

# 使用泰克 AFG31000 任意函数发生器进行双脉冲测试

## 应用指南



**KEITHLEY**  
A Tektronix Company

**Tektronix®**

## 引言

功率电子中使用的半导体材料正从硅转变到宽带隙半导体，如碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN)，因为这些材料在汽车和工控应用中展现了杰出的性能。GaN 和 SiC 实现了更小、更快、更高效的设计。监管和经济压力正不断推动着高压功率电子设计改善效率。更小更轻的设计实现的功率密度优势，在空间有限的应用和 / 或移动应用中尤其明显，比如电动汽车，而紧凑型功率电子的需求则日益提高，特别是从降低系统成本角度看。同时，随着各国政府引入资金激励计划，制订更严格的能效法规，效率的重要性也在不断提高。

全球经济体签发的指引，如欧盟的生态设计指令、美国能源部 2016 年效率标准、中国质量认证中心 (CQC) 标志，都对电气产品和服务提出了能效要求。不管是从发电角度还是从消费角度，功率电子都要求提高效率，**如图 1** 所示。功率转换器在发电、传送、消费链条的多个阶段运行，由于没有一种操作是 100% 效率的，所以每一步都会出现一定的功率损耗。由于最主要的能量损耗是热能，整个周期中的整体效率下降会产生积累效应。[1]

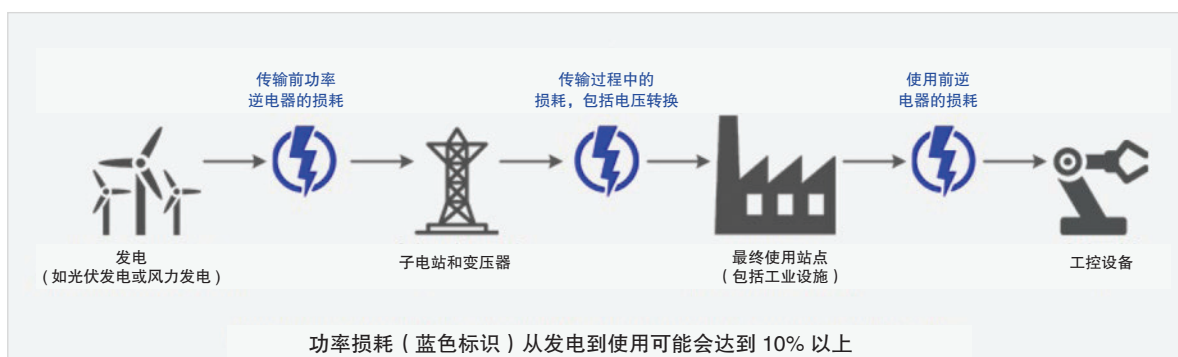


图 1：发电、传送和消费各点发生的功率损耗 [1]。

在设计功率转换器时，理想的功率损耗是 0%，**如图 2** 所示。

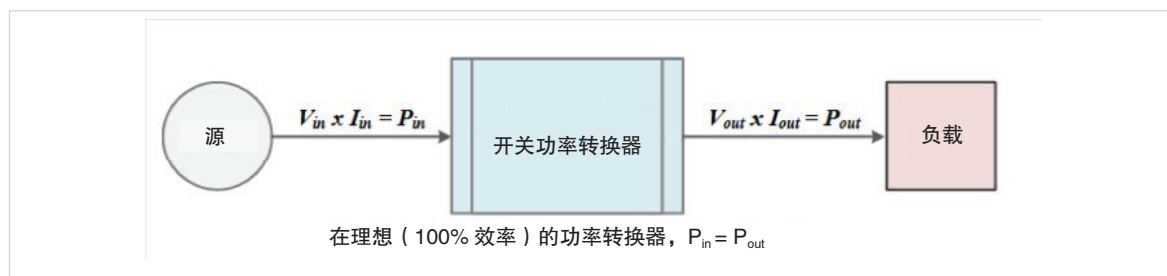


图 2：理想的功率转换效率 [1]。

然而，开关损耗是不可避免的。所以人们的目标是通过设计优化来使损耗达到最小，因此必须严格测量与效率有关的设计参数。

典型转换器的效率约为 87%~90%，也就是说，10% ~ 13% 的输入功率在转换器中被耗掉了，其主要表现为废热。这一损耗的很大部分耗散在开关器件中，如 MOSFETs 或 IGBTs。[2]

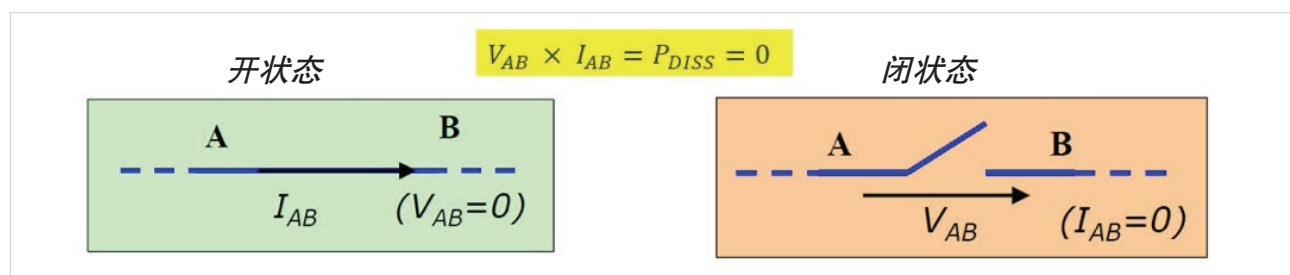


图 3. 理想的开关。

理想情况下，开关器件要么是“开”，要么是“关”，**如图 3** 所示，并在这两种状态之间即时切换。在“开”状态下，开关的阻抗是零欧姆，开关中不耗功，不管流经的电流有多大。在“关”状态下，开关的阻抗无穷大，流经的电流为零，所以不耗功。

在实践中，在“开”和“关”（关闭）之间及“关”和“开”（启动）之间的转换过程都会耗功。之所以发生这些不理想的行为，是因为电路中有寄生单元。**如图 4** 所示，栅极上的寄生电容会降慢器件的开关速度，延长启动时间和关闭时间。在漏极电流流经时，MOSFET 漏极和源极之间的寄生电容会耗功。[2]

