



功率半导体 双脉冲测试分析

应用指南



引言

功率电子领域使用的半导体材料正从硅逐渐转向碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 等宽禁带半导体，因为它们在许多应用中表现更优。宽禁带开关器件能够实现更小、更快且更高效的设计。这种小型化和轻量化的功率密度优势在空间受限和移动产品 (如电动汽车) 中尤为明显，但紧凑的功率电子设计在各种产品中都具有吸引力。同时，

随着政府推出财政激励和更严格的能效法规，效率变得越来越重要。

在设计功率转换器时，理想情况下功率损耗为 0%，如图 1 所示。然而，开关损耗不可避免。因此，目标是通过设计优化将损耗降至最低，并且必须严格测量与效率相关的设计参数。

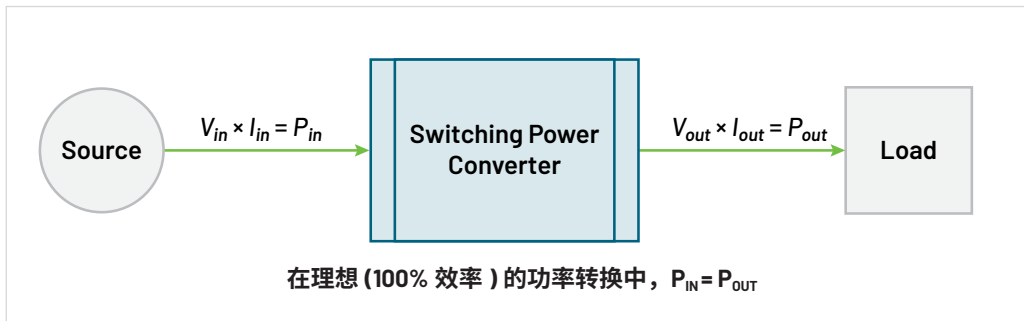


图 1: 理想的功率转换效率。

传统的硅基转换器效率约为 87% 至 90%，意味着 10% 至 13% 的输入功率在转换器中以废热形式耗散。其中大部分损耗发生在 MOSFET 或 IGBT 等开关器件中。[2]

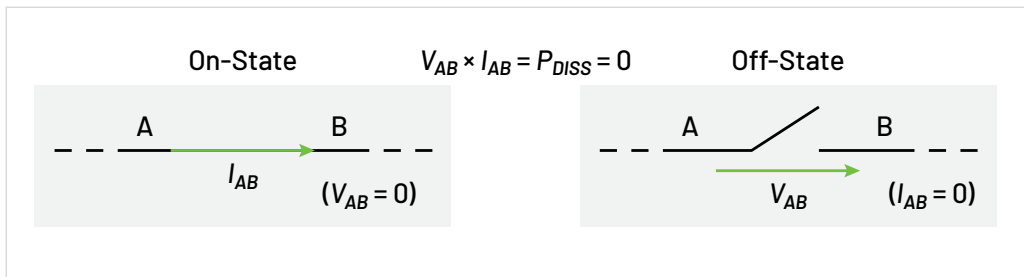


图 2: 理想的开关行为。

理想情况下，开关器件只有“开”和“关”两种状态，如图 2 所示，并在这些状态之间瞬时切换。在“开”状态下，开关的阻抗为零欧姆，无论流经多少电流，开关中都不会耗散功率。在“关”状态下，开关的阻抗为无限大，电流为零，因此也不会耗散功率。

实际上,功率会在“开”和“关”(关断)以及“关”和“开”(导通)之间的过渡过程中耗散。这些非理想行为是由于电路中的寄生元件引起的。如图 3 所示,器件上的寄生电容会减缓开关速度,延长导通和关断时间。[2] 为了将开关损耗保持在最低水平,从而设计更高效的转换器,设计工程师需要仿真并测量开关时序及相关能量损耗。

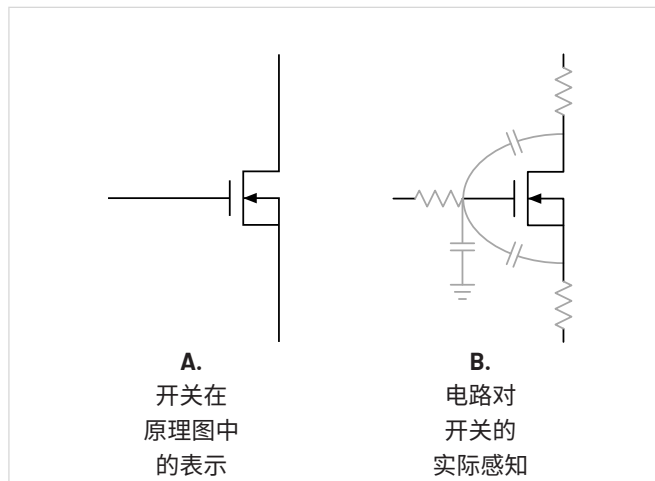


图 3: A: MOSFET 在原理图中的表示。B: 电路对 MOSFET 的实际感知。

工程师还需要测量反向恢复引起的能量损耗。这种损耗是由于二极管从正向偏置切换到反向偏置时,瞬态电流流入开关器件造成的。

测量 MOSFET 或 IGBT 开关参数的首选测试方法是“双脉冲测试”法。这些测试方法在 JEDEC 和 IEC 标准中有描述,包括 JEP182 [3]、JESD24-10、IEC 60747-9、IEC 60747-8 和 IEC 60747-9。

本应用指南将介绍双脉冲测试及其如何通过仪器实现,涵盖开关损耗和反向恢复测量。特别是,它将解释如何使用泰克 AFG31000 任意函数发生器生成脉冲,并通过 4、5 或 6 系列 MSO 示波器和探头测量重要参数。

什么是双脉冲测试?

双脉冲测试 (DPT) 是一种测量开关参数并评估功率器件动态行为的方法。它使工程师能够在受控的电压、电流和温度条件下测试开关器件。通过使用脉冲限制被测器件 (DUT) 的自发热并保持稳定的结温。此测试用于:

- 保证 MOSFET 和 IGBT 等功率器件的规格。
- 确认功率器件或功率模块的实际值或偏差。
- 在各种负载条件下测量开关参数,并验证多个器件的性能。[3]

此测试的目标通常是测量以下开关参数: [4][5]

• 导通参数:

- 导通延迟时间 $t_{d(on)}$
- V_{DS} 下降时间 t_f
- 导通时间 t_{on}
- 最大漏极电流 I_D
- dv/dt
- di/dt
- 导通能量 E_{on}
- 动态导通电阻 $R_{DS(on)}$

• 关断参数:

- 关断延迟时间 $t_{d(off)}$
- V_{DS} 上升时间 t_r
- 关断时间 t_{off}
- 最大漏源电压 V_{DSM}
- dv/dt
- di/dt
- 关断能量 E_{off}
- 输出电荷 Q_{oss}

• 反向恢复参数:

- 反向恢复时间 t_r
- 反向恢复电流 I_r
- 反向恢复电荷 Q_{rr}
- 反向恢复能量 E_{rr}
- di/dt
- 正向导通电压 V_{SD}

典型的双脉冲测试电路如图 4 所示。

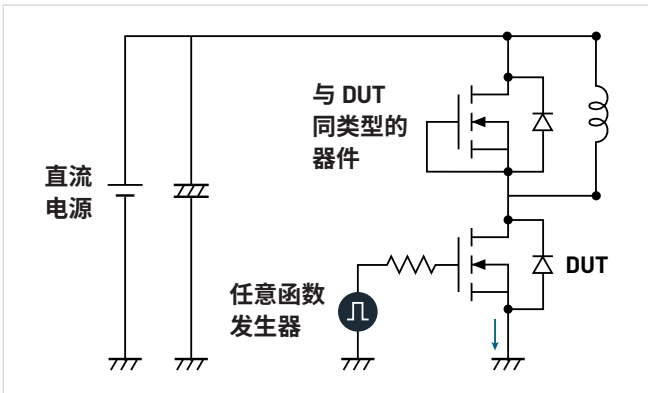


图 4: 用于测量低侧 FET 开关损耗的双脉冲测试电路。高侧 FET 的栅极可能被短路以防止其导通，并连接一个负载电感。

测试通常使用感性负载和电源进行，但具体电路可能因被测功率器件的应用而异。[3] 电感用于模拟转换器设计中的电路条件。电源用于为电感提供电压。任意 / 函数发生器用于生成脉冲以触发 MOSFET 的栅极，使其导通和关断。

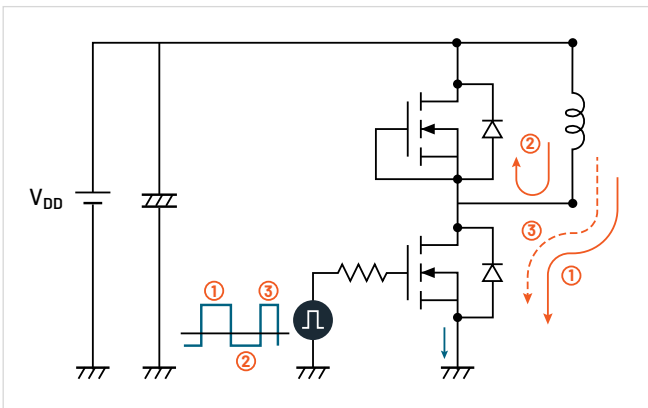


图 5: 以 MOSFET 为 DUT 的电流流向。双脉冲测试可分为三个阶段，如本节所述。

图 5 显示了 MOSFET 测试中不同阶段的电流流向。测试 IGBT 时的电流流向相同，如图 6 所示。

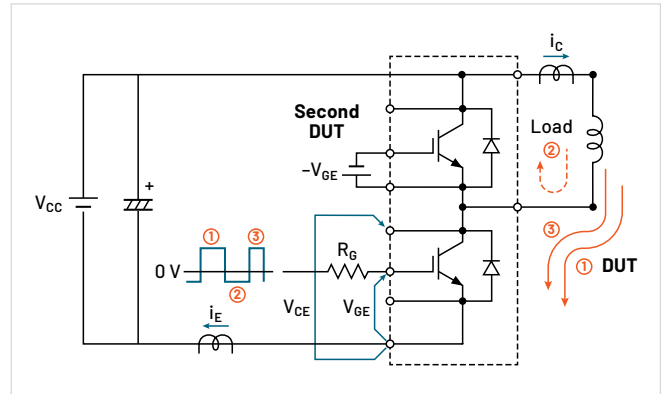


图 6: 以 IGBT 为 DUT 的电流流向。

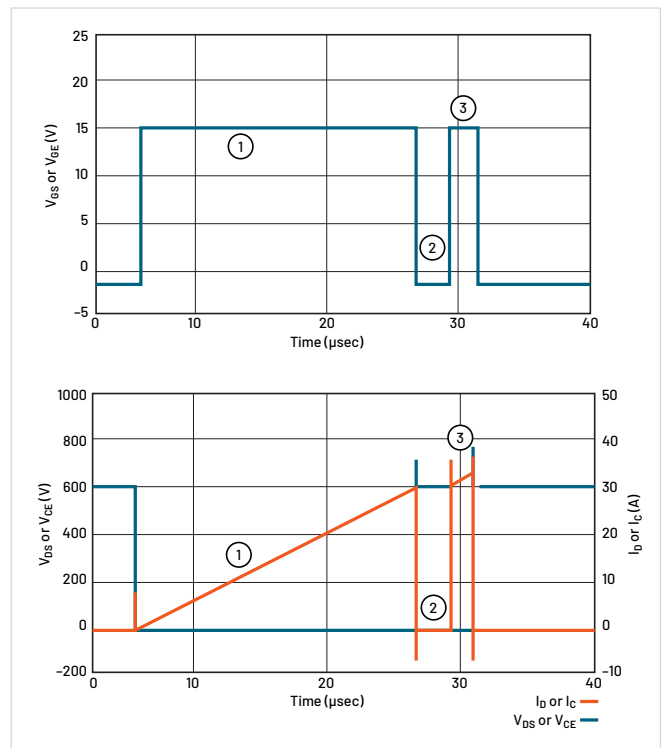


图 7: 双脉冲测试波形。顶部波形显示施加到栅极或栅极驱动器的信号。底部信号是对应的漏极电流 (I_C) 和漏源电压 (V_{DS})。测量在第 1 和第 2 阶段以及第 2 和第 3 阶段之间的过渡处进行。

