

# 使用泰克 AFG31000 任意函数发生器 进行双脉冲测试

## 应用指南



**KETHELEY**  
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，都对电气产品和设备提出了能效要求。不管是从发电角度还是从消费角度，功率电子都要求提高能效，**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。<sup>[1]</sup>

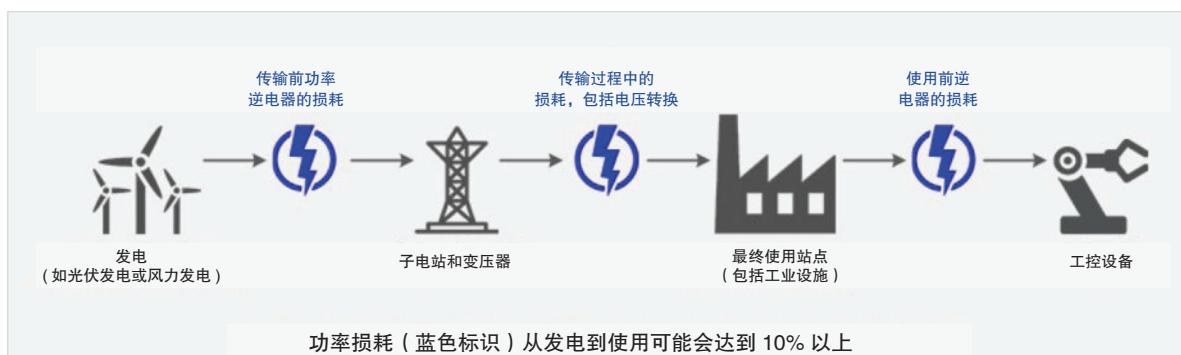


图 1：发电、传送和消费各点发生的功率损耗 [1]。

在设计功率转换器时，理想的功率损耗是 0%，**如图 2 所示**。

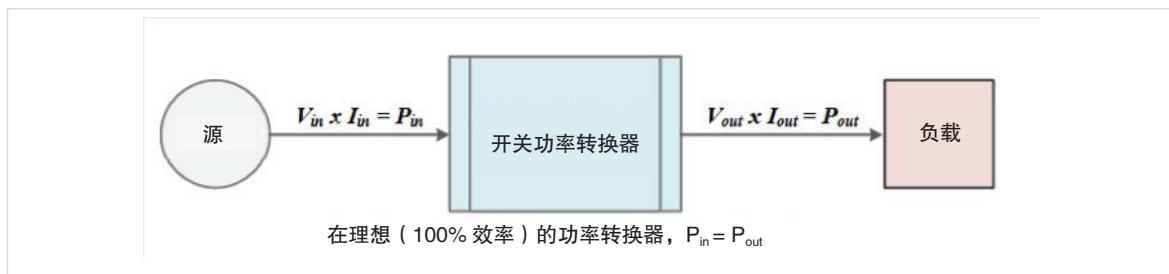


图 2：理想的功率转换效率 [1]。

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。<sup>[2]</sup>

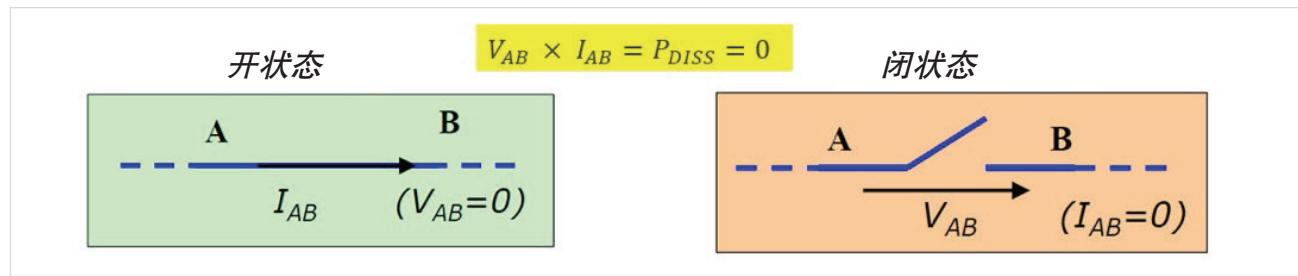


图 3. 理想的开关。

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]

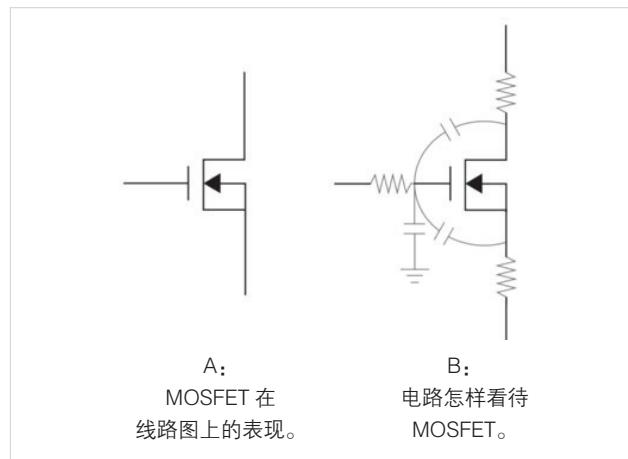


图 4: A: MOSFET 在线路图上的表现。B: 电路怎样看待 MOSFET。

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 ( $tr$ )、  
 $t_{on}$  (启动时间)、 $E_{on}$  (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 ( $tf$ )、 $t_{off}$  (关闭时间)、 $E_{off}$  (关能量)、 $dv/dt$  和  $di/dt$ 。然后确定能量损耗。[4]
- **反向恢复参数：** $t_{rr}$  (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  $V_{sd}$  (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。

