄生电容保持耦合接地，从而导致振铃和波形失真。图4显示了高压侧门驱动器上的浮动测量。振铃和失真很明显，出现了高达28V过冲。

也可以使用伪差分测量（而不是无源探头），可能满足某些低频信号测量。通过进行两个地电平参考的信号测量，使用示波器对两条示波器通道进行减法运算，可以完成测量。在图5中，示波器从CH1的波形中

减去CH2的波形，得到红色波形。两个输入必须设置成相同的标度，探头必须一模一样且紧密匹配。这种技术中的共模抑制比 (CMRR) 很差，如图5所示，特别是在更高频率下，可能会超过示波器输入范围。CMRR 是指示波器在进行差分测试时抑制两个测试点的共模电压的能力。

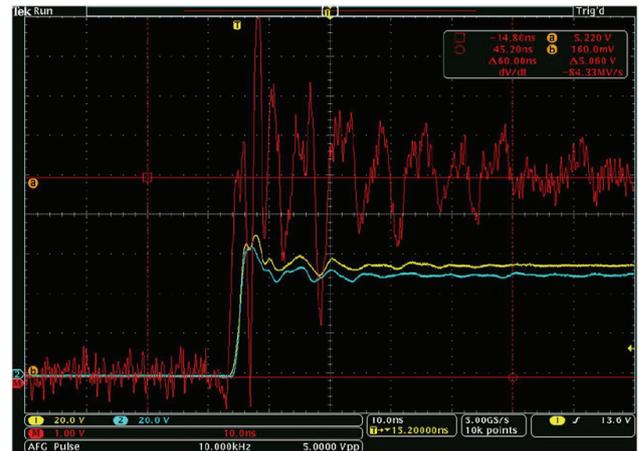


图5. 伪差分测量性能有限，但对拥有低共模信号的超低频信号测量足够了。

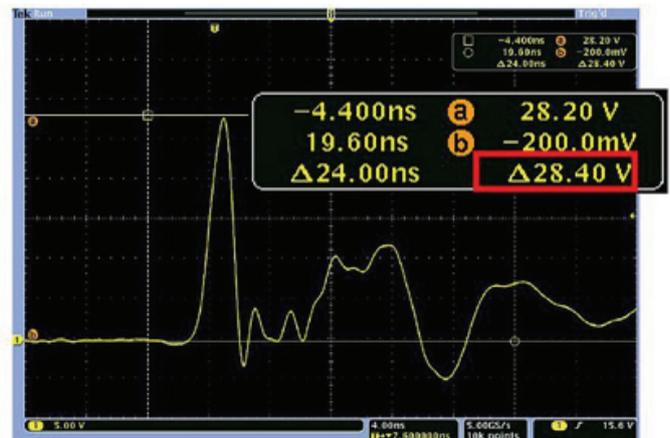
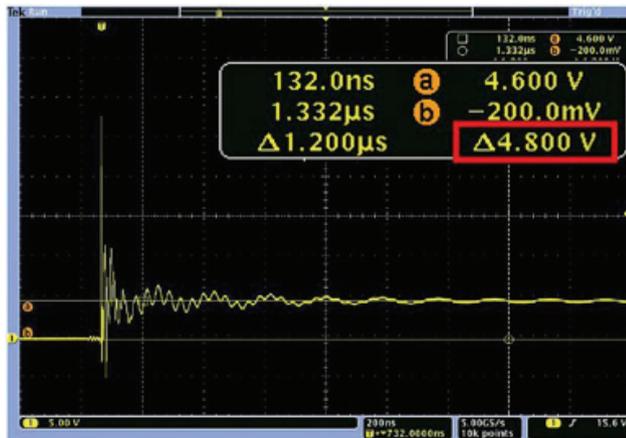


图4. 在这个高压侧门驱动器浮动测量中，明显有振铃、失真和28V过冲。

## 优化宽禁带材料器件的半桥和门驱动器设计

### 差分探头

对大多数 GaN 和 SiC 应用，差分探头是准确进行低压侧测量和某些高压侧测量的很好选择。但对性能更高的器件来说，最可能的情况是传统高压差分探头并不是最佳选择，因为其在更高的频率下共模抑制能力不足。在执行高压侧电压测量时，这成为一个明显的问题，因为要在快速开关跳变过程中，在存在大的共模电压的情况下测量小的差分电压。

一个常见的误解是差分探头是浮动的。其实，传统差分探头基于差分放大器，差分放大器则连接到接地上。遗憾的是，这种连接限制了共模电压范围，导致频率额定值下降，产生接地弹跳，在带宽超过一定 MHz 时会限制共模抑制比。

在测试通电的 GaN 或 SiC 器件时，这些局限性尤其明显，因为这些器件拥有超快速开关速率，甚至有标称的共模电压。例如，100 MHz 带宽差分探头在 DC 时提供了 -70 dB CMRR，在 1 MHz 时提供了 -50 dB CMRR，而在 100 MHz 时则下降到 -27 dB CMRR，大约是 22 : 1。