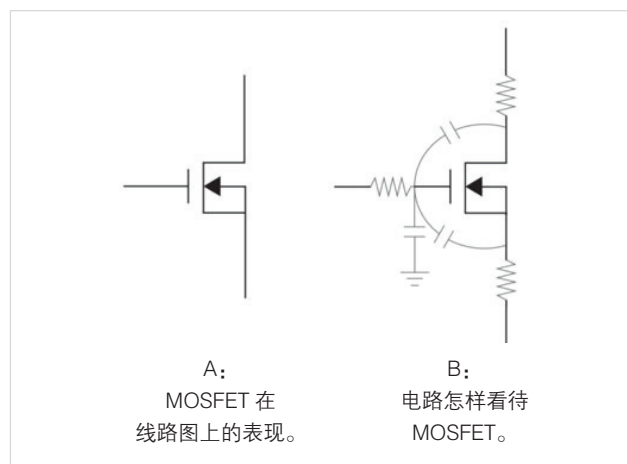


图 4: A: MOSFET 在线路图上的表现。B: 电路怎样看待 MOSFET。

MOSFET 中还要考虑体二极管的反向恢复损耗。二极管的反向恢复时间用来衡量二极管中的开关速度，从而会影响转换器设计中的开关损耗。

因此，设计工程师需要测量所有这些定时参数，以使开关损耗达到最小，从而设计更加高效的转换器。

测量 MOSFETs 或 IGBTs 开关参数的首选方式是“**双脉冲测试**”方法。本应用指南将介绍双脉冲测试及其实现方式，其中提供了采用 ST 微电子评估板和泰克设备的一个实例。特别是，本应用指南说明了可以怎样使用泰克 AFG31000 任意函数发生器及其内置双脉冲测试应用来简便地生成脉冲，并使用泰克 5 系列 MSO 混合信号示波器进行测量。

## 什么是双脉冲测试？

双脉冲测试是一种测量开关参数、评估功率器件动态特点的方法。该应用的用户一般要测量以下开关参数：[3]

- **启动参数：** 启动延迟 (td(on))、上升时间 (tr)、ton (启动时间)、Eon (开能量)、dv/dt 和 di/dt。然后确定能量损耗。[4]
- **关闭参数：** 关闭延迟 (td(off))、下降时间 (tf)、toff (关闭时间)、Eoff (关能量)、dv/dt 和 di/dt。然后确定能量损耗。[4]
- **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 (前向开电压)。[4]

之所以执行这一测试，是为了：

- 保证功率器件指标，如 MOSFETs 和 IGBTs。
- 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这些开关参数，在多个器件中验证性能。

图 5 是典型的双脉冲测试电路。

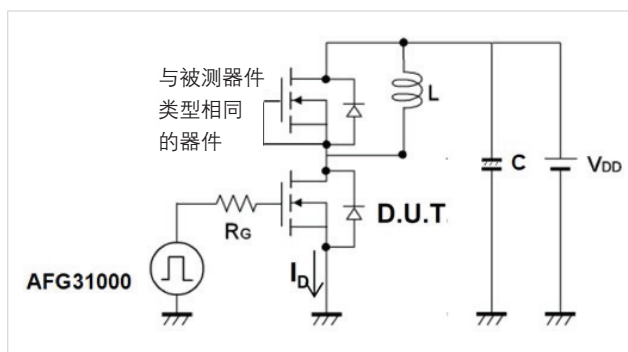


图 5：双脉冲测试电路。

测试使用感性负载和电源完成。电感器用来复现转换器设计中的电路条件。电源用来为电感器提供电压。AFG31000 用来输出脉冲，触发 MOSFET 栅极，从而启动并开始传导电流。

