

双脉冲测试演示装置

TF1000D



深圳市知用电子有限公司

前言



警告

为安全使用本机器

TF1000D 双脉冲测试演示装置内含一个 1000V 的高压电源，在本装置工作时，内部电路和输出端口可能存在 1000V 的直流高压。为了保证用户的人身安全，必须严格遵守以下安全注意事项，并按如下说明进行使用。此外，因违反注意事项进行操作所产生的问题，本公司概不负责。

- ◆ 当内部电路和输出端口存在直流高压时，本装置的液晶显示屏会显示电源电压的大小，高于 36V 是不安全的，禁止一切接线操作。
- ◆ 当内部电路和输出端口存在直流高压时，本装置红色高压指示灯高于 36V 会点亮，此时本装置是不安全的，禁止一切接线操作。
- ◆ 必须先触摸屏上进行关闭高压电源的操作，等到高压电源电压放电到低于 36V 且红色高压指示灯不亮后，才可以接入或移除电流电压探头。
- ◆ 本装置属高压设备，用户不可自行拆卸或维修本装置。否则会引起严重的安全问题
- ◆ 本装置属高压设备，用户必须有一定的电学基础同时要严格按照本说明书的要求进行使用。

一、概述

TF1000D 是一款集成了高压电源、功率电感、双脉冲信号发生器、UI 控制界面等完整核心组件的便携式双脉冲测试仪。

- ✧ 本装置设计有供电电压探头使用的便捷式接驳端子，可便捷且精准地将功率半桥拓扑结构的测试波形读取至用户示波器上，以充分展示本公司探头在高速功率器件级动态测试实验过程中的优异性能，工程师无需再额外配置外围仪器仪表。
- ✧ 本装置可帮助工程师测试表征 TO-247-3L/ TO-247-4L 封装 SiC MOSFET 单管器件的动态性能，其主体电路包含主电路回路和驱动电路两部分，得益于整体低杂散电感的电路设计，当 MOSFET 快速通断且达到 500V/15ns (dv/dt 高达 33KV/us) 时，器件两端的波形震荡仍可控制在极低水平，以便于精确测量计算被测 SiC MOSFET 器件的动态参数。
- ✧ 本装置上部电路板区域集成了各类电流电压探头的接入端口，均根据精确测量的要求布局设计，以充分发挥出探头性能；针对高压差分探头的采用定制型 4mm 香蕉插座，在降低波形振荡的同时实现对 500MHz 高速电压信号进行低失真测量采集。对于高速电流采集：设置了两个本公司最新型螺栓型同轴分流器，分别用于检测上管及下管的高速电流波形。此新型螺栓型同轴分流器可较为简便地进行徒手安装和拆卸，或快速替换各不同阻值的同轴分流器。
- ✧ 本装置可以通过前面的可视化 UI 软件控制界面，可快速准确地切换双脉冲实验的不同测试项目（DUT 器件开关特性/反向恢复特性）的硬件电路连接。软件设置时会同步配置上/下桥臂的驱动器，内部继电器，以及空心电感接入位置，工程师可快速准确作设置切换并避免错误设置。

TF1000D 双脉冲测试演示装置整体尺寸仅有 214*193*123mm，非常便于携带及演示。

二、双脉冲测试简介

双脉冲（Double Pulse Test）测试是一种测量评估功率半导体器件的动态开关性能和指标参数的测试方法，属于一种以半桥结构为基础的电感型负载开关电路。电力电子工程设计人员和测试工程师会采用双脉冲测试方式来量测以下各类开关参数：

➤ 开通参数：

开通延迟 $T_{D(ON)}$ 、上升时间 T_R 、开通损耗 E_{ON} 、瞬态电压电流变化率 $dv/dt_{(ON)}$ 和 $di/dt_{(ON)}$ 。

➤ 关断参数：

关断延迟 $T_{D(OFF)}$ 、下降时间 T_F 、关断能量 E_{OFF} 、瞬态电压电流变化率 $dv/dt_{(OFF)}$ 和 $di/dt_{(OFF)}$ 。

➤ 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_{REC} 、峰值电压尖峰 $V_{RR Peak}$ 等

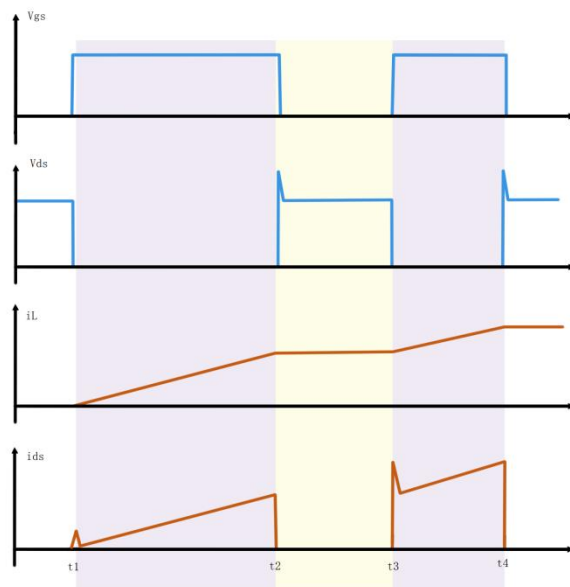
双脉冲测试方法：基于半桥拓扑结构，待测器件分别位于高侧 High-Side（简称为上管）和低侧 Low-Side（简称为下管），对其中一个 MOSFET/IGBT 的门极发出一组（连续的两个）驱动脉冲信号，测试过程中对另一个 MOSFET/IGBT 一直施加关断信号（施加零或负电压）。此方法不仅操作简单，同时因无需连续施加门极脉冲信号来控制 MOSFET/IGBT 开通反复开通关断，故上/下管的开关损耗也不会持续产生，避免了导致器件发热后影响测试结果的情况。

