

有效测量碳化硅 (SiC) 功率电子系统中的信号

应用指南



有效测量碳化硅 (SiC) 功率电子系统中的信号

引言

在多年研究和设计之后，碳化硅 (SiC) 功率器件正迅速被各种功率电子应用所采用。从硅转向SiC，正从底层推动着新节能设计的发展。

与硅 IGBTs 和 MOSFETs 相比，SiC 效率更高，开关速度更快，同时改善了热性能，进而提高了功率密度，降低了系统成本。

SiC 正在被应用到功率更高、电压更高的设计中，比如电动汽车 (EV) 的马达驱动器、电动汽车快速充电桩、车载和非车载充电器、风能和太阳能逆变器和工控电源。

作为技术成熟的标志，JEDEC 标准 JC-70.2 中已经编制了SiC技术在电源转换设计中的实现文档，制定了 SiC 功率电子转换半导体标准和测试方法。

技术成熟的另一个标志，是许多SiC FET供应商推出了先进的评测电路板，比如 Wolfspeed WolfPACK™ KIT-CRD-CIL12N-FMC。通过使用这些电路板，工程师可以表征动态性能，测量定时、速度、开关损耗，并针对不同应用调谐门驱动器行为。



图 1: Wolfspeed WolfPACK FM3 功率模块及引脚网格设计实例，实现了扩充能力和灵活性。图片由 Wolfspeed 提供，获准重新印刷

随之而来的，是功率系统设计人员在转向 SiC 时要考虑的某些问题：

- 测试设备能否准确地测量 SiC 系统的快速开关动态？
- 怎样才能准确地优化门驱动性能和空转时间？
- 共模瞬态信号是否影响测量准确度？
- 我看到的振铃是真的吗？还是探头响应结果？

对工程师来说，解决这些挑战非常难。还有一点，工程师需要准确地查看所有这些信号，才能及时做出正确的设计决策。提高设计裕量和过度设计，只会推动成本上升，让性能下降。使用适当的测量设备才是解决问题的关键。

通过配套使用泰克 IsoVu™ 探头、4 系、5 系或 6 系 MSO 示波器及仪器上提供的自动测量功能，设计人员可以解决 SiC 电路级性能验证问题。

为提供所需的查看能力，测试设备在信号到达示波器之前，必须在电气上隔离测量通道。基于 SiC 的功率器件可以在几纳秒内开关，所以示波器和探头至少要拥有 200 MHz 带宽，才能捕获瞬态信号的快速上升沿和下降沿。例如，如果使用 30 MHz Rogowski 电流传感器，与 400 MHz 电流查看电阻器相比，开关损耗测量会下降 30%，因为 30 MHz 探头不能捕获开关波形的完整行为。（参考资料 3）高带宽低噪声信号为这些重要测量提供了要求的准确度。

本文重点介绍 CAB011MI2FM3 高性能半桥模块。这个模块拥有 Wolfspeed® C3M® 碳化硅(SiC) MOSFETs，是灵活的 Wolfspeed WolfPACK 功率模块家族的旗下产品，图1是其中一个产品。这些模块消除了传统底板，改善了热性能。此外，引脚网格设计实现了扩充能力和灵活性，许多模块选项放在同一个标准底座中，可以开发替代转换器配置和拓扑，并使热量管理系统和电气设计变化达到最小。

有效测量碳化硅 (SiC) 功率电子系统中的信号

硬件概述

确保 SiC 验证测量准确度

时域测量和开关损耗计算的准确度，受到用来采集测量数据的探头的准确度、带宽和时延的影响。下面从多个方面对比了常用的仪器探头。尽管这一讨论的重点是示波器探头之间的差异，但具体实现方式（如布局、寄生信号和耦合）也在测量准确度中发挥着关键作用。需要测量下面三个重要参数，才能正确验证采用 SiC 技术的功率模块。