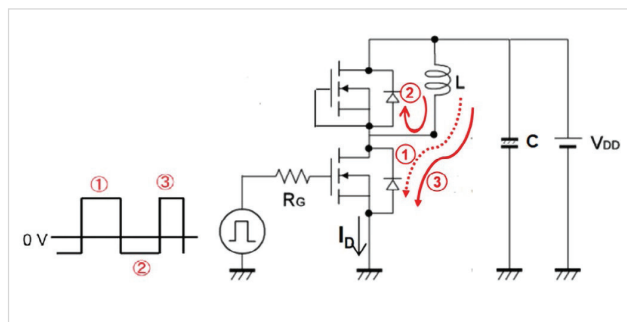


图 6：使用 MOSFETs 作为 DUTs 时的电流流动。

图 6 显示了使用 MOSFET 进行双脉冲测试时不同测试阶段内的电流流动。使用 IGBT 时也适用于这一电流流动，如图 7 所示。

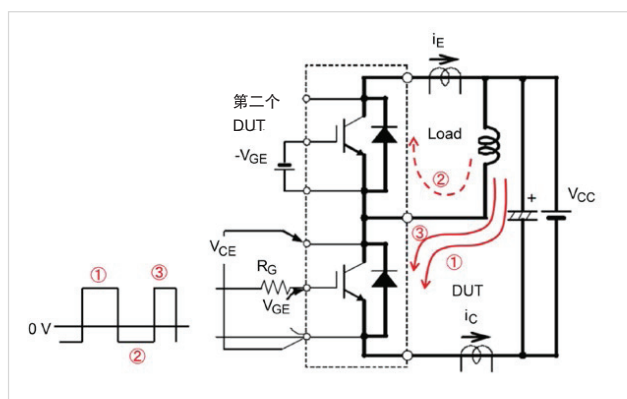


图 7：使用 IGBTs 作为 DUTs 时的电流流动。

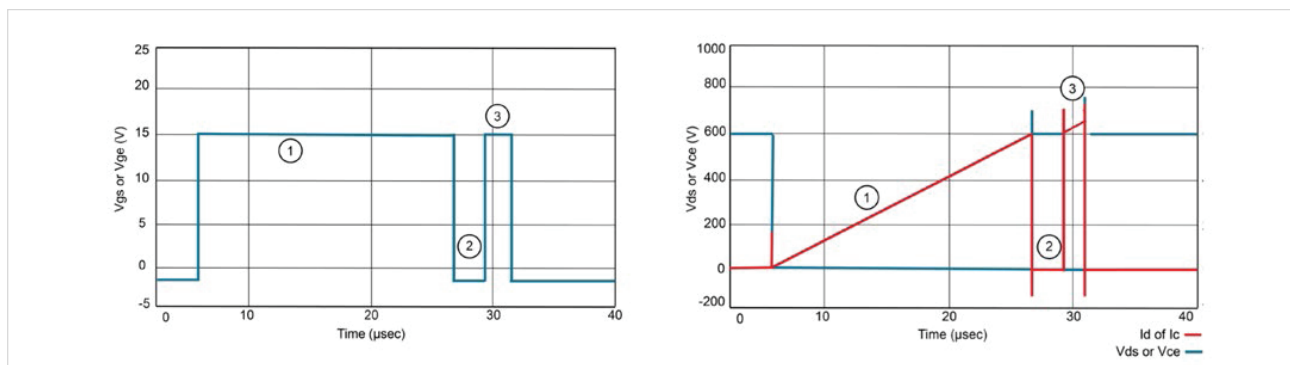


图 8：双脉冲测试的典型波形。

图 8 显示了低侧 MOSFET 或 IGBT 上获得的典型测量。这些是不同的双脉冲测试阶段 ( 这些阶段参见图 6、图 7 和图 8)。

- 第一步用 1 号启动脉冲表示，是一开始调节的脉宽。这在电感器建立了电流。将调节这个脉冲，以获得所需的测试电流 ( $I_d$ )，如图 8 所示。
- 第二步 (2) 是关闭第一个脉冲，在续流二极管中产生电流。关闭周期很短，以使负载电流尽可能接近经过电感器的恒定值。图 8 显示了低侧 MOSFET 上的  $I_d$ ，其在第 2 步中变成零，但电流流经电感器和高侧二极管。如图 6 和图 7 所示，电流流经高侧 MOSFET 的二极管 (MOSFET 没有打开)。
- 第三步 (3) 用第二个启动脉冲表示。脉冲宽度短于第一个脉冲，器件不会过热。第二个脉冲要足够长，以便能够进行测量。图 8 中的电流过冲是由于高侧 MOSFET/IGBT 的续流二极管反向恢复引起的。
- 然后在第一个脉冲关闭、第二个脉冲启动时捕获关闭和启动定时测量。

在下一节中，我们将讨论测试设置及怎样获得测量。

## 双脉冲测试设置

图 9 显示了运行双脉冲测试的设备设置，其要求的设备如下：

- AFG31000：连接隔离门驱动器，使用示波器上的双脉冲测试应用，迅速生成不同脉宽的脉冲。正是隔离门驱动器负责启动 MOSFET。
- 示波器（这一设置使用泰克 5 系列 MSO）：测量  $V_{ds}$ 、 $V_{gs}$  和  $I_d$ 。
- IsoVu (TIVM1)：高共模抑制比探头。推荐使用这一探头测量  $V_{gs}$ 。特别是对宽带隙半导体，因为它提供了高带宽和高共模电压。如需进一步了解 IsoVu，请参阅应用指南：“测量宽带隙半导体上的  $V_{gs}$ ”。[8]
- 需要 DC 电源或源测量单元 (SMU) 仪器，来提供负载电压。

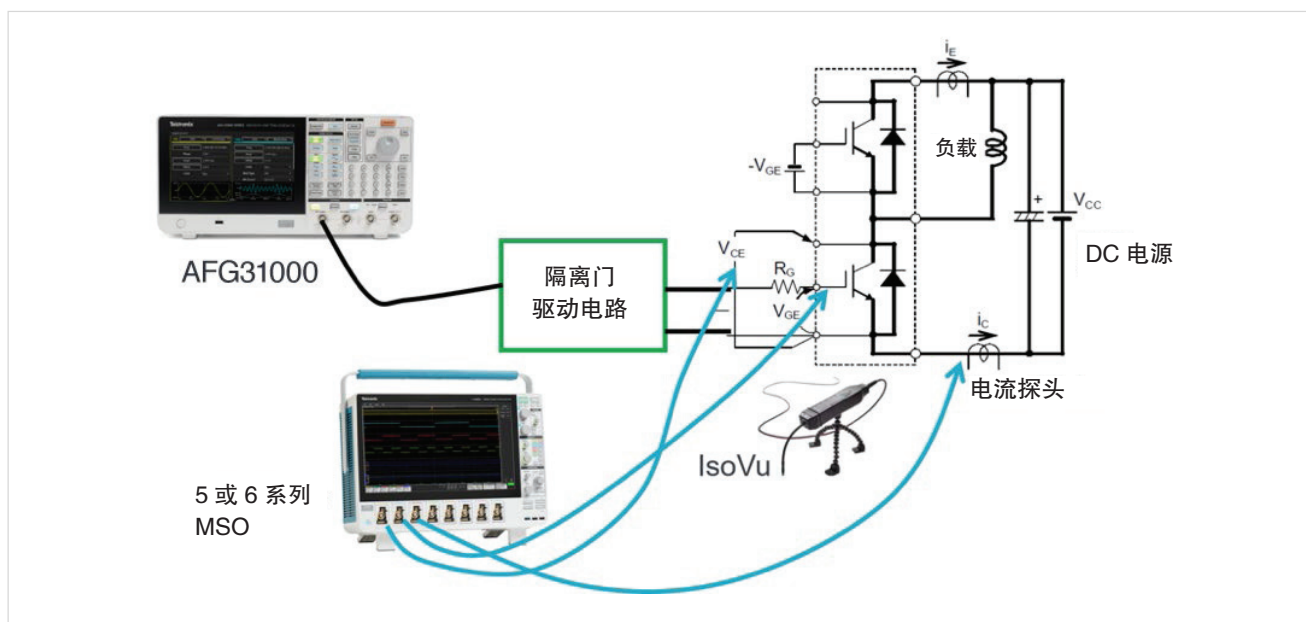


图 9：双脉冲测试设置



AFG31000 双脉冲测试应用可以直接从 [tek.com](http://tek.com) 网站中下载，并安装到 AFG31000 上。图 10 显示了在下载并安装应用后 AFG31000 主屏的双脉冲测试图标。