图 7 显示了低侧 MOSFET 或 IGBT 的典型双脉冲测试波形。典型的双脉冲测试有三个重要阶段，如图 5、6 和 7 所示，并描述如下：

- 1. 建立目标测试电流 (I_D):** 调整第一个脉冲的宽度以通过负载电感提供所需的测试电流。
- 2. 第一个脉冲的关断及关断测量:** 此时 I_D 已达到目标测试电流, 并在功率器件关断时降至零。测量关断延迟 ($t_{d(off)}$)、下降时间 (t_f)、关断时间 (t_{off})、关断能量 (E_{off})、 dv/dt 和 di/dt 。负载电流从负载电感流经续流二极管。关断时间保持较短以将负载电流维持在目标 I_D 。
- 3. 第二个脉冲的导通及导通测量:** 在此阶段进行导通测量, 目标 I_D 开始重新流入功率器件。导通期间的电流过冲是由于续流二极管反向恢复时的暂时过量电流。第二个脉冲宽度仅保持足够长以确保稳定测量, 同时避免过热。

关断和导通测量定义

为了计算导通和关断参数, 我们重点关注开关器件的首次关断和随后的导通。在这些点上, I_D 应处于测试的目标电流水平。

行业标准对导通和关断时序参数的定义如图 8 所示。

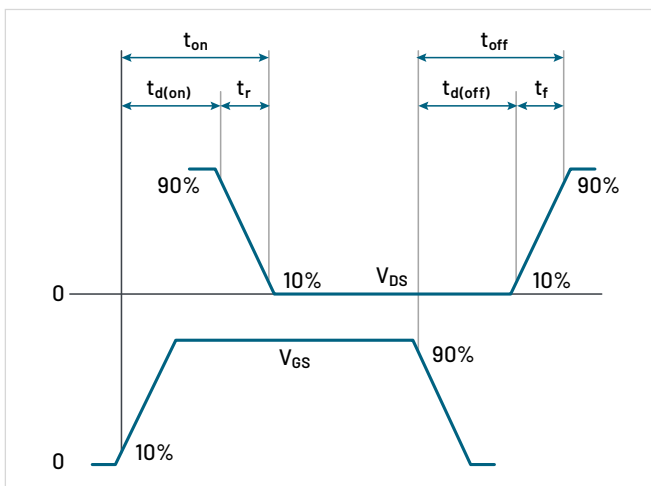


图 8: 开关时间标准波形 [6]。上方波形代表 V_{DS} , 下方波形代表 V_{GS} 。注意, 按照惯例, “上升”和“下降”分别对应导通(上升)和关断(下降), 而非 V_{DS} 波形上的边沿。

- $t_{d(on)}$: V_{DS} 达到其峰值的 10% 与 V_{DS} 达到其峰值幅度的 90% 之间的时间间隔。
- t_r : V_{DS} 从峰值的 90% 降至 10% 的时间间隔。注意, t_r 在器件导通时测量, 因此对应 V_{DS} 的下降沿。
- $t_{d(off)}$: V_{DS} 达到其峰值的 90% 与 V_{DS} 达到其峰值幅度的 10% 之间的时间间隔。
- t_f : V_{DS} 从峰值的 10% 升至 90% 的时间间隔。注意, t_f 在器件关断时测量, 因此对应 V_{DS} 的上升沿。

为计算能量损耗, 需先计算瞬时功率, 然后积分得到能量。导通损耗通过在导通期间积分功率耗散来测量 (图 9, 公式 1) :

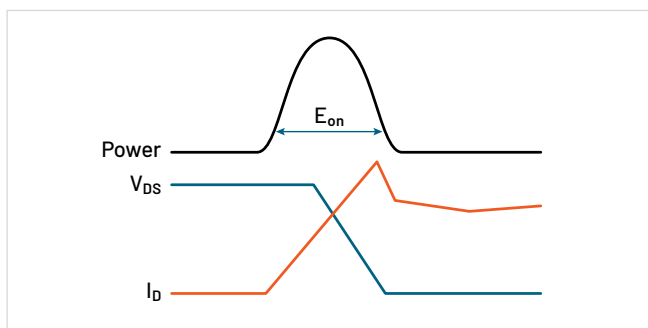


图 9: 导通能量通过在导通期间对采样功率波形积分计算。

$$E_{on} = \int_0^t V_{DS} I_{DS} dt$$

相同的方法用于计算关断过渡期间的能量损耗 (图 10, 公式 2) :

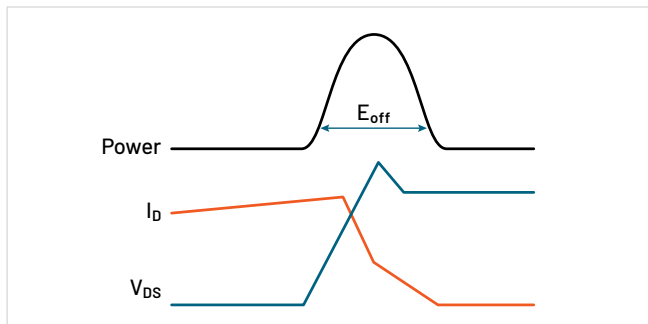


图 10: 关断能量通过在关断期间对采样功率波形积分计算。

$$E_{off} = \int_0^t V_{DS} I_{DS} dt$$

这些计算可以通过示波器上的波形数学功能实现，将 V_{DS} 和 I_D 波形相乘生成功率波形，然后使用面积（积分）测量功能在导通和关断期间测量能量。也可以通过 MATLAB 等数学软件对波形数据进行计算。在本应用指南中，将使用 WBG-DPT 示波器应用程序内置的测量算法进行计算。

反向恢复测量

除了导通和关断损耗外，了解与二极管反向恢复相关的损耗也很重要。每当二极管从正向偏置（导通）切换到反向偏置（关断）时，反向恢复电流会在短时间内流经二极管。

反向恢复测量在测试设置中的续流二极管上进行。在图 11 中，当低侧二极管在阶段 2 关断时，高侧二极管处于续流状态。随着低侧 MOSFET 再次导通，阶段 3 开始，理想情况下高侧二极管会立即阻止反向电流。然而，实际二极管会短暂导通后才关断。反向恢复电流转化为能量损耗，影响功率转换器的效率。

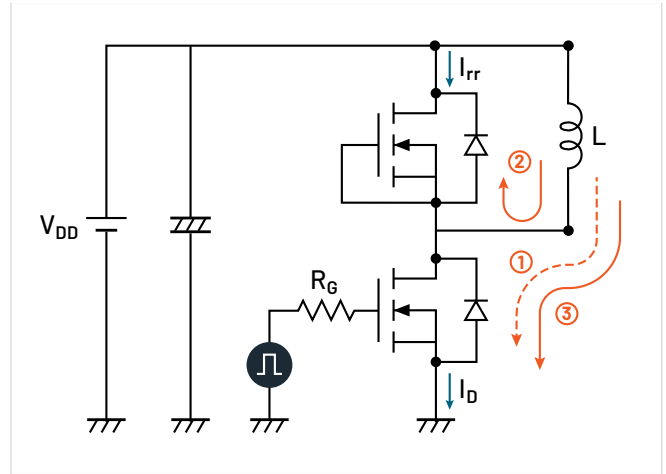


图 11: 二极管反向恢复。当高侧二极管从正向偏置或“续流”（阶段 2）切换到反向偏置（阶段 3）时，短暂的反向电流流过高侧体二极管，增加了低侧漏极电流。

反向恢复参数如图 12 所示，包括 T_{rr} （反向恢复时间）、 I_{rr} （反向恢复电流）、 Q_{rr} （反向恢复电荷）、 E_{rr} （反向恢复能量）、 di/dt 和 V_{sd} （正向导通电压）。

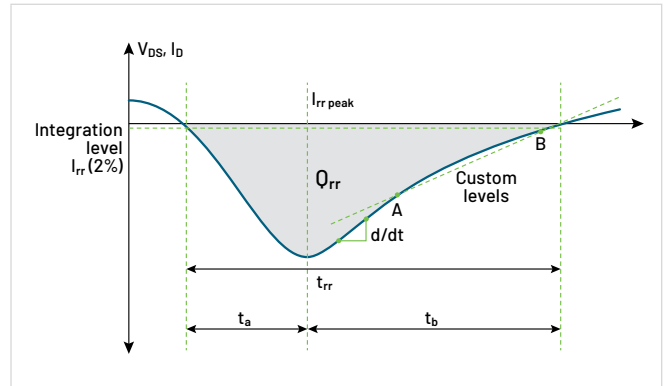


图 12: 二极管反向恢复测量在二极管反向偏置并开始阻断电流时进行。反向恢复测量在二极管电流通过零点的瞬间与上升电流外推再次通过零点的瞬间之间进行。

公式 3 用于计算过渡期间的能量损耗：

$$E_{rr} = \int_0^t V_{SD} I_{rr, max} dt \quad (3)$$

双脉冲测试设置

警告！ 由于功率半导体测试可能涉及致命电压和电流，必须使用带有安全联锁的适当外壳和个人防护装备！

双脉冲测试的仪器配置示例如图 13 所示。一般设置包括：

- **信号源：** 提供栅极驱动信号，通常通过隔离栅极驱动器。每个脉冲的宽度必须独立可调。因此，通常使用任意 / 函数发生器 (AFG)，并且特殊的 DPT 软件对设置激励非常有价值。AFG 可以是独立的仪器 (如 AFG31000 系列)，也可以是内置在示波器中的 (如 4、5 和 6 系列 MSO 上的 AFG)。
- **直流电源：** 提供足够的漏极电压 (V_{DD}) 和漏极电流 (I_D) 进行测试。例如，[EA-PSI 10000](#) 可编程电源 (测试高达 2 kV 和 30 kW)、Keithley [2657A](#) 高压源测量单元 (SMU) (测试高达 3 kV) 或 Keithley [2260B-800-2](#) 可编程直流电源 (测试高达 800 V)。
- **直流电源：** 用于支持栅极驱动 IC 等电子设备。例如 Keithley 2230 或 2280S 系列直流电源。
- **多通道数字示波器：** 用于采集和测量 V_{DS} 、 V_{GS} 和 I_D 。本应用指南描述了使用泰克 5 系列 B MSO 进行测试，但 4 系列 B MSO 和 6 系列 B MSO 操作相同，只是规格不同。