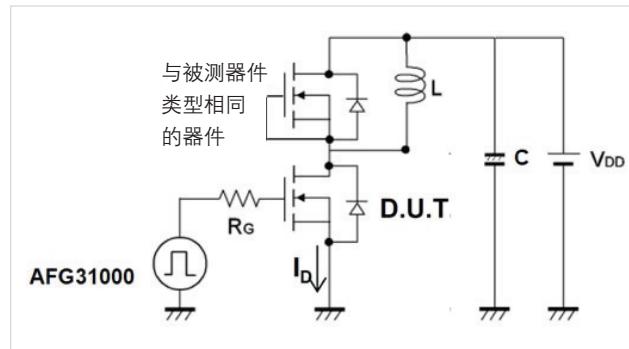


图 5：双脉冲测试电路。

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。

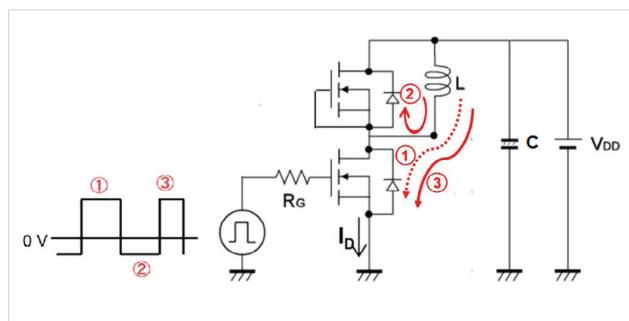


图 6：使用 MOSFETs 作为 DUTs 时的电流流动。

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。

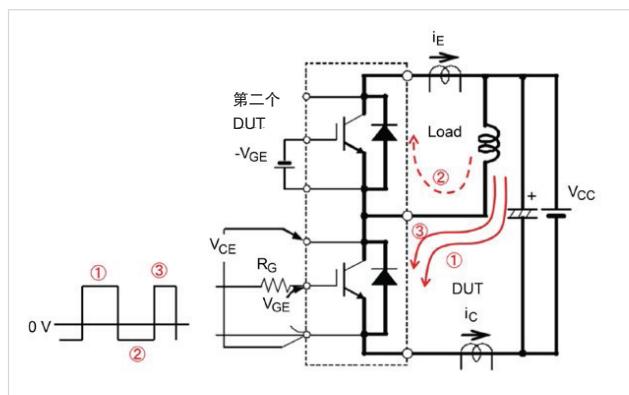


图 7：使用 IGBTs 作为 DUTs 时的电流流动。

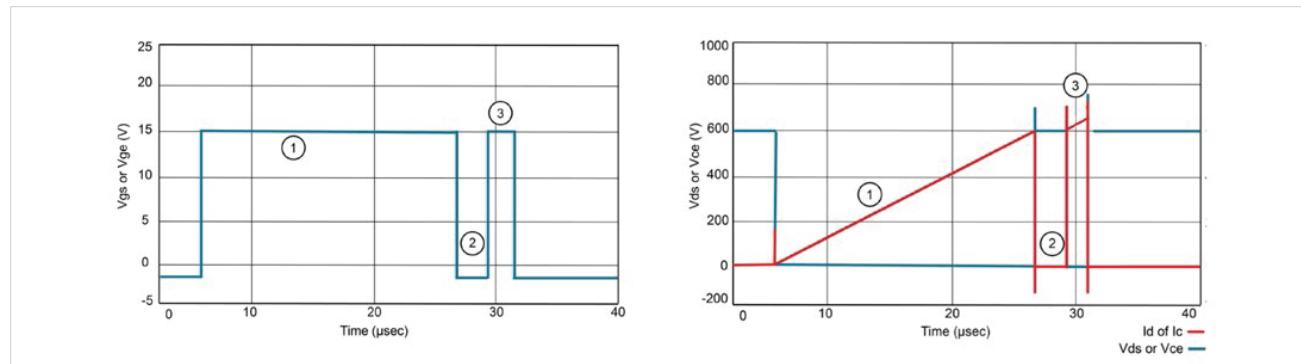


图 8：双脉冲测试的典型波形。

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 的续流二级管反向恢复引起的。
- 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  $I_{do}$ 。
- 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。

