

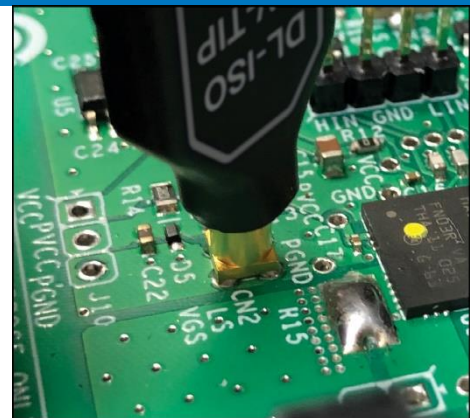
双脉冲测试中的测试仪器选择

Denny Li

Denny.li@teledyne.com



TELEDYNE LECROY
Everywhere you look™



SiC动态参数测试-双脉冲测试

1. Oscilloscope



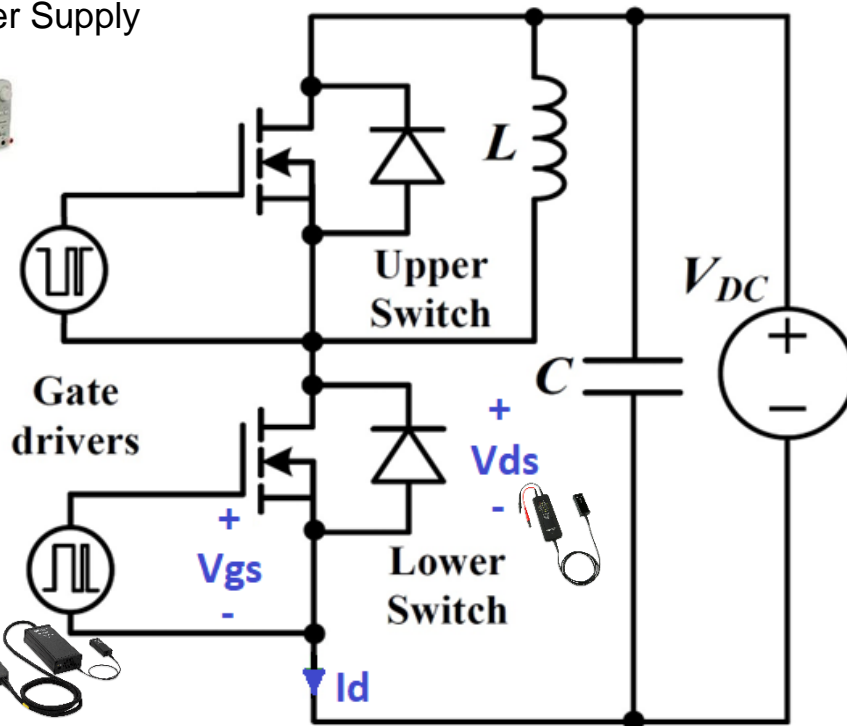
