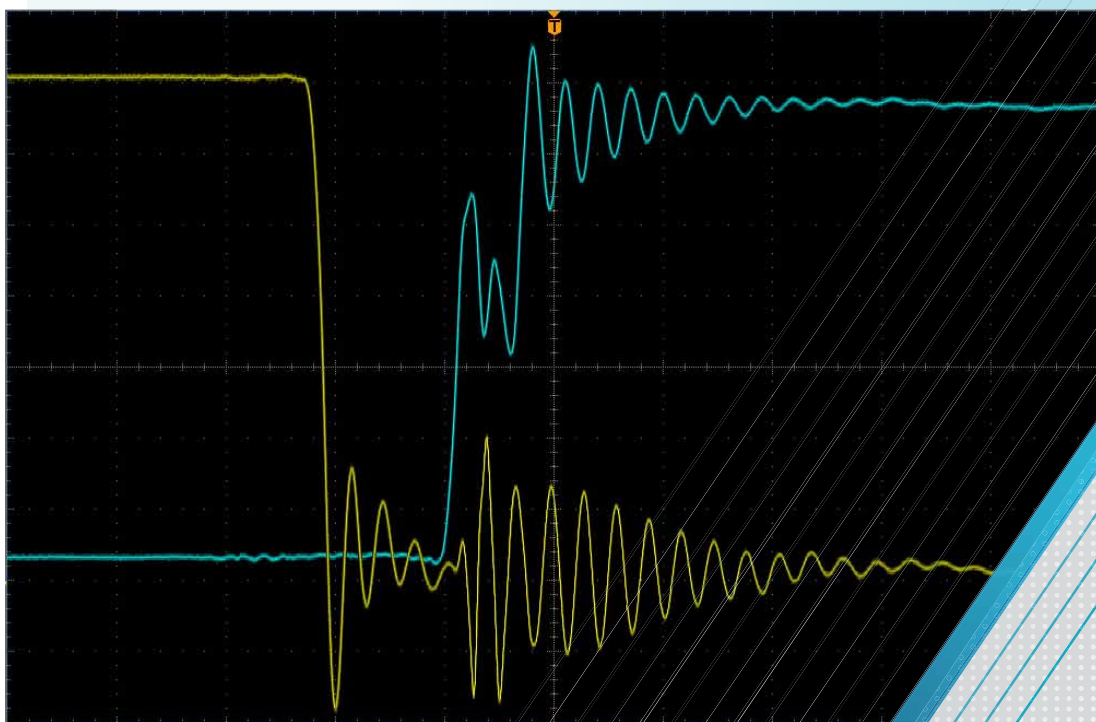


高效测量碳化硅 (SiC) 电源系统中的信号

应用指南



引言

经过多年研究和设计应用，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。

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

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

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，规定了 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，并针对不同应用调整门驱动器行为。



图 1. Wolfspeed WolfPACK FM3 功率模块及引脚网格设计实例，实现了扩展能力和灵活性。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特性？
- 怎样才能准确地优化门驱动性能和死区时间？
- 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？还是探头导致的结果？

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 的功率器件可以实现在几纳秒内开关速度，所以示波器和探头至少要拥有 200 MHz 以上带宽，才能准确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，开关损耗测量结果会下降 30%，因为 30 MHz 探头不能捕获开关波形的完整信号成份。（参考资料 3）高带宽、低噪声信号测试能力为这些重要测量提供了满足要求的准确度。

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。这些模块去除了传统底板，改善了热性能。此外，引脚网格设计实现了扩展能力和灵活性，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。

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，受到采集测量数据探头的准确度、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会有高 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退耦，要有非常大的共模抑制比能力。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 4 比较了标准差分探头与光隔离探头进行的高压侧栅极电压测量。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



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)。

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，降慢开关瞬态信号，减少振铃。但是，这将会不必要的提高 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。