图 13：用于测试 SiC 低侧 FET 的双脉冲测试设置，包括带有双脉冲测试应用程序的 MSO58B 示波器、AFG31252 任意 / 函数发生器、用于 V_{DD} 的 PSB 11500-06 1.5 kW 直流电源，以及用于供电栅极驱动器的 Keithley 2231A-30-3 三通道电源。TICP0100 隔离电流探头通过分流电阻测量漏极电流。TCP0030A 钳式电流探头用于测量电感电流。在此设置中，低侧 FET 的源极接地，允许使用接地参考探头。TPP0850 高压无源探头连接到 V_{DS} ，带有 MHCX 插头的 TPP1000 无源探头连接到 V_{GS} 。

- **示波器必须配备适当的探头：**探头选择对获得有效结果至关重要，将在下一节中介绍。
- **示波器上的双脉冲测试应用软件：**有助于进行可重复的测量。本应用指南描述了使用 4、5 和 6 系列 B MSO 的双脉冲测试软件 Opt. WBG-DPT 进行测试。

4/5/6 系列 MSO 上的双脉冲测试软件

双脉冲测试的相关测量可以使用 4、5 和 6 系列 MSO 示波器的内置功能完成，因为这些示波器包括乘法、微分和积分功能以及可调门控和参考电平。然而，适用于这些仪器的宽禁带双脉冲测试 (WBG-DPT) 应用程序 (图 14) 可以自动化双脉冲测量，无需任何自定义编程。自动化测量可以提供比手动设置和测量更高的可重复性和更快的速度。

本应用指南涵盖了测量背后的数学原理，但在测量示例中将使用自动化 DPT 工具。

与手动测试方法或自定义代码相比，示波器上的软件提供以下优势：

- 即使在有振铃的信号上也能进行可重复的测量。
- 符合 JEDEC 和 IEC 标准或使用自定义参数的测量。
- 能够从 AFG31000 系列任意 / 函数发生器生成双脉冲栅极驱动信号。
- 预设功能以简化示波器设置。
- 独特的延迟校正功能，可在采集后进行，无需特殊夹具。
- 在脉冲之间轻松导航和注释。
- 结果表中汇总的测量数据。
- 通过 / 失败测试，可配置限制和失败时的操作。
- 报告、会话文件和波形以帮助记录结果。

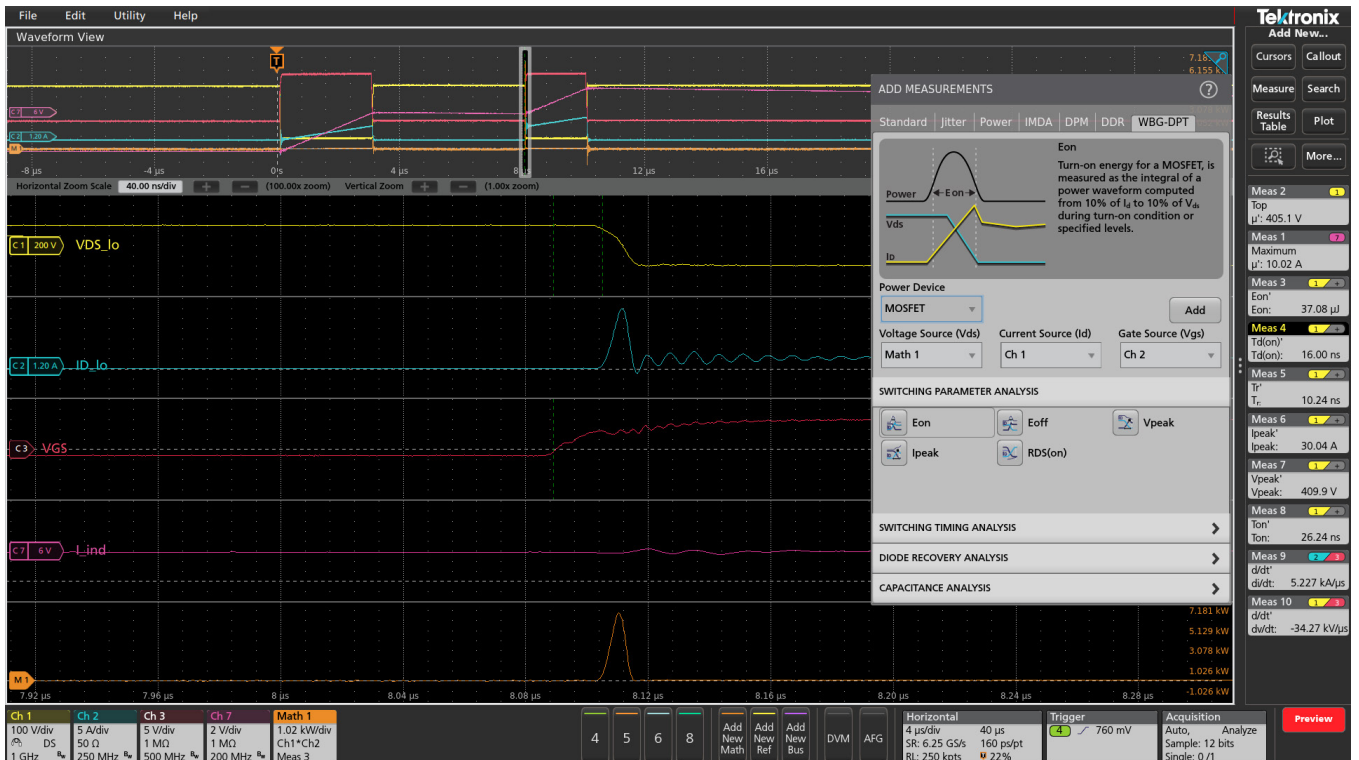


图 14：示波器上的双脉冲测试软件（如 WBG-DPT 宽禁带双脉冲测试应用程序）自动化设置并帮助实现一致的结果。

- 完整的编程接口用于测试自动化。

除了开关损耗、时序和反向恢复外，WBG-DPT 应用程序还支持自动化：

- 死区时间测量。
- 动态 $R_{DS(on)}$ 测量，无需外部钳位。

这些参数可以通过类似于双脉冲测试的设置进行测量，但需要不同的探头和连接方式。

有关 WBG-DPT 应用程序的更多信息，请参阅 [Option 4-WBG-DPT](#)、[5-WBG-DPT](#)、[6-WBG-DPT 应用数据表](#)。

栅极驱动信号源

DPT 需要一个能够提供多个独立可调宽度脉冲的栅极驱动信号源。脉冲可以通过带有自定义软件的微控制器板生成，但现成的信号发生器通常能提供更可预测的性能和对脉冲参数的更精细控制。任意 / 函数发生器 (AFG) 是适用于此应用的性价比高的信号源类别。这可以是独立的发生器，也可以内置在示波器中。例如：

- **AFG31000 系列任意 / 函数发生器：**提供双脉冲测试应用程序，可快速生成具有不同脉冲宽度的脉冲。下一节将描述此功能。AFG31000 系列具有双输出，并且可以作为独立于示波器的通用函数发生器使用。在本应用指南中，AFG31000 通过前面板控制，但它也可以通过 LAN 连接，并通过 4、5 或 6 系列 MSO 上的 WBG-DPT 双脉冲测试应用程序进行控制。**图 15** 显示了通过 LAN 连接的 AFG 的配置菜单。

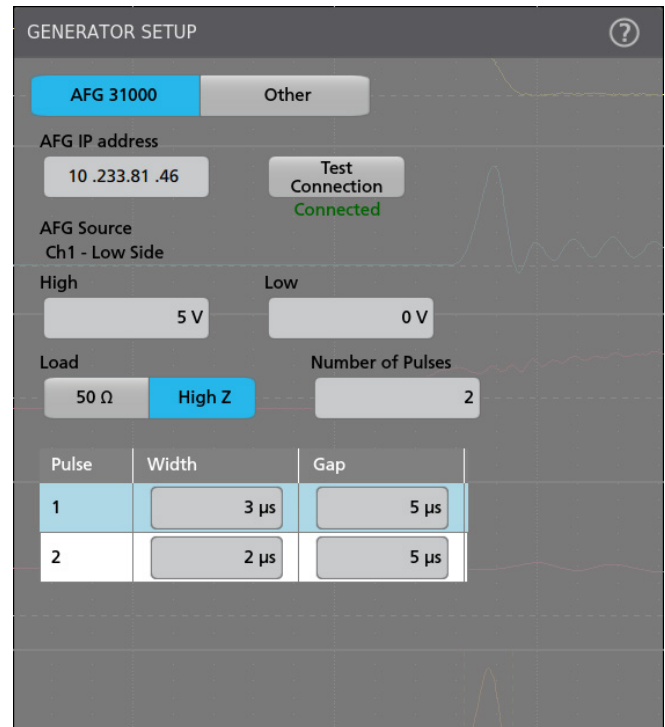


图 15: 除了 AFG31000 的前面板控制外，还可以通过示波器上的 DPT 应用程序使用 LAN 连接控制发生器。

- **4、5 和 6 系列 MSO 示波器：**提供可选的内置 AFG。此 AFG 具有与独立发生器相同的许多功能，但紧密集成到示波器中，共享相同的用户界面。内置 AFG 不能由 DPT 应用软件控制，但可以通过在 5 或 6 系列 MSO 上运行的 Windows 自定义软件进行控制 (参见 [《使用内置任意函数发生器的 5 或 6 系列 MSO 对功率半导体器件进行双脉冲测试》](#))。

在 AFG31000 上生成双脉冲栅极信号

AFG31000 双脉冲测试应用程序可以直接从 tek.com 网站下载并安装到 AFG31000 上。图 16 显示了 AFG31000 主屏幕上安装双脉冲测试应用程序后的图标。

