



# 功率半导体双脉冲 测试分析

操作指南



## 引言

在汽车和工业应用中，由于硅基半导体性能的局限性，功率电子中使用的半导体材料正逐渐从硅过渡到如碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 这类宽禁带半导体。GaN 和 SiC 支持更小、更快、更高效的设计。规制和经济压力持续促使高压功率电子设计的效率提高。在空间受限和 / 或移动应用 (例如电动汽车) 中，更小、更轻的设计的功率密度优势尤为明显，而从系统成本降低的角度来看，更紧凑的功率电子设备也普遍受到青睐。同时，随着政府推出财政激励措施和更严格的能效规定，效率的重

要性日益增长。例如，欧盟的 Eco-design 指令、美国能源部 2016 年效率标准、中国质量认证中心 (CQC) 标志等全球实体发布的指南，都在管理电气产品和设备的能效要求。从电力生成到消耗的各个阶段，功率电子都需要实现更高的能效，如图 1 所示。功率转换器在生成、传输和消耗链的多个阶段运作，由于这些操作没有一个是 100% 高效的，因此每一步都会有一些功率损失。主要由于热能损失，这些效率的整体下降在整个周期中不断加剧。

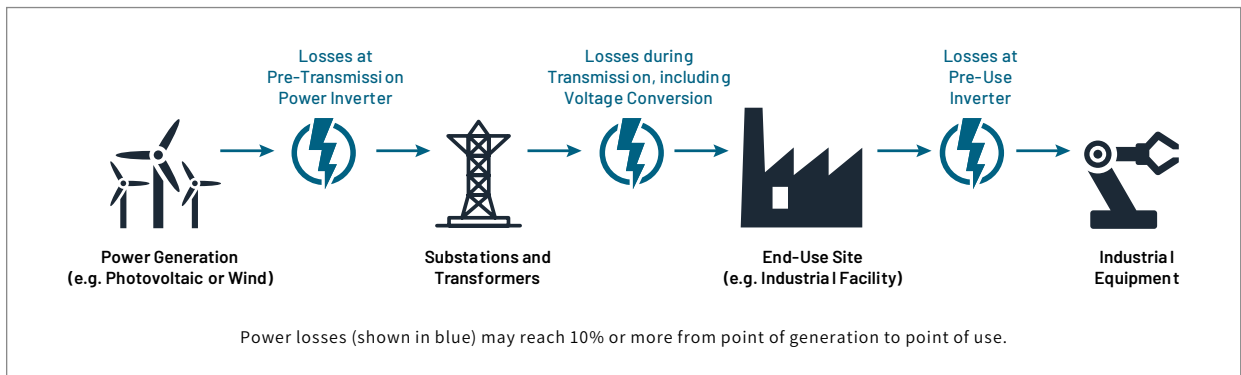


图 1: 在生成、传输和消耗阶段的功率损失 [1]。

设计功率转换器时，理想状态下的功率损失为 0%，如图 2 所示。

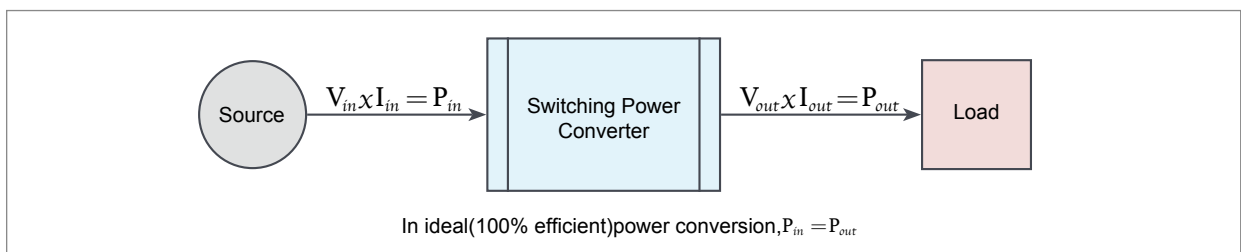


图 2: 理想的功率转换效率 [1]。

然而，开关损耗是不可避免的。因此，目标是通过设计优化来最小化损失。与效率相关的设计参数必须经过严格的测量。

典型的转换器效率约为 87% 到 90%，这意味着 10% 到 13% 的输入功率在转换器内部消耗掉，大部分以废热的形式。这种损失的一大部分发生在开关设备如 MOSFET 或 IGBT 上。[2]

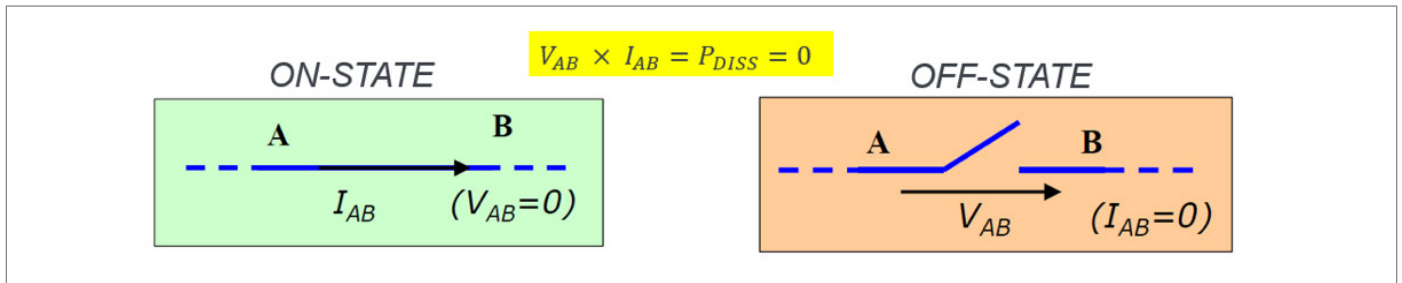


图 3: 理想的开关。

理想情况下，开关设备只有“开”或“关”两种状态，如图 3 所示，并能瞬间在这两种状态间切换。在“开”状态时，开关的阻抗为零欧姆，无论通过开关的电流有多大，都不会在开关中耗散任何功率。在“关”状态时，开关的阻抗为无限大，无电流流过，因此不耗散任何功率。

然而，实际上在“开”到“关”（关断）和“关”到“开”（开通）的转换过程中会耗散功率。这些非理想行为是由于电路中的寄生元件造成的。如图 4 所示，门极上的寄生电容会减缓器件的切换速度，延长开通和关断时间。MOSFET 的漏极和源极之间的寄生电阻在漏电流流动时会耗散功率。

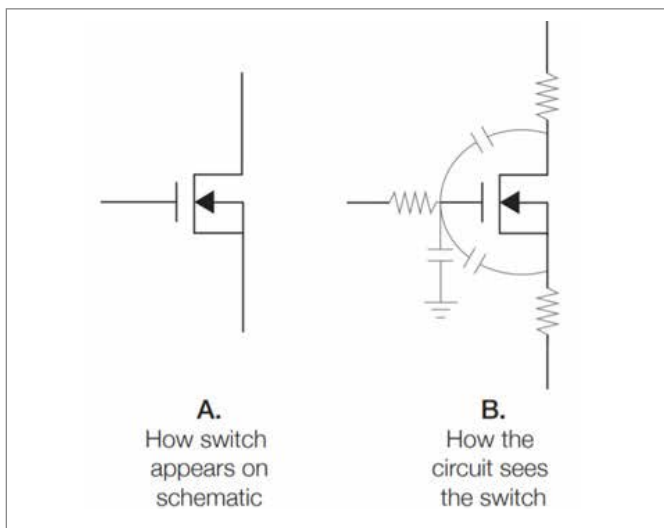


图 4: A: MOSFET 在原理图上的外观。B: 电路如何看待 MOSFET。

还需要考虑 MOSFET 体二极管的反向恢复损失。二极管的反向恢复时间是衡量二极管切换速度的一个指标，因此会影响转换器设计中的切换损失。

因此，设计工程师需要测量所有这些时间参数，以尽量减少切换损失，从而设计出更高效的转换器。

首选的测试方法来测量 MOSFET 或 IGBT 的切换参数是“双脉冲测试”方法。本应用说明将描述双脉冲测试及其实施方式。具体来说，本应用说明将解释如何使用 Tektronix AFG31000 任意函数发生器生成脉冲，并使用 4、5 或 6 系列 MSO 示波器测量重要参数。

## 什么是双脉冲测试？

双脉冲测试是一种测量功率设备的切换参数和评估动态行为的方法。使用这种应用的用户通常希望测量以下切换参数：

- **开通参数:** 开通延迟 ( $t_{d(on)}$ )、上升时间 ( $t_r$ )、开通时间 ( $t_{on}$ )、开通能量 ( $E_{on}$ )、电压变化率 ( $dv/dt$ ) 和电流变化率 ( $di/dt$ )。然后确定能量损失。
- **关断参数:** 关断延迟 ( $t_{d(off)}$ )、下降时间 ( $t_f$ )、关断时间 ( $t_{off}$ )、关断能量 ( $E_{off}$ )、电压变化率 ( $dv/dt$ ) 和电流变化率 ( $di/dt$ )。然后确定能量损失。
- **反向恢复参数:** 反向恢复时间 ( $t_{rr}$ )、反向恢复电流 ( $I_{rr}$ )、反向恢复电荷 ( $Q_{rr}$ )、反向恢复能量 ( $E_{rr}$ )、电流变化率 ( $di/dt$ ) 和正向导通电压 ( $V_{sd}$ )。

此测试的执行目的是：

- 保证像 MOSFET 和 IGBT 这类功率设备的规格。
- 确认功率设备或功率模块的实际值或偏差。
- 在各种负载条件下测量这些切换参数，并验证多个设备的性能。