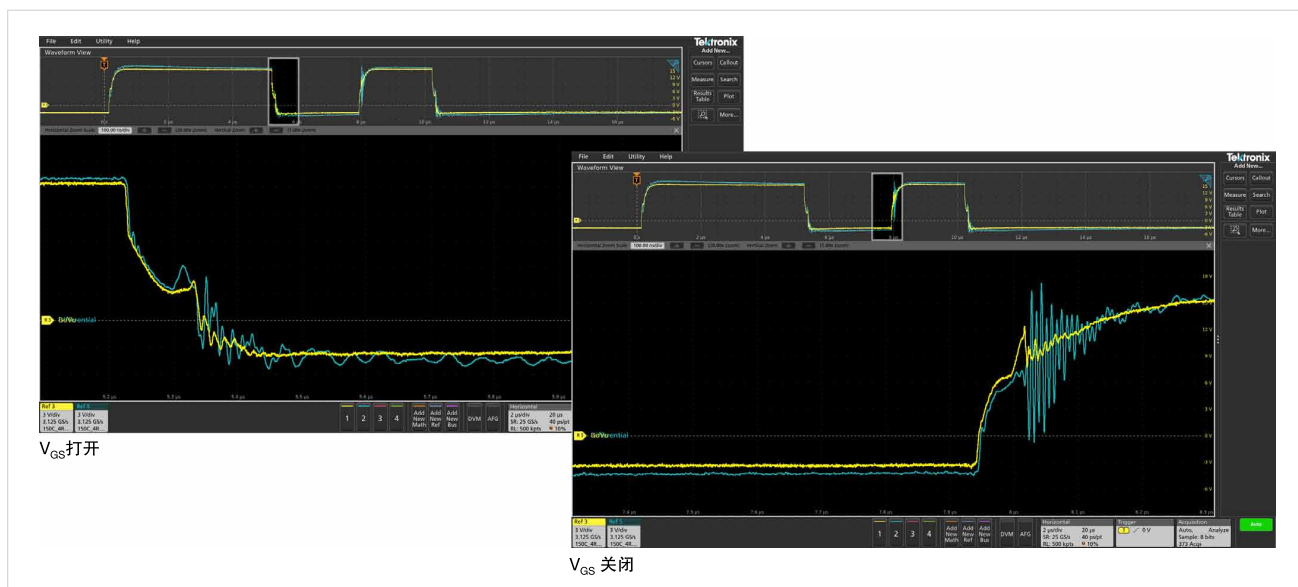


图 4. 差分探头 (蓝色轨迹) 与 IsoVu 光隔离探头 (黄色轨迹) 对比。

漏极电压测量

在功率电子系统中，差分探头和地电平参考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。而地电平参考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。地电平参考探头测量不正确，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，地电参考平探头，支持 50x 衰减 (高达 $100V_{RMS}$) 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，在结合使用地电平参考探头与 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。