4. Auxiliary Power Supply



3. AWG



2. Probes

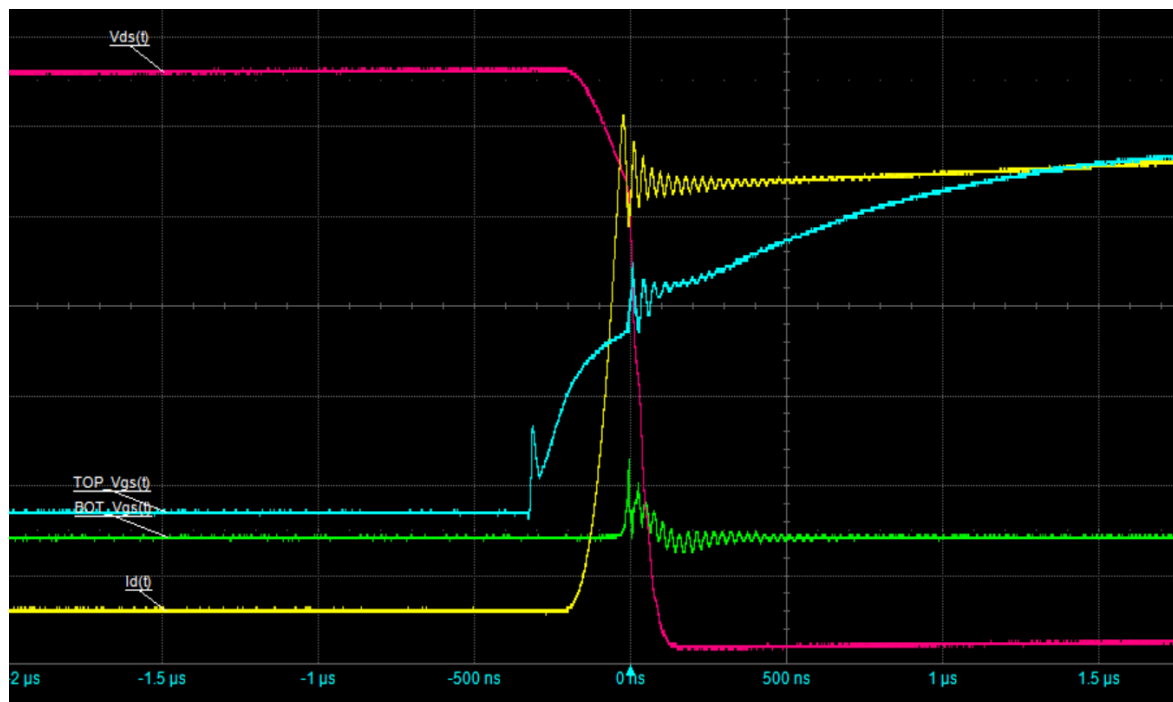


5. High Voltage Power Supply

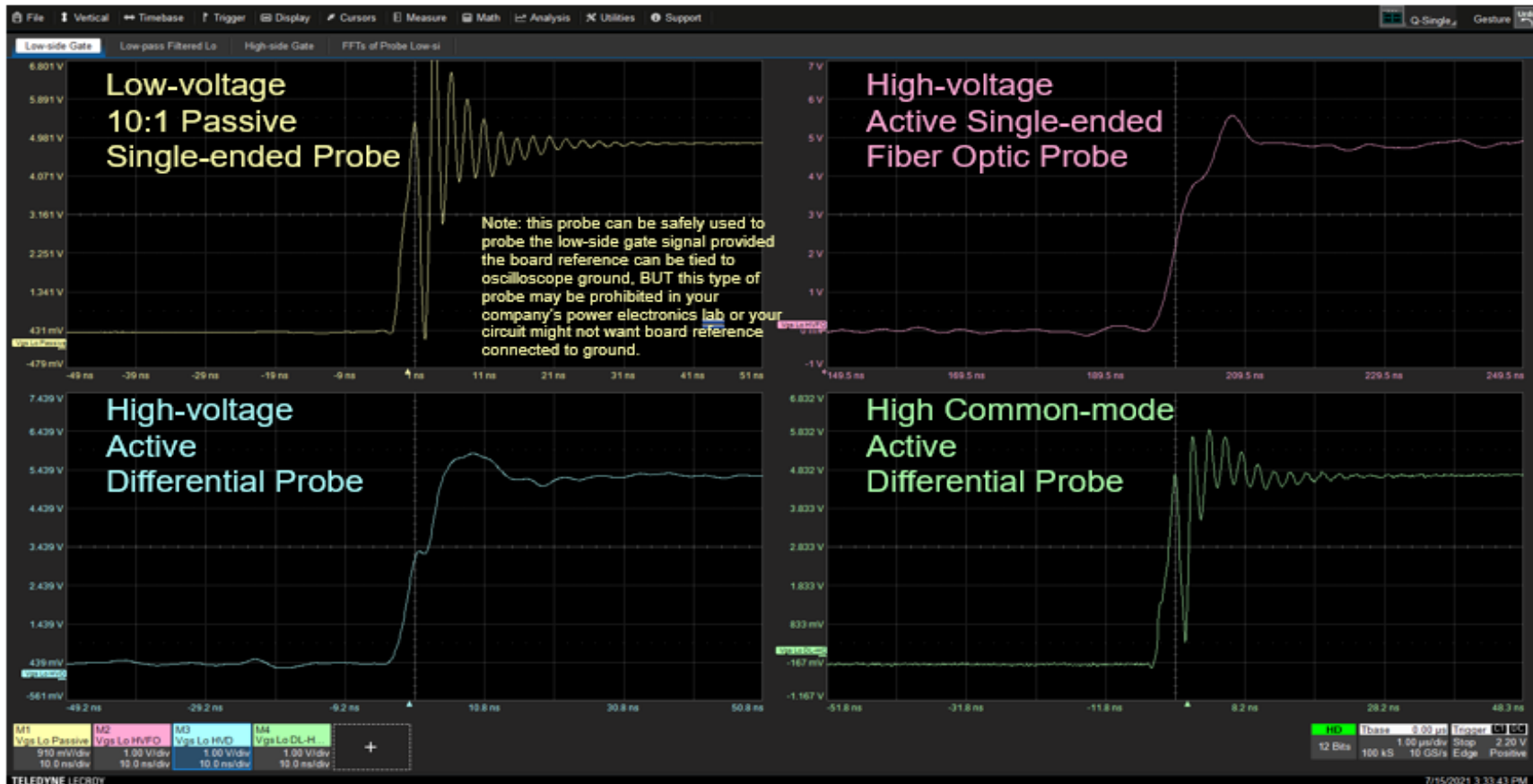
宽禁带半导体面临的测试挑战