图 5 展示了一个典型的双脉冲测试电路。

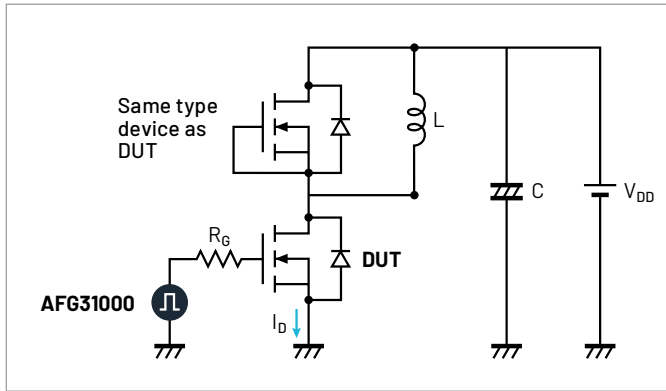


图 5: 双脉冲测试电路。

该测试使用感应负载和电源进行。电感用于复制转换器设计中的电路条件。电源用于向电感提供电压。AFG31000 用于输出脉冲，这些脉冲触发 MOSFET 的门极，从而使其开启并开始导电。

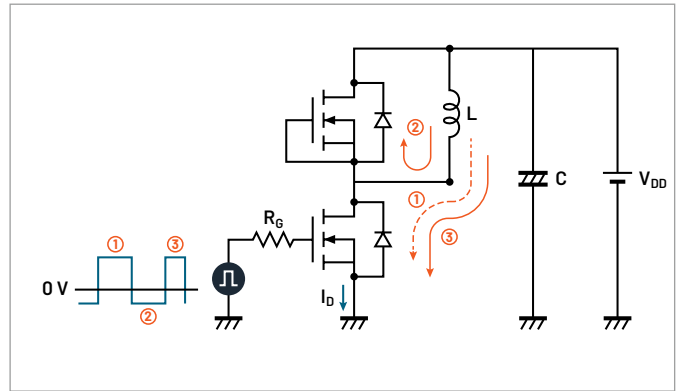


图 6: 使用 MOSFET 作为待测设备时的电流流向。

图 6 展示了使用 MOSFET 进行双脉冲测试时不同阶段的电流流向。使用 IGBT 作为待测设备时的电流流向如图 7 所示。

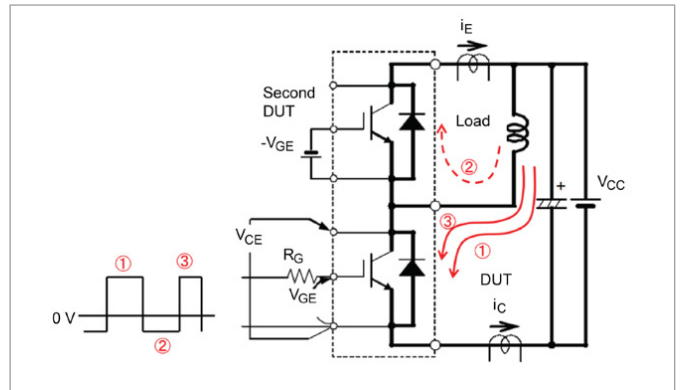


图 7: 使用 IGBT 作为待测设备的电流流向。

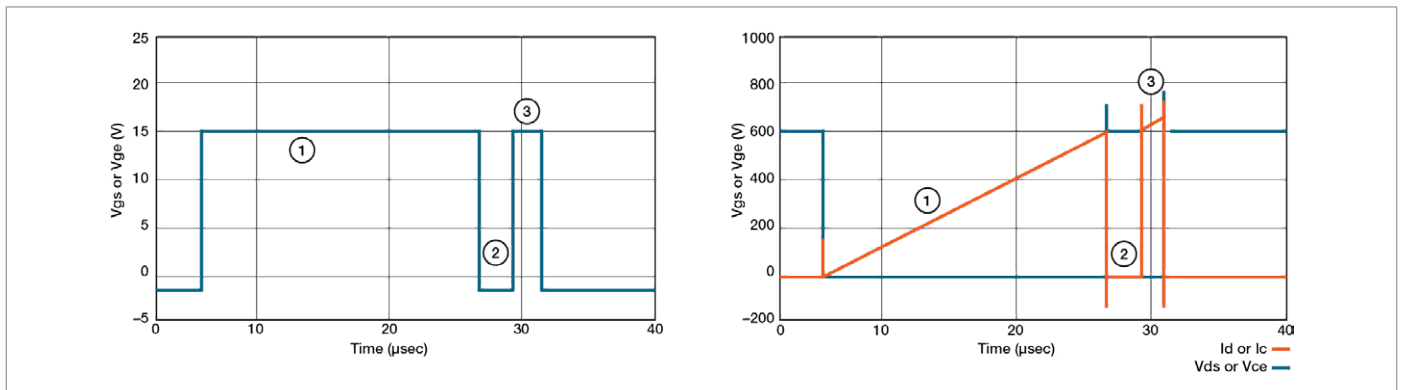


图 8: 双脉冲测试的典型波形。

图 8 展示了在低侧 MOSFET 或 IGBT 上取得的典型测量数据。以下是双脉冲测试的不同阶段（这些阶段对应图 6、图 7 和图 8）

- 第一步, 由第一次开通脉冲代表, 是初始调整的脉宽。这建立了电感中的电流。调整此脉冲以达到图 8 所示的所需测试电流 ( $I_d$ )。
- 第二步 (2) 是关闭第一个脉冲, 这在自由轮二极管中产生电流。关断周期很短, 以保持电感中的负载电流尽可能接近恒定值。图 8 显示低侧 MOSFET 上的  $I_d$  在第二步归零; 然而, 电流通过电感和高侧二极管流动。这可以在图 6 和图 7 中看到, 电流通过高侧 MOSFET (未被开通的 MOSFET) 的二极管流动。
- 第三步 (3) 由第二次开通脉冲代表。脉冲宽度比第一次脉冲短, 以防设备过热。第二个脉冲需要足够长, 以便进行测量。图 8 中看到的电流超调是由于高侧 MOSFET/IGBT 的自由轮二极管反向恢复所致。
- 然后在第一次脉冲的关断和第二次脉冲的开通时捕获关断和开通时间测量。

下一部分将讨论测试设置和测量方式。

## 双脉冲测试设置

图 9 展示了进行双脉冲测试的设备设置。需要以下设备:

- AFG31000: 连接到隔离门驱动器, 并使用设备上的双脉冲测试应用快速生成不同脉宽的脉冲。隔离门驱动器用于开通 MOSFET。
- 示波器: 4/5/6 系列 MSO (此设置使用 Tektronix 5 系列 MSO): 测量 VDS、VGS 和  $I_D$ 。
- 示波器上的双脉冲测试软件: 4/5/6 系列 MSO 上的 Opt. WBG-DPT, 用于自动化测量。
- 用于低侧设备和高侧二极管反向恢复的探头:

### 低侧探测:

- Ch1: VDS - TPP 系列或 THDP/TMDP 系列电压探头
- Ch2: VGS - TPP 系列或带 MMCX 适配器尖端的 TIVP 隔离探头。
- Ch3:  $I_D$  - TCP 系列电流探头

### 高侧探测:

- Ch4: IRR - TCP 系列电流探头
- Ch5: VDS - THDP/TMDP 系列电压探头
- 直流电源:

### 高压电源:

- EA-PSI 10000 可编程电源, 最高 2 千伏, 30 千瓦
- 2657A 高压源表单元 (SMU), 最高 3 千伏
- 2260B-800-2, 可编程直流电源, 最高 800 伏