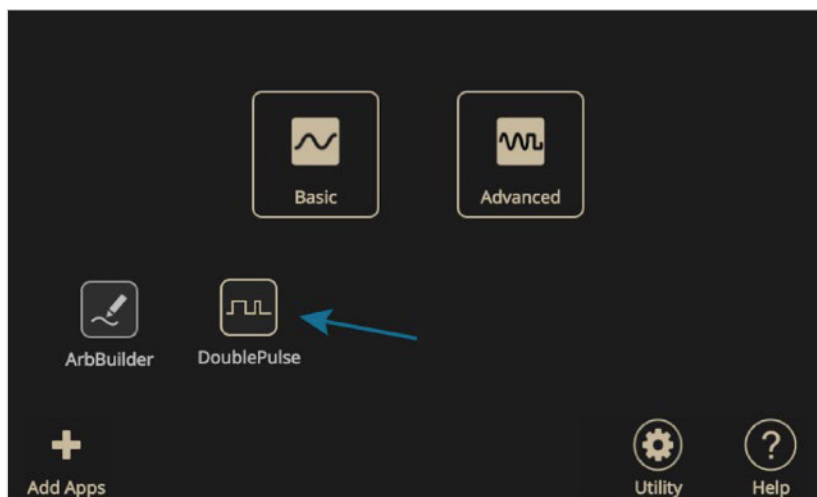


图 10：AFG31000 主屏。

双脉冲测试应用允许用户创建不同脉宽的脉冲，由于创建不同脉宽的脉冲会耗费很长时间，所以这一直是主要用户痛点。其中部分方法包括在 PC 上创建波形，然后上传到函数发生器；使用微控制器，这要求大量的编程工作和时间。AFG31000 上的双脉冲测试应用可以从前面显示器上实现这一点。应用非常直观，设置迅速。它会调节第一个脉宽，得到所需的开关电流值。还可以独立于第一个脉冲调节第二个脉冲，第二个脉冲通常要短于第一个脉冲，这样就不会毁坏功率器件。用户还能够确定每个脉冲之间的时隙。

图 11 显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 ~ 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 – 50Ω 或高阻抗

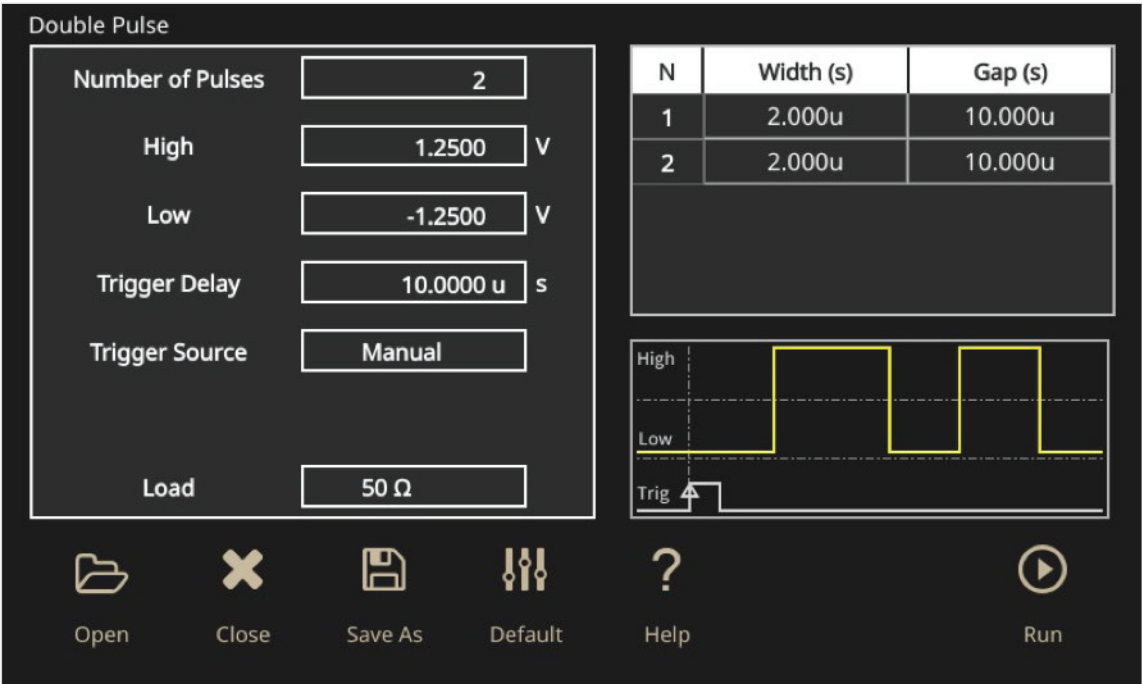


图 11：AFG31000 上的双脉冲测试应用。

双脉冲测试应用提供了下表中介绍的许多功能，给用户带来了许多对应的好处。

特点	对应好处
生成两个不同脉宽的脉冲	能够控制脉宽，这对测试非常关键
脉宽在 20 ns ~ 150μs 之间	各种脉宽
GUI 和大型触摸屏显示器	使用简便快捷。所有设置都在一个窗口上，减少了出错或模棱两可的可能
提供了 3 种触发方法：手动触发，连续触发，外部触发	<ul style="list-style-type: none"><li>● 手动触发：迅速设置一次性测量</li><li>● 连续触发：提高用户自动化程度</li><li>● 外部触发：能够使用示波器触发</li></ul>
可以输出最多 30 个脉冲	适用于不确定所需工作电流是多少的初学者
50 欧姆或高阻抗输出模式	根据器件阻抗，为用户提供更多选择
下载和安装简便	为用户节省大量的时间
适用于所有 AFG31000 型号	现有客户也可以下载应用，支持免费固件升级