如何真实再现 V_{GS} , V_{DS} , I_D 的真实信号特性?

- 更大的 di/dt 和 dv/dt
- 对寄生参数更敏感
- 更大的共模干扰



不同探头的测试结果

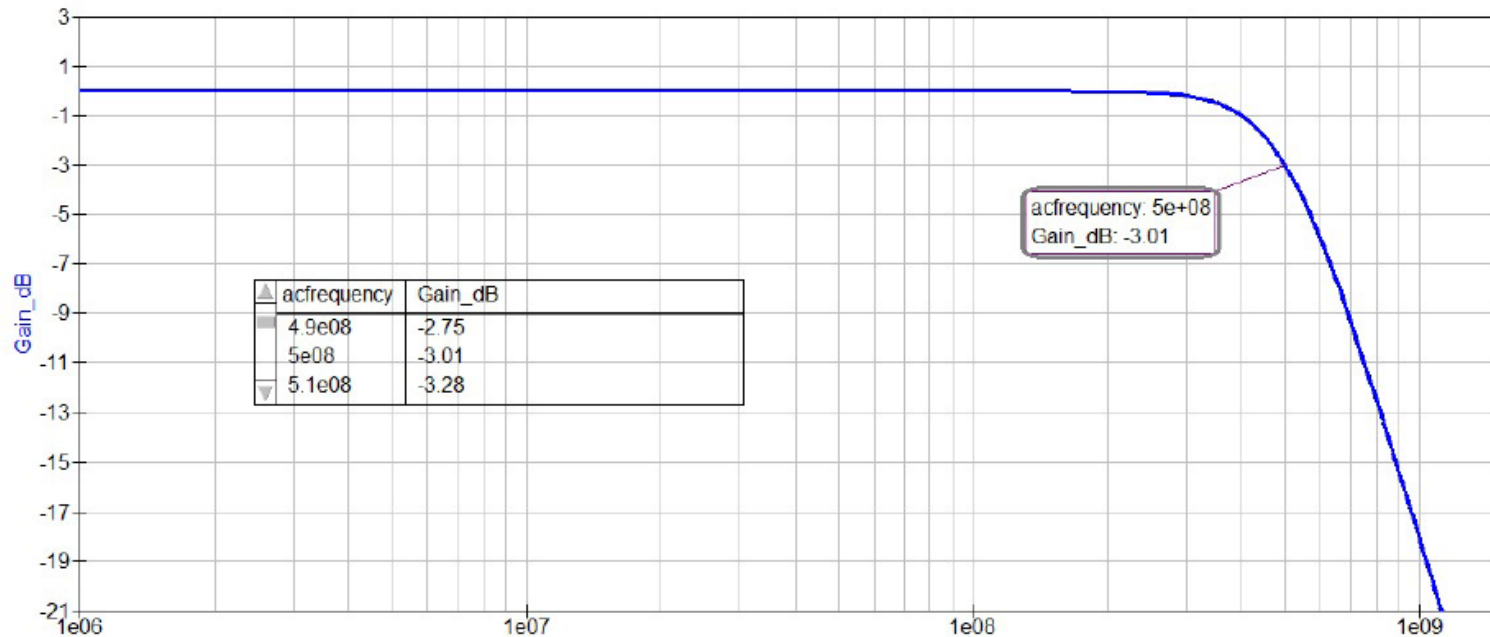


影响测试的探头指标

- 带宽
- 输入电压范围
- 衰减
- 输入阻抗
- 共模抑制比(CMRR)