### 门驱动电路电源:

- 2230 系列或 2280S 系列直流电源

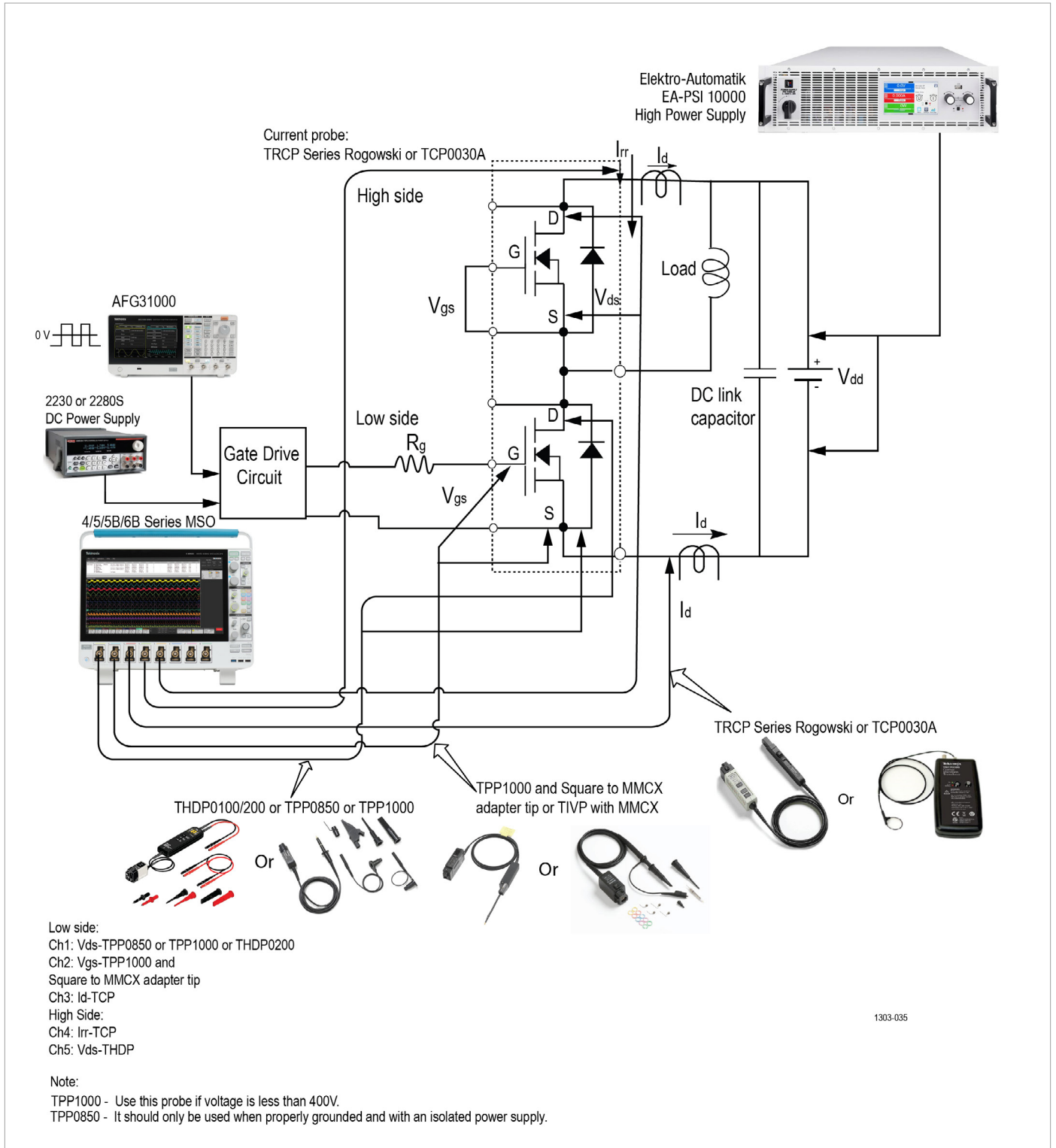


图 9:

## AFG31000 上的双脉冲应用

AFG31000 的双脉冲测试应用可以直接从 tek.com 网站下载，并安装到 AFG31000 上。图 10 展示了双脉冲测试应用在 AFG31000 主屏幕上的图标，该应用被下载并安装到设备上后即可见。

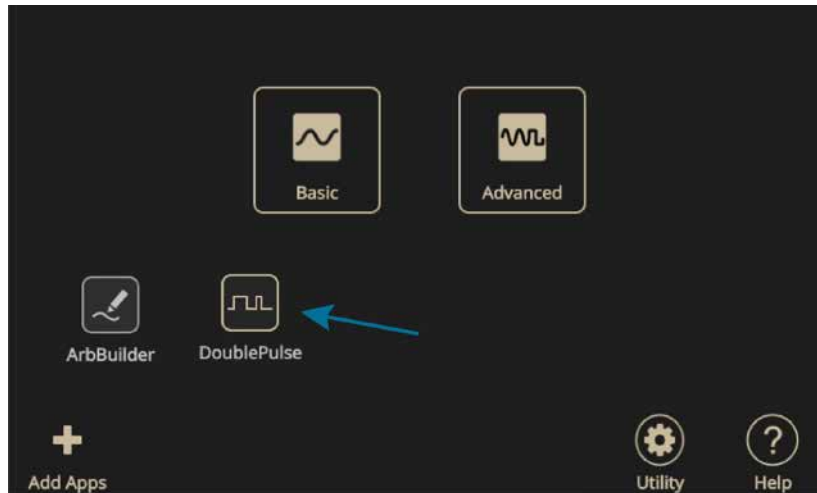


图 10: AFG31000 主屏幕。

双脉冲测试应用让用户能够创建具有不同脉宽的脉冲，这一直是主要的用户痛点，因为创建具有不同脉宽的脉冲的方法耗时。这些方法包括在 PC 上创建波形并上传到函数发生器。其他方法是使用需要大量编程工作和时间的微控制器。AFG31000 上的双脉冲测试应用使得用户能够直接从前端显示屏进行操作。该应用直观且快速设置。第一个脉宽调整以获得所需的开关电流值。第二个脉冲也可以独立于第一个脉冲进行调整，通常比第一个脉冲短，以防止功率设备被破坏。用户还可以定义每个脉冲之间的时间间隔。

图 11 展示了双脉冲测试应用窗口。在这里，用户可以设置：

- 脉冲数量: 2 至 30 脉冲
- 高低电压幅度 (V)
- 触发延迟 (秒)
- 触发源 - 手动、外部或定时器
- 负载 - 50Ω 或高阻 (high Z)

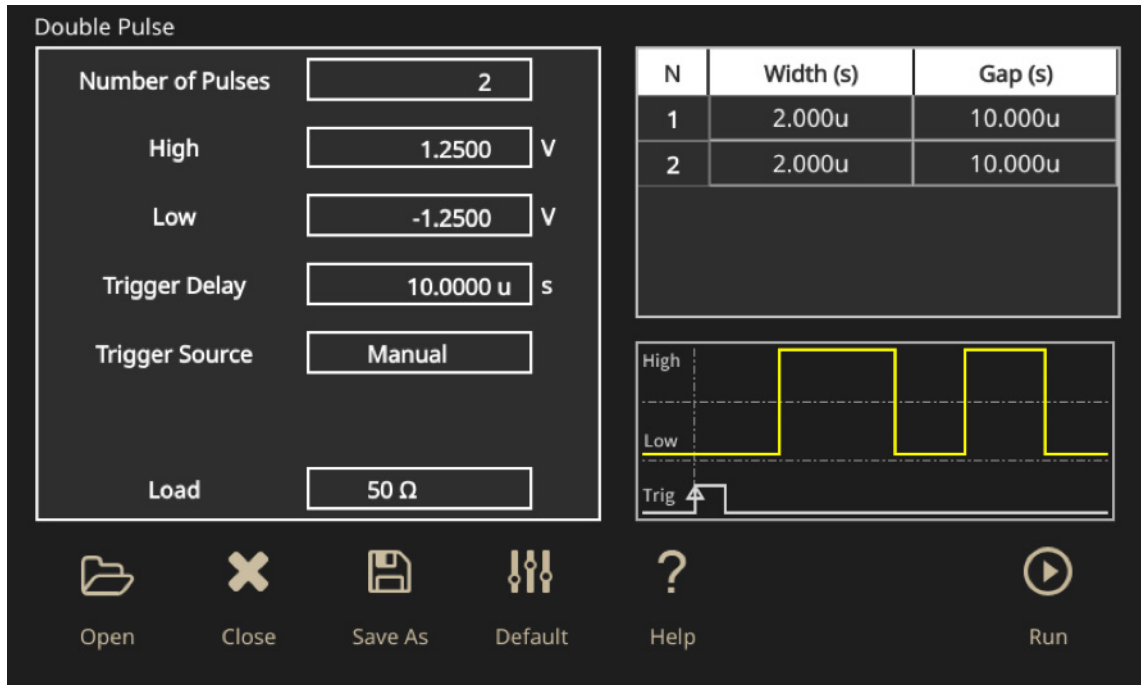


图 11: AFG31000 上的双脉冲测试应用。

图 12 展示了双脉冲测试的实际测试设置。

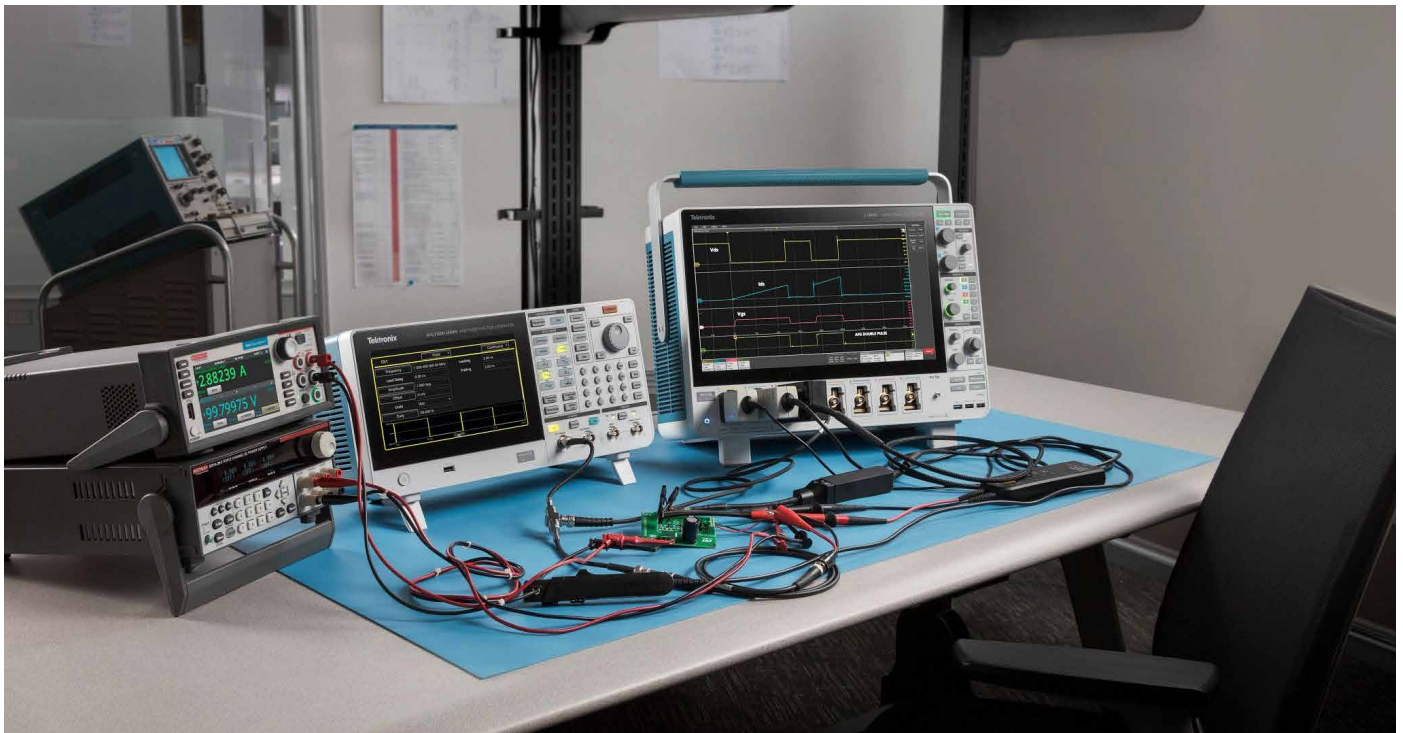


图 12 展示了双脉冲测试的实际测试设置。

在这个例子中, 使用 ST Micro-Electronics 的评估板作为 N 沟道功率 MOSFET 和 IGBT 的门驱动器: EVAL6498L, 如图 13 所示。