双脉冲测试法只需要通过施加两个脉冲信号，便可以获得指定电流和电压条件下的 MOSFET/IGBT 的动态开关特性参数，测量并保留上/下管器件在关断和开通时刻的 V_{GS} I_{DS} V_{DS} 波形，即可进行分析和评估。以最常用的测试方法示例说明：基于完整的半桥电路，若要测得一侧器件的全部动态参数，则需要分别进行两种不同电路联接的配置和测试。

	驱动下管 Q2 模式	驱动上管 Q1 模式
主电路	空心电感并联在半桥电路中点(图示下管 Q2 的 D 电极上侧)和电源 DC+之间	空心电感并联在半桥电路中点(图示下管 Q2 的 D 电极上侧)和 DC-之间
控制方式	Q1 关闭, 等效为一个二极管 Q2 施加双脉冲信号实现开通和关断	Q1 施加双脉冲信号实现开通和关断 Q2 关闭, 等效为一个二极管
测试结果	Q1 的体二极管动态参数 (反向特性) Q2 的动态特性参数 (开通和关断)	Q1 的动态特性参数 (开通和关断) Q2 的体二极管动态参数 (反向特性)
方法特点	Q2 是在低电位, 不需要浮地测量	Q1 是在高电位, 必须要采用浮地测量
适合对象	单管和半桥模块	半桥模块及多相全桥模块

三、双脉冲测试的原理分析

以驱动下管模式的双脉冲测试为例分析原理如下:



t1-t2 (第一个脉冲周期)	t2-t3 (脉冲间歇)	t3-t4 (第二个脉冲周期)
母排电容承受高压, 始终 Q1 保持关断, Q2 导通之后电流及电感电流由零开始线性增加, 直至达到目标电流值	Q2 关断, 但由于电感的存在电流无法突变, 则电换流至 Q1 与电感形成的续流回路内, 电感电流缓慢略微下降	Q2 重新开通, 电流重新流向 Q2, Q2 电流则继续上升, 电感电流继续增加

t1 时刻 Id 的尖峰电流是空芯电感 L 的杂散电容引起的		t3 时刻 Id 的尖峰电流是 Q1 二极管的反向恢复电流
	t2 时刻 Vds 尖峰是直流母线杂散电感 Ls 与 Id 电流的 di/dt 的乘积	t4 时刻 Vds 尖峰是直流母线杂散电感 Ls 与 Id 电流的 di/dt 的乘积

双脉冲测试可以分析的动态参数如下:

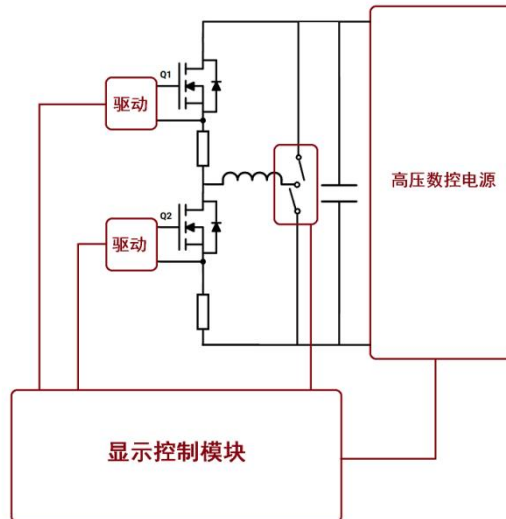
测试类型	符号	参数/特性表征
双脉冲测试(上、下管)	td(on)	第二次开通延时时间
	tr	第二次开通上升时间
	ton	第二次开通时间
	Eon	第二次开通能量损耗
	td(off)	第一次关断延时时间
	tf	第一次关断下降时间
	toff	第一次关断时间
	Eoff	第一次关断能量损耗
	Vdsmax	第一次关断电压尖峰
	di/dt(on)	第二次开通电流斜率
	dv/dt(off)	第一次关断电压斜率
	Vgs vs. t	开关特性
	Vds vs. t	开关特性
	Id vs. t	开关特性
反向恢复测试(上、下管)	trr	反向恢复时间
	Qrr	反向恢复电荷
	Err	反向恢复能量损耗
	Irrm	二极管反向恢复电流最大值
	Vrrm	二极管反向恢复电压最大值
	-dirr/dt	二极管反向恢复电流斜率最大值
	dv/dt(Diode)	二极管反向恢复电压斜率最大值
	Vsd	二极管导通电压
	二极管 Id vs. t	开关特性
	二极管 Vds vs. t	开关特性

示例：下表为 Wolfspeed 公司 SiC 半桥模块 CAB006M12GM3 的部分动态参数：

Dynamic Switching & Reverse Recovery								
Code	Test Condition							
CAB006M12GM3	ID=200A VDD=600V VGE=-4/+15V							
	T _{don}	T _R	T _{DOFF}	T _F	E _{ON}	E _{OFF}	E _{RR}	Remark
R _G = 1.5Ω	50	25	80	35	4.7	1.7	0.13	Datesheet
R _G = 1.5Ω	60.4	23.2	97.2	34.4	3.6	1.71	0.18	PowerSemiLab
R _G = 5.0Ω					9.2	2.8		Datesheet
R _G = 5.0Ω					9.3	2.74		PowerSemiLab