带宽

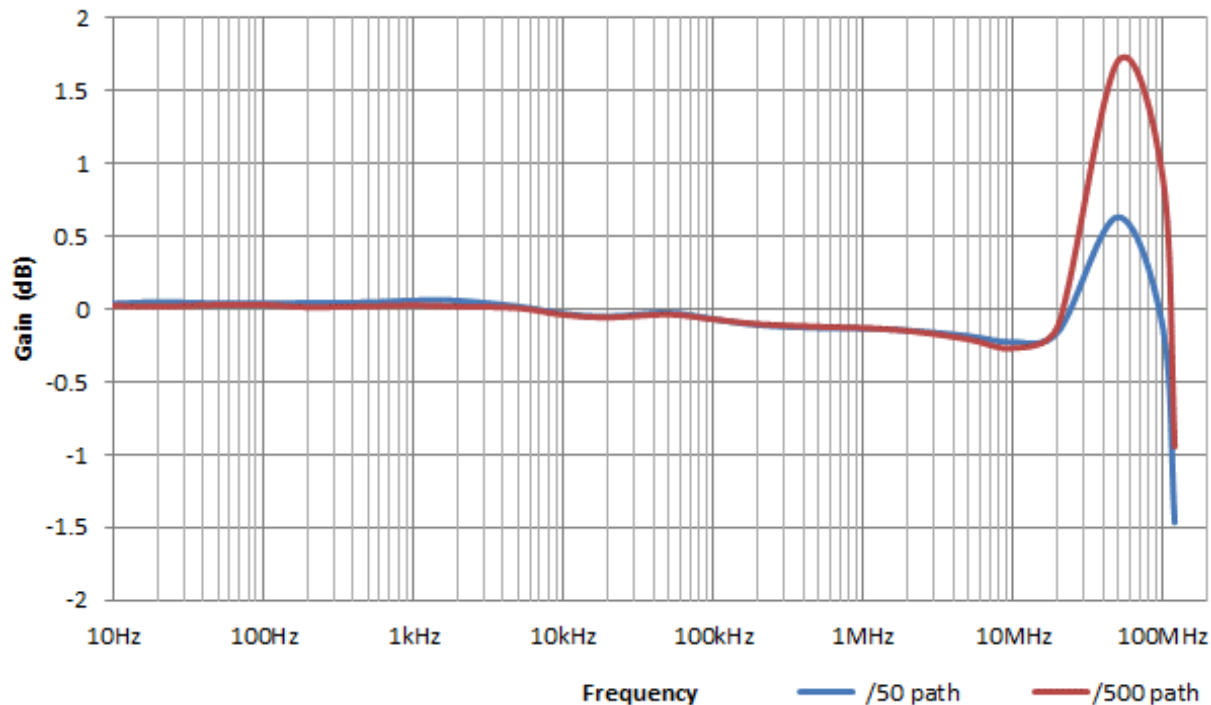
- 幅度下降比标称（DC）响应低3 dB的频率



带宽-探头的频响曲线

HVD3106的频率响应曲线

- 非常平坦的低频响应(DC to 5 kHz)
- 缓慢滚降到10 MHz(0.25 dB)
- 在60 MHz 有0.5至1.5 dB峰值
 - 这看起来似乎是极端的，但这个峰值比这个类中的其他探头都小