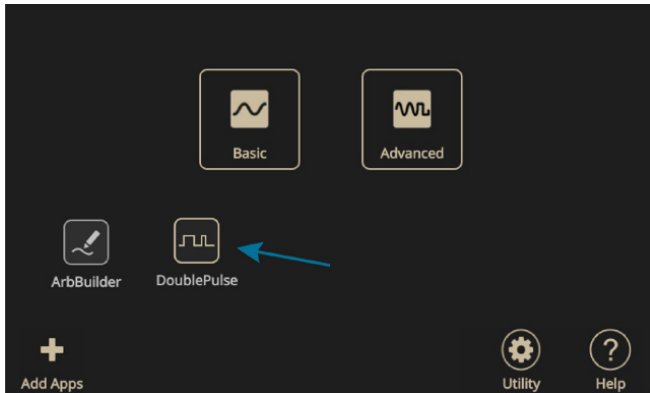


图 16: 安装双脉冲测试应用程序后的 AFG31000 主屏幕。

双脉冲测试应用程序允许用户从发生器前面板创建具有不同脉冲宽度的多个脉冲。该应用程序直观且易于设置。调整第一个脉冲宽度以获得所需的开关电流值。第二个脉冲宽度可以独立调整，通常较短以限制 DUT 中的发热。脉冲之间的时间也可配置。

图 17 显示了双脉冲测试应用程序窗口。用户可以在此设置：

- 脉冲数量：2 至 30 个脉冲。
- 高和低电压幅度 (V)。
- 触发延迟 (s)。
- 触发源 - 手动、外部或定时器。
- 负载 - 50 Ω 或高阻抗。

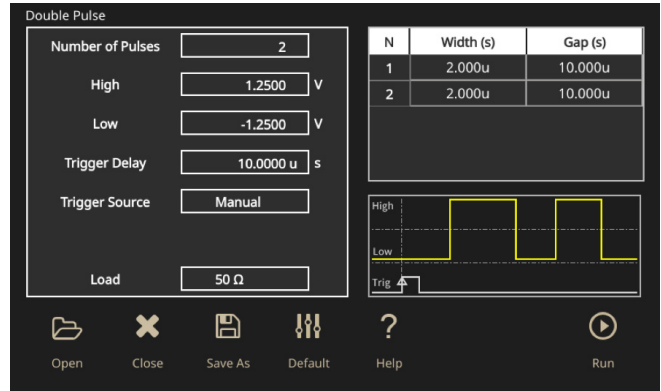


图 17: AFG31000 上的双脉冲测试应用程序可轻松配置具有不同宽度的多个脉冲。

双脉冲测试的示波器探头选择

双脉冲测量的可靠性取决于选择合适的电压和电流探头，以及遵循最佳实践。探头选择的全面讨论超出了本应用指南的范围，但在此提供了一些双脉冲测试中探头选择的高级考虑因素。

首先，探头和附件必须始终具有足够的额定值以处理测试中预期的最大电压或电流。这在功率转换器测量中尤为重要，因为电流和电压水平通常高于一般电子应用。此外，必须额外考虑接地、绝缘和隔离，以避免损坏或伤害。

电压探头

单端无源电压探头比差分探头更简单且成本更低，但它们在功率转换器中的应用有限。这是因为它们的参考线通过示波器连接到地。使用无源探头时，保持接地引线短，并在可能的情况下屏蔽连接。例如，MMCX 连接器提供高带宽和屏蔽。

差分电压探头在功率应用中更通用，因为它们不直接连接到地。它们设计用于进行浮动测量。具有适当电压额定值的差分探头通常用于测量漏源电压。

需要注意的是，传统差分探头在共模抑制方面存在限制。这可能会影响高侧栅极测量 (V_{GS})，其中相对较小的电压“叠加”在高共模信号上。在进行高侧 V_{GS} 测量时，推荐使用隔离电压探头，因为它们大大减少了测量中的共模噪声。

电流探头

钳式交流 / 直流示波器电流探头结合了霍尔效应传感器和线圈，常用于测量功率转换器电路。无源电流互感器 (CT) 也可用于测量，但无法测量直流。高质量交流 / 直流探头和仅交流 CT 的带宽约为 100 MHz，必须注意其插入电感。这种电感是线圈设计固有的，会影响被测

电路，尤其是那些在 SiC 和 GaN FET 中出现的快速上升时间信号。

罗氏电流钳因其灵活性和宽电流范围而方便。然而，它们无法测量直流，带宽限制在几十兆赫兹，因此在 DPT 中的应用有限。

为了实现双脉冲测试宽禁带器件所需的高带宽和低插入电感，设计人员通常使用分流电阻或电流检测电阻 (CVR)。与通用差分探头不同，分流探头 (如泰克 TICP IsoVu™ 隔离电流探头) 是专门设计用于测量分流电阻上低电平信号的特殊电压探头。

表 1: 用于测量宽禁带器件 DPT 测试电路中漏极电流的电流测量方法调查。

型号	类型	侧	最大电流	带宽	上升时间	备注
TCP0030A	钳式交流 / 直流	低侧、高侧	50A (峰值) 30A (有效值)	120 MHz	<2.92 ns	• 由于带宽有限，可能不是 WBG 器件的最佳选择。
同轴分流器	CVR	低侧、高侧	100+ 安培	2000 MHz	0.18 ns	• 由于其更高的带宽和准确性，是 WBG 器件电流测量的最受欢迎选择。
电流监视器	CT	低侧	100A (峰值) 2.5A (有效值)	200 MHz	2 ns	• 提供电流隔离。
电流监视器	CT	低侧	5 kA (峰值) 50A (有效值)	20 MHz	20 ns	• 在功率回路中引入额外的寄生电感。
电流互感器	CT	低侧	10 kA (峰值) 35A (有效值)	50 MHz	7 ns	• 由于带宽和准确性有限，罗氏线圈不适用于 WBG 器件。
CWT	罗氏线圈	低侧	300A (峰值)	15 MHz	25 ns	• 向回路中添加插入电感。

探头连接

本节介绍开关测量的探头建议和连接方式。常见的 DPT 方法是测量低侧开关的开关损耗。尽管一些设计人员在测试期间会仔细驱动高侧和低侧开关，但通常的简化方法是通过将栅极短路到源极来强制高侧开关关闭。如图 18 所示。

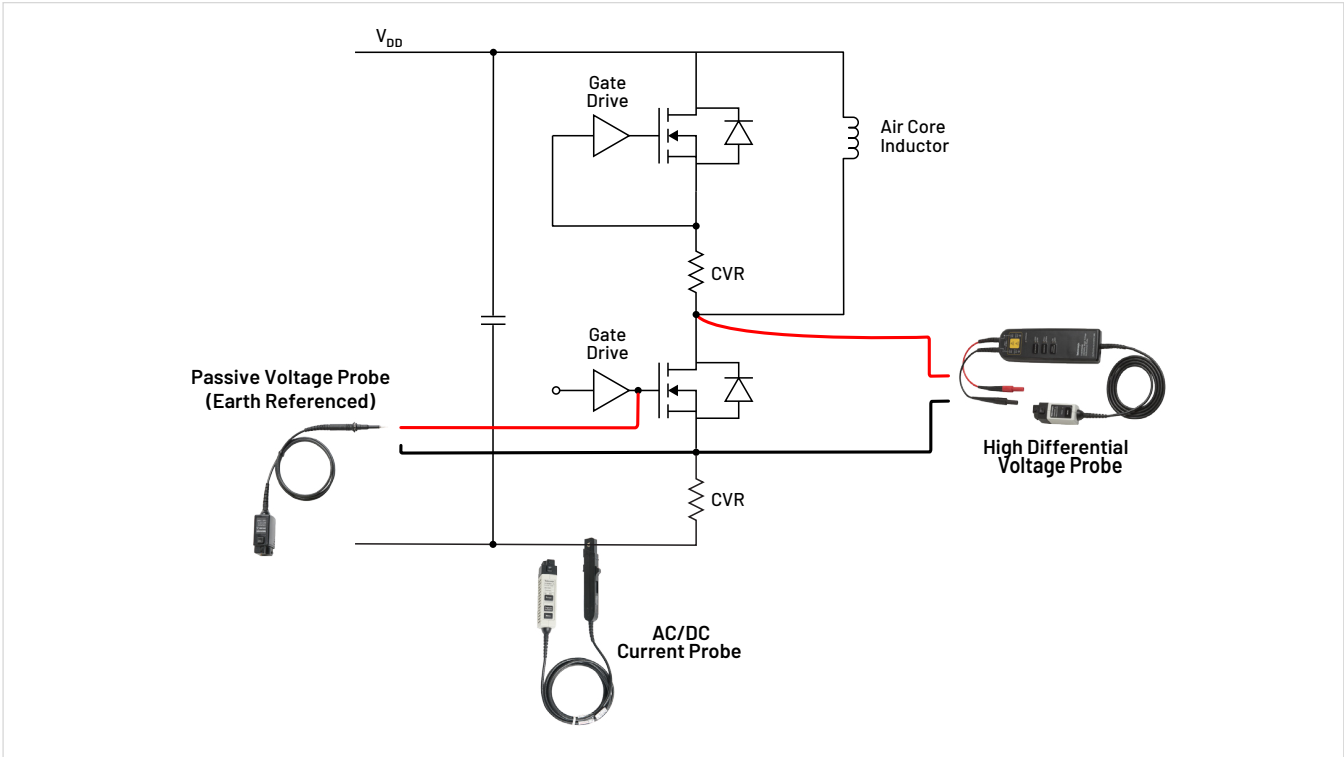


图 18: 低侧开关测量的探头连接。电流也可以通过 CVR 上的电压降测量（如果可用）。

对于图 18 所示的低侧器件开关测试，以下探头配置是大多数应用的理想起点：

- V_{GS-L0} : [TPP 系列](#) 10X 无源探头是一种有效的解决方案，并随 4、5 和 6 系列 MSO 提供。在这种情况下，FET 的源极通过示波器接地。在栅极上安装 MMCX 连接器可以创建一个高带宽测试点，TPP1000 探头可选配 MMCX 插头。
- V_{DS-L0} : 如果低侧源节点可以接地，[高压无源探头](#)是一个很好的解决方案。TPP0850 是一款 50X 衰减探头，适用于 1000 VRMS CAT II 应用。如果源节点不能接地，推荐使用 [THDP/TMDP 系列差分电压探头](#)。
- I_{D-L0} : [TCP 系列](#) 电流探头。如果插入电感是一个问题且需要高于 120 MHz 的带宽，则推荐使用 [TICP 系列 IsoVu 隔离电流探头](#)以及高性能分流电阻或 CVR。