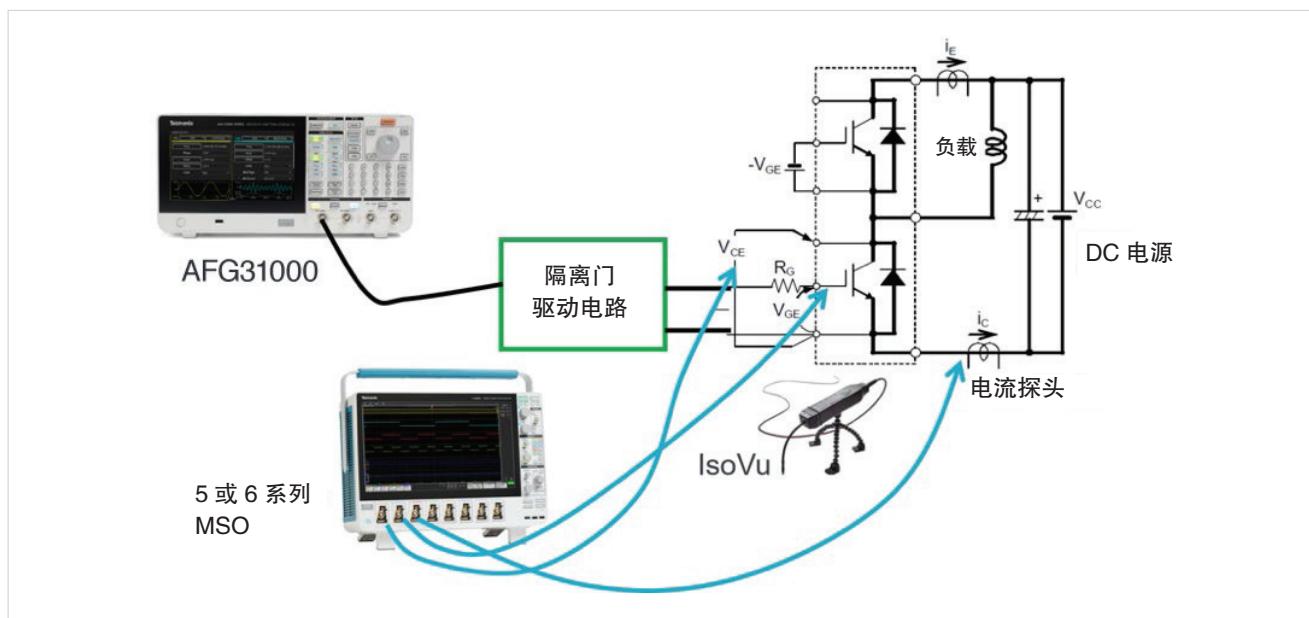


图 9：双脉冲测试设置

AFG31000 双脉冲测试应用可以直接从 [tek.com](https://www.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。