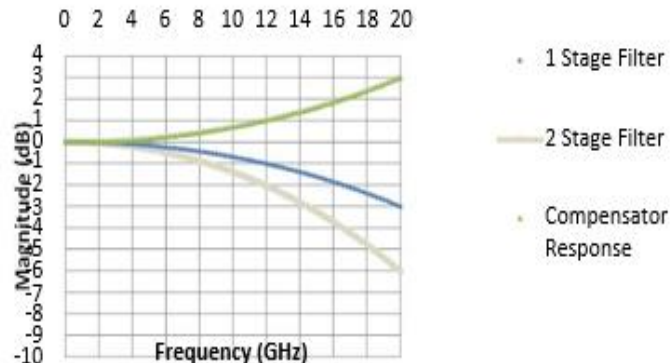
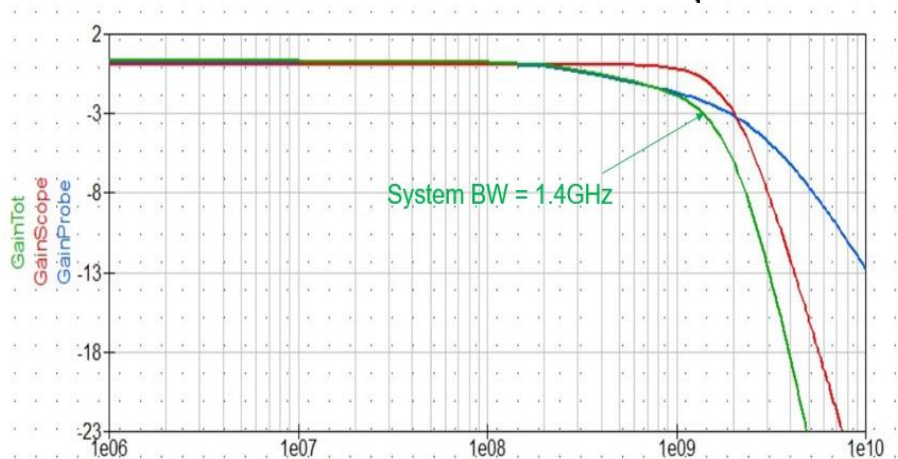


系统带宽：示波器带宽+探头带宽

$$BW = 0.4 / \text{Rise Time} \quad \text{System BW} = 0.4 / \text{System Rise time}$$

$$\text{System Rise time} = \sqrt{\text{Rise time DSO}^2 + \text{Rise time Probe}^2}$$

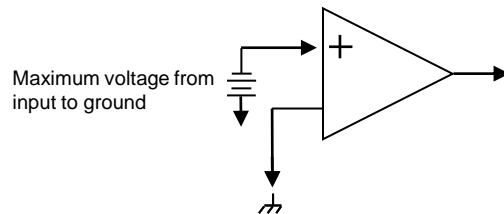
$$\text{System bandwidth} = \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{BW_1^2} + \frac{1}{BW_2^2}}}$$



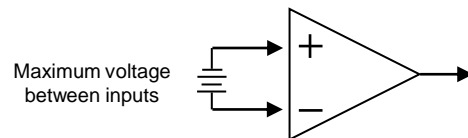
输入电压范围-量程

- 单端电压范围
 - 输入和地之间的最大电压
 - 探头地直接连接到示波器地，因此，该接地连接不能是浮地电压！
- 差模电压范围 (DMR)
 - 可在+和 - 输入端之间施加的最大电压差。
 - 不需要接地
 - **但不能超过共模电压标称值**
- 共模电压范围(CMR)
 - 任意输入端和地之间的最大电压。
 - 通常不直接由探头测量，而是通过探头拓扑实现
 - 可以通过将探头的负输入连接到地，将正输入连接到共模电压来验证

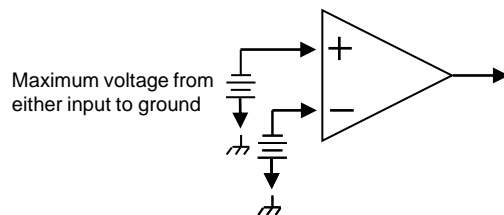
Single-ended Range



Differential Mode Range

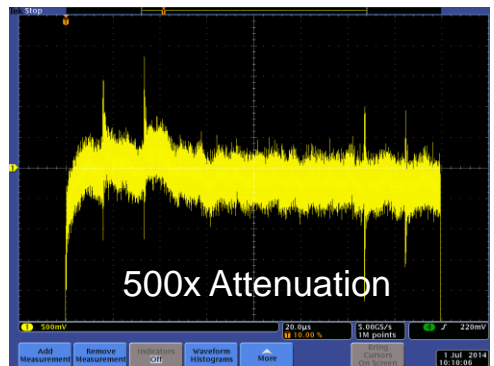
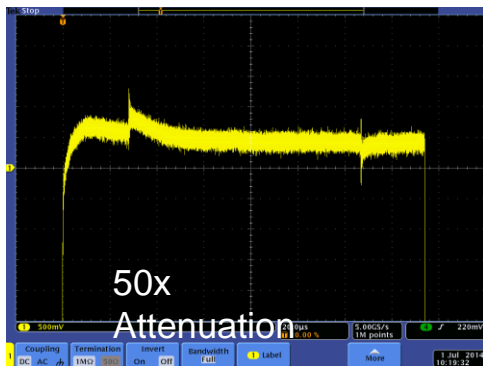