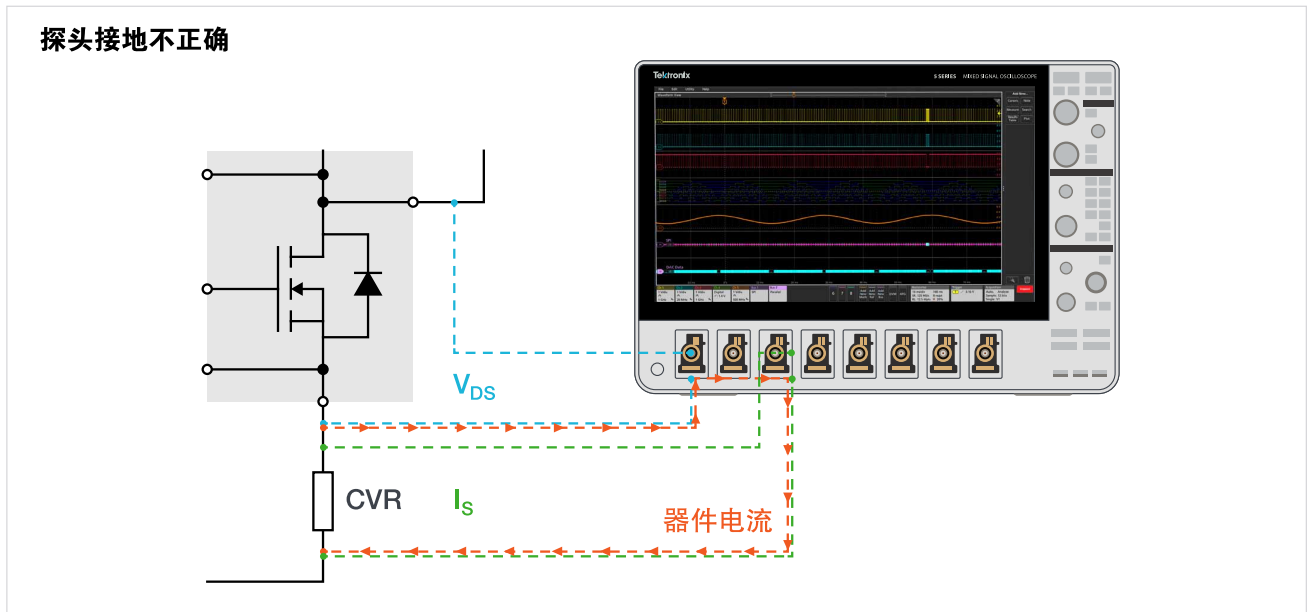


图 6. 在两只地电平参考探头连接到不同参考电压时，器件电流会旁路 CVR，流经地线和示波器。这会导致测量错误，并可能会导致设备损坏。

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 Wolspeed 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。

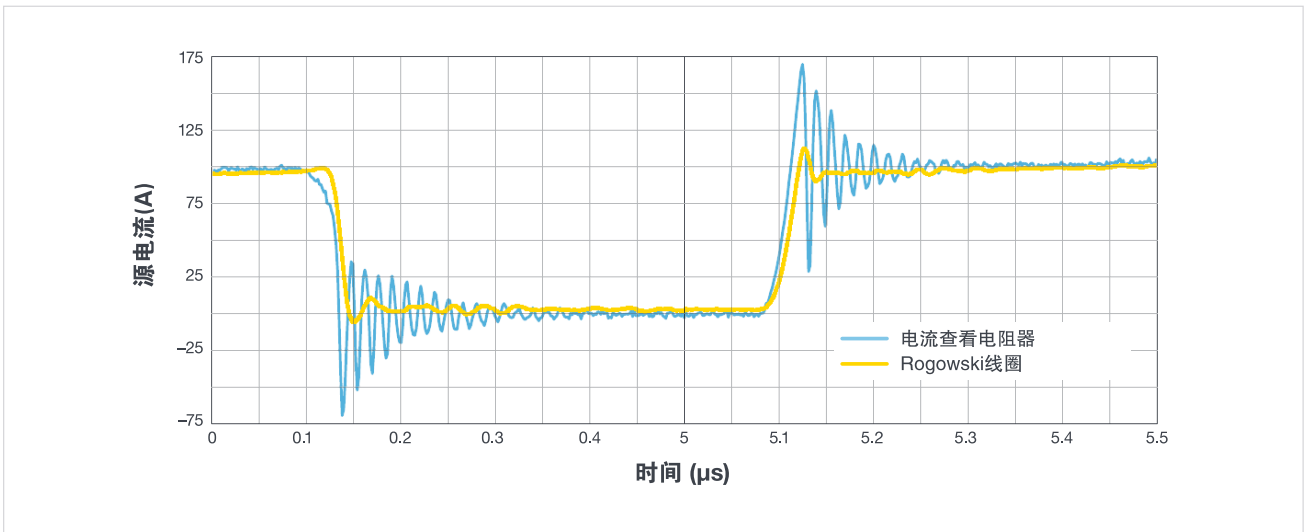


图 8. CVR 与 Rogowski 电流探头, CAB016M12FM3 (TJ = 25°C, RG = 6.8, Vos= 600 V, Is = 100A)。