图 13:

使用的 MOSFET 也来自 ST Micro-Electronics: STFH10N60M2。这些是 N 沟道 600V MOSFET，额定漏电流为 7.5A。

测试电路中使用的其他设备和器件包括：

- 脉泰克 (Tektronix) 4、5 或 6 系列 MSO 示波器
- 泰克电流探头 TCP0030A-120 MHz
- 泰克高压差分探头: TMDP0200
- 凯斯利 (Kiethley) 直流电源 - 2280S (为门驱动 IC 供电)
- 凯斯利 2461 SMU 仪器 (为电感供电)
- 电感: 约 1 mH

电源连接如下:

- MOSFET 焊接在电路板上。Q2 是低侧，Q1 是高侧。
- Q1 的门和源需要短接，因为 Q1 不会被打开。
- Q2 的门电阻已焊接。R = 100Ω。
- AF31000 的 CH1 连接到评估板上的 PWM\_L 和 GND 输入。

- 凯斯利电源连接到评估板上的 Vcc 和 GND 输入，为门驱动 IC 供电。
- 凯斯利 2461 SMU 仪器连接到 HV 和 GND，为电感供电。
- 然后将电感连接到 HV 和 OUT。

## 双脉冲测试测量

一旦所有电源连接都已安全连接，我们可以将示波器的探头连接到 Q2 (低侧 MOSFET)，如图 14 所示。

- 一个被动探头连接到 VGS。
- 差分电压探头连接到 VDS。
- TCP0030A 电流探头通过 MOSFET 源引脚上的环路。

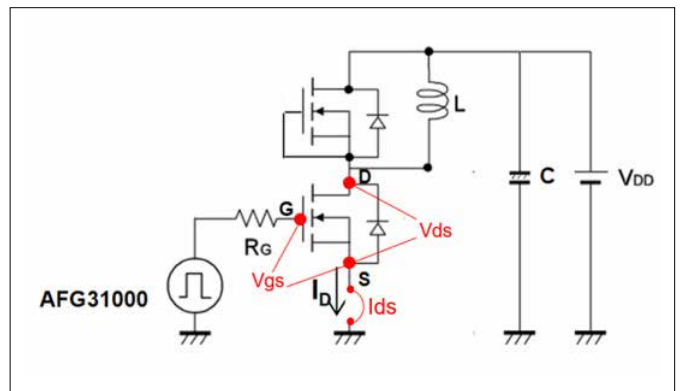


图 14: 示波器测量测试点。

细心的探测和优化将帮助用户获得好的结果。用户可以采取一些步骤来进行准确和可重复的测量，如从测量中移除电压、电流和时间误差。如 4/5/6 系列 MSOs 的 WBG-DPT 选项的自动化测量软件消除了手动步骤，节省时间并提供可重复的结果。

现在可以在 AFG31000 上设置双脉冲测试，如图 15 所示的屏幕捕获。

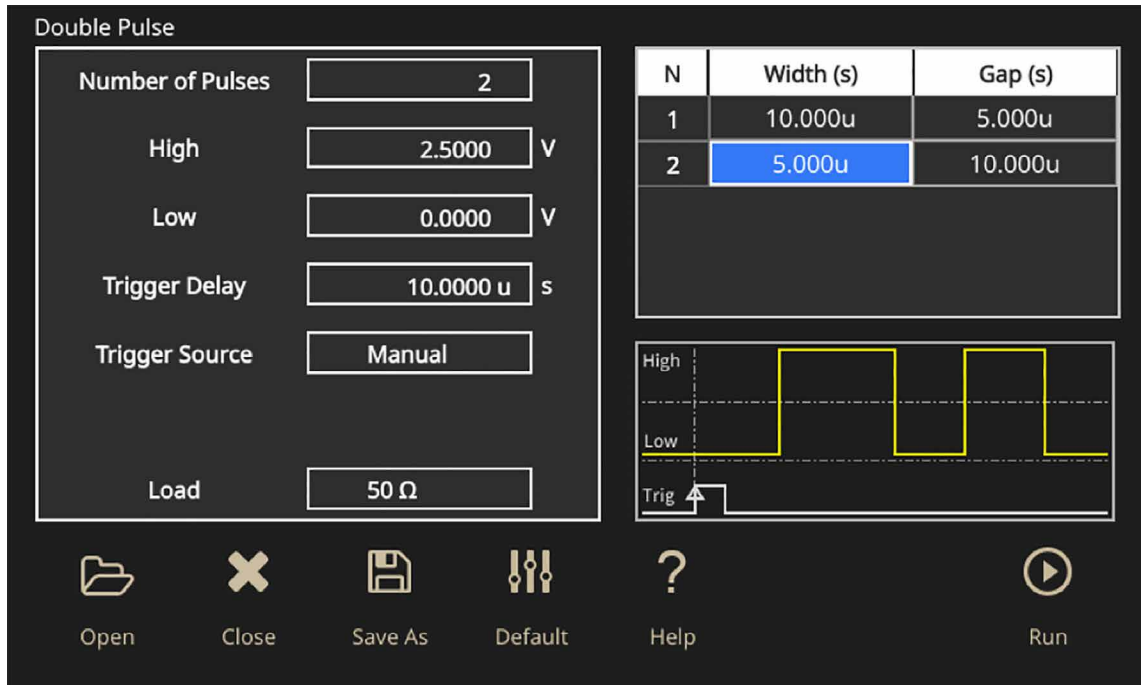


图 15: AFG31000 上的双脉冲测试设置

脉冲的幅度设置为 2.5 伏。第一个脉冲的脉宽设置为 10 微秒，间隙设置为 5 微秒，第二个脉冲设置为 5 微秒。触发设置为手动。

SMU 仪器设置为向 HV 源输入 100 伏。配置好门驱动信号和电源后，现在可以使用示波器上的 WBG-DPT 应用来配置和执行双脉冲测试。

## 4/5/6 系列 MSO 上的双脉冲测试软件

WBG-DPT 应用相较于手动测试提供了几个重要优势：

- 缩短测试时间
- 即使在带有振铃的信号上也能实现可重复的测量
- 根据 JEDEC/IEC 标准或使用自定义参数进行测量
- 预设功能以便于示波器设置
- 在脉冲之间和注释之间轻松导航
- 在结果表中总结测量结果
- 通过报告、会话文件和波形记录结果
- 完整的编程接口实现自动化
- 使用可配置的限制和对失败采取的行动进行合格 / 不合格测试