Common Mode Range



衰减

- 探头衰减有两个主要目的：
 - 将测量电压降低到可安全输入到示波器的电压
 - 降低电路负载
- 然而，衰减多少，必须放大多少
 - 更低灵敏度的示波器增益设置具有更低的SNR，因此...
 - 更高的衰减意味着更大的噪声（所有其他条件都相同）
 - 这并不意味着高衰减是“坏的” - 在某些情况下是必要的

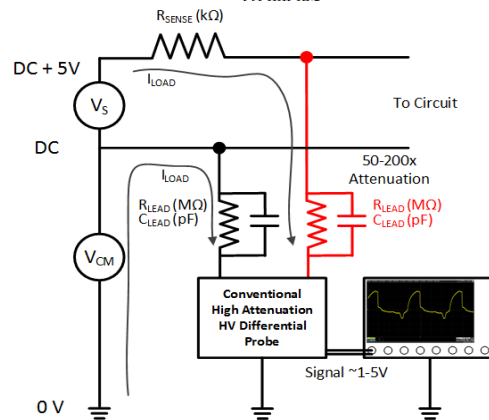
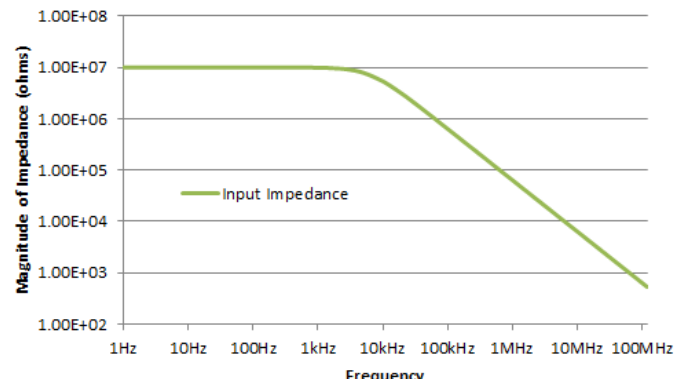


某HV差分探头，50x (左) 和500x (右)。注意：此探头需要手动选择衰减，这使得可以直接比较

输入阻抗

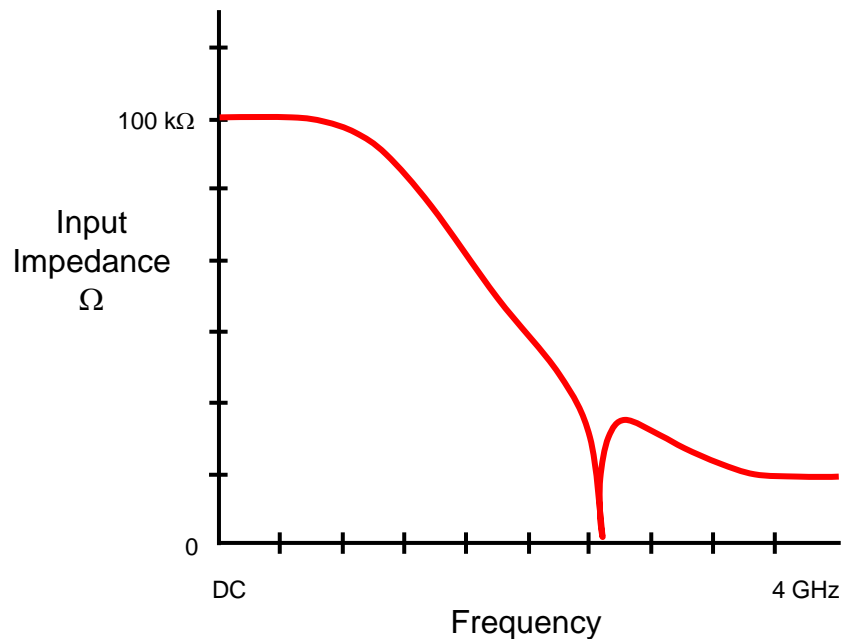
- 所有探头都会向被测电路增加一个负载，这将改变波形的特性。
 - 高输入阻抗将增加更少的负载（吸收更少的电流）
 - 所有探头的输入阻抗随着频率的增加而降低
- 严重的负载可能改变电路的运行
- 高共模电压将增加容性负载
 - 全共模+浮地信号电压必定会对引线电容充电

HVD3106的差分输入阻抗(Z_{IN})