- 栅极电压
- 漏极电压
- 电流

栅极电压测量

测量 SiC 功率器件的栅极电压极具挑战性，因为它是一种低压信号 (~20 Vpp)，参考的节点相对于示波器接地可能會有高 DC 偏置和高 dv/dt。此外，最大的 dv/dt 发生在开关事件过程中，这是测量栅极信号时最关心的时间。即使是器件源极连接到接地的拓扑中，电路接地和示波器接地之间的寄生阻抗仍会由于快速瞬态信号而导致错误读数。这要求测量设备从接地反耦，要有非常大的共模抑制比。这种栅极电压测量在传统上采用标准差分探头（图 2），而最新的光隔离探头，如 IsoVu 探测系统（图 3），则可以大大提高这种测量的准确度。



图 2. 差分电压探头实例：泰克差分探头THDP0200探头及附件



图 3. 泰克 IsoVu TIVP1 光隔离探头 (TIVPMX10X, ± 50 V 传感器尖端)

图 4 比较了标准差分探头与光隔离探头进行的高侧栅极电压测量。不管是关闭还是打开，在器件栅极经过阈值区域后，栅极上都可以看到高频振铃。由于栅极和功率环路之间的耦合，预计会出现部分振铃。但是，在差分探头中，振铃的幅度明显要高于光隔离探头测得的值。

这可能是由于参考电压变化在探头内部引起了共模电流及标准差分探头的假信号。虽然图 4 中差分探头测得的波形似乎通过了器件的最大栅极电压，但光隔离探头的测量准确度要更高，明确显示器件位于规范范围内。使用标准差分探头进行栅极电压测量的应用工程师要注意，因为其可能区分不了这里显示的探头和测量系统假信号与器件额定值实际违规。这种测量假信号可能会导致设计人员提高栅极电阻，放慢开关瞬态信号，减少振铃。但是，这不一定会提高 SiC 器件的损耗。为此，使用的测量系统一定要能准确地反映器件的实际动态，以正确设计系统，优化性能。

有效测量碳化硅 (SiC) 功率电子系统中的信号



图 4. 差分探头 (蓝色轨迹) 与 IsoVu 光隔离探头 (黄色轨迹) 对比

漏极电压测量

在功率电子系统中，差分探头和参考地电平探头是两种常用的电压测量方法。差分探头是一种流行的选择，因为它可以毫无问题地添加到电路的任意节点中。而参考地电平探头要注意实现方式，因为其屏蔽引脚连接到示波器的接地上。参考地电平测量实现不正确，一般会导致探头参考上出现小的接地电流，明显降低测量的准确度。这种效应在SiC设计中会更明显，因为高 dv/dt 会给示波器探头参考地电平引入寄生电流，导致测量误差。在更严重的情况下（参考地电平屏蔽层连接到功率信号时），大电流会流过接地，损坏探头或示波器。在最坏的情况下，从仪器到接地的连接失败会导致示波器的外部金属壳浮动到总线电压，给操作人员的人身安全带来严重威胁。



图 5. 泰克 TPP0850 电压探头：单端，参考地电平探头，支持 50x 衰减（高达 100VRMS）及 800 MHz 带宽

在使用参考地电平 CVR 时，接地问题变得更加关键。如图 6 所示，在结合使用参考地电平探头与 CVR 时，有可能通过示波器屏蔽路径绕过 CVR。这会导致整个器件电流流过示波器，可能会损坏电压探头或示波器，也会带来重大的人身安全隐患。一般来说，推荐使用差分探头进行器件漏极到源极测量。