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。

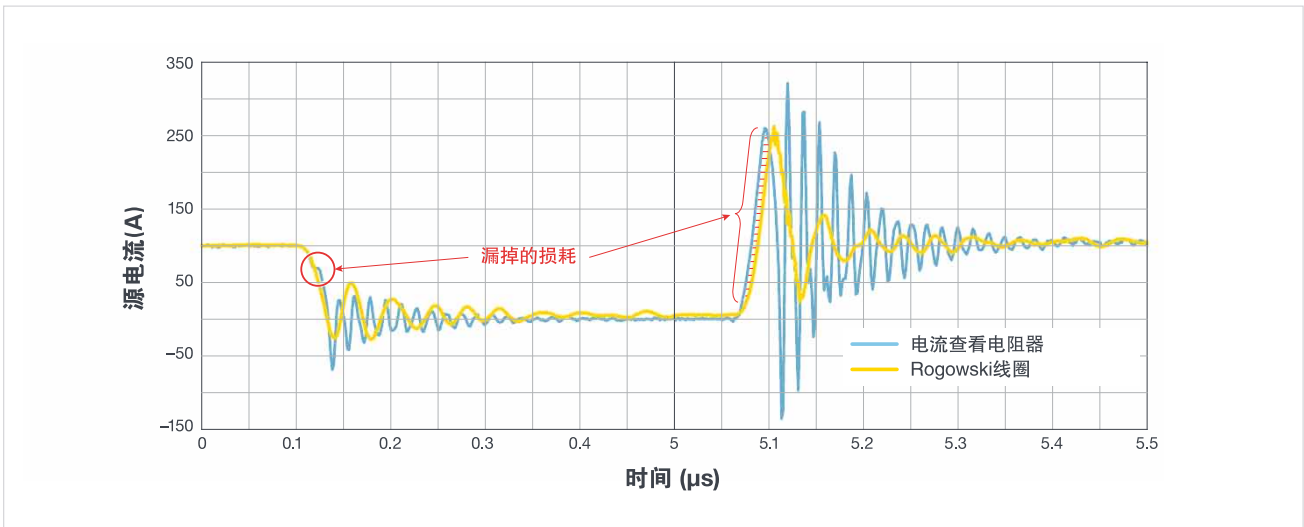


图 9. CVR 与 Rogowski 电流探头, CAB011M12FM3 (TJ = 150° C, RG = 1Ω), VDS= 600 V, IS = 100A)。

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，漏掉了轻微的接合部分，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，使估算的开关损耗降低。