有关 WBG-DPT 应用的更多信息，请参阅数据表。

测量分为开关参数分析、开关定时分析和二极管恢复分析。

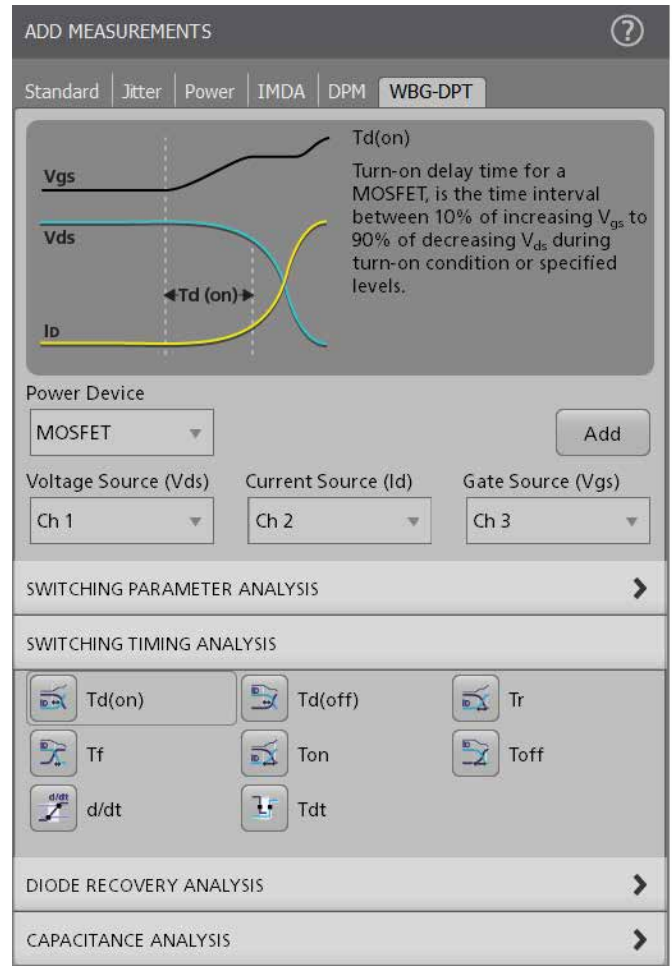


图 16. WBG-DPT 应用中的开关定时分析测量。

## WBG Deskew 功能

脉冲的幅度设置为 2.5 伏。第一个脉冲的脉宽设置为 10 微秒, 间隙设置为 5 微秒, 第二个脉冲设置为 5 微秒。触发设置为手动。

SMU 仪器设置为向 HV 源输入 100 伏。配置好门驱动信号和电源后, 现在可以使用示波器上的 WBG-DPT 应用来配置和执行双脉冲测试。

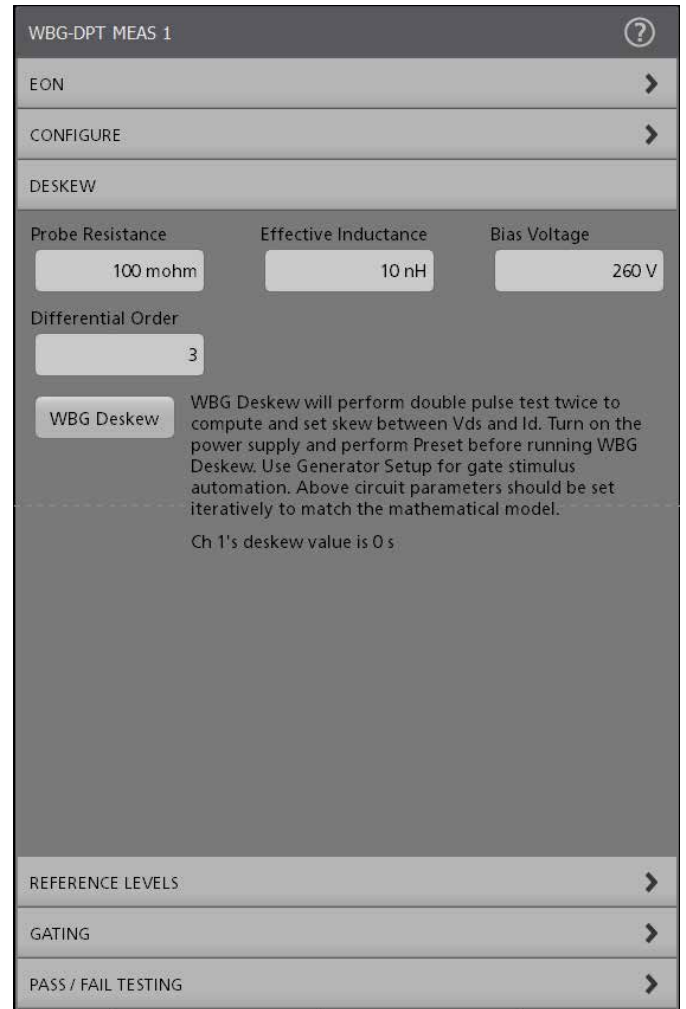


图 17. WBG Deskew 过程专门用于双脉冲测试, 并在信号被获取后实现电流和电压波形的对齐。

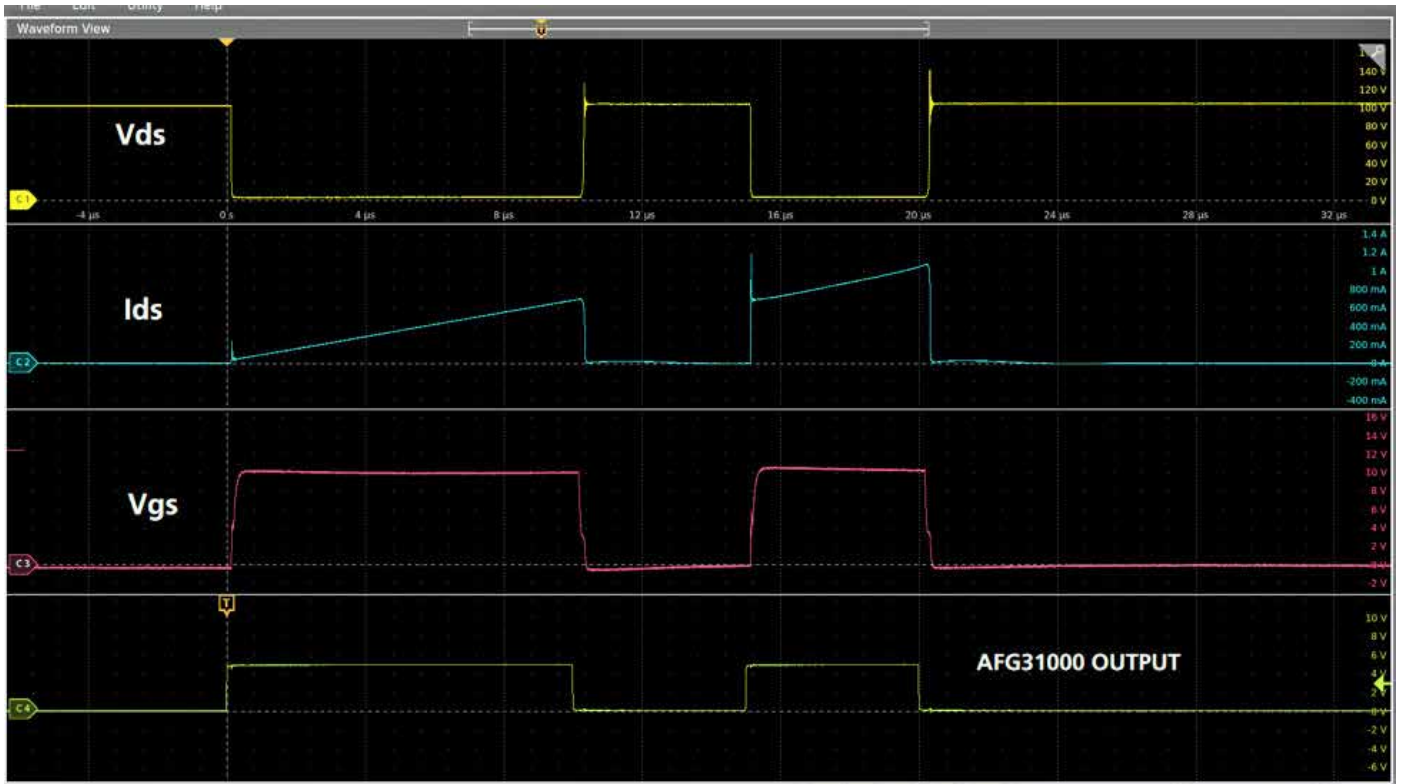


图 18: 双脉冲测试波形。

注意图 18 中的波形与图 8 中显示的波形相似。再次提到,  $I_{ds}$  上看到的电流超调是由于高侧 MOSFET/IGBT 的自由轮二极管的反向恢复。这个尖峰是被使用设备的固有特性, 并将导致损耗。

## 测量开通和关断时序及能量损失

为了计算开通和关断参数，我们查看第一个脉冲的下降沿和第二个脉冲的上升沿。

测量开通和关断参数的行业标准如图 19 所示。

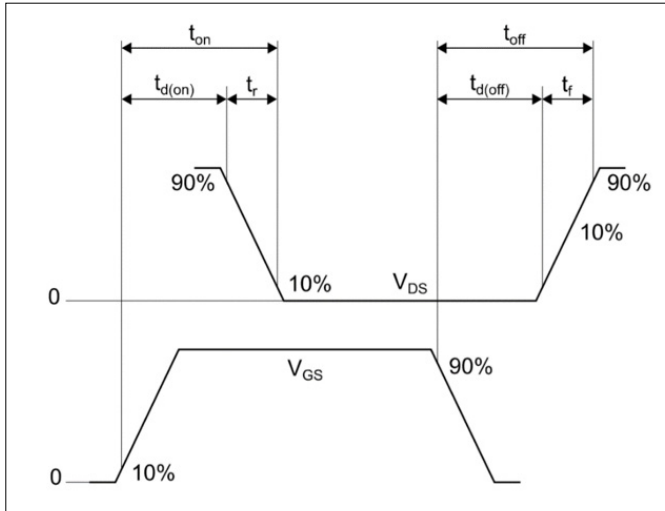


图 19: 开关时间标准波形 [5]。

- $t_{d(on)}$ :  $V_{GS}$  在其峰值的 10% 与  $V_{ds}$  在其峰值的 90% 之间的时间间隔。
- $T_r$ :  $V_{DS}$  从 90% 降到 10% 的峰值之间的时间间隔。
- $t_{d(off)}$ :  $V_{GS}$  在其峰值的 90% 与  $V_{ds}$  在其峰值的 10% 之间的时间间隔。
- $T_f$ :  $V_{DS}$  从 10% 升到 90% 的峰值之间的时间间隔。