有效测量碳化硅 (SiC) 功率电子系统中的信号

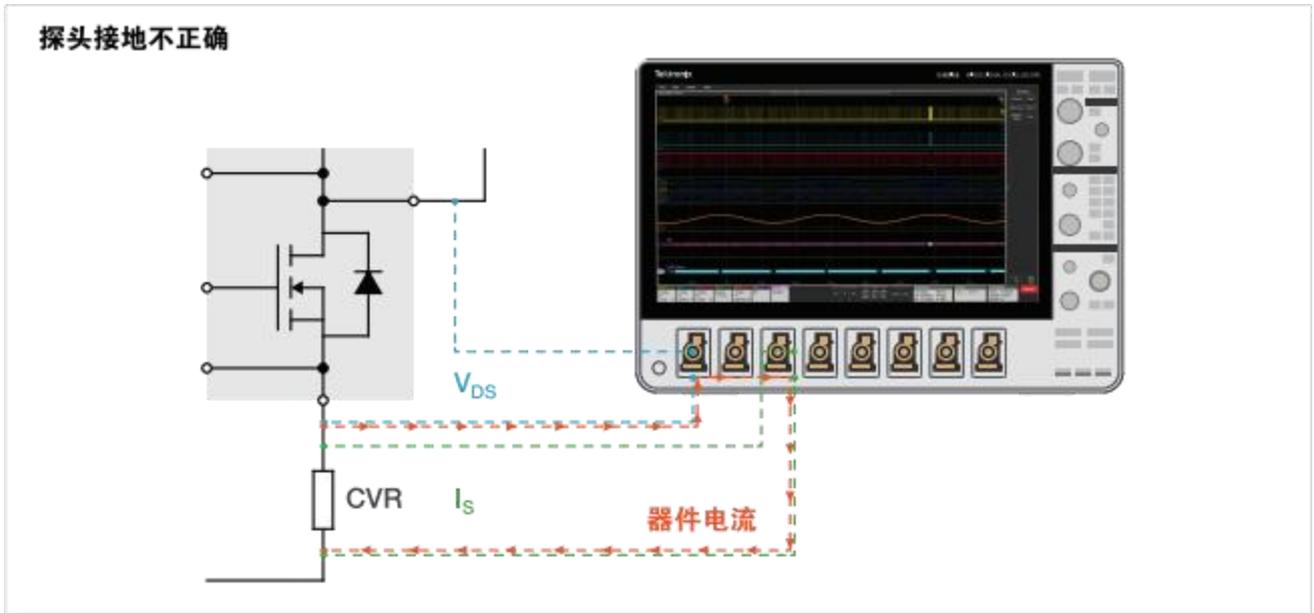


图 6. 在两只参考地电平的探头连接到不同电压的参考平面时，器件电流会旁路 CVR，流经地线和示波器。这会导致测量错误，并可能会导致设备损坏

电流测量



图 7. 探头实例：(a) 电流查看电阻器 (T & M Research SSDN-005, 400 MHz)。图片由 Wolfsped 提供，获准重新印刷。(b) Rogowski

电流探头 (TRCP0600 电流波形变送器, 30 MHz)

在功率电子系统中，电流查看电阻器 (CVR) 和 Rogowski 线圈（图 7a 和 b）是两种常用的电流测量方法。Rogowski 线圈是一种流行的选择，因为它可以简便地添加到电路中，是一种非侵入式测量，但这类探头通常会有明显的带宽限制，不适合用于 SiC。另一方面，CVRs 拥有极高的带宽，可以进行准确的电流测量。遗憾的是，串联晶体管时需要添加额外的器件要求谨慎规划PCB布线，因为添加 CVR 一般会提高电路中的寄生电感。