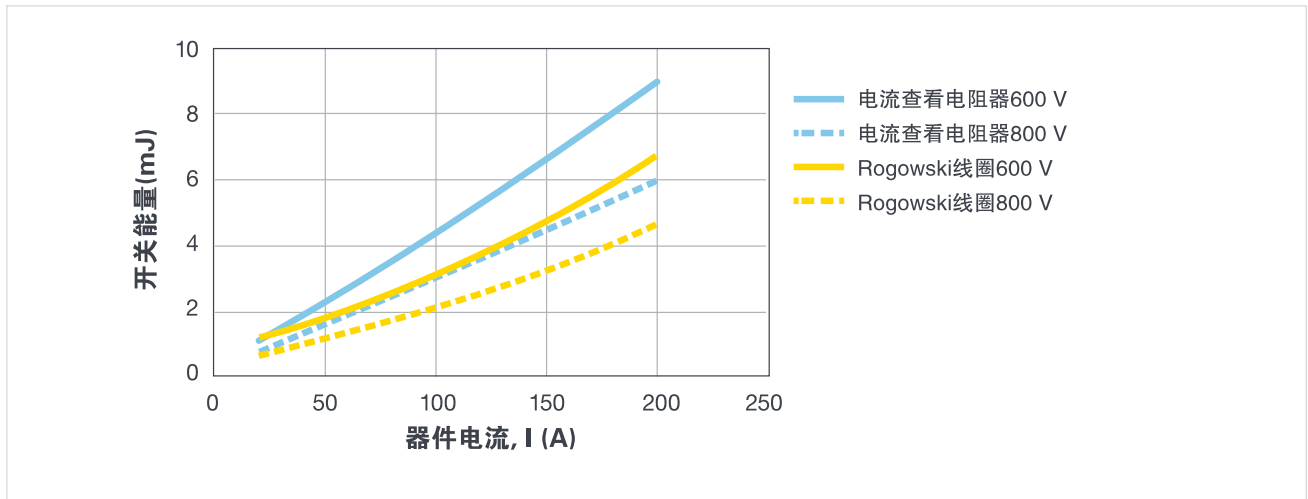


图 10. 使用不同探头 (CAB011M12FM3, $T_J = 150^{\circ}\text{C}$, $R_G = 1\Omega$) 估算开关损耗 ($E_{\text{off}} + E_{\text{on}}$)。

图 10 直接比较了 Wolfspeed WolfPACK™ CAB011 M12FM3 在漏极电流中估算的开关损耗。如上所述，Rogowski 线圈在测量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。这种差异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加剧。对低速开关技术 (如 IGBTs)，测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 V_{DS} 和 V_{GS} 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。可以使用如图所示的电路板，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 ID 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。

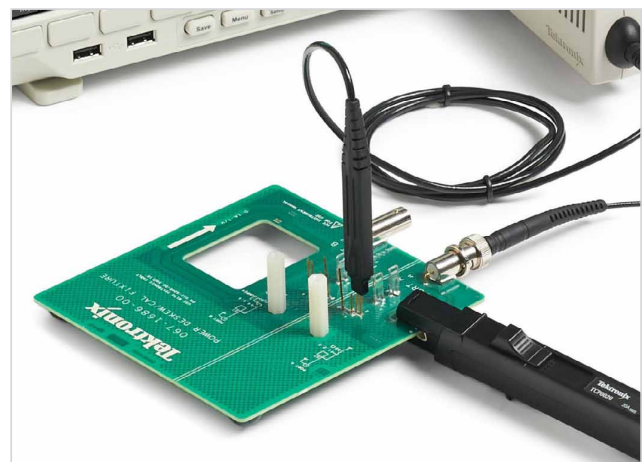


图 11. 功率测量时延校正和校准夹具 (067-1686-00)。这些连接装置提供了一种方便的方式，可以补偿电压探头和电流探头之间的时延。

SiC 电路级验证使用的探头连接技术

在执行栅极测量时，要认真考虑连接问题，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伏地地测量，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组化预置方法，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)

MMCX 连接器插到测试点附近时，IsoVu Gen 2 测量系统可以实现优异的性能。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 接口提供了卡口连接，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。如果想了解怎样把这些连接器焊接到设计中，可以参阅：www.tek.com/isolated-measurement-systems。