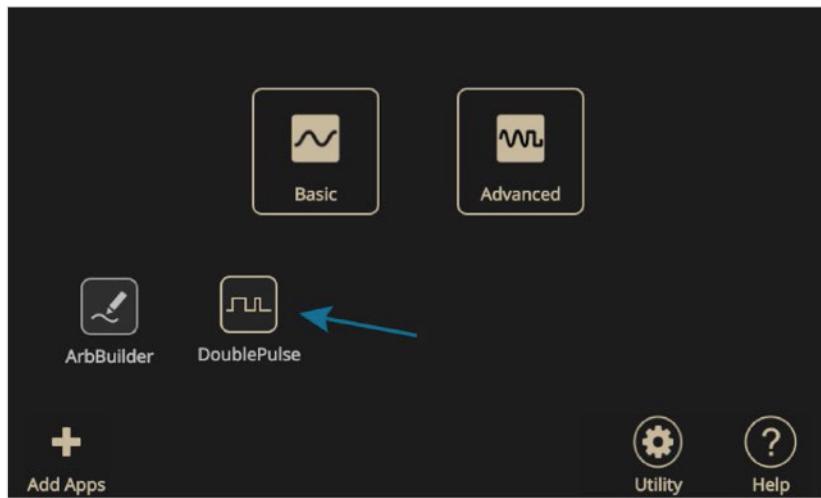


图 10：AFG31000 主屏。

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 –  $50\Omega$  或高阻抗

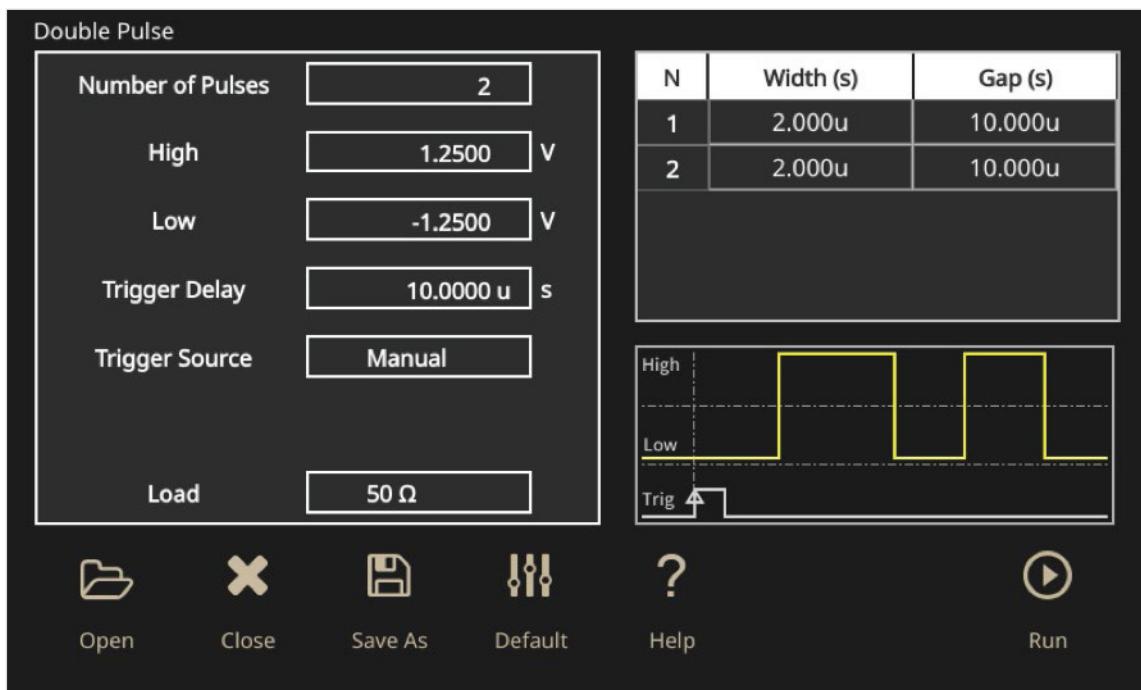


图 11：AFG31000 上的双脉冲测试应用。

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。

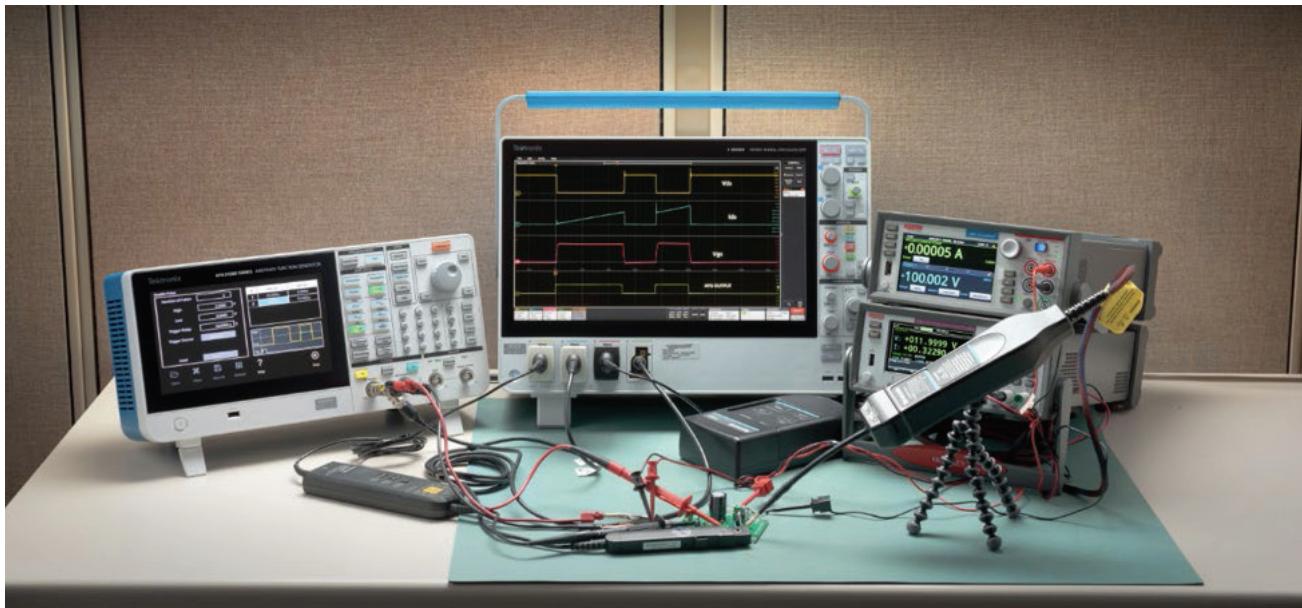


图 12：双脉冲测试设置。

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/eva06498l.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。 $R = 100\Omega$ 。
- AF31000 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。