有效测量碳化硅 (SiC) 功率电子系统中的信号

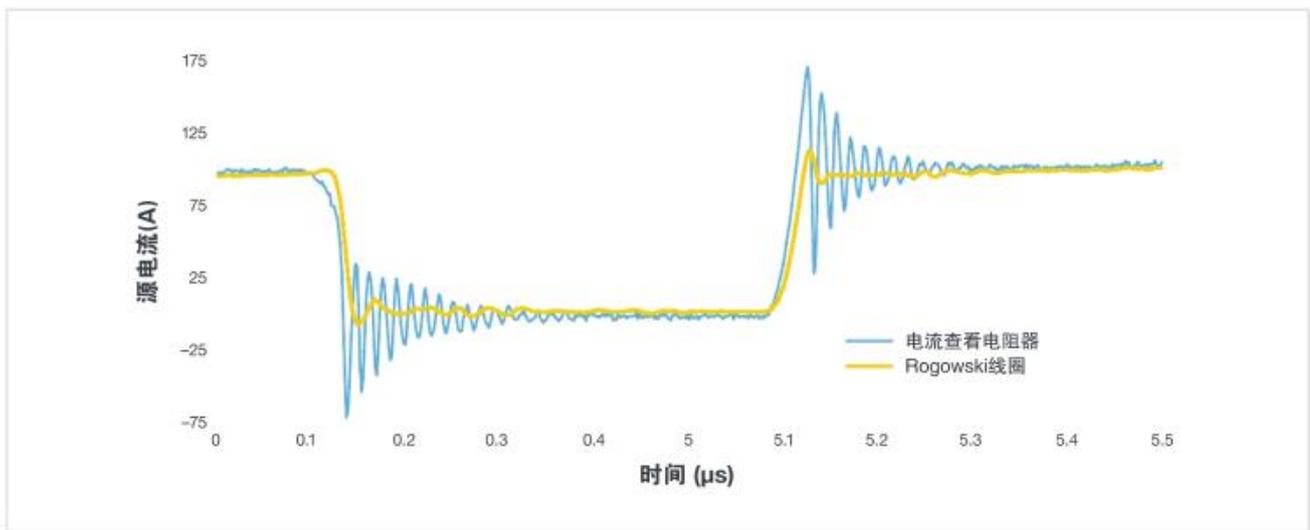


图 8. CVR 与 Rogowski 电流探头, CAB016M12FM3 (T_J = 25°C, R_G = 6.8, V_{os} = 600 V, I_s = 100A)

图 8 比较了 Rogowski 线圈和 CVR 测量的典型 SiC 硬开关事件。Rogowski 线圈的带宽明显低得多，导致人为抑制试验波形中存在的振铃。更重要的是，它会人为抑制初始过冲，对测量的 di/dt 发出预警。