表 1：AFG31000 上双脉冲测试应用的特点和好处。

图 12 显示了双脉冲测试的实际测试设置。

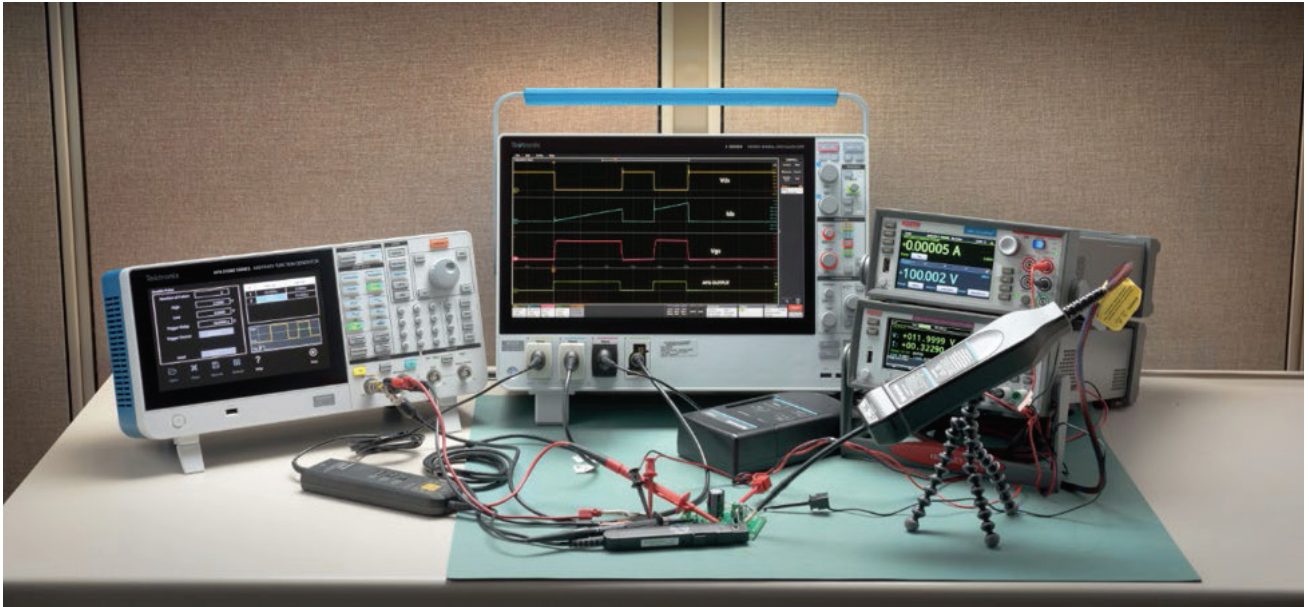


图 12：双脉冲测试设置。

在本例中，我们使用 ST 微电子评估电路板作为 N 通道功率 MOSFET 和 IGBT 的评测电路板，也就是图 13 中所示的 EVAL6498L。

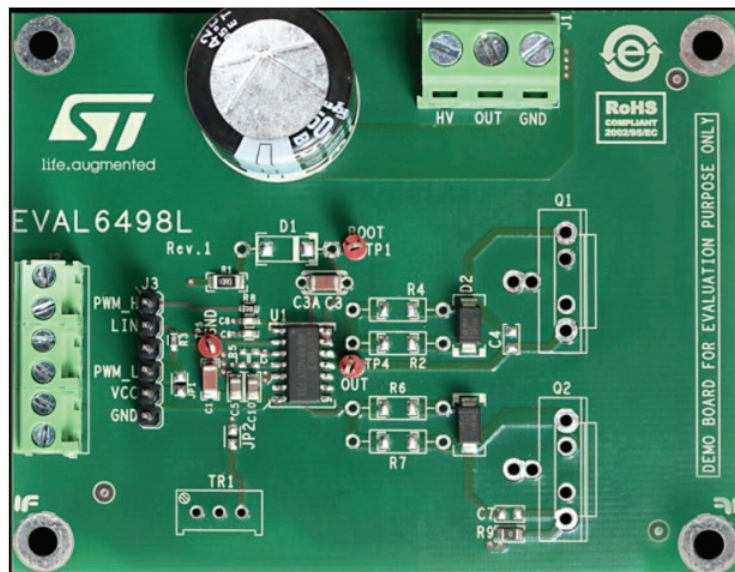


图 13：EVAL6498L； <https://www.st.com/en/evaluation-tools/evao6498l.html>。

使用的 MOSFETs 也来自 ST 微电子：STFH10N60M2。这些是 N 通道 600V MOSFETs，额定值是 7.5A 漏极电流。



测试电路中使用的其他设备和器件包括：

- 泰克 MSO54 示波器：1 GHz, 6.25 GS/s
- 泰克电流探头 TCP0030A–120 MHz
- 泰克高压差分探头：TMDP0200
- 吉时利 DC 电源 – 2280S ( 为门驱动器 IC 供电 )
- 吉时利 2461 SMU 仪器 ( 为电感器提供电压 )
- 电感器：~1 mH

电源连接如下：

- MOSFETs 焊接到电路板上。Q2 在低侧，Q1 在高侧。
- Q1 上的栅极和源极必需短路，因为 Q1 不会打开。
- Q2 的栅极电阻器要进行焊接。R= 100Ω。
- AFG31000 的 CH1 连接到评测电路板的 PWM\_L 输入和 GND 输入上。
- 吉时利电源连接到评测电路板的 Vcc 和 GND 输入上，为门驱动器 IC 供电。
- 吉时利 2461 SMU 仪器连接到 HV 和 GND 上，为电感器供电。
- 然后把电感器连接到 HV 和 OUT 上。

## 双脉冲测试测量

一旦安全连接了所有电源线，我们可以把探头从示波器连接到 Q2 ( 低侧 MOSFET)，如图 14 所示。

- IsoVu 探头连接到 VGS。
- 差分电压探头连接到 VDS。
- TCP0030A 电流探头经过 MOSFET 源引线上的环路。

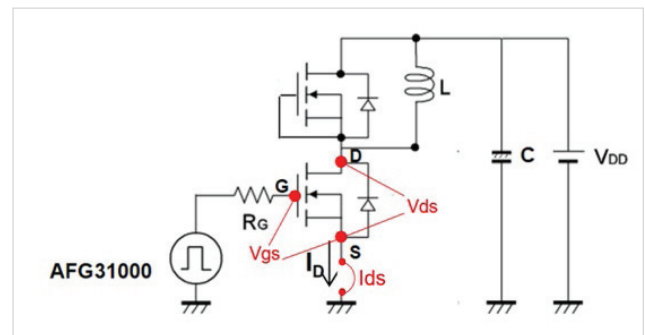


图 14：示波器测量测试点。

通过审慎的探测和优化，用户可以获得很好的结果。用户可以采取几个步骤，来进行准确的可重复的测量，比如从测量中消除电压、电流和定时误差。如需更详细的信息，请参阅下面的应用指南：“使用示波器测量电源开关损耗”。[2]