输入阻抗

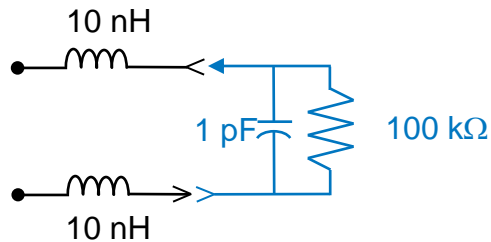
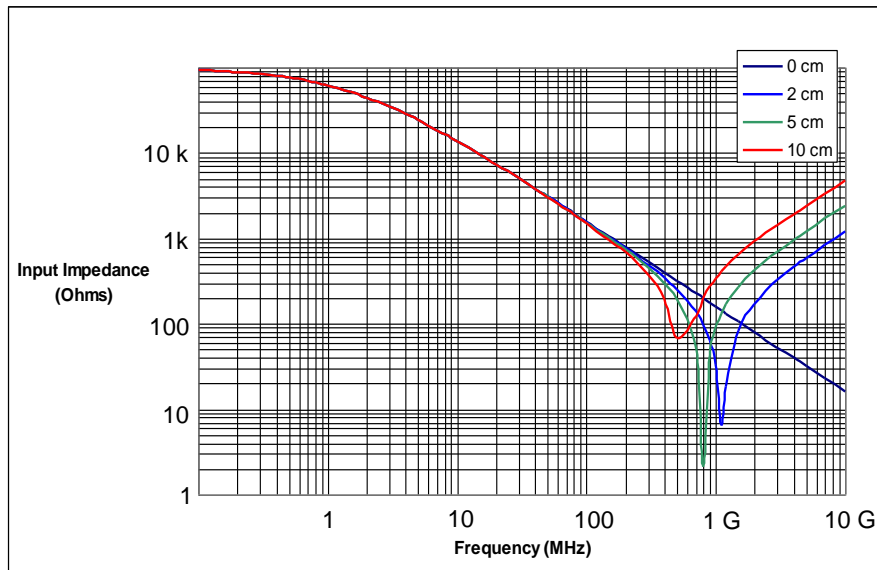
- 探头输入端的电感和输入电容可以形成串联谐振电路
 - $\omega L = 1/\omega C$
- 在谐振点，输入阻抗会掉到很低
- 如果谐振在通频带中，可能导致严重的波形失真



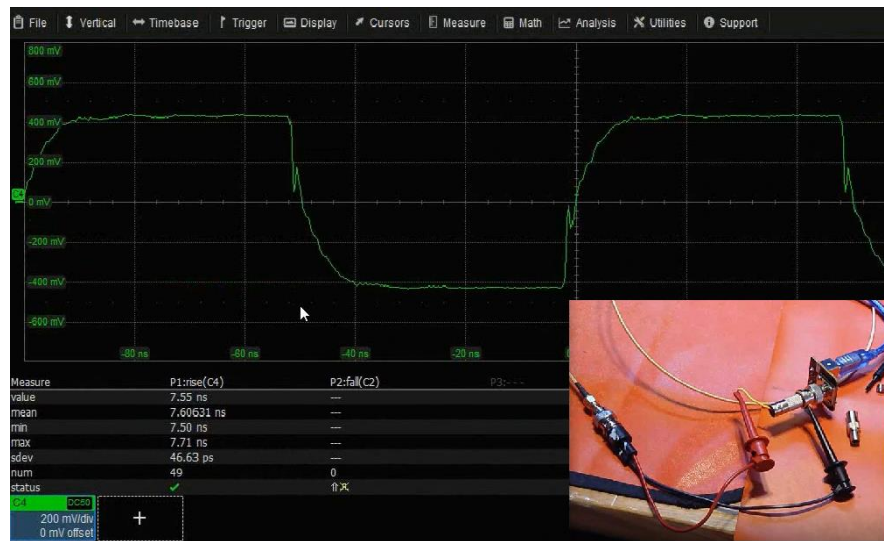
输入阻抗

所以，不要增加延长线

- 将延长线添加到探头输入端增加了寄生电感，降低了谐振频率
 - 在这个高带宽探头示例中，将2厘米引线增加到前端和地，就使 Z_{in} 从159 欧姆降低到8.3欧姆
- 长（附加的）输入引线也会增加环路电感
 - 在存在高共模电压和高 di/dt 的情况下，这绝对不是一件好事
 - 将增加噪声（至少）和不可预测的失真（振铃）。