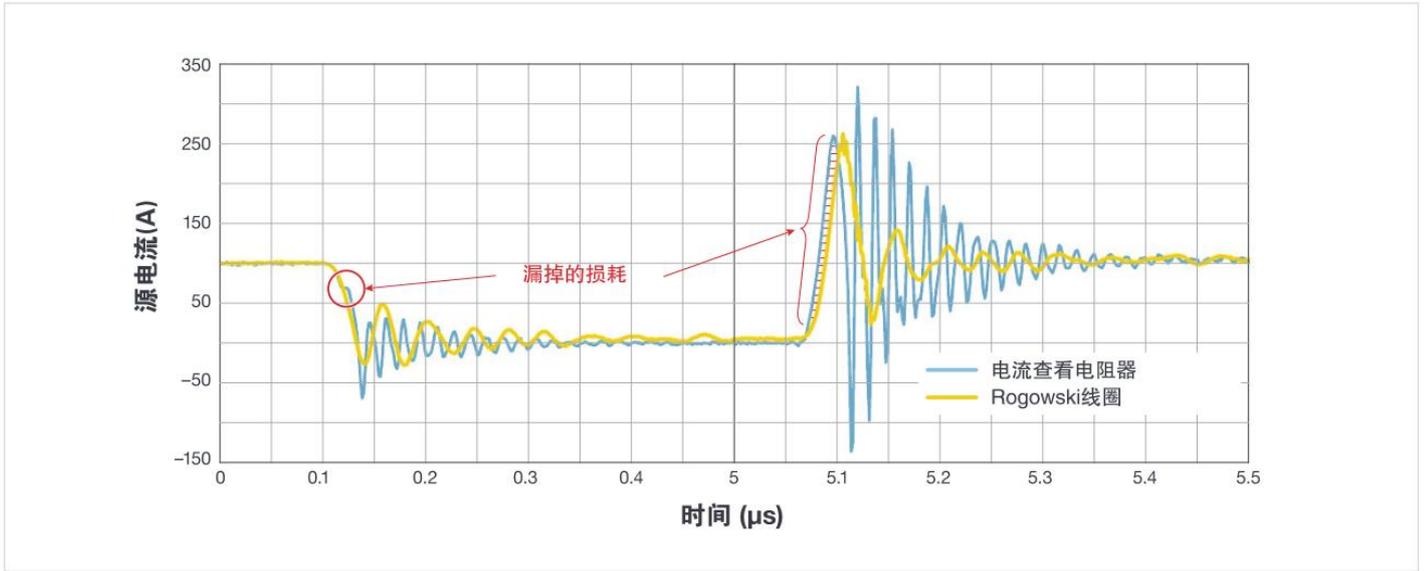


图 9. CVR 与 Rogowski 电流探头, CAB011M12FM3 (TJ = 150°C, RG = 1Ω), VDS= 600 V, IS = 100A)

图 9 在更加激进的开关条件下比较了不同的探头，比较中突出了两个关心的点。第一，在关闭时，Rogowski 线圈不能充分捕获电流波形的形状，漏掉了轻微的膝部，会降低表面上的开关损耗。此外，打开时预测的 di/dt 下降还会导致预测的开关损耗降慢。Rogowski 线圈带宽下降的累积效应，是估算的开关损耗降低。

有效测量碳化硅 (SiC) 功率电子系统中的信号

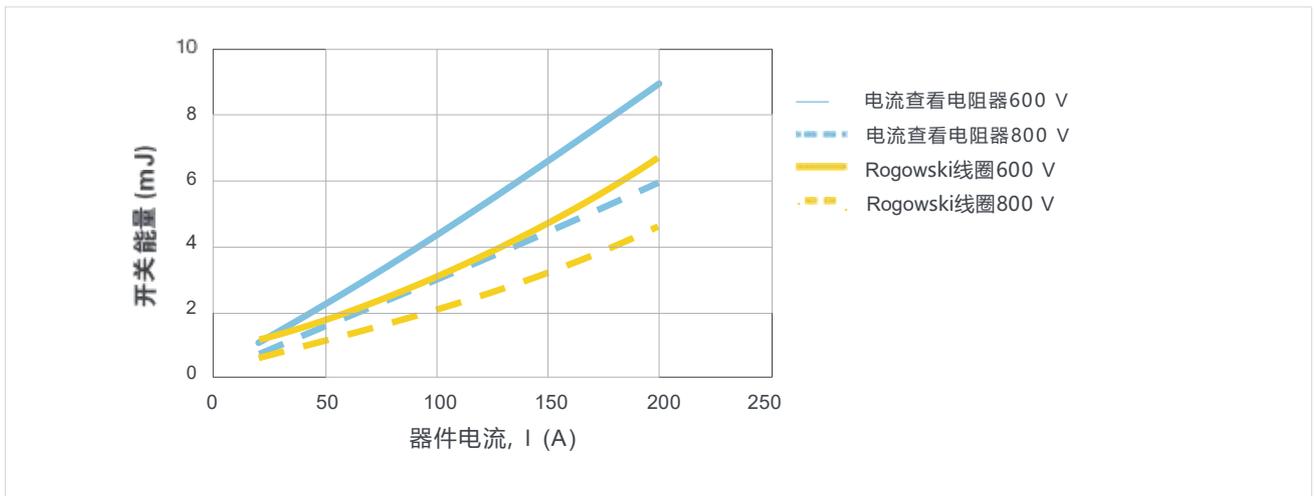


图 10. 使用不同探头 (CAB011M12FM3, TJ = 150°C, RG = 1Ω) 估算开关损耗 (E_{off} + E_{on})

图 10 直接比较了 Wolfspeed WolfPACK™ CAB011MI2FM3 在漏极电流中估算的开关损耗。如上所述，Rogowski 线圈在预测时一直低估了电路的开关损耗，给人感觉电路损耗过于乐观。由于不一致与探头带宽限制有关，所以它取决于晶体管的边沿速率，在更激进的栅极电阻时会进一步提高。对低速开关技术（如 IGBTs），计量差异可以忽略不计。