现在可以在 AFG31000 上设置双脉冲测试，如图 15 中的截图所示。

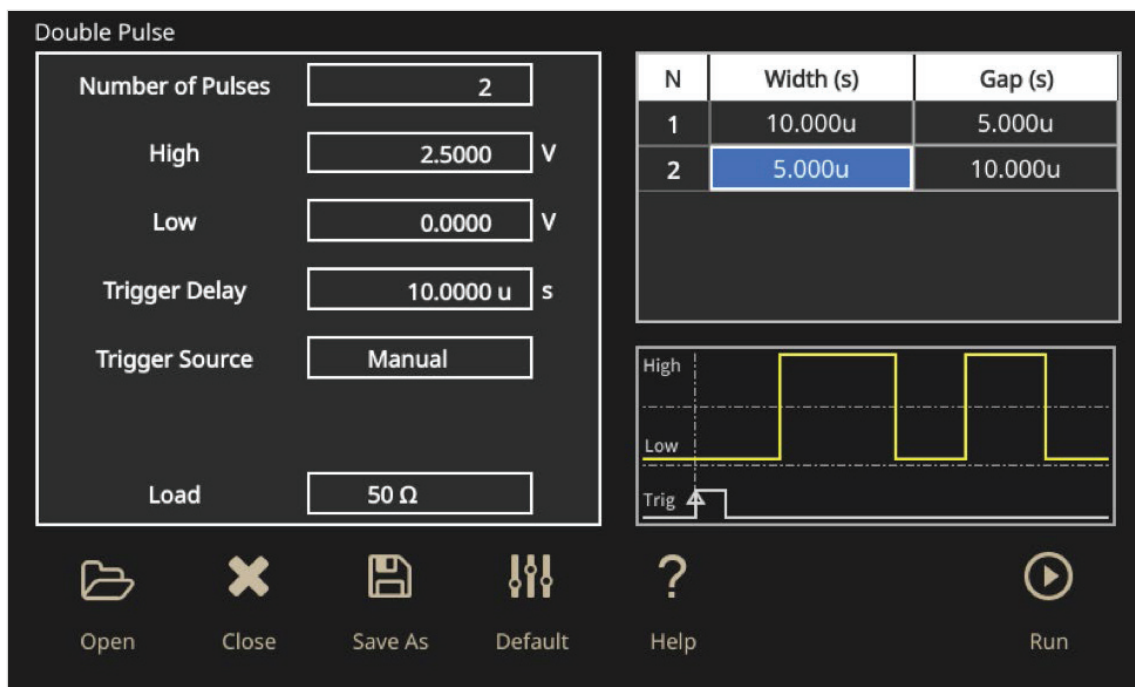


图 15：AFG31000 上的双脉冲测试设置。

脉冲幅度设置成 2.5 V。第一个脉冲的脉宽设置成 10 $\mu$ s，间隙设置成 5 $\mu$ s，第二个脉冲设置成 5 $\mu$ s。触发设置成手动。

SMU 仪器设置成为 HV 提供 100 V 电压。然后把 5 系列 MSO 设置成进行单次触发测量。现在触发 AFG31000 输出脉冲。然后在示波器上捕获得到的波形，如图 16 所示。

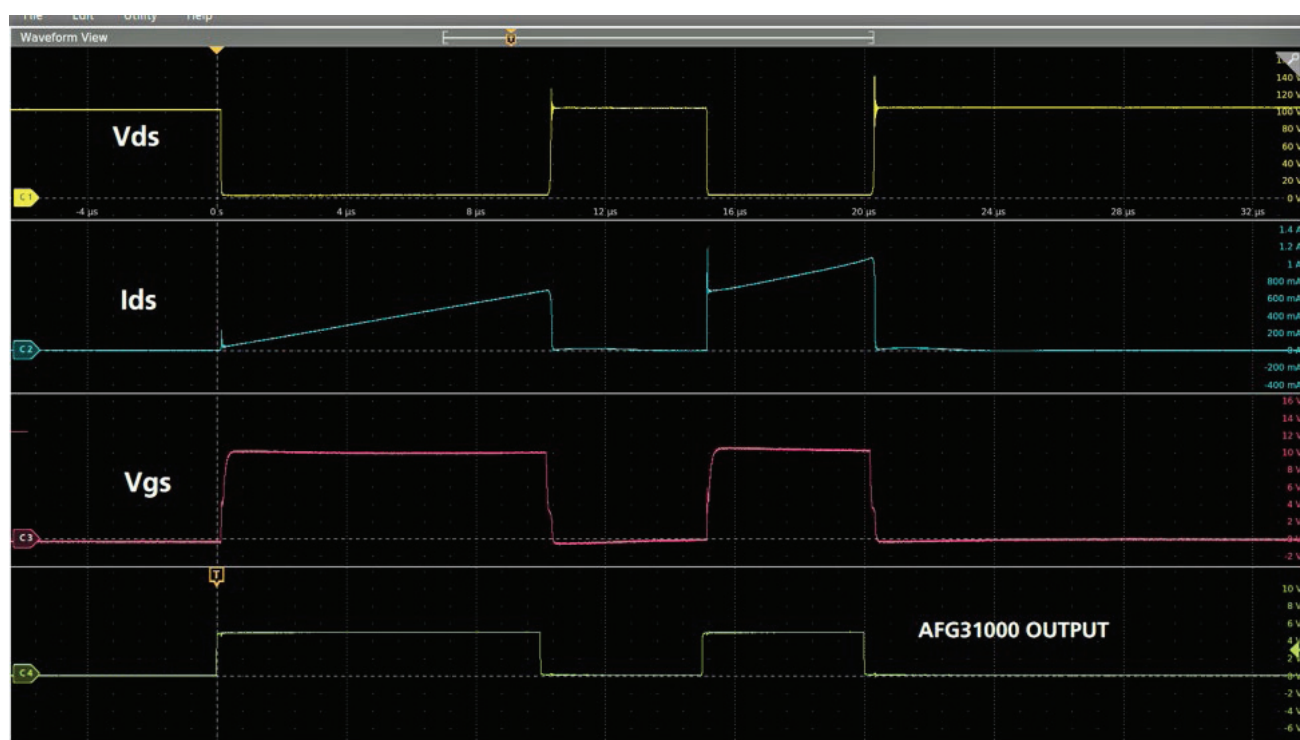


图 16：双脉冲测试波形。

注意图 16 中的波形与图 8 中类似。 $I_{ds}$  上看到电流过冲也是由高侧 MOSFET/IGBT 中续流二极管的 AFG31000 导致的。这个尖峰是使用的器件固有的特点，会导致损耗。