前端连接方式的影响 (带宽和失真)

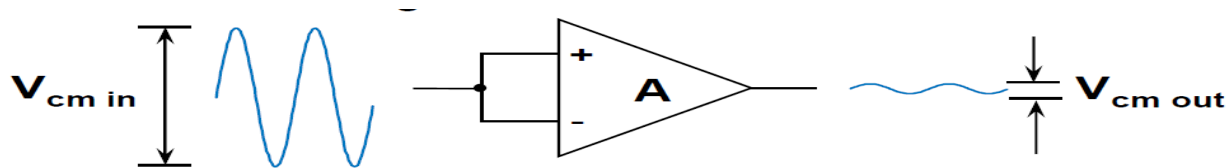


- 同轴线缆 (1m) 直接连接:
 - 上升时间: 450ps→500ps

- 同轴线缆+微型夹子
 - 上升时间: 450ps→7.5ns
 - 信号失真

共模抑制比 (CMRR)

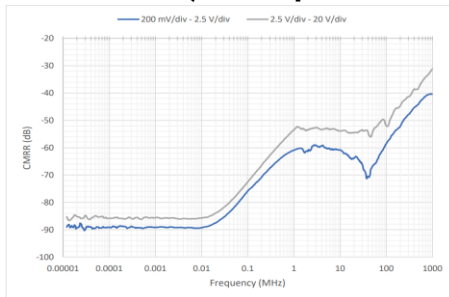
- 共模抑制是差分放大器抑制两个输入中共同分量的能力
 - 现实中，差分放大器不能消除所有的共模信号
 - 另外，差分探头前端对必须完美匹配频率响应，这对于具有衰减的探头前端对是很难的（但仍然可以获得良好的结果）。
 - 共模信号与VDM（感兴趣的信号）相加到差分放大器的输出中，变得与真实信号不可区分
- 差分探头系统抑制共模信号能力的衡量指标是共模抑制比 (CMRR)
 - CMRR表示为dB单位或作为抑制电压的比率。 $20\log_{10} (A_d / A_c) = \text{CMRR}_{\text{dB}}$
 - 实质上，较低的CMRR等于在测量信号中有较大的噪声和干扰。
- 使用常规高压（高衰减）探头拓扑结构难以实现高频下的高CMRR（100dB，或100,000:1）。



共模抑制比(CMRR) 光隔离探头的CMRR远远优于传统的HV差分探头

高压差分探头

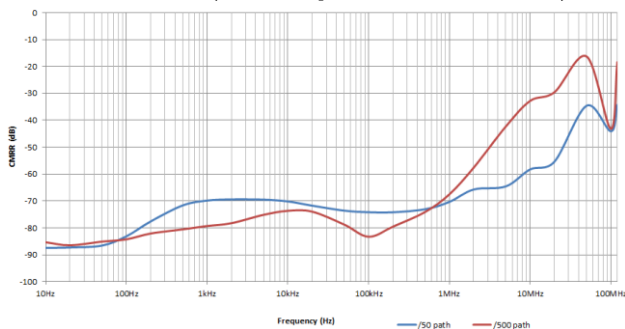
DL-HCM Series (from Operator's Manual)



Specifications

- 80 dB @ 10 kHz
- 70 dB @ 100 kHz
- 55 dB @ 1 MHz
- 50 dB @ 100 MHz
- 30 dB @ 1 GHz

HVD3106 (from Operator's Manual)

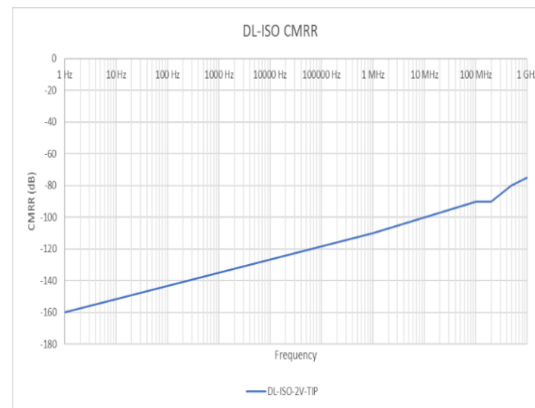


Specifications

- 80dB @ 60 Hz
- 65dB @ 1 MHz
- 40dB @ 5 MHz
- 30dB @ 100 MHz

光隔离探头

DL-ISO