四、TF1000D 双脉冲测试演示装置简介

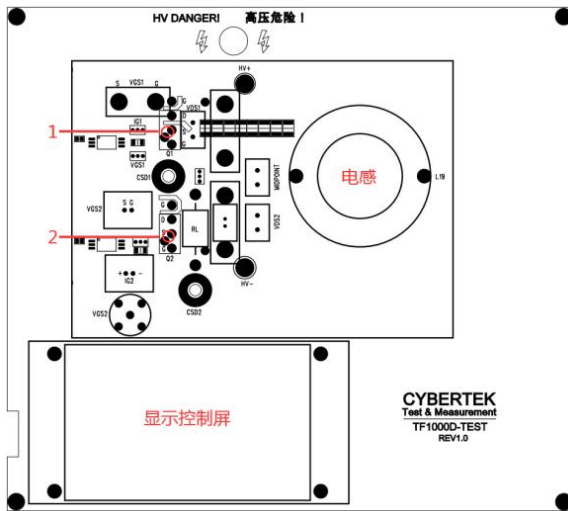
TF1000D 双脉冲测试演示装置的内部功能模块包括：1000V 高压数控电源、双脉冲发生器、高速隔离驱动模块、用于成半桥拓扑的高低侧 SiC MOSFET 器件、可切换模式电感、宽带同轴分流器等双脉冲测试所需的全部功能电路和组件。用户可通过外部 3.5 寸智能触摸屏来设置并执行所有的控制功能。根据下方示意图，我们可以通过软件控制内部继电器，从而实现空心电感的不同连接位置的切换，以配置双脉冲测试中的驱动上管或驱动下管的两种不同模式。



硬件名称	参数	备注
空心电感	$L=0.1\text{mH}$	
高压直流电源	50V-700V	50V 步进（本装置限制 700V）
双脉冲时间初始值	5us/2us/2us	
双脉冲总导通时间范围	2-10uS	1uS 步进
双脉冲截止时间范围	1-10uS	1uS 步进
I_d 电流典型值	$I_d=U*T/L=35\text{A}$	$L=0.1\text{mH}$ $U=500\text{V}$ 5us/2us/2us
驱动模块	驱动芯片	ACPL-W346
	驱动电阻	5R
	驱动电压	15V/-2V
SiC 半桥	C3M0075120K SiC MOSFET (TO-247-4L 封装)*两颗	32A/1200V
V_{DS} 上升时间	500V/15ns	
V_{DS} 下降时间	500V/15ns	

五、TF1000D 双脉冲测试演示装置的探头测试接入点

本装置的电路板上集成了双脉冲测试所需所有探头的接入端子（接驳插座），也可以用于工程师验证电流电压探头的性能。可提供采集的波形如 MOSFET 的输入侧 V_{GS} 、 I_G 波形、输出侧 V_{DS} 和 I_D 波形。



注:

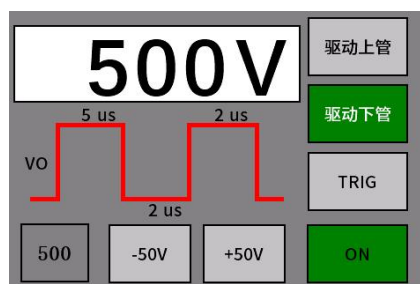
- 1、当使用 T0-247-3L 封装时，务必将红圈内两点短路起来，否则 MOSFET 容易损坏；
- 2、当使用 T0-247-3L 封装时，务必将红圈内两点短路起来，否则 MOSFET 容易损坏；

测试区域	项目	项目定义	测试点形式	探头类型	可使用探头型号
半桥的上管	V _{GS} 1	上管驱动电压	4mm 香蕉插座	高压差分探头	DPX6150B
			SSMB	光隔离电压探头	OPL6050
	I _G 1	上管驱动电流	SSMB	光隔离电压探头	OPL6050
	I _D 1	上管 DS 电流	BNC	同轴分流器+光隔离电压探头	CSD01M20+OPL6050
	V _{DS} 1	上管 DS 电压	4mm 香蕉插座	高压差分探头	DPX6150B
			5.08 插座	光隔离电压探头	OPL6050
半桥的中点	V _{sw} 半桥中点	测试高压差分探头或光隔离电压探头的 CMRR 效果	SSMB	光隔离电压探头	OPL6050
			4mm 香蕉插座	高压差分探头	DPX6150B
			5.08 插座	光隔离电压探头	OPL6050
半桥的下管	V _{GS} 2	下管驱动电压	SSMB	光隔离电压探头	OPL6050
			BNC	无源探头	P6251
			2.54 插座	低压差分探头	DP6020B
	I _G 2	下管驱动电流	2.54 插座	低压差分探头	DP6020B
	I _D 2	下管 DS 电流	BNC	同轴分流器	CSD01M20
	V _{DS} 2	下管 DS 电压	4mm 香蕉插座	高压差分探头	DPX6150B
			5.08 插座	光隔离电压探头	OPL6050

六、驱动下管模式的双脉冲测试

位于半桥拓扑结构低侧开关下管 S 极与示波器共地，故对待测的器件的测量探头并没有浮地及共模抑制比的要求，通常可采用单管无源探头和低压差分探头来量测漏源电压 V_{DS} 和 V_{GS} 门极电压。另外，如需有高带宽电流测量要求，可使用知用 CSD 系列高速同轴分流器来实现。当同轴分流器使用时（在安装 50 欧姆阻抗匹配器后）可直接接入示波器输入端，无需隔离。可见当采用驱动下管的模式时候，所需外围探头的要求及成本较低。

TF1000D 双脉冲测试仪的设置如下图：



1、测量下管 4 个主要波形：驱动波形 V_{GS2}、驱动电流 I_{G2}、漏极电流 I_{D2}、漏源电压 V_{DS2} 测量漏极电流 I_{D2} 的是本公司生产的高带宽同轴分流器。显示的波形理想纯净，非常有利于双脉冲测试的中 E_{on} 和 E_{off} 的精确计算。