探头产品技术资料中很难看到这么差的指标，因为额定值随频率下降不可能成为厂家推广的指标。您需要翻查用户手册，才会找到像图 6 这样的示图，但我们很容易就能计算出 CMRR 较差的影响。例如，对 600 V 共模电压，得到的误差是 27 V (600 除以 22)。这种表现很扎眼，因为在存在 600 V 共模电压时，使用误差这么大的探头是不可能准确测量高频 15 V 差分信号的。

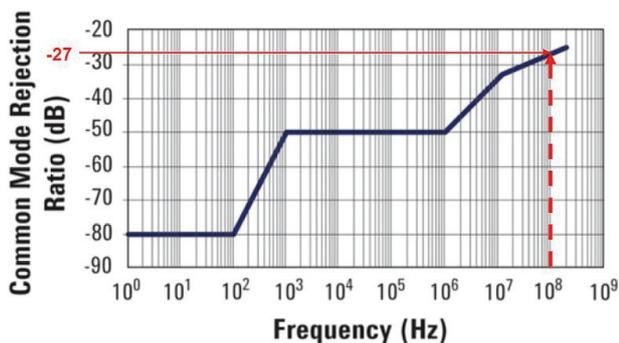


圖 6. 100 MHz 带宽差分探头在频率提高时 CMRR 额定值下降到 -27 dB。

在计算共模抑制时，另一个考虑因素是探头和 DUT 之间的连接。大多数共模抑制指标只包括探头，没有考虑额外的连接选项，如大的挂勾夹。

由于缺乏足够的探测配件，许多电源设计人员求助于某些替代技术来执行高压侧器件测量，如先测量低压侧，使用全面仿真推导高压侧结果，考察发热的特点、EMI 接近式探测，如果这些方法都行不通，那么就只能试错了。

### 高性能隔离探头

SiC 和 GaN 功率器件拥有超快速开关速率和高标称共模电压，在测试这些器件时，单端探头和差分探头的局限性变得更加明显。由于这些信号捕获问题源于接地需求，因此可行的解决方案所采用的探头技术不能依赖于接地，从而或多或少地不受共模电压的影响。这种隔离探头完全通过光纤运行，提供了大量的优势，包括高达 1 GHz 的带宽、大的差分电压范围、在所有频率中提供了完美的共模抑制能力。

在执行高压侧 VGS 测量时，工程师需要查看足够的波形细节，来确认仿真，评估信号特点，如与图 7 中表示的理想状态相比产生的振铃。高压侧 VGS 打开，第一个区域表示 CGS 门源充电时间，后面是米勒平台。在通道进行传导后，门将充电到最终值。