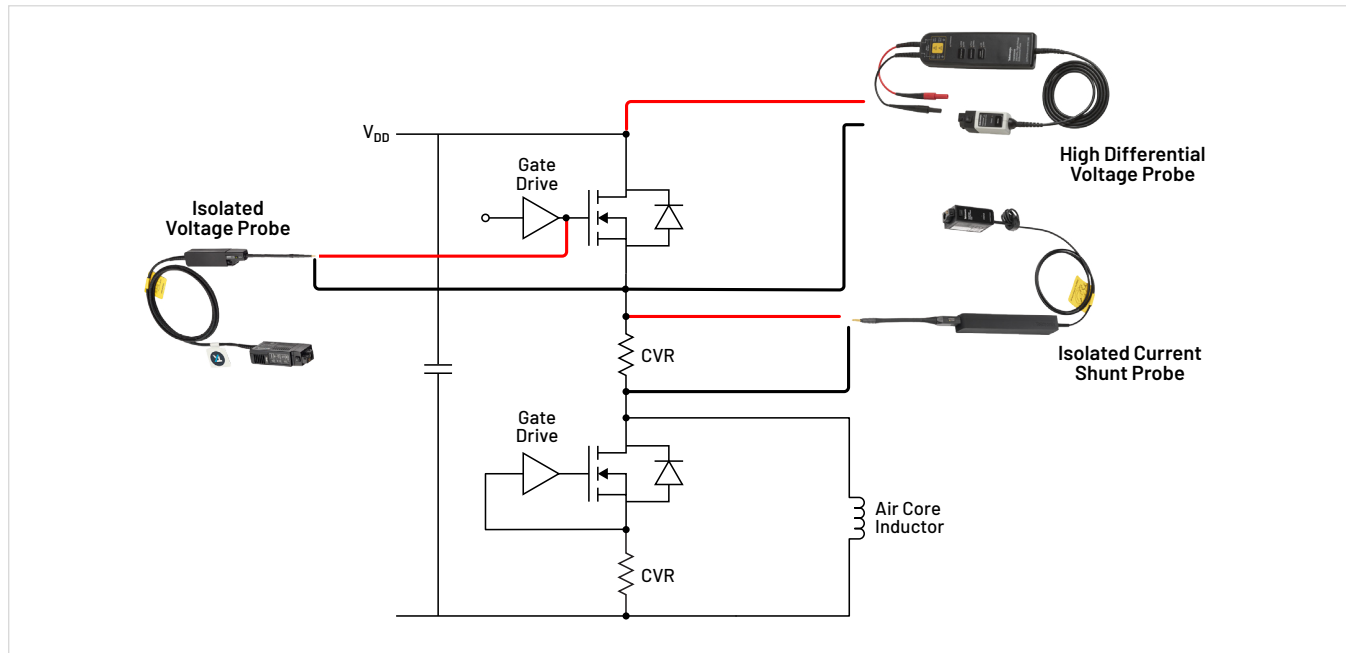


图 19：高侧开关测量的探头连接。

对于高侧 FET 的开关损耗测试 (如图 19 所示), 低侧 FET 被强制关闭, 高侧 FET 被驱动。以下探头是进行测量的理想起点:

- V_{GS-Hi} : [TIVP IsoVu 隔离电压探头](#)。
- V_{DS-Hi} : [THDP/TMDP 系列差分电压探头](#)。
- I_{D-Hi} : 推荐使用 [TICP 系列 IsoVu 隔离电流探头](#) 以及高性能分流电阻或 CVR。

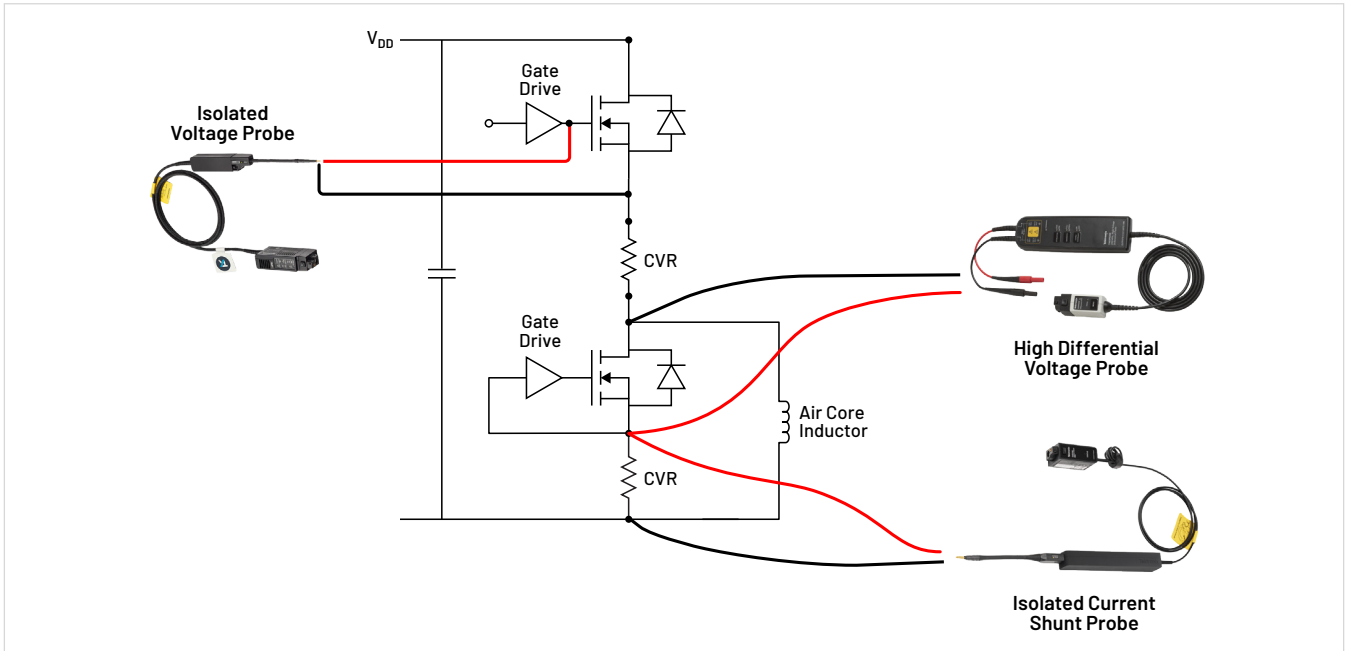


图 20：测量低侧二极管反向恢复参数的探头配置。在此设置中，负载电感位于低侧，高侧 FET 被驱动。

图 20 显示了测试低侧二极管反向恢复参数的探头配置示例。此示例中的探头包括：

- V_{GS-HI} ：TIVP IsoVu 隔离电压探头。
- V_{SD-Lo} ：THDP/TMDP 系列差分电压探头。在图 20 中，探头正向连接在体二极管上。
- I_{D-Lo} ：推荐使用 TICP 系列 IsoVu 隔离电流探头以及高性能分流电阻或 CVR。如果可访问，也可以使用 TCP 系列钳式电流探头。

双脉冲测试测量示例

本节将配置、执行并解释实际测量。通过一个示例设置，将在低侧开关上测量开关损耗和时序，并将测试电路重新配置以测量低侧二极管的反向恢复损耗。SiC FET 的测试将在 400 VDC 下进行。

示例测试设置

在本案例研究中，测量是在 Wolfspeed SpeedVal Kit™ 半桥母板和 SpeedVal Kit TOLL 功率子卡上进行的 [13]。子卡包括两个 850 V SiC MOSFET，采用半桥配置。设置使用 1 mH 空心负载，低侧 FET 的源极通过分流电阻接地。测试设置如图 21 所示，配置为低侧开关测量。

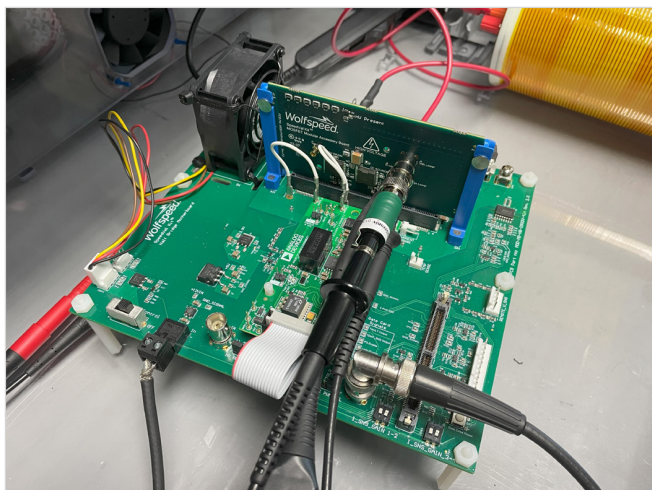


图 21: 配置用于低侧 FET 双脉冲测试的 Wolfspeed SpeedVal Kit，包括示波器探头、电源连接和负载电感。

示例中使用的仪器包括：

- 泰克 AFG31252 任意 / 函数发生器，带有双脉冲测试应用程序
- Elektro-Automatik PSB 11500-06 1.5 kW 直流电源，用于提供 V_{DD}

- Keithley 2231A-30-3 三输出直流电源 (最大 3 A, 30 V)，用于供电栅极驱动器和其他低压电子设备
- 泰克 5 系列 BMSO 示波器 (也可使用 4 或 6 系列 BMSO)，带有 WBG-DPT 双脉冲测试应用软件和以下探头：
 - TPP1000 300 V, 1 GHz 接地参考探头，用于低侧 V_{GS}
 - TIVP12.5 kV, 1 GHz IsoVu 隔离电压探头，用于高侧 V_{GS}
 - TPP0850 1000 V, 800 MHz 高压接地参考探头，用于低侧 V_{DS} 测量
 - TMPD0200 750 V, 200 MHz 高压差分探头，用于高侧 V_{DS} 测量
 - TICP0100 1 GHz IsoVu 隔离电流探头，用于通过分流器测量漏极电流
 - TCP0030A 30 A, 120 MHz 钳式电流探头，用于测量负载电感电流