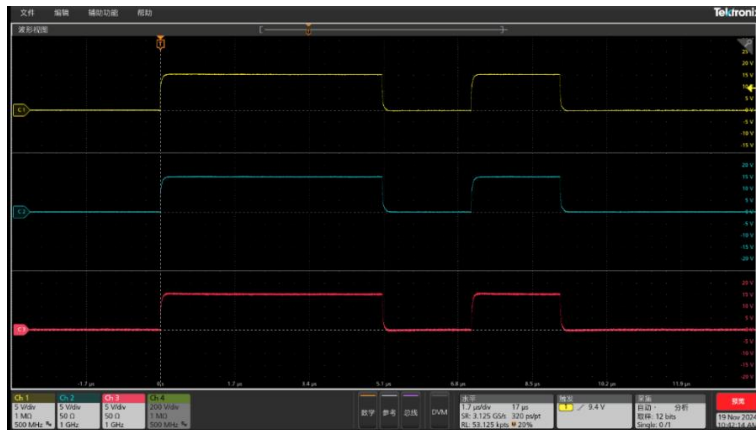
驱动电流 I_{G2} 是采用本公司生产的的低压差分探头测量 5 欧姆驱动电阻上的电压来实现的。

示波器通道	CH1	CH2	CH3	CH4
测试项目	V _{GS2}	I _{G2}	I _{D2}	V _{DS2}
探头类型	10: 1 无源探头	低压差分探头	同轴分流器	高压差分探头
探头型号	P6501	DP6020B	CSD01M20	DP6150



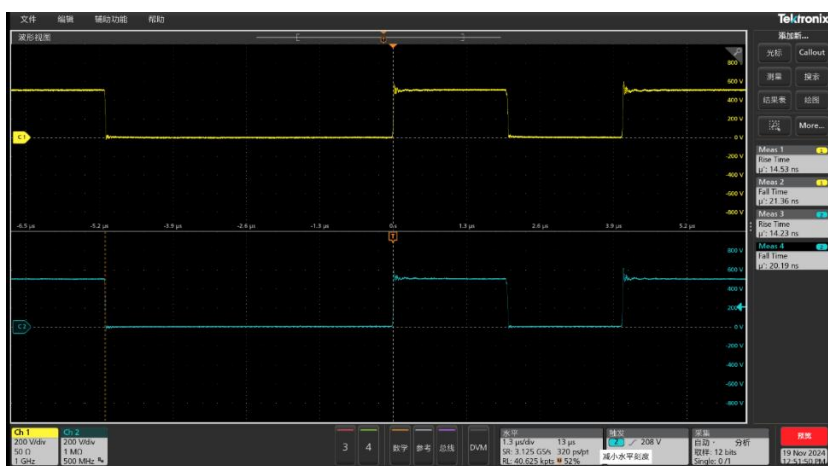
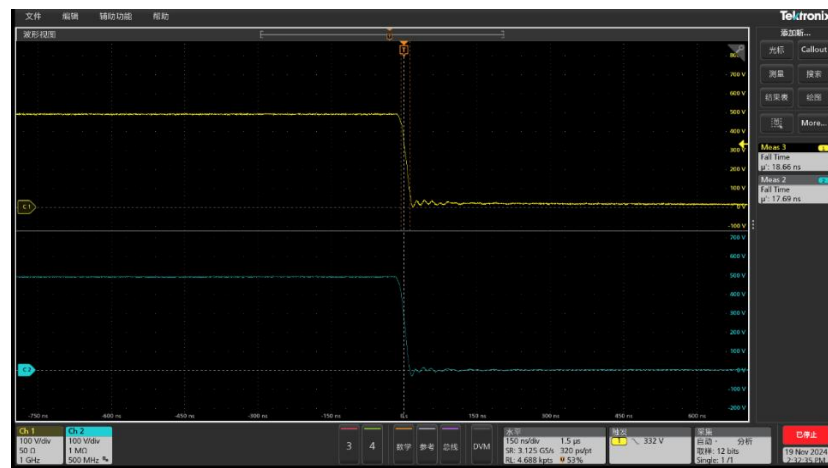
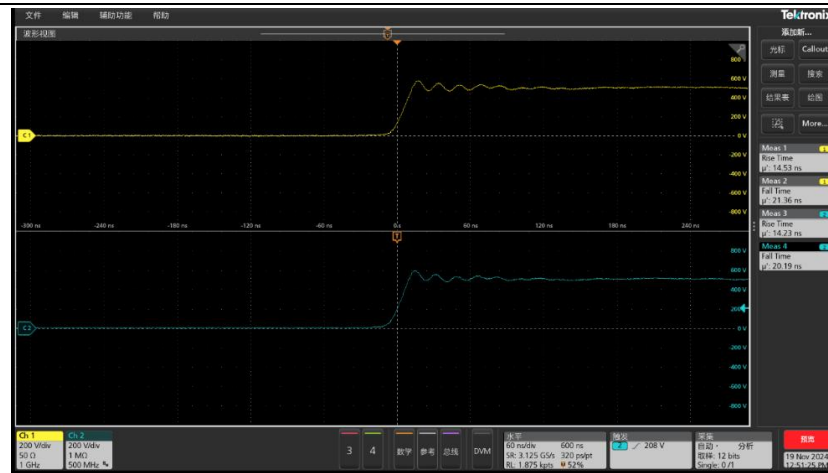
2、三种探头测试 V_{GS} 驱动波形是一致的，相互印证了测量结果的准确性。

示波器通道	CH1	CH2	CH3
测试项目	V _{GS2}	V _{GS2}	V _{GS2}
探头类型	10: 1 无源单端探头	低压差分探头	光隔离电压探头
探头型号	P6501	DP6020B	OPL6050