校正探头时延

使用的探头除了要有充足的带宽和噪声抑制功能外，还必须进行时延校正，保证电压信号和电流信号的时延匹配。电压探头和电流探头时延不匹配哪怕只有1-2 ns，就会导致30% 及以上的 E_{on} 和 E_{off} 测量误差。正确地进行时延校正对 SiC 系统中固有的快速开关瞬态信号至关重要。

在时延校正前，必要时要自动清零和校准探头，消除任何偏置或定标误差。

通过使用对称连接把两只探头连接到一台函数发生器上，可以校正电压探头 VDS 和 VGS 的时延。使用函数发生器生成的方波，检查信号的振铃和下降沿是否对齐。可以使用图 9 所示的电路板，简便地连接函数发生器和任何电压探头。函数发生器信号连接到电路板中心，电路板边缘周围为示波器探头连接提供了各种选项，可以适应各种探头接口。

有多种方法校正 VDS 和 I_D 探头时延，保证正确测量开关损耗。所有方法背后的原理都一样，即要有一条测试电路，如图 11 所示的夹具，尽可能接近纯电阻电路，这样电压波形和电流波形就能对准。然后可以使用这条测试电路校正电流探头时延，与电压探头响应相匹配。



图 11. 功率测量时延校正和校准夹具 (067-1686-00)。这些连接提供了一种方便的方式，可以补偿电压探头和电流探头之间的定时差

有效测量碳化硅 (SiC) 功率电子系统中的信号

iC 电路级验证使用的探头连接技术

在执行栅极测量时，要认真考虑连接选项，确保从功率转换模块中捕获干净的信号。鉴于这是在较高电压下进行的未接地测量，因此连接非常关键。

有两种主要连接方式：MMCX 为器件连接提供了一种模块化预制件方法，方针则有一个连接器可以转接到不同的 PC 电路板实现方案。下面我们进一步介绍这两种方式。

MMCX 式传感器尖端电缆 (高性能，高达 250 V 应用)



图 12. MMCX 连接器 - 实例 1。图片由 Wolfspeed 提供，获准重新印刷

MMCX 连接器插到测试点附近时，IsoVu Gen 2 测量系统可以实现最好的性能。图 12 和图 13 显示了两 种不同的应用。MMCX 连接器是一种行业标准，许多电子元件分销商都卖这种连接器。这些连接器提供了高信号保真度。固体金属机身和黄金触点提供了屏蔽精良的信号路径。配对的 MMCX 接口提供了卡接 连接，拥有正向固定力，实现稳定的免提连接能力。分离力为高压应用提供了安全稳定的连接。MMCX 连接器分成多种配置，如下图所示，可以转接到许多应用，即使电路板中没有设计这种连接器也无妨。如果了解怎样把这些连接器焊接到设计中。



图 13. MMCX 连接器 - 实例 2。图片由 Wolfspeed 提供，获准重新印刷

方针到 MMCX 转接头

在不能使用 MMCX 连接器时，可以转接尖端电缆，适应行业标准方针。泰克提供了探头转接头，把传感器尖端电缆连接到电路板的方针上。泰克提供了两种不同间距的转接头：MMCX 到 0.1 英寸 (2.54 毫米) 转接头和 MMCX 到 0.062 英寸 (1.57 毫米) 转接头。