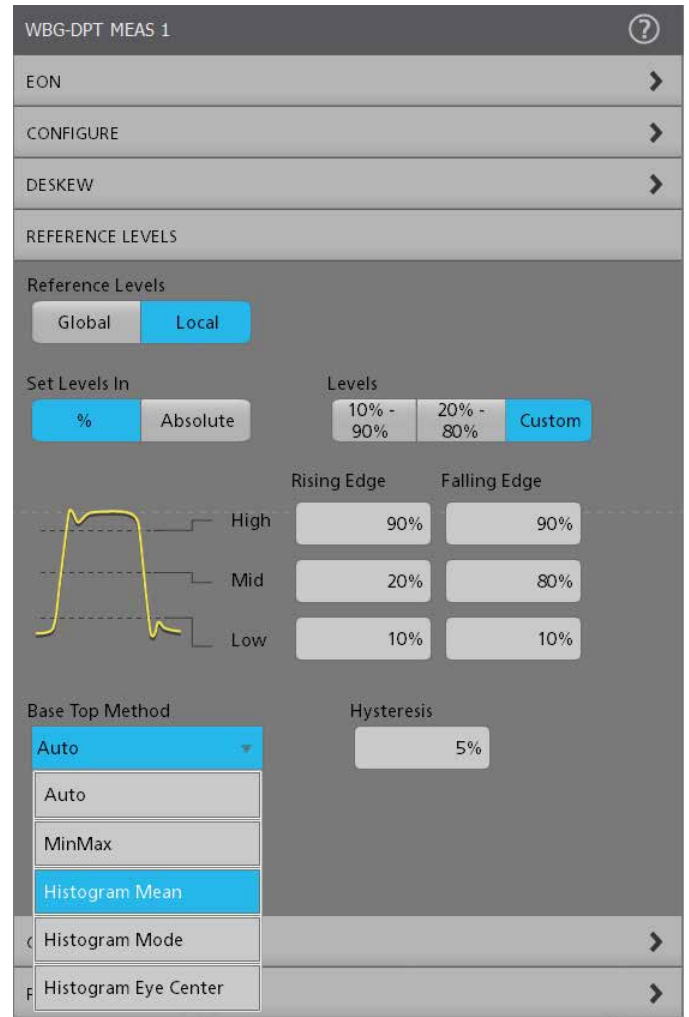


图 20: 示波器上的 DPT 软件支持标准和自定义参考水平。滞回带设置了参考水平的范围，信号必须穿过该范围才被识别为一个过渡。这有助于过滤掉偶发事件。

图 21 展示了在示波器上捕获的波形和开通参数的测量。在示波器上，启动 WBG-DPT 应用。选择功率设备类型为 MOSFET。配置  $V_{DS}$ 、 $I_D$  和  $V_{GS}$  源。

转到开关定时分析组。添加  $T_{d(on)}$ 、 $T_{d(off)}$ 、 $T_r$  和  $T_f$  测量。配置  $T_{d(on)}$  测量，点击预设。这将示波器设置为单次采集。

开启电源。

开启 AFG31000 以产生输出脉冲。

如图 21 所示，结果波形被捕获在示波器上。

然后使用以下方程计算过渡期间的能量损失：

$$E_{on} = \int_0^t V_{DS} \times I_{DS} dt \quad (1)$$

通常，设计师会在示波器上使用积分功能来计算这一特定的能量损失。WBG-DPT 应用在开关参数分析组下提供  $E_{on}$  测量。这个测量设置了积分并快速显示结果。