3、高压差分探头和光隔离电压探头测试 V_{DS} 波形是一致的，相互印证了测量结果的准确性。

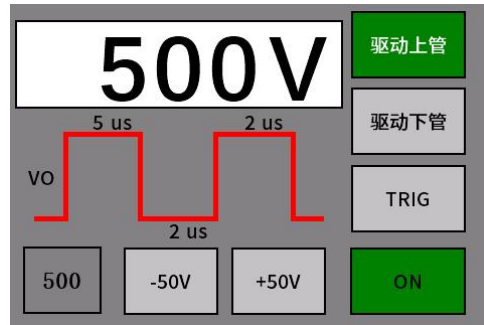
示波器通道	CH1	CH2
测试项目	V _{DS}	V _{DS}
探头类型	光隔离电压探头	高压差分探头
探头型号	OPL6050	DP6150
上升时间	14.5ns	14.3ns
下降时间	21.4ns	20.2ns



七、驱动上管双脉冲测试

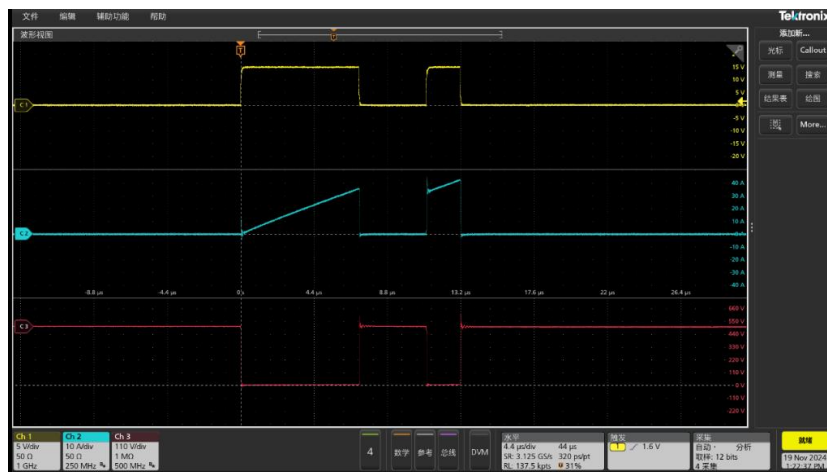
位于半桥拓扑结构的高侧开关器件为高压浮地状态，故此探头必须能承受一定的共模高电压，同时需达到较高的共模抑制比。知用电子的 OPL 和 OPB 系列光隔离电压探头可承受 60kV 共模电压，同时具有极高的共模抑制比，因此非常合适测量上管器件的门极输入侧 V_{GS} 、 I_G 波形、输出侧 V_{DS} 和 I_D （配合同轴分流器）波形。本装置的高低侧器件均采用了 SiC MOSFET 开关器件和对应的高速门极驱动 IC，因此中点（AC）处的电压上升/下降的摆动时间极短，分别可达 500V/15ns 及 33kV/us。此测试环境对于探头的共模抑制性能是一个挑战。

TF1000D 双脉冲测试仪的设置如下图



1、展示了在较快的上升/下降时间（500V/15ns）的共模干扰工况下，使用一个光隔离电压探头测试上管的 V_{GS} 电压，另外一个光隔离电压探头+同轴分流器测试 I_D 电流的实测波形。从波形中可看到两个波形没有受到高频共模干扰的影响，和前面测试下管的 V_{GS} 、 I_D 波形完全一致。此结果印证了知用的光隔离电压探头具有优异的共模抑制比。

示波器通道	CH1	CH2	CH3
测试项目	V_{GS1}	I_D1	V_{DS1}
探头类型	光隔离电压探头	同轴分流器+光隔离电压探头	高压差分探头
探头型号	OPL6050	CSD01M20+OPL6050	DP6150



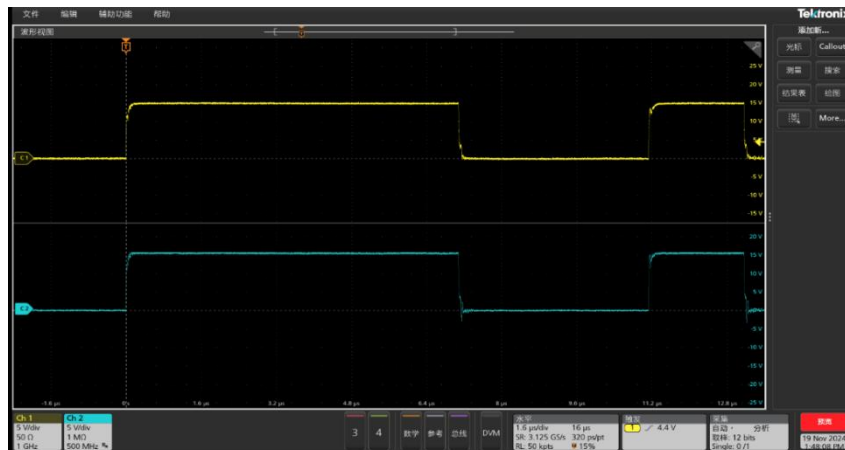
2、展示了在较快的上升/下降时间（500V/15ns）的共模干扰工况下，采用一个光隔离电压探头测试上管的 V_{GS} 电压，另外一个光隔离电压探头测试 I_G 电流（驱动芯输出电阻 $R_{on}=5\Omega$ 上的电压）的测量波形。通过实测，能够看到两个波形未有受到高频共模干扰的影响，与之前测试下管的 V_{GS} 、 I_G 波形完全一致。此结果印证了知用的光隔离电压探头具有优异的共模抑制比。

示波器通道	CH1	CH2	CH3
测试项目	V_{GS1}	I_G1	V_{DS1}
探头类型	光隔离电压探头	光隔离电压探头	高压差分探头
探头型号	OPL6050	OPL6050	DP6150