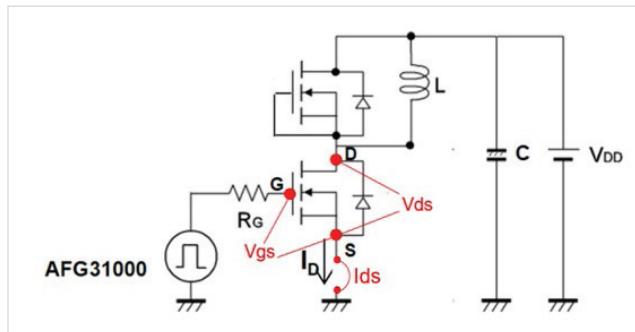


图 14：示波器测量测试点。

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。

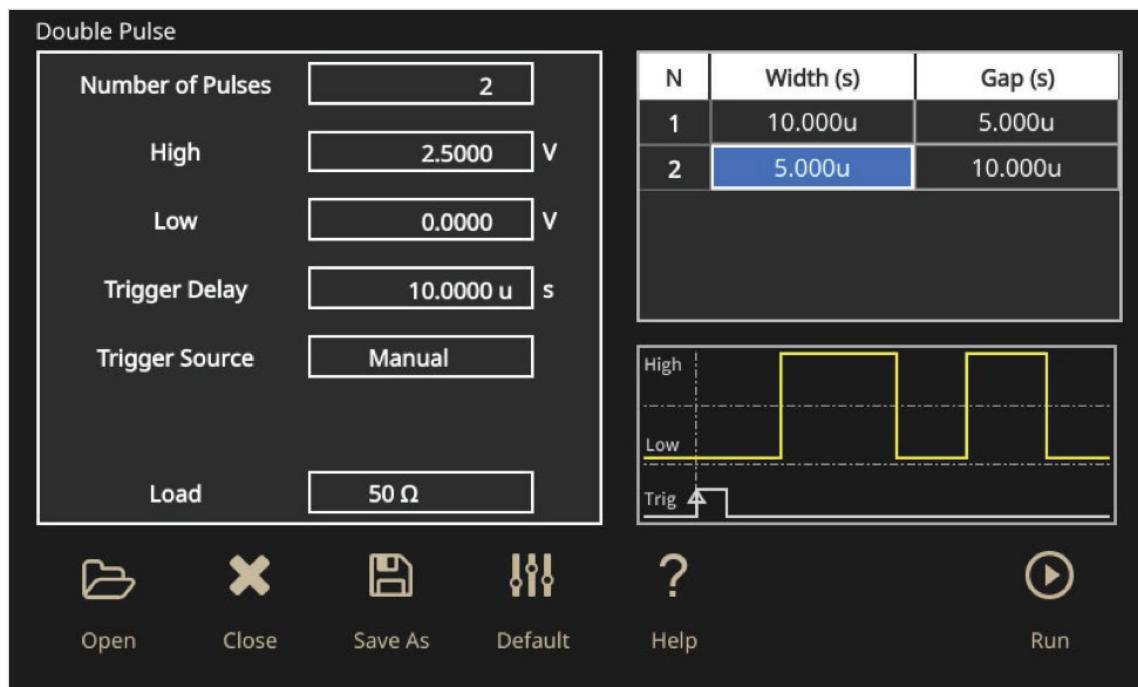


图 15：AFG31000 上的双脉冲测试设置。

脉冲幅度设置成 2.5 V。第一个脉冲的脉宽设置成 10μs，间隙设置成 5μs，第二个脉冲设置成 5μs。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。