上述相同的方程可用于计算关断过渡期间的能量损失：

$$E_{off} = \int_0^t V_{DS} \times I_{DS} dt \quad (2)$$

DPT 应用在开关参数分析菜单中包括一个自动  $E_{off}$  测量。这执行计算并直接提供能量损失结果。

注意：示波器捕获的数据仅供参考。

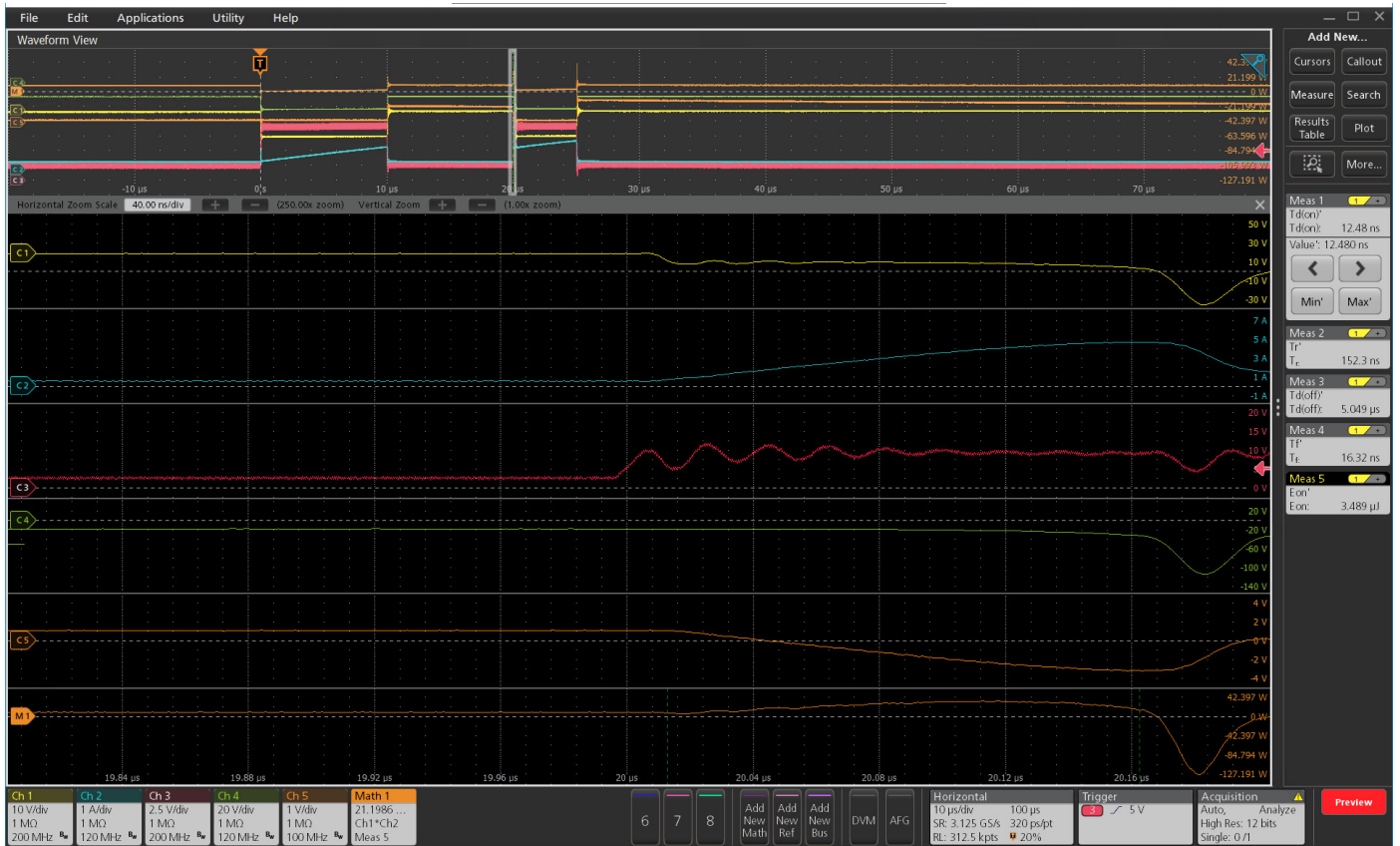


图 21: 开通参数波形

图 22 展示了使用示波器光标获得的关断波形测量。

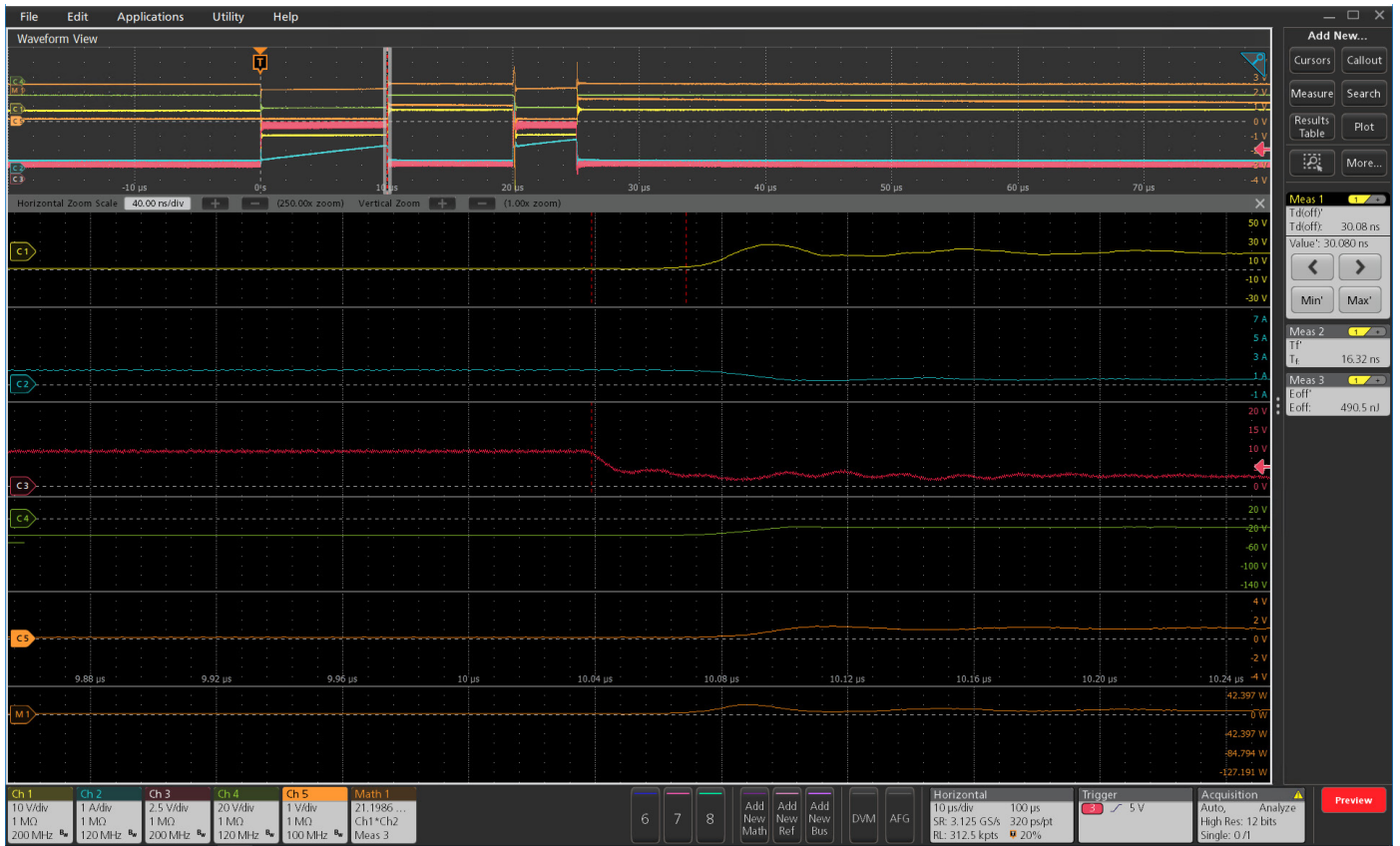


图 22: 关断参数波形。

### 测量反向恢复

现在，需要测量 MOSFET 的反向恢复特性。

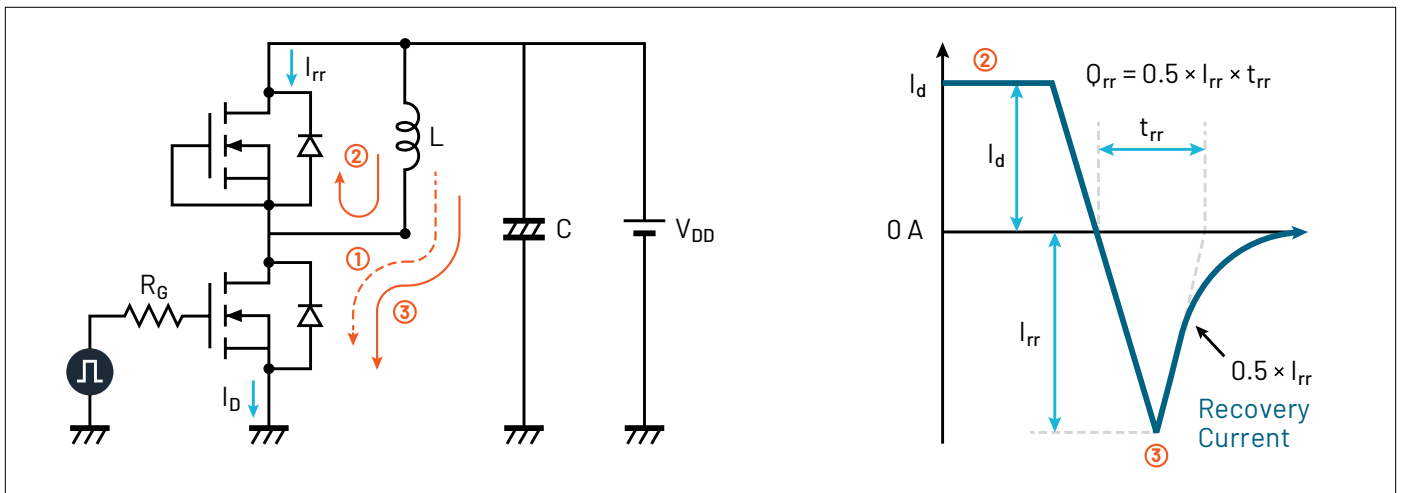


图 23:



反向恢复电流发生在第二个脉冲的开通期间。如图 23 所示，在第二阶段，二极管在正向条件下导通。当低侧 MOSFET 再次开通时，二极管应立即切换到反向阻断状态；然而，二极管会在一个短时间内以反向条件导通，这被称为反向恢复电流。这种反向恢复电流转化为能量损失，这直接影响了功率转换器的效率。

现在测量高侧 MOSFET 的参数。通过高侧 MOSFET 测量 Id，并在二极管上测量 Vsd。

图 23 还展示了如何检索反向恢复参数：

- 反向恢复参数: trr (反向恢复时间)、Irr (反向恢复电流)、Qrr (反向恢复电荷)、Err (反向恢复能量)、di/dt 和 Vsd (正向导通电压)。

然后使用以下方程计算过渡期间的能量损失：

$$E_{rr} = \int_0^{\infty} V_{DS} \times I_{DS} dt \quad (2)$$

WBG-DPT 支持在二极管反向恢复组下测量  $T_{rr}$ 、 $Q_{rr}$  和  $E_{rr}$ 。波形和捕获的结果显示在图 24 中。

多个  $T_{rr}$  测量也可以在一个重叠的图中显示，显示选定的脉冲、标注、切线和配置的值。

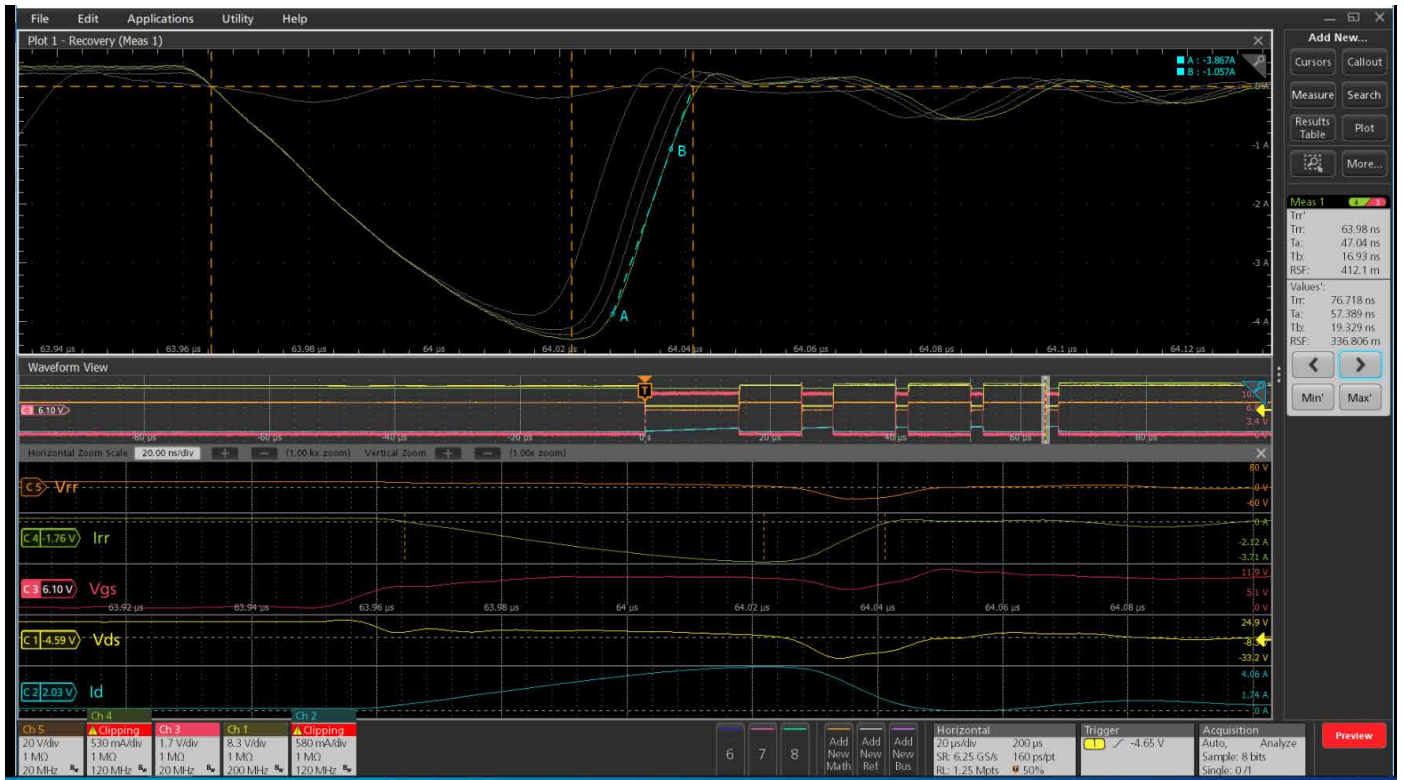


图 24: 反向恢复波形。显示器顶部的波形显示了多个事件的重叠图。切线 (A-B) 表示当前选中的测量事件。

### 测量死区时间

对于半桥配置中的开关设备,为了确保被测试设备(DUT)的完整性和人员的安全,一个开关在另一个开关开启前必须关闭。如果两个开关同时开启,会发生“穿透”现象,这将导致失败。然而,两个开关关闭的时间过长会影响效率。因此,优化死区时间是一个关键的设计目标。 $\Delta t$  死区时间  $V_{gs1}$   $V_{gs2}$  图 25。在半桥功率转换器中,死区时间是一个开关设备关闭和另一个 FET 开启之间的延迟,如图中的  $\Delta t$  所示。

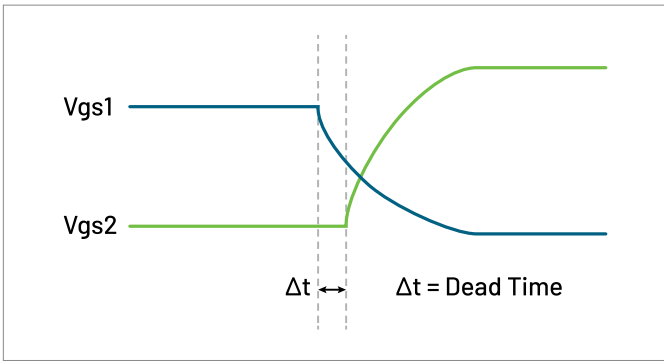


图 25.