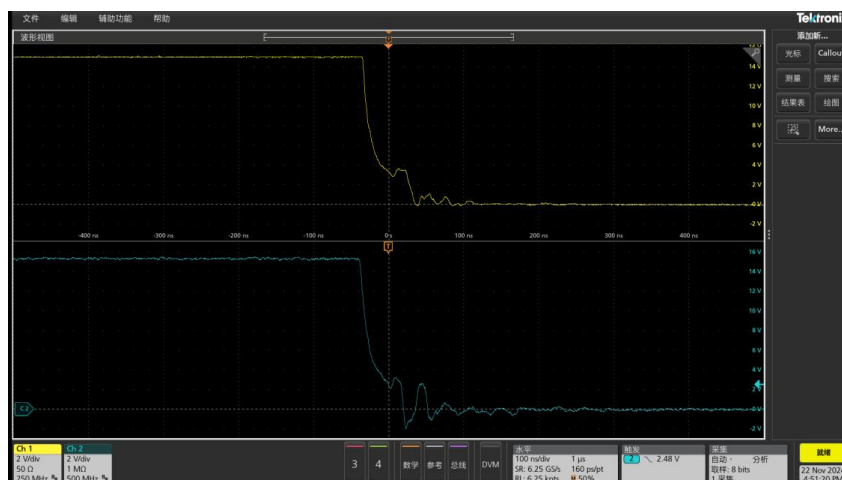


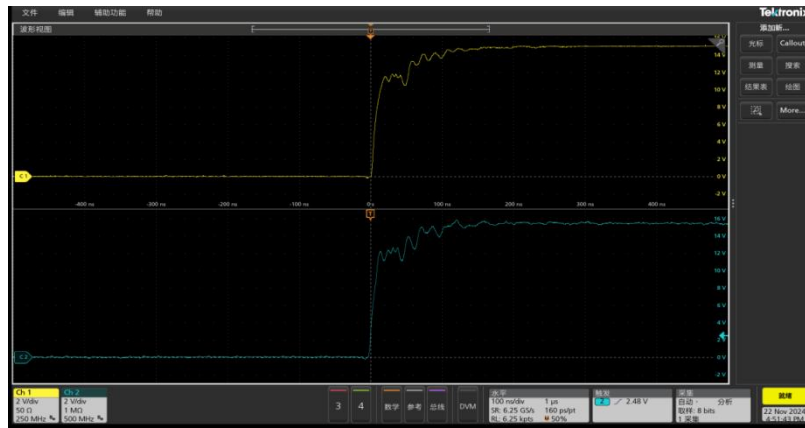
3、展示了在较快的上升/下降时间（500V/15ns）的共模干扰工况下，测试上管 V_{GS} 电压的波形，知用的高压差分探头所测结果虽略逊于光隔离电压探头的波形（如红圈处），但已经远优于市售同类竞品探头。此结果印证知用差分探头的共模抑制比较优，是一种低成本浮地 V_{GS} 测量方案。

示波器通道	CH1	CH2
测试项目	V_{GS1}	V_{GS1}
探头类型	光隔离电压探头	高压差分探头
探头型号	OPL6050	DP6150



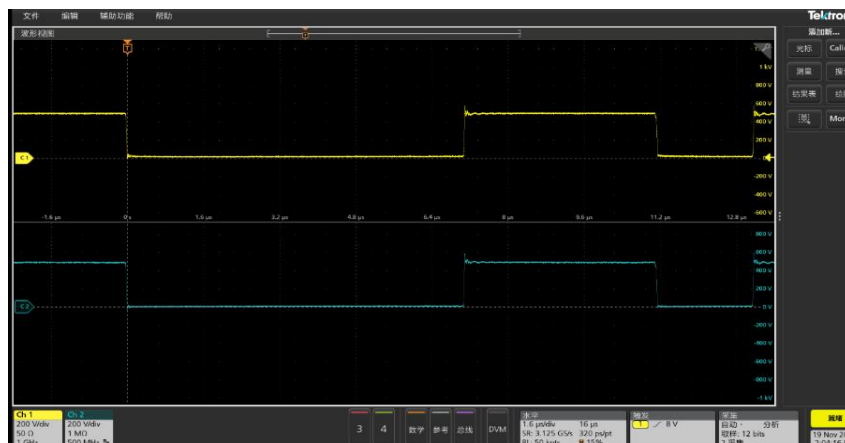
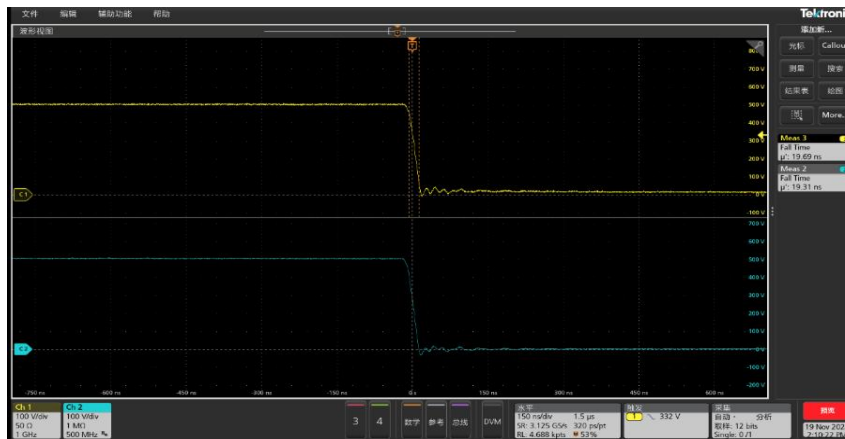
下面是对上管驱动波形的上升沿和下降沿放大。可以发现上升沿波形几乎一样，下降沿波形差分探头有一些振荡。