配置栅极驱动信号

双脉冲激励在 AFG31000 上设置，如图 22 所示。

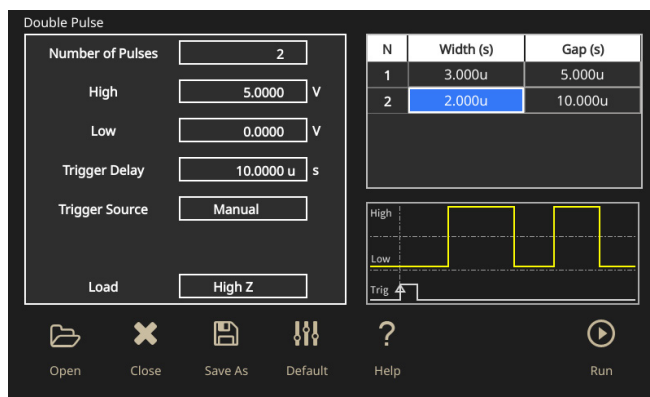


图 22: AFG31000 上的双脉冲测试设置。

脉冲幅度设置为 5 V，负载为高阻抗。第一个脉冲宽度设置为 3 μ s，间隔为 5 μ s，第二个脉冲宽度设置为 2 μ s。触发设置为手动。

低侧开关测量的探头配置

在进行任何连接之前，务必确保电路已断电！

首先进行的是低侧开关测量。对于这些测量，示波器探头连接如图 23 所示。此外，AFG 的信号被路由到通道 4 以进行触发。

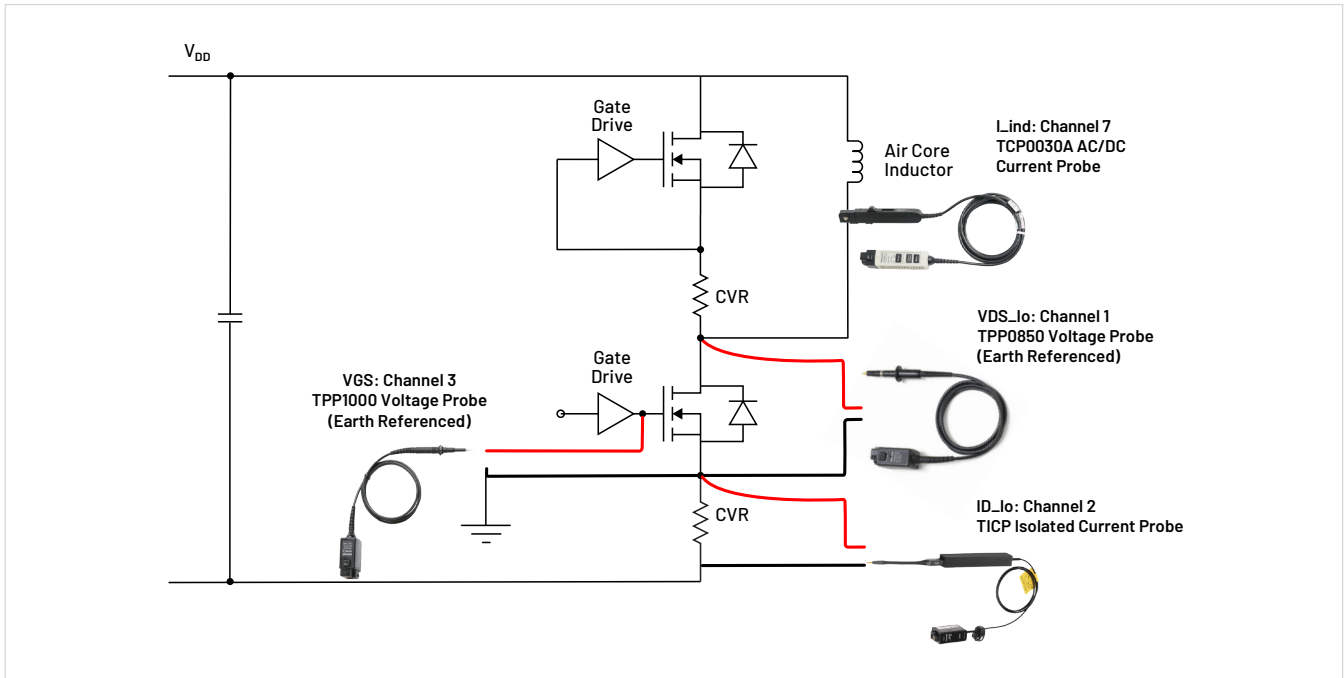


图 23：低侧开关参数测量的探头连接。

电压和电流信号的延迟校正

为了进行准确的功率测量，必须校正电流和电压探头之间的不同延迟，尤其是 V_{DS} 和 I_D 之间的延迟。探头之间的任何延迟都会在功率和能量测量中引入误差。在传统的测试流程中，必须在连接到 DUT 之前进行电压和电流探头的延迟校正。然而，这种方法在高功率设置中可能较为困难，因为它需要使用特殊夹具和 / 或用电阻负载替换负载电感。

然而，在 WBG-DPT 应用软件中，测量系统的延迟是作为采集后操作进行的，不需要任何特殊夹具或信号源 [12]。WBG-DPT 应用程序中内置的 WBG 延迟校正功能(图 24) 计算并校正 V_{DS} 和 I_D 或 V_{CE} 和 I_C 之间的延迟（当功率器件是 MOSFET 或 IGBT 时）。然后将延迟值应用于 V_{DS} 或 V_{CE} 信号，以使其与漏极或发射极电流对齐。

对于以下测量，通过以下步骤进行探头的延迟校正：

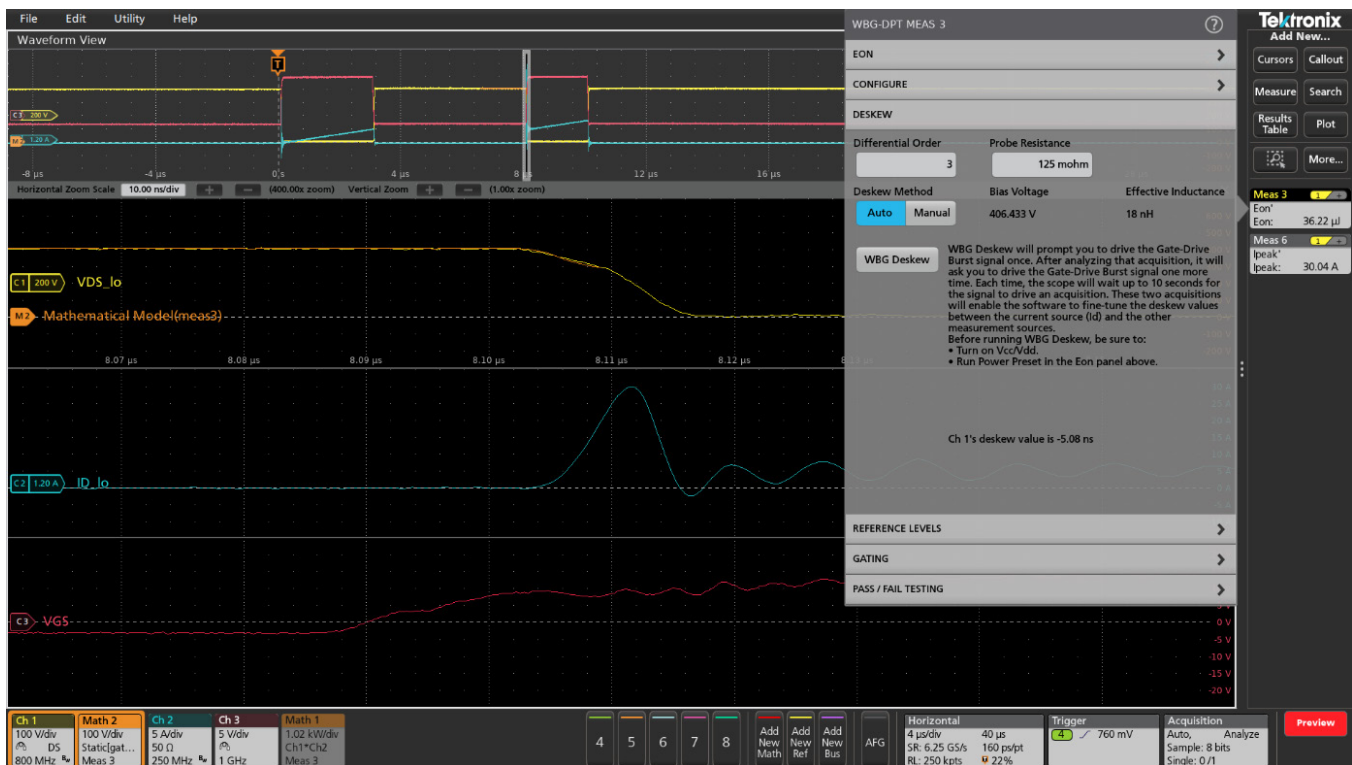


图 24：使用 WBG-DPT 应用程序，可以在双脉冲测试设置中使用测量波形进行延迟校正。用户指定分流电阻的值（本例中为 125 mΩ）。点击 WBG 延迟校正按钮会自动计算延迟校正并对齐 V_{DS} 和 I_D 波形。

测量低侧开关时序和能量损耗

开关时序测量可以使用光标进行，但必须精确放置光标并将其分配到正确的通道，因为行业标准测量是在 V_{GS} 和 V_{DS} 的边沿之间进行的（见图 8）。在本示例中，将通过示波器上的 WBG-DPT 应用程序定义测量，以简化通道分配和参考电平设置。

同样，开关过程中的能量损耗可以通过通道数学功能将电压和电流相乘生成功率波形，并使用面积测量（积分）来确定能量。为了简化此过程，WBG-DPT 应用程序在“开关参数分析”组中提供了 E_{on} 和 E_{off} 测量。此测量执行必要的数学运算并快速显示结果。

使用 WBG-DPT 应用程序进行开关损耗测量

与 4、5 和 6 系列 MSO 上的所有测量一样，WBG-DPT 应用程序控件通过触摸屏右上角的“Measure”按钮访问。在本示例中，功率器件类型设置为 MOSFET。 V_{DS} 、 I_D 和 V_{GS} 源分别设置为通道 1、2 和 3，如图 25 所示。

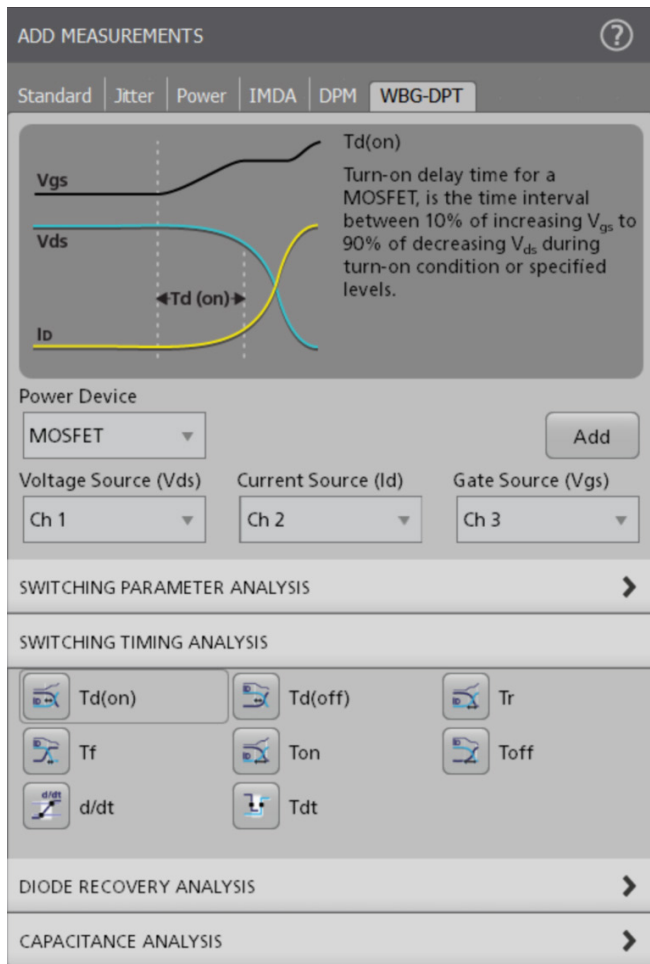


图 25: WBG-DPT 应用程序中的开关时序分析测量。

测量关断参数

为了测量关断特性，选择了以下测量：

- V_{DS} 上的“Top”幅度测量（用于监控）
- 电感器的最大电流（用于监控）
- 关断延迟 $T_d(\text{off})$
- 下降时间 T_f
- 峰值 V_{DS}/V_{peak}
- 关断时间 T_{off}
- 电流变化率 di/dt
- 电压变化率 dv/dt
- 输出电荷 Q_{oss}