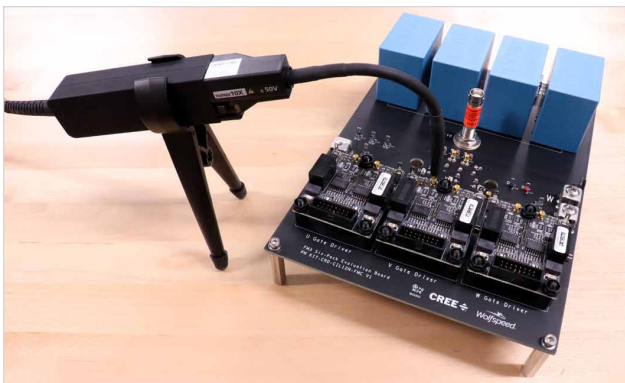


图 12. MMCX 连接器 - 实例 1。图片由 Wolfspeed 提供，获准重新印刷。

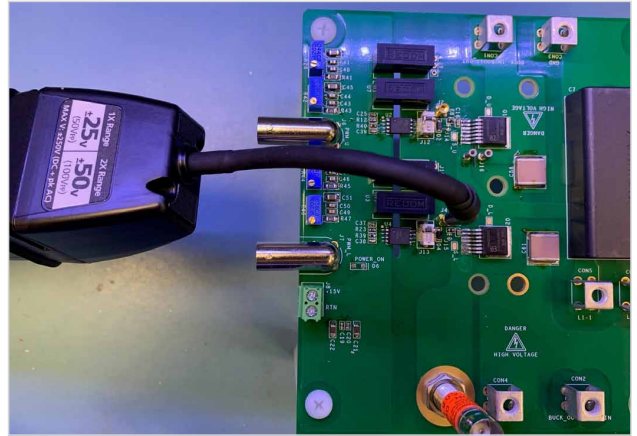


图 13. MMCX 连接器 - 实例 2。图片由 Wolfspeed 提供，获准重新印刷。

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。

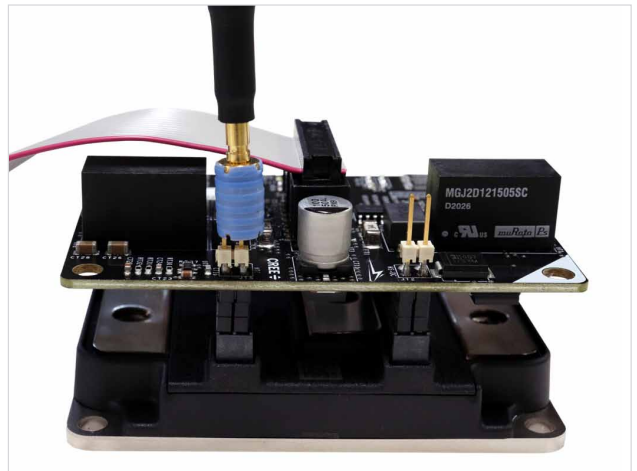


图 14. MMCX 到方针转接头。图片由 Wolfspeed 提供，获准重新印刷。

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，可以实现优异的电气性能。

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。

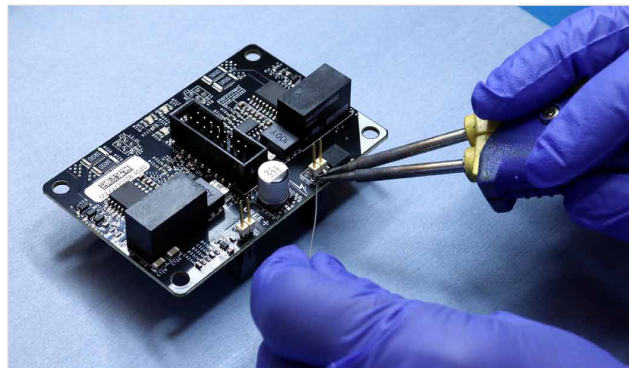


图 16. 经 V_{GS} 节点焊接方针头部，测量高压侧栅极驱动信号。图片由 Wolfspeed 提供，获准重新印刷。

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。与同等硅基产品相比，SiC 开关体积更小，频率更快，效率更高。这些技术广泛用于各种应用中，从电动汽车到太阳能光伏。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。泰克一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，特别适合测试叠加在很高的电压上的小电压信号。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。

参考资料

1. 您是否正在大‘功率’切换到 SiC 和 GaN ?
<https://www.tek.com/blog/are-you-making-big-power-switchsic-and-gan>
2. Wolfspeed 功率应用 <https://www.wolfspeed.com/power/applications>
3. CPWR-AN45: Wolfspeed WolfPACK 动态性能应用指南
https://www.wolfspeed.com/downloads/dl/file/id/1971/product/741/cpwr_an45_wolfspeed_wolfpack_trade_application_note.pdf
4. SiC 功率和 GaN RF 解决方案 | Wolfspeed
<https://www.wolfspeed.com/>
5. SiC MOSFET 和 GaN FET 开关功率转换器分析套件
<https://eepower.com/new-industry-products/sicmosfet-and-gan-fet-switching-power-converter-analysis-kit/>



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

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) 3168 6695
传真：(852) 2598 6260

更多宝贵资源，尽在 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。

051821 SBG 48C-73812-0