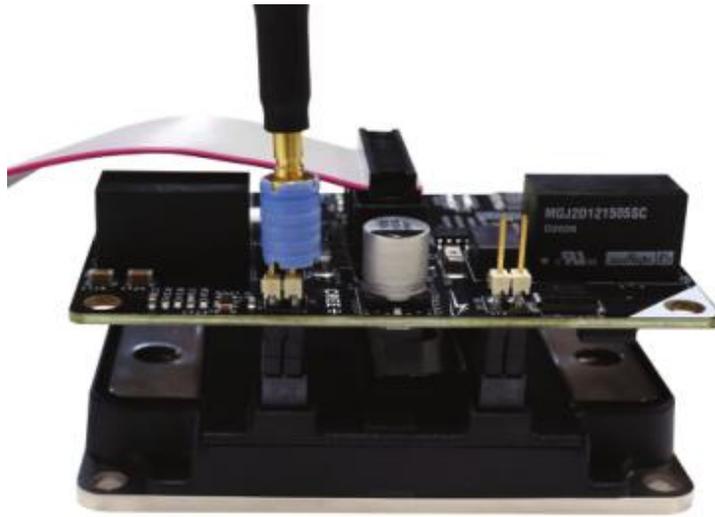


图 14. MMCX 到方针转接头。图片由 Wolfspeed 提供，获准重新印刷

转接头 (图 14) 有一个 MMCX 插座，用来连接 IsoVu 尖端电缆。转接头另一端有一个中心引脚插座，转接头外部周围有 4 个公共 (屏蔽) 插座。转接头上的凹槽可以用来固定屏蔽插座。在探头尖端转接头靠近电路板时，可以实现最佳的电气性能。

有效测量碳化硅 (SiC) 功率电子系统中的信号

方针式传感器尖端电缆

TIVP 系列 (IsoVu Gen 2) 产品还包括方针式传感器尖端电缆，可以实现更高的输入差分电压功能。这些尖端接口不仅连接简便，而且连接牢固，在高压环境中可以安全实现免

提操作。方针式传感器尖端电缆分成两种：0.100" (2.54 mm) 间距，可以用于高达 600 V 的应用；0.200" (5.08 mm) 间距，可以用于高达 2500 V 的应用。



图 15. 方针式传感器尖端电缆。图片由 Wolfspeed 提供，获准重新印刷

非预计的测试点

在理想情况下，测试点会提前规划，并整合到栅极驱动器或评测电路板中，如 Wolfspeed KIT-CRD-CIL12N-FMC Wolfpack 评测套件。在这种场景下，MMCX 连接器会提供最好的性能，如果关心的信号落在 300Vpk 电压额定值范围内，推荐使用 MMCX 连接器。

当然，我们不能一直预测每个可能的测试点。在具体情况要求添加非预计的测试点时（如图 16 所示），应根据以下指引确保最高的测量准确度：

1. 在电压额定值允许时使用 MMCX 连接器。
2. 连接器位置要尽可能安全地靠近 IC 或元器件。
3. 同样，任何要求的飞线要尽可能短或不用飞线。
4. 使用热熔胶、聚酰亚胺胶带或类似东西机械加强连接器。