## 测量启动和关闭定时和能量损耗

为计算启动和关闭参数，我们看一下第一个脉冲的下降沿和第二个脉冲的上升沿。

图 17 显示了测量启动和关闭参数的行业标准。

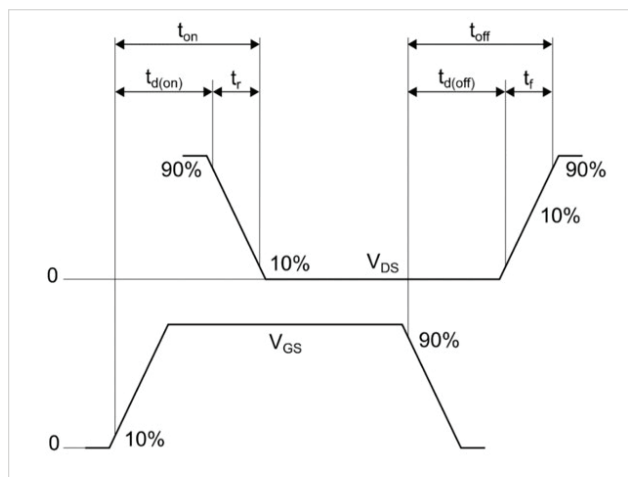


图 17：开关时间标准波形 [5]。

- $t_{d(on)}$ :  $V_{GS}$  是 10% 的峰值与  $V_{DS}$  是 90% 的峰值幅度之间的时间间隔。
- $T_r$ :  $V_{DS}$  是 90% 的峰值幅度与 10% 的峰值幅度之间的时间间隔。
- $t_{d(off)}$ :  $V_{GS}$  是 90% 的峰值与  $V_{DS}$  是 10% 的峰值幅度之间的时间间隔。
- $T_f$ :  $V_{DS}$  是 10% 的峰值幅度与 90% 的峰值幅度之间的时间间隔。

图 18 显示了示波器上捕获的波形及启动参数测量。可以使用光标检索定时参数。可以使用数学功能计算转换过程中的启动损耗。5 系列 MSO 还能够使用示波器上的 5-PWR 软件包执行自动开关损耗测量，具体可参见 tek.com 网站中的下述产品技术资料：“高级功率测量和分析”。[7]