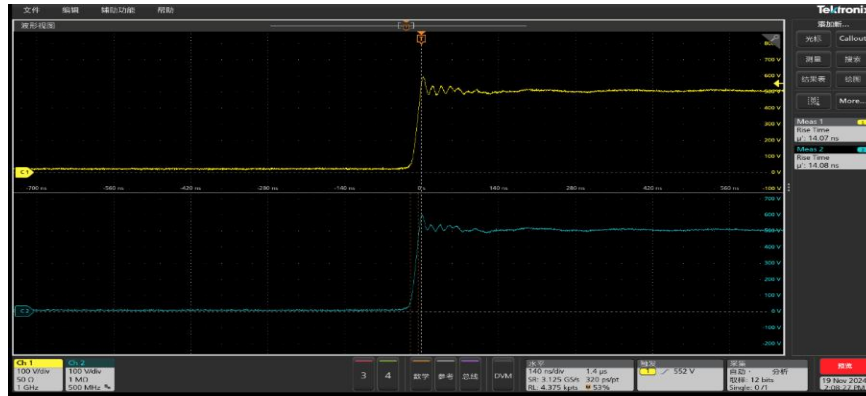




4、采用知用的光隔离电压探头和高压差分探头对上管进行测试，在较快的上升/下降时间（500V/15ns）的共模干扰工况下，2个探头波形完全一致。这一点再一次印证了知用的差分探头的共模抑制比较为优秀，亦是一种可采用低成本的浮地 V_{DS} 电压的测量方案。

示波器通道	CH1	CH2
测试项目	Vds1	Vds1
探头类型	光隔离电压探头	高压差分探头
探头型号	OPL6050	DP6150

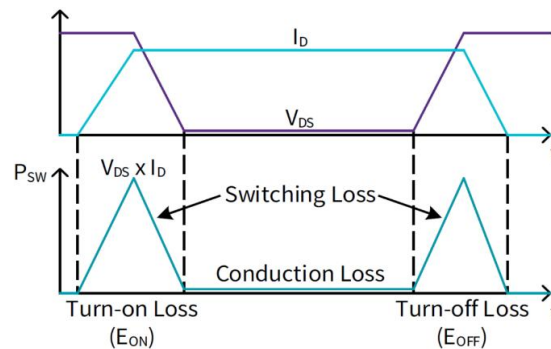




八、下管的开通损耗 E_{ON} 和关断损耗 E_{OFF} 的测量

测量并计算 MOSFET 的开通损耗 E_{ON} 和关断损耗 E_{OFF} 是双脉冲测试的重要项目。计算方法是把电压和电流的波形相乘得到一条损耗功率曲线。对开通或关断期间的功率进行积分就得到 E_{ON}/E_{OFF} 。对 MOSFET 的导通期间的功率进行积分就得到导通损耗。

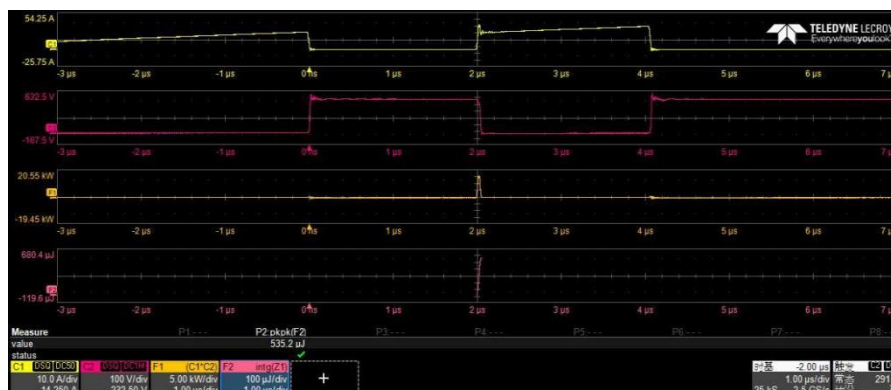
特别要注意的是电压探头和电流探头的相对延时参数必须精确测量到然后输入到示波器。电压探头和电流探头的相对延时参数如果不准确或导致开通损耗 E_{ON} 和关断损耗 E_{OFF} 的计算产生较大偏差。



下面测试了在本装置上的 MOSFET 的 E_{ON}/E_{OFF}

测试条件: $V=500V$, $R_G=5R$, $I_D=25A$, $V_{GS}=0/15V$, $L=100\mu H$, 室温

示波器通道	CH1	CH2
测试项目	I_D	V_{DS2}
探头类型	同轴分流器	高压差分探头
探头型号	CSD01M20	DP6150
1 米同轴电缆延时	5.2ns	5.2ns
同轴分流器本体的延时 (长度为 30mm)	0.1ns	
高压差分本体的探头		7.1ns
示波器上显示的延时差	0	+7ns

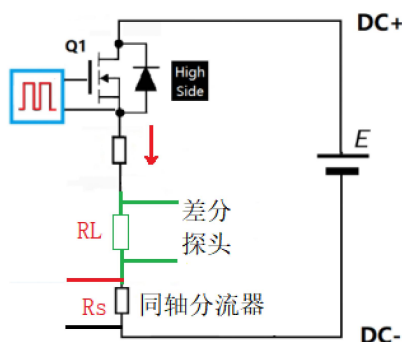


测试结果：开通损耗 $E_{ON}=535\mu J$ 。由于此 SiC MOSET 器件的关断损耗 E_{OFF} 相对过小，故本试验不作分析。

九、在本装置上进行电压电流探头延时的校准测量

对电压探头和同轴分流器进行延时偏移校准的关键是产生一个完全同步的电压和电流的上升沿信号。这个可以在一个无感的大功率电阻上施加一个上升沿很快的脉冲电压。本装置完全可以产生一个 500V 上升时间很快的脉冲电压，完全可以胜任这个工作。