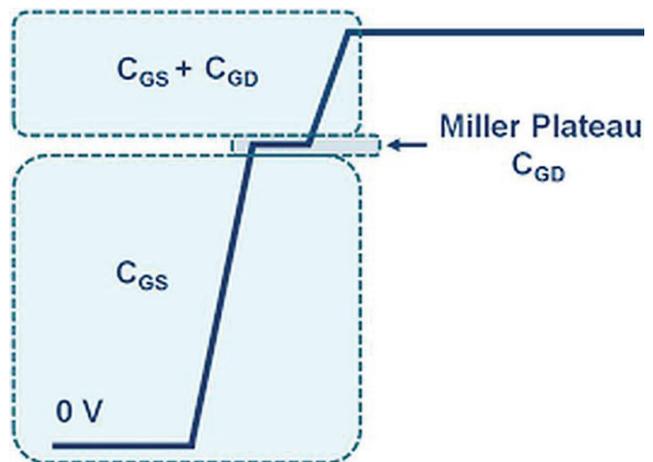


图 7. 这是高压侧 VGS 理想状态的示意图。

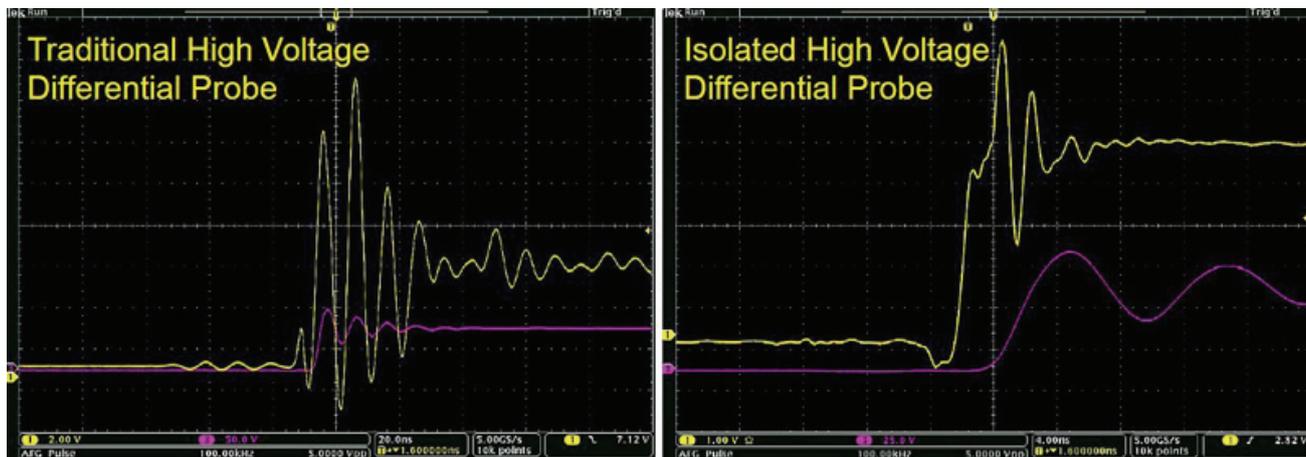


图 8. 隔离高压差分探头提供了优化器件性能所需的信心。

图 8 比较了使用传统高压差分探头与使用高性能隔离探头进行高压侧 VGS 测量，明显可以看出，在传统探头提供的测量基础上，很难提取有意义的信息，制订设计决策。

相比之下，隔离高压测量系统为测量、表征和优化设计性能提供了所需的分辨率和可重复性。可以明显看出米勒平台及开关到节点转换的关联。这个波形清楚地显示了以前隐藏的谐振和信号细节，从而为优化性能、开发设计而又不会过于保守提供了所需的信心。

## 高压侧，低压侧交互

对容差紧张的 GaN 器件，开关节点中低压侧开关与高压侧门极之间的寄生耦合，是诊断起来比较困难的问题之一。图 9 显示了来自高压侧的过冲或振铃传递到低压侧的情况。如果不能执行准确的高压侧测量，这种情况是无从知晓的，其会产生大量的问题，至少会导致开关和效率损耗和劣化，最坏情况是低压侧和高压侧开关同时打开导致灾难性的故障。

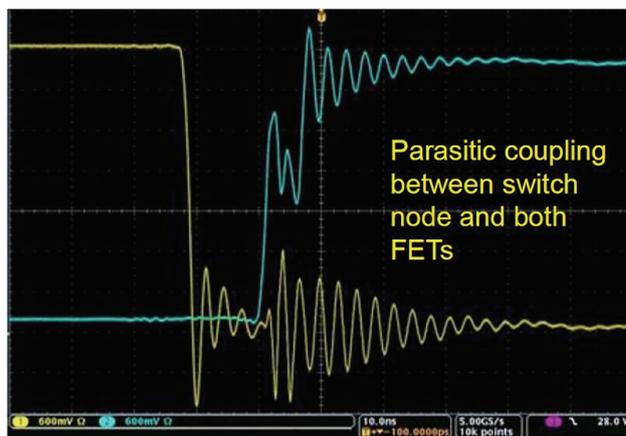


图 9. 能够查看实际波形，使得诊断和解决开关节点之间的寄生耦合等问题成为可能。

## 优化宽禁带材料器件的半桥和门驱动器设计

### 小结

完全可以肯定地说，半桥和门驱动器测量面临着诸多挑战，必须克服这些挑战，才能全面利用最新宽禁带器件的优势。这要求正确的测量技术和强大的测量解决方案。通常来说，问题的根源不在于示波器，而在于探头的选择上。高压侧门测量尤其困难，但通过了解共模抑制比，及隔离高压差分探头在存在高共模电压情况下可以怎样实现精确可靠地测量，许多相关挑战都能迎刃而解。



泰克官方微信

**如需所有最新配套资料，请立即与泰克本地代表联系！**

**或登录泰克公司中文网站：[www.tek.com.cn](http://www.tek.com.cn)**

**泰克中国客户服务中心全国热线：400-820-5835**

**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**

北京市朝阳区酒仙桥路6号院  
电子城·国际电子总部二期  
七号楼2层203单元  
邮编：100015  
电话：(86 10) 5795 0700  
传真：(86 10) 6235 1236

**泰克上海办事处**

上海市长宁区福泉北路518号  
9座5楼  
邮编：200335  
电话：(86 21) 3397 0800  
传真：(86 21) 6289 7267

**泰克深圳办事处**

深圳市深南东路5002号  
信兴广场地王商业大厦3001-3002室  
邮编：518008  
电话：(86 755) 8246 0909  
传真：(86 755) 8246 1539

**泰克成都办事处**

成都市锦江区三色路38号  
博瑞创意成都B座1604  
邮编：610063  
电话：(86 28) 6530 4900  
传真：(86 28) 8527 0053

**泰克西安办事处**

西安市二环南路西段88号  
老三届世纪星大厦26层L座  
邮编：710065  
电话：(86 29) 8723 1794  
传真：(86 29) 8721 8549

**泰克武汉办事处**

武汉市洪山区珞喻路726号  
华美达大酒店702室  
邮编：430074  
电话：(86 27) 8781 2760

**泰克香港办事处**

香港九龙尖沙咀弥敦道132号  
美丽华大厦808-809室  
电话：(852) 2585 6688  
传真：(852) 2598 6260

更多宝贵资源，尽在 [WWW.TEK.COM.CN](http://WWW.TEK.COM.CN)

© 泰克科技公司版权所有，侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国专利和国外专利保护。本文中的信息代替所有以前出版的材料中的信息。技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX 和泰克徽标是泰克公司的注册商标。本文提到的所有其他商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