死区时间 ( $T_{dt}$ ) 是一个 MOSFET 关断时间和另一个 MOSFET 开通时间之间的时间延迟,通过每个 MOSFET 的门驱动信号测量。死区时间在图 25 中显示为  $\Delta t$ 。

WBG-DPT 应用包含一个自动化的死区时间测量,可以在“开关定时分析”选项卡下找到,如图 16 所示。 $T_{dt}$  测量显示在图 26 的显示屏右侧的徽章中。死区时间是一个门电压的配置下降沿级别和另一个门电压的配置上升沿级别之间的时间间隔。默认的上升和下降沿级别为 50%。测量注释(虚线垂直线)标示了门驱动信号上的死区时间测量。

在某些情况下,必须在具有缓慢上升或下降时间的波形上进行死区时间测量。在这些情况下,可以在测量中配置自定义边缘级别。自定义级别可以相对于波形的高低级别,或者是绝对值。

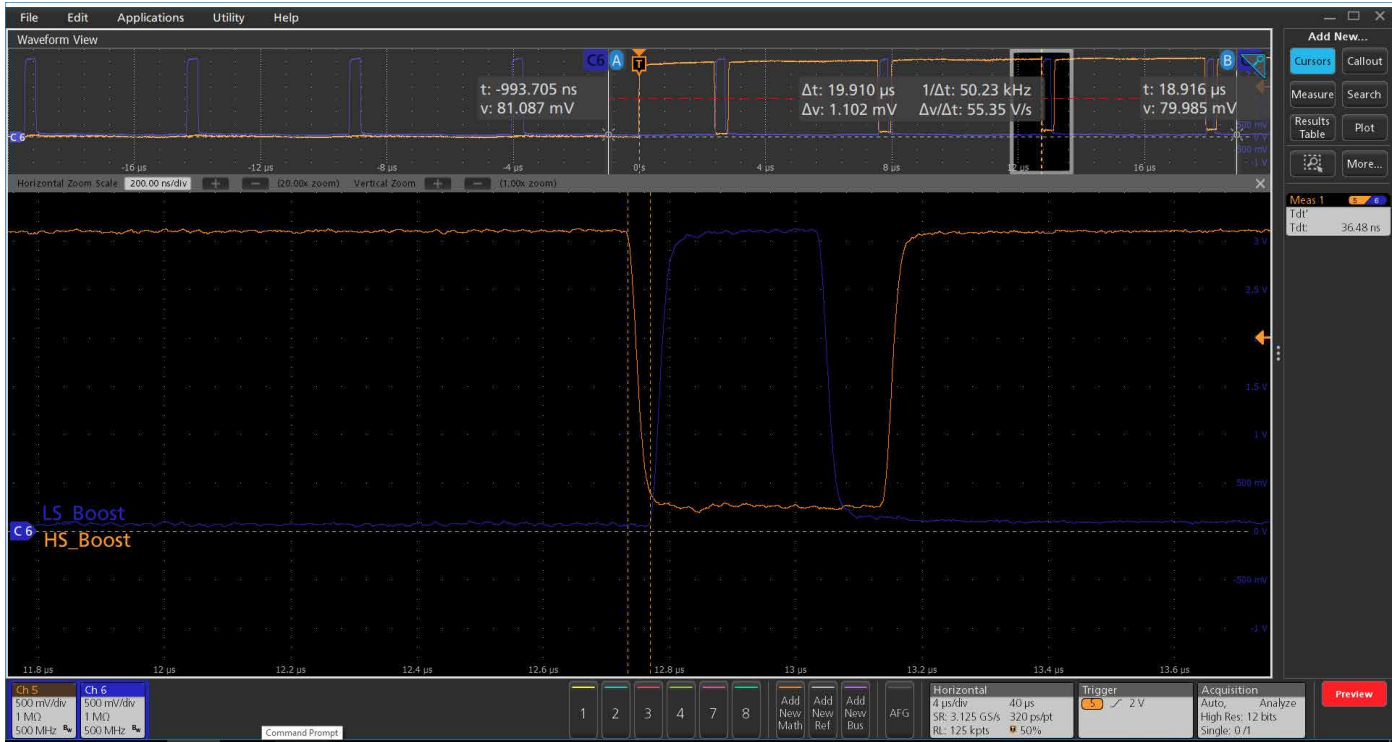


图 26. 自动化死区时间测量。第 6 通道的门驱动信号 (绿色) 关闭低侧 MOSFET, 然后高侧 MOSFET 的门驱动信号 (黄色) 开启高侧 MOSFET。

## 结论

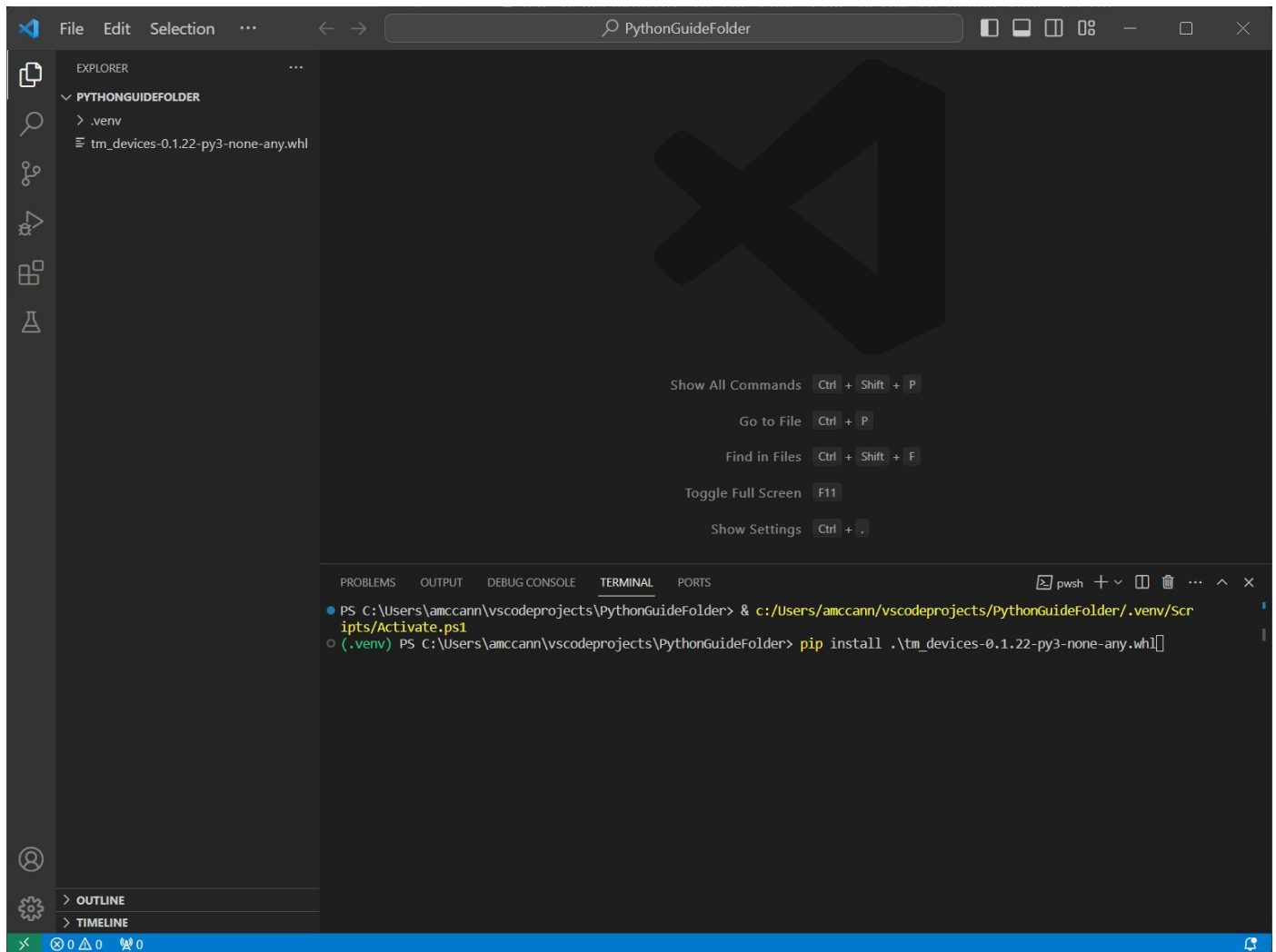
双脉冲测试是测量功率设备的开关参数和评估其动态行为的首选测试方法。使用这个应用的测试和设计工程师对了解功率设备的开关、定时和反向恢复行为表现出浓厚的兴趣。此测试需要两个具有不同脉宽的电压脉冲，这是主要的用户痛点，因为创建具有不同脉宽的脉冲的方法耗时较长。这些方法包括在 PC 上创建波形并上传到函数发生器。其他方法则是使用需要大量编程工作和时间的微控制器。本应用说明展示了泰克 (Tektronix) AFG31000 任意函数发生器提供了一种直接在前端显示屏上创建不同脉宽脉冲的简便方法。AFG31000 上的双脉冲测试应用设置快速，输出脉冲迅速，因此允许设计

和测试工程师专注于收集数据和设计更高效的转换器。

在 4/5/6 系列 MSO 上的 WBG-DPT 双脉冲应用能够进行特定标准的测试，分析功率设备的行为，与手动测试相比节省时间。该应用包括一个预设功能，以帮助捕获正确的波形，提供详细的配置选项以超越标准测试，启用信号调理功能以分析噪声波形，提供导航和注释功能，并提供详细的文档以实现可重复的测量。

AFG31000 和 4/5/6 系列 MSO 上的自动化双脉冲测试设置和分析相结合，极大地减少了测试时间，并为下一代功率转换器的更快上市时间做出了贡献。

3. 在 Visual Studio Code 中导航至终端 (Ctrl+Shift+P-> 创建新终端)。本例使用的是虚拟环境，因此如果不是虚拟环境，其看起来可能会有所不同。



4. 确保此文件位于您的工作目录中，并键入：  
`pip install <specific filename and version of tm_devices>.whl`  
其应该类似于: `tm_devices-1.0.0-py3-none-any.whl`
5. 如果 `tm_devices` 导入过程没有出错，则安装成功。

Find more valuable resources at [TEK.COM](https://www.tek.com)