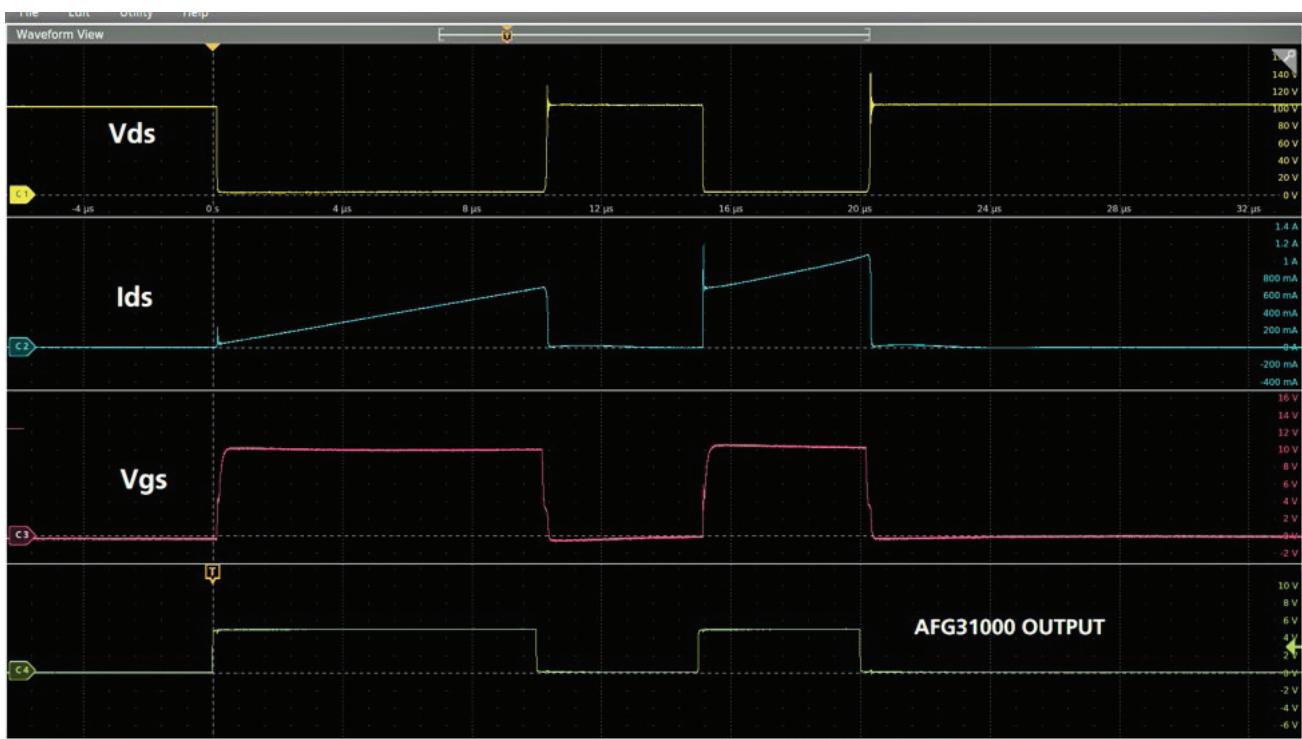


图 16：双脉冲测试波形。

注意图 16 中的波形与图 8 中类似。Ids 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。

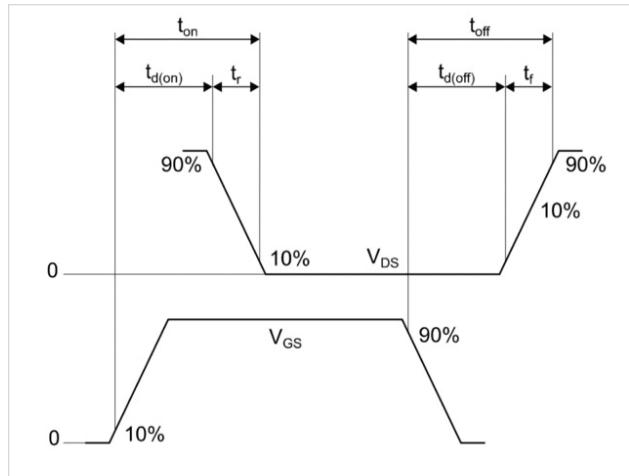


图 17：开关时间标准波形 [5]。

- **$t_{d(on)}$** :  $V_{GS}$  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。