如下图，当 Q1 导通时，无感的功率电阻 RL 两端的电压和流过同样无感的同轴分流器 Rs 的电流上升沿是完全同步的。示波器上两个波形的延时偏移差就是电压电流探头实际的延时偏移差。

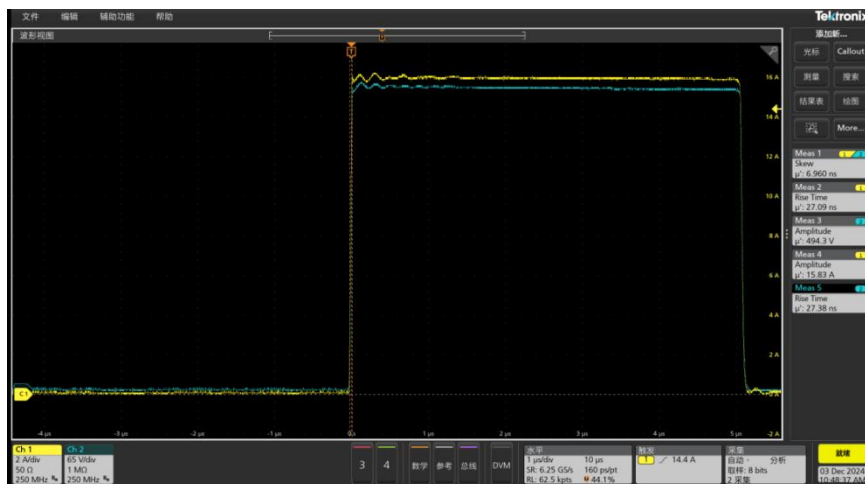


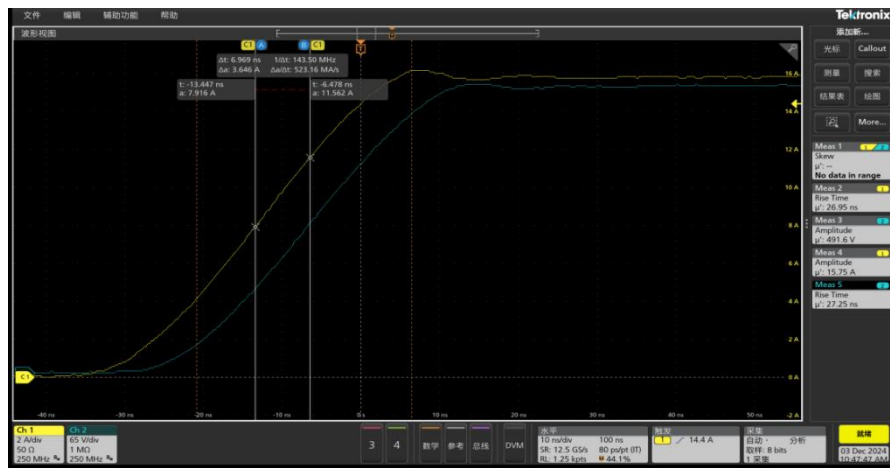
具体操作方法：

- 本装置刚开机时，驱动上管模式和驱动下管模式的触摸按键在触摸屏上都显示为灰色，正好都是无效的。此时本装置内部的两个继电器都是断开的，也就是说内部双脉冲测试用的电感和功率电路是断开的，这样就可以把下管用一个无感电阻代替。双脉冲测试后，上述驱动上管模式或驱动下管模式的触摸按键可能没有显示为灰色，请按动触摸按键使其变为灰色，取消其功能。
- 把半桥下管从插座上拔走，换上一个 33 欧姆的无感电阻。
- 触发一个 500V 电压的双脉冲测试
- 示波器采集下管的 Id 电流波形和下管的 Vds 电压波形
- 测量示波器上两通道的延时 SKEW

下图是实际测试示波器显示的电流波形超前电压波形 7ns。而前面根据探头和同轴电缆的参数计算所得的电压探头滞后也是 7ns。

这两种方法的延时测试结果完全重合！





本装置也可以测量 CP9000 系列罗氏线圈电流探头和高频交直流电流探头 HCP8000 系列的延时参数。只需要把电流探头夹在上面所述的无感电阻上即可。

附录：本装置可以验证的本公司的电流电压探头

电压探头	光隔离电压探头	OPL6000/OPB6000 系列	
	无源电压探头	P6251/P6501	
	高压差分探头	DP6000 (A/B/D)系列 DPX6000 (A/B/D)系列 P1300	
	低压差分探头	DP60*0B 系列	
电流探头	高频交直流电流探头	HCP8000(HCPX8000/HCP8000C)系列	
	罗氏线圈电流探头	CP9000 系列 CPX9000 系列	
	同轴分流器	CSD*M 系列	

十、装箱单

装 箱 单	
双脉冲测试仪本体	1 个
CSD01M20 分流器	1 个
BNC 线(CK-310)	1 根
AC 电源线(CK-318)	1 根
说明书	1 册
保修卡	1 页

CYBERTEK

深圳市知用电子有限公司

SHENZHEN ZHIYONG ELECTRONICS CO.,LTD.

深圳市龙岗区黄阁北路天安数码城4号大厦A1702

Tel: 400 852 0005 / 0755-8662 8000

Q Q: 400 852 0005

Email: cybertek@cybertek.cn

Url: <http://www.cybertek.cn>

© Zhiyong Electronics, 2025

Published in China, Mar. 1, 2025