可以使用下面的公式计算转换过程中的能量损耗：

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

在本例中，使用示波器上的积分函数，得到  $4.7\mu J$ 。

这个能量损耗相对较小，因为在测试过程中只应用了标称电压和电流电平。



注：示波器截图中显示的数据仅供参考。

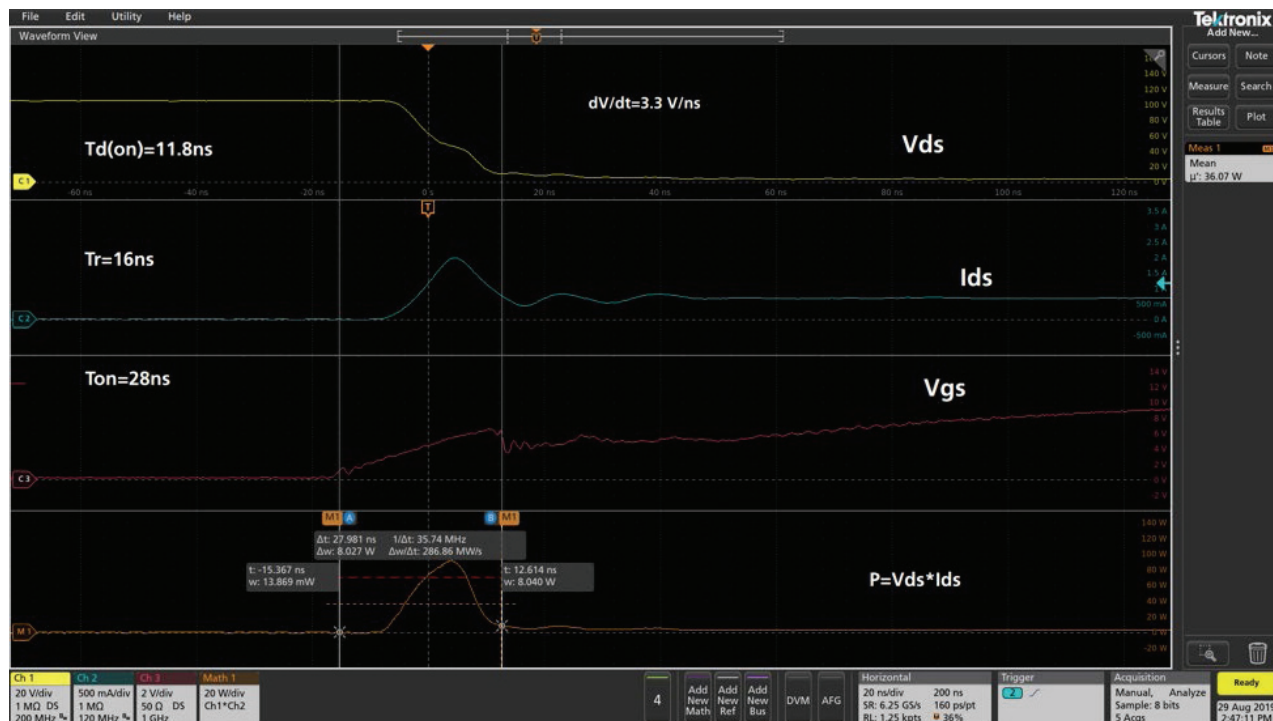


图 18：启动参数波形。

图 19 显示了使用示波器光标获得的关闭波形测量。



图 19：关闭参数波形。

可以使用数学功能，计算出转换期间的关闭损耗。

使用示波器的积分函数，得到  $1.68\mu\text{J}$ 。

使用上面的同一公式，计算出关闭转换期间的能量损耗：

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

这个能量损耗也相对较小，因为在测试过程中只应用了标称电压和电流电平。

## 测量反向恢复

现在需要测量 MOSFET 的反向恢复特点。

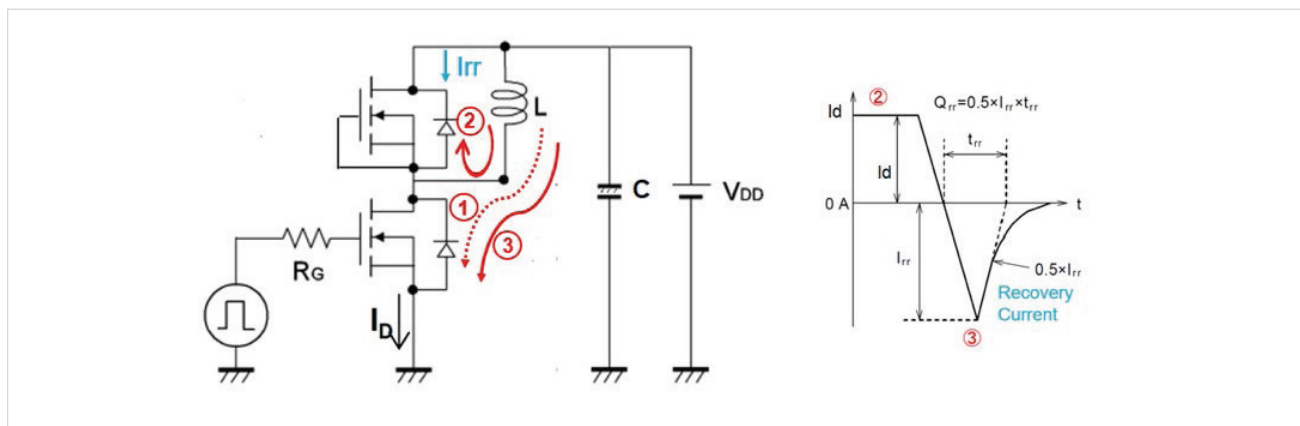


图 20：二极管反向恢复。

反向恢复电流发生在第二个脉冲启动过程中。如图 20 所示，二极管在第 2 阶段在正向条件下传导。在低侧 MOSFET 再次启动时，二极管应立即切换到反向阻塞条件，但二极管将在反向条件下传导很短的时间，称为反向恢复电流。这种反向恢复电流转换成能量损耗，会直接影响功率转换器的效率。

现在在高侧 MOSFET 上完成测量。 $I_d$  通过高侧 MOSFET 测得， $V_{\text{sd}}$  经二极管测得。

图 20 还显示了怎样检索反向恢复参数。

- **反向恢复参数：**  $t_{\text{rr}}$  (反向恢复时间)、 $I_{\text{rr}}$  (反向恢复电流)、 $Q_{\text{rr}}$  (反向恢复电荷)、 $E_{\text{rr}}$  (反向恢复能量)、 $di/dt$  和  $V_{\text{sd}}$  (前向开电压)。

图 21 所示波形是在 SMU 仪器应用 20 V 时捕获的。我们使用光标检测定时参数，然后使用数学功能，计算出转换过程中的反向恢复能量损耗。

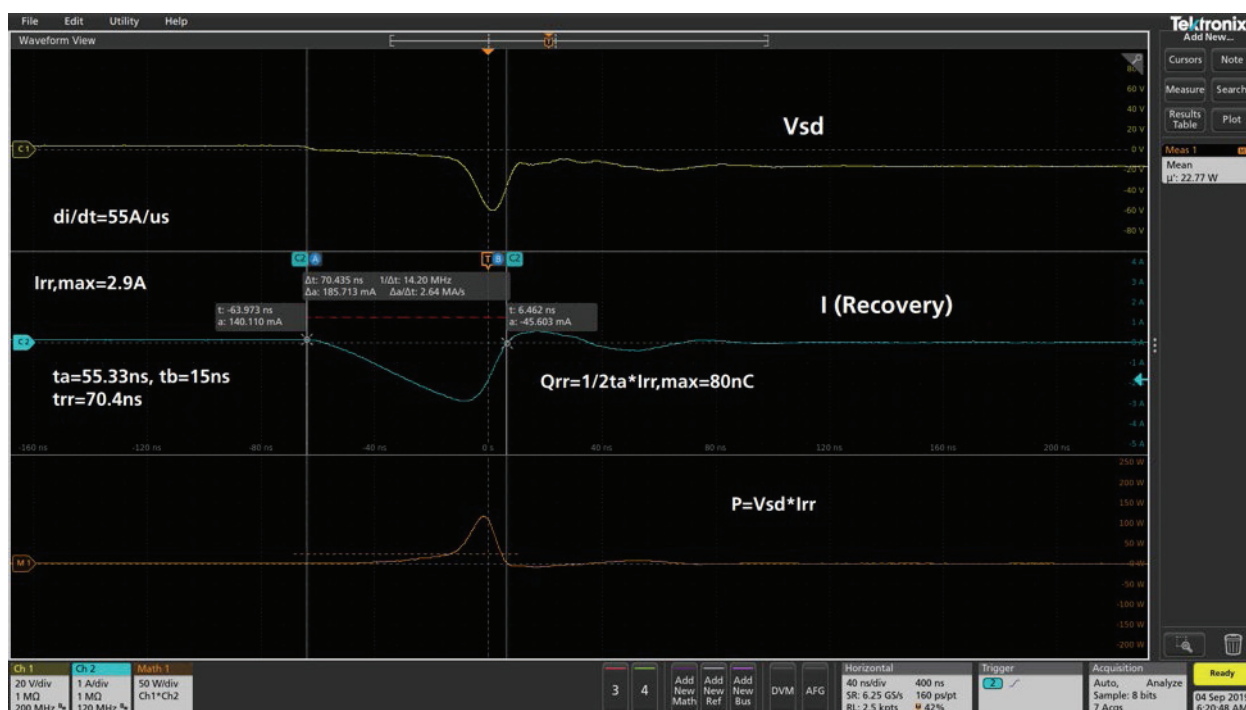


图 21：反向恢复波形。

然后使用下面的公式计算转换过程中的能量损耗：

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

使用示波器的积分函数，得到  $7\mu J$ 。

## 总结

在测量功率器件的开关参数，评估功率器件的动态特点时，双脉冲测试是首选的测试方法。使用这一应用的测试和设计工程师都会关注转换器的开关损耗。测试要求两个不同脉宽的电压脉冲，由于创建不同脉宽的脉冲耗时很长，因此这是用户的主要痛点。其中部分方法包括在 PC 上创建波形，然后上传到函数发生器；使用微控制器，这要求大量的编程工作和时间。本应用指南表明，泰克 AFG31000 任意函数发生器提供了一种简明的方式，可以在前面显示器上直接创建不同脉宽的脉冲。双脉冲测试应用将为用户节省大量的时间和资金。它可以迅速设置和输出脉冲，从而让设计和测试工程师把重点放在收集数据、设计更高效的转换器上。

## 参考资料

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. Infineon: IGBT 和 FWD 双脉冲测试 – 原理  
<https://u.dianyuan.com/upload/space/2011/07/29/1311925659-501009.pdf>
4. <https://training.ti.com/understanding-mosfet-datasheets-switching-parameters>
5. <https://www.mouser.com/datasheet/2/389/stfh10n60m2-974335.pdf>
6. [https://www.st.com/resource/en/data\\_brief/eval6498l.pdf](https://www.st.com/resource/en/data_brief/eval6498l.pdf)
7. <https://www.tek.com/datasheet/advanced-power-measurement-and-analysis>
8. <https://www.tek.com/document/application-note/measuring-vgs-wide-bandgap-semiconductors>



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

**KEITHLEY**

A Tektronix Company

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。

092619 SBG 75C-61623-0