# 使用泰克 AFG31000 任意函数发生器进行双脉冲测试

应用指南

注：示波器截图中显示的数据仅供参考。

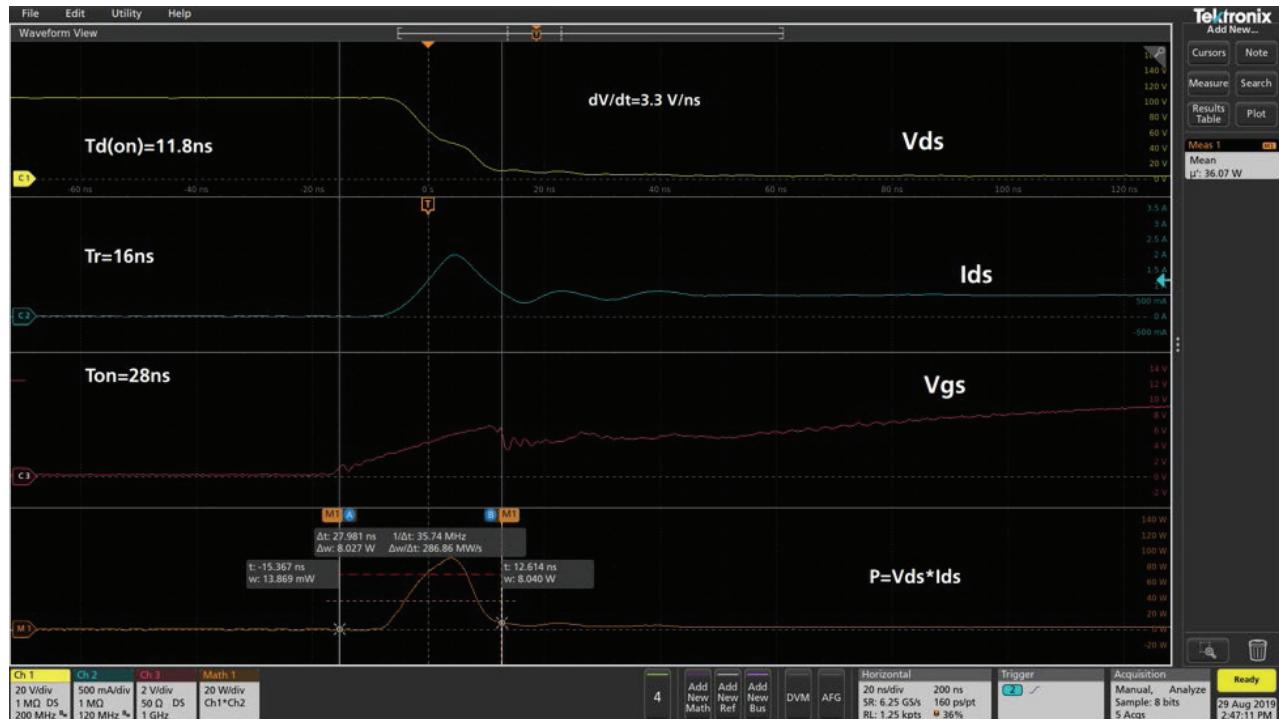


图 18：启动参数波形。

图 19 显示了使用示波器光标获得的关闭波形测量。

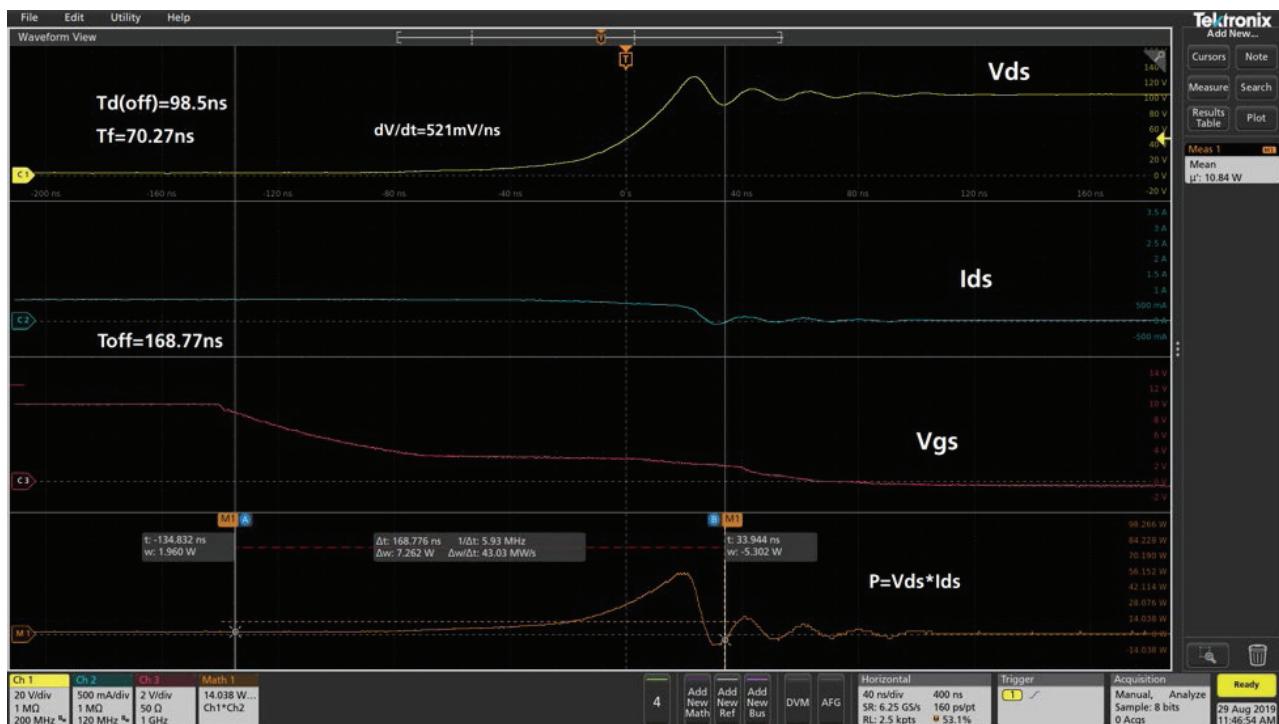


图 19：关闭参数波形。

可以使用数学功能，计算出转换期间的关闭损耗。

使用上面的同一公式，计算出关闭转换期间的能量损耗：

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

使用示波器的积分函数，得到  $1.68\mu J$ 。

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。

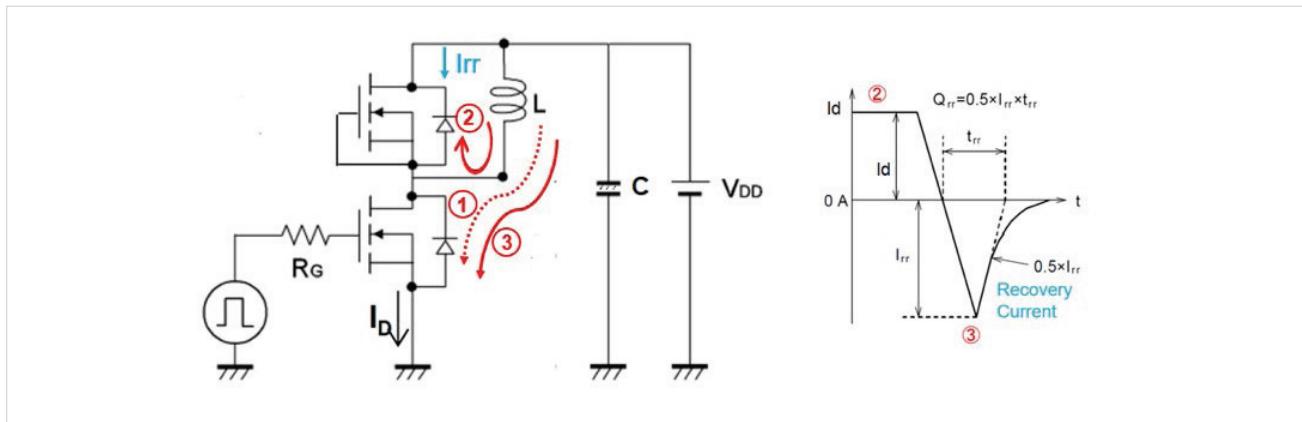


图 20：二极管反向恢复。

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， $V_{sd}$  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：** $t_{rr}$  ( 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  $V_{sd}$  ( 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。

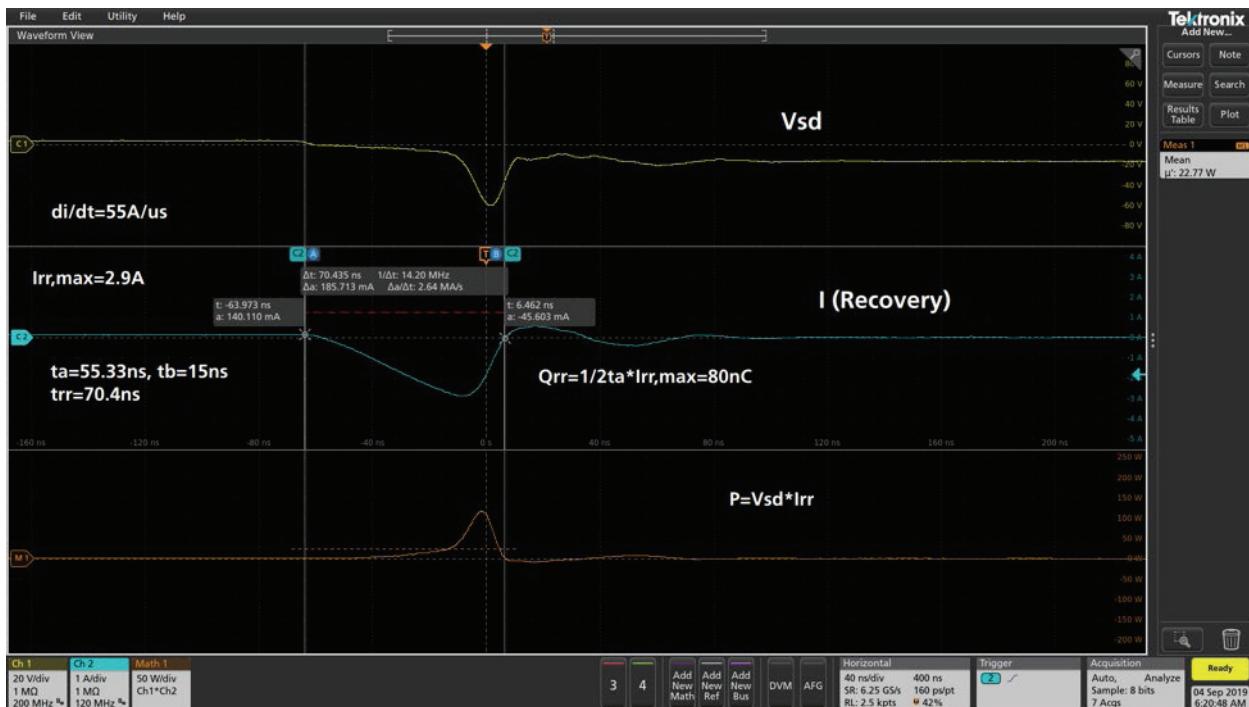


图 21：反向恢复波形。

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

- <https://www.tek.com/document/technical-brief/evolving-materials-and-testing-emerging-generations-power-electronics>
- <https://www.tek.com/document/application-note/measuring-power-supply-switching-loss-oscilloscope>
- Infineon: IGBT 和 FWD 双脉冲测试 – 原理  
<https://u.dianyuan.com/upload/space/2011/07/29/1311925659-501009.pdf>
- <https://training.ti.com/understanding-mosfet-datasheets-switching-parameters>
- <https://www.mouser.com/datasheet/2/389/stfh10n60m2-974335.pdf>
- [https://www.st.com/resource/en/data\\_brief/eval6498l.pdf](https://www.st.com/resource/en/data_brief/eval6498l.pdf)
- <https://www.tek.com/datasheet/advanced-powermeasurement-and-analysis>
- <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 和泰克微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