在下面的实例中，电路板组装后在 VGS 测试点中添加了一个方针头部。测试点使用非导电的热熔胶加强，以增加强度。

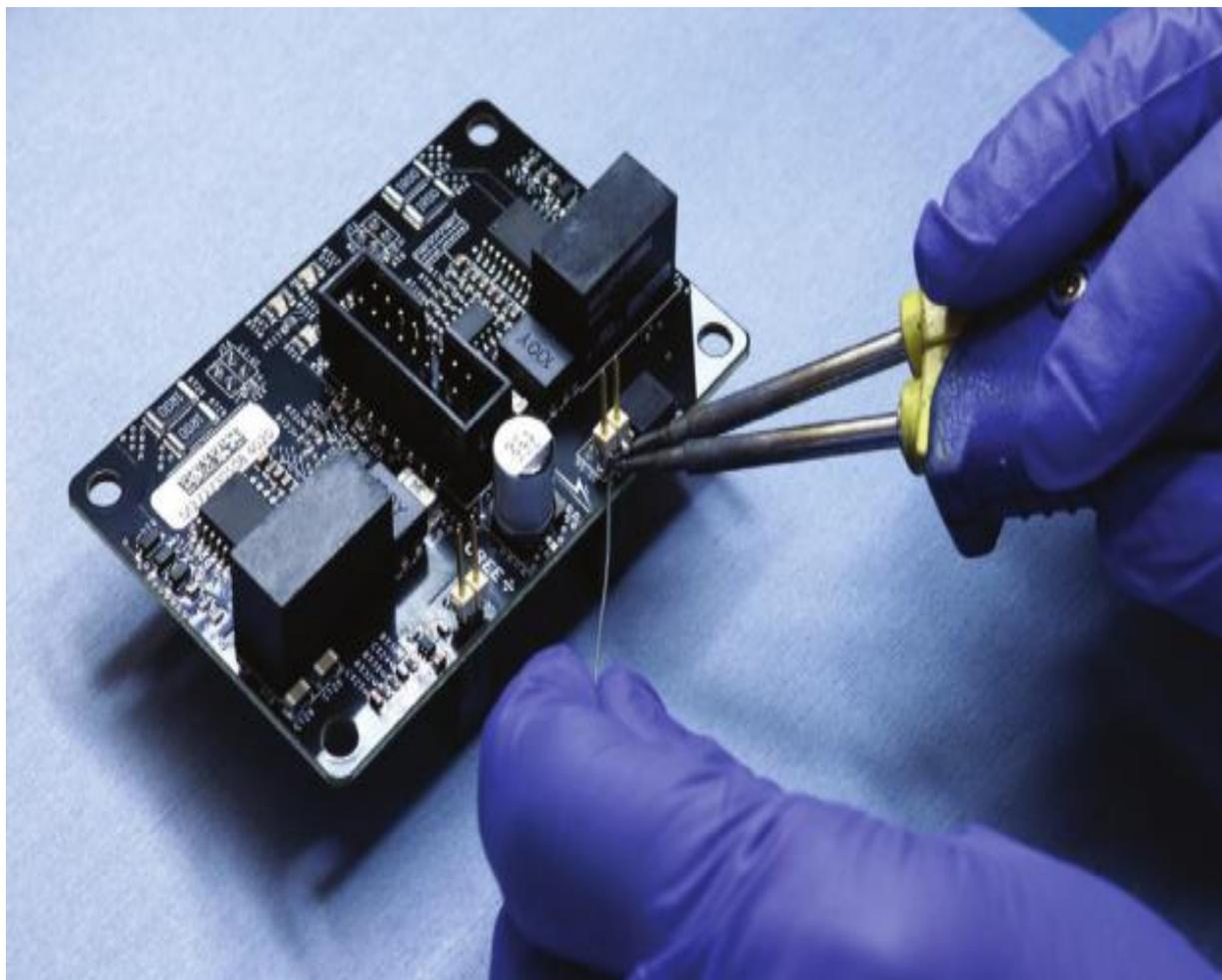


图 16. 经 VGS 节点焊接方针头部，测量高侧栅极驱动信号。图片由 Wolfspeed 提供，获准重新印刷

小结

总之，宽带隙半导体技术将在功率转换和能效的未来发展中发挥巨大的作用。与同等硅产品相比，SiC 开关更小，更快，效率更高。这些技术广泛用于各种应用中，从电动汽车到光伏材料。因此，使用正确的工具测试这些技术变得非常重要，这样设计人员才能正确设计、开发及整合到最终应用中。泰克系列解决方案发挥着关键作用。

IsoVu™ 隔离探测系统提供了浮动的非参考地电平的差分探测体验，特别适合栅极测量需求。其分成多种带宽，从 200 MHz 到 1 GHz，拥有各种探测尖端，在需要时可以衰减支持电压更高的信号。

5 系 MSO 示波器是一种高分辨率 (12 位) 示波器，特别适合测试存在高得多的电压时的小电压。例如，在存在 VDS 电压时测试 VGS、RDS_ON 和传导损耗要求高垂直分辨率。此外，它有 8 条通道，可以同时查看更多的定时信号，优化性能，考察大量信号之间的关联性。

5-PWR 软件旨在 5 系 MSO 示波器上运行自动的、准确的、可重复的功率完整性测量，包括实际工作条件下的开关损耗、传导损耗、RDS_ON、磁性损耗、SOA 等等。

从测试项目立项开始
陪伴客户
co-operate from the very beginning
of your electronic testing project

Misson

Applications
方案提供商

Software Customize
软件定制

Instrument Products
仪器产品

After Sale Service
永续服务

测试测量仪器综合服务商

零式未来
Zero Formula

咨询热线-仪器帮帮
400-852-1788