每个测量可以单独配置，如图 26 和 27 所示的关断能量测量 (E_{off}) 示例。

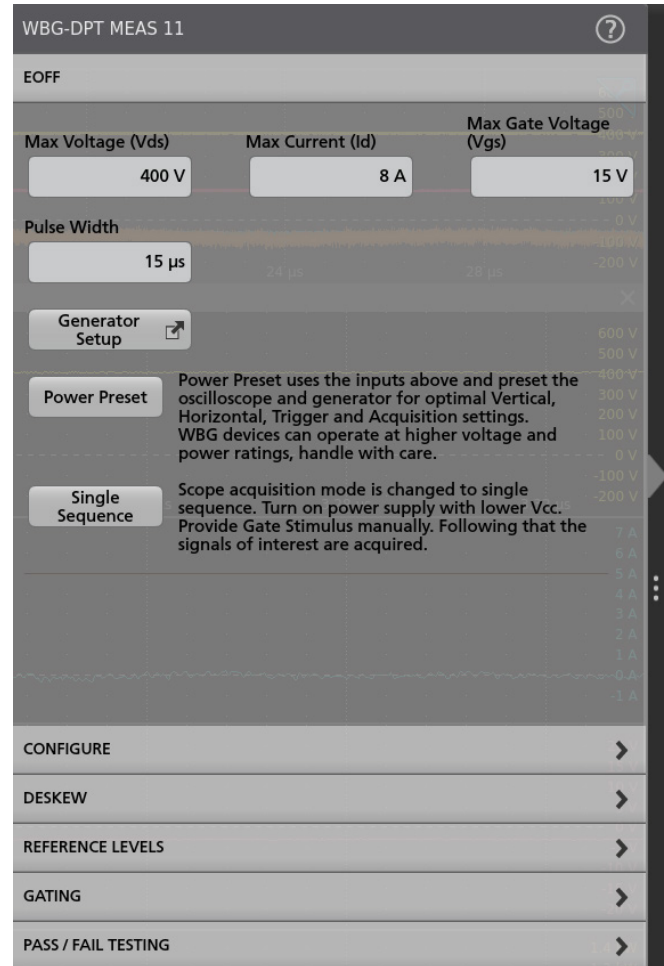


图 26: Eoff 的测量设置示例。最大值和脉冲宽度值用于“Power Preset”功能，以自动配置垂直和水平比例。

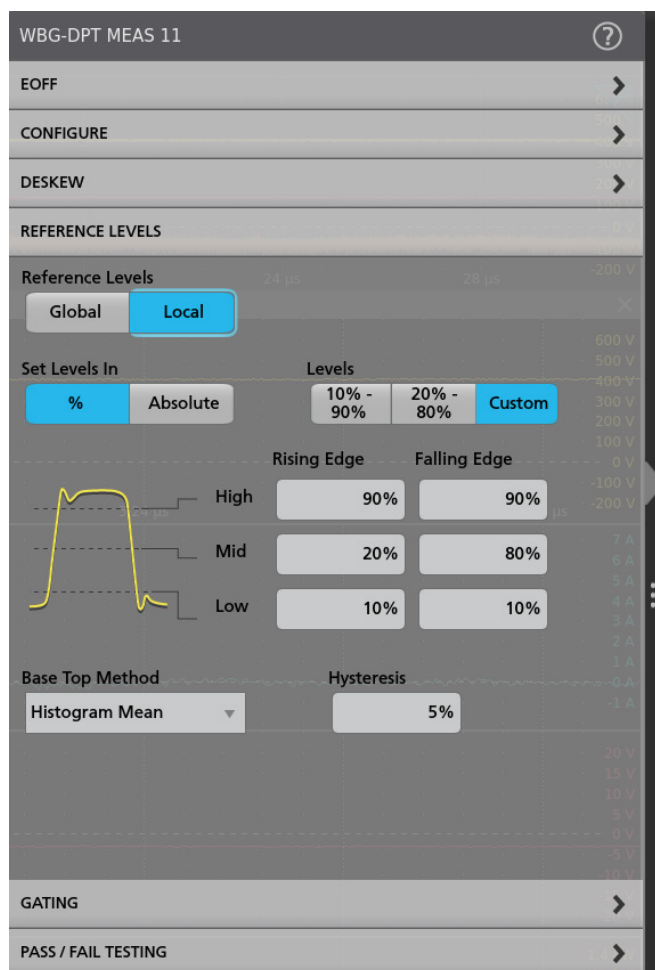


图 27: DPT 软件支持标准和自定义参考电平。电平可以应用于所有测量(全局)或单个测量(局部)。滞后带通过在参考电平上设置一个范围来过滤掉杂散事件。

WBG-DPT 应用软件默认为图 27 所示的行业标准 10% 和 90% 阈值。它还支持自定义阈值设置。本示例中使用默认电平。

在仔细检查连接和电源设置并密封安全外壳后，系统开始上电：

- 首先，通过激活低压电源为栅极驱动电子设备供电。
- 通过激活高压电源为 V_{DD} 供电。**此时电路高压已存在！**
- 示波器准备采集。
- 触发 AFG31000 生成栅极驱动脉冲。
- 关闭 V_{DD} 的高压电源。
- 将栅极驱动器的低压电源置于待机状态。

采集到的波形如图 28 所示，测量结果显示在示波器上。数据和设置存储为“session”以记录测量结果。图 28 显示了第一个 V_{GS} 脉冲结束时关断事件的细节，此时 I_D 已升至目标值。



图 28: 关断参数和波形。

配置了第二组测量以记录导通事件。图 29 显示了第二个 V_{GS} 脉冲开始时导通事件的细节。

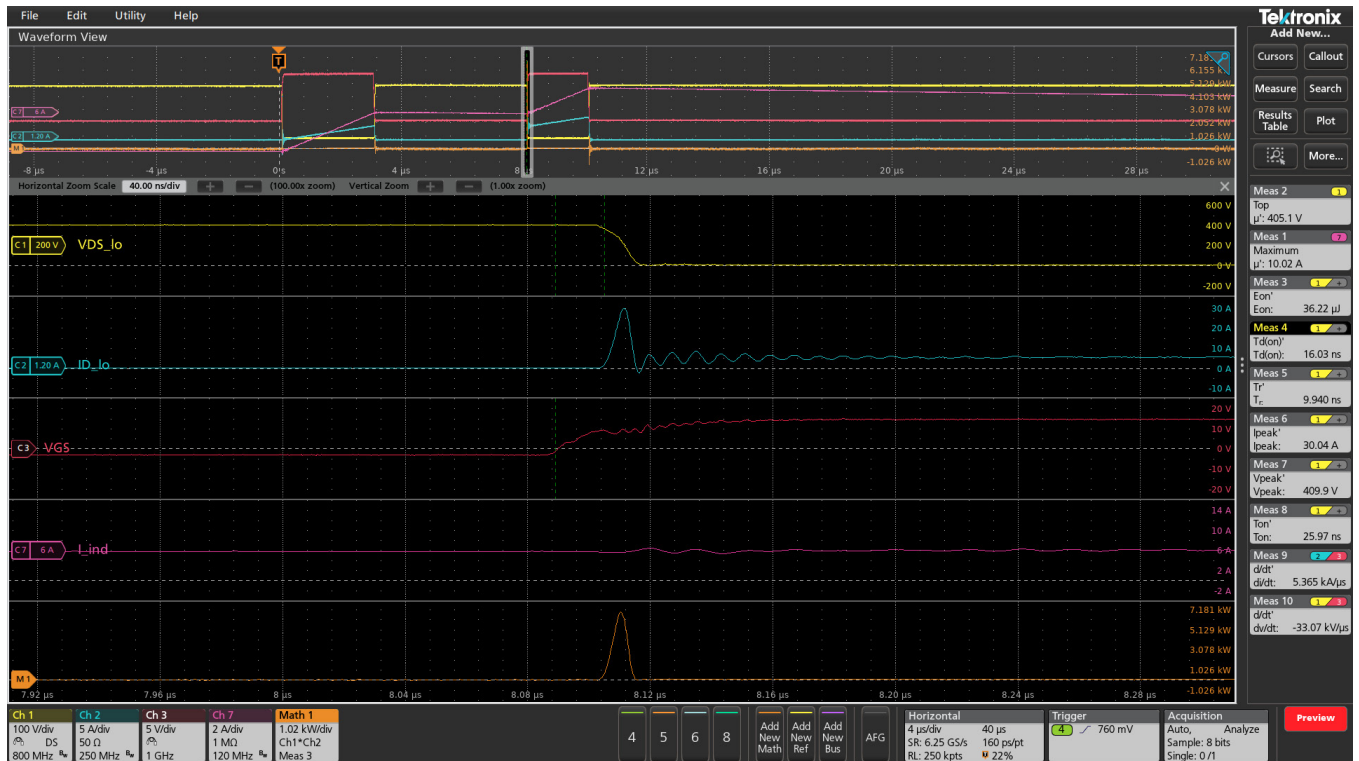


图 29：导通参数和波形。

测量反向恢复

续流二极管的反向恢复特性可以在低侧或高侧器件上测量。在本示例中，测量了低侧二极管，因为被测器件通过屏蔽的高带宽 MMCX 连接器提供了对低侧源极分流器的便捷访问。为了测量低侧二极管，负载电感必须连接在低侧开关上，并驱动高侧 FET。低侧二极管表现为续流二极管，在高侧 FET 关闭时传导电感电流。当高侧 FET 再次导通且低侧二极管反向偏置时，会短暂流过反向恢复电流。

在 WBG-DPT 应用程序的“二极管反向恢复”组中设置了以下测量：

- 峰值 V_{DS}
- 最大电感电流
- 反向恢复时间 T_{rr}
- 最小反向恢复电流 I_{rrm}
- 反向恢复电荷 Q_{rr}
- 反向恢复能量 E_{rr}

探头连接如图 30 所示。注意，通道 1 上的电压探头正向连接在低侧二极管上 (V_{SD} 而非 V_{DS})。波形和捕获的测量结果如图 31 所示。

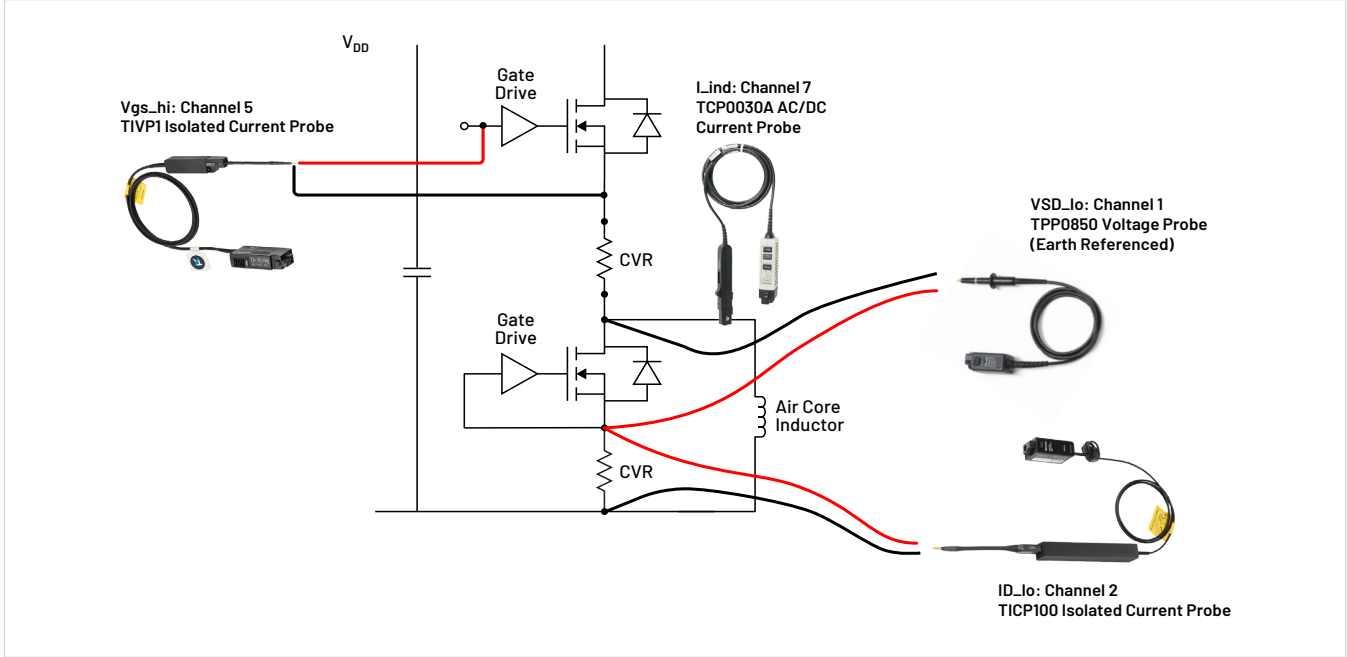


图 30: 反向恢复测量的探头连接示例。注意高压测量是从源极到漏极。

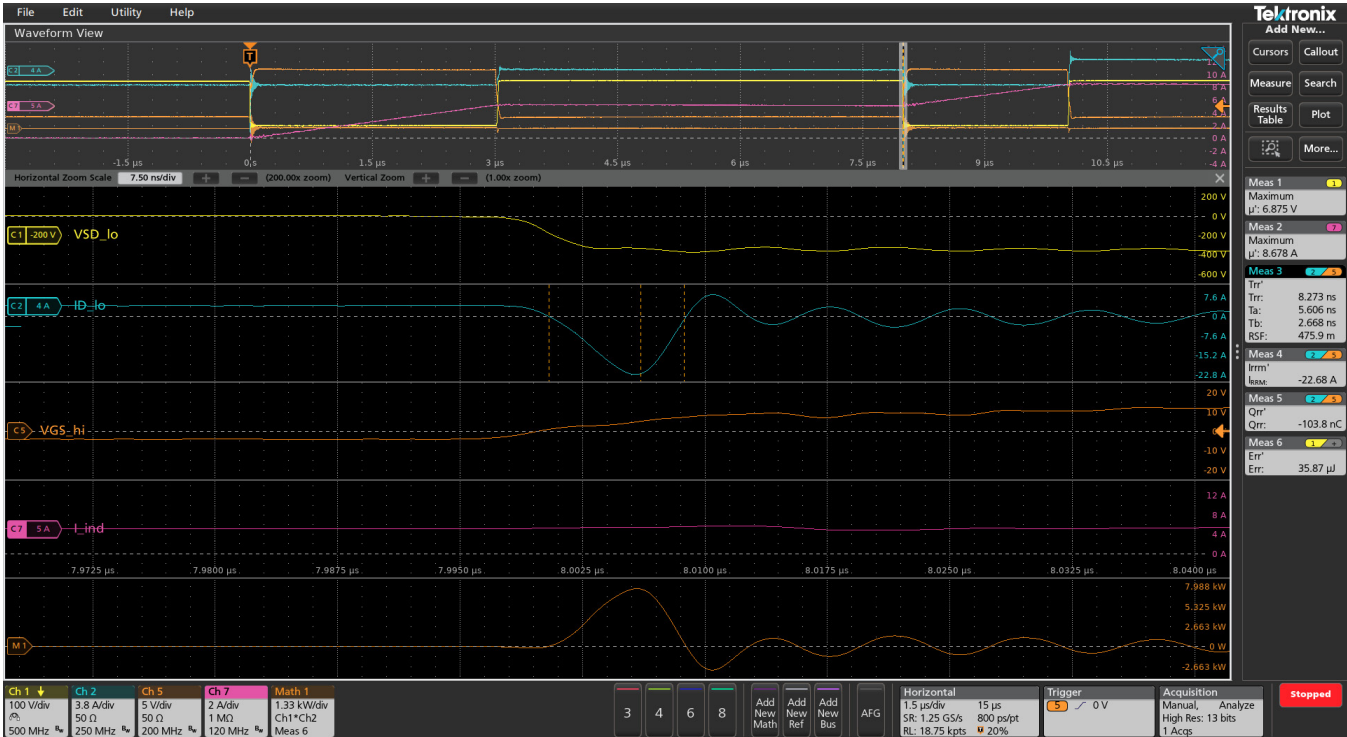


图 31: 反向恢复波形和测量结果。

WBG-DPT 应用程序还允许在多个脉冲上采集多个 T_{rr} 测量值。这些测量可以以重叠图显示，以观察多个脉冲上 t_{rr} 的变化。

结论

双脉冲测试是在受控结温下测量功率器件开关参数的首选方法。本应用指南介绍了如何应用仪器、探头和应用软件以获得高质量、可重复的结果。

泰克科技提供广泛的仪器、探头和软件以满足双脉冲测试应用的需求。

Elektro-Automatik 和 Keithley 电源提供精确、可靠的电源，同时节省空间。

AFG31000 及其双脉冲测试应用程序设置快速简便，使工程师能够专注于数据采集。

4、5 或 6 系列 B MSO 上的 WBG-DPT 双脉冲应用程序完全集成到示波器测量系统中，通过广泛的测量、控制任意函数发生器的能力以及创新的延迟校正方法，自动化测试。它默认使用行业标准测量，但也可以自定义。

最后，一系列示波器探头（如低噪声隔离电压和电流探头）将高保真信号传输到示波器。

如本应用指南所述，这些元素可以组合使用，大大缩短测试时间，并帮助下一代功率转换器设计人员更快地将产品推向市场。

参考文献

1. <https://www.tek.com/document/technical-brief/evolving-materials-and-testing-emerging-generations-power-electronics>
2. <https://www.tek.com/document/application-note/measuring-power-supply-switching-loss-oscilloscope>
3. “Test Method for Continuous-Switching Evaluation of Gallium Nitride Power Conversion Devices”, JEDEC Standard JEP182, Version 1.0, January 2021
4. Infineon: Double Pulse Test for IGBT & FWD – Principle <https://u.dianyuan.com/upload/space/2011/07/29/1311925659-501009.pdf>
5. <https://training.ti.com/understanding-mosfet-datasheets-switching-parameters>
6. <https://www.mouser.com/datasheet/2/389/stfh10n60m2-974335.pdf>
7. https://www.st.com/resource/en/data_brief/eval6498l.pdf
8. <https://www.tek.com/datasheet/advanced-power-measurement-and-analysis>
9. <https://www.tek.com/document/application-note/measuring-vqs-wide-bandgap-semiconductors>
10. <https://www.tek.com/en/how-to/double-pulse-testing—energy-loss-measurements>
11. <https://www.tek.com/en/products/reference-solutions/wide-bandgap-double-pulse>
12. <https://www.tek.com/en/blog/a-new-software-deskew-approach-accelerates-double-pulse-testing>
13. <https://www.wolfspeed.com/products/power/evaluation-kits/speedval-kit-modular-evaluation-platform/>



扫码关注泰克公众微信号

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：tek.com.cn

泰克中国客户服务中心全国热线：400-820-5835

服务时间：9:00am-5:00pm，周一至周五

Tektronix (China) Co., Ltd.
泰克科技 (中国) 有限公司
泰克中国客户服务中心
免费热线：400-820-5835

Beijing Branch
泰克科技 (中国) 有限公司
北京分公司
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
E-mail: china.mktg@tektronix.com

Shanghai Branch
泰克科技 (中国) 有限公司
上海分公司
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
E-mail: china.mktg@tektronix.com

Shenzhen Branch
泰克科技 (中国) 有限公司
深圳分公司
广东省深圳市深南东路 5002 号
信兴广场地王商业大厦 3001-3002 室
邮编：518008
电话：(86 755) 8246 0909
E-mail: china.mktg@tektronix.com

Chengdu Branch
泰克科技 (中国) 有限公司
成都分公司
四川省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) 8620 3028
E-mail: china.mktg@tektronix.com

Wuhan Branch
泰克科技 (中国) 有限公司
武汉分公司
湖北武汉市洪山区文化大道 555 号
融创智谷二期 B1 栋 7 层 05 室
邮编：430072
E-mail: china.mktg@tektronix.com

更多宝贵资源，请访问 TEK.COM.CN

版权所有 © 泰克科技。保留所有权利。泰克产品受美国及外国专利保护，包括已授权和待授权专利。本出版物中的信息取代之前所有发布材料中的信息。保留规格和价格变更的权利。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克公司的注册商标。所有其他贸易名称均为其各自公司的服务标志、商标或注册商标。

040725 75C-61623-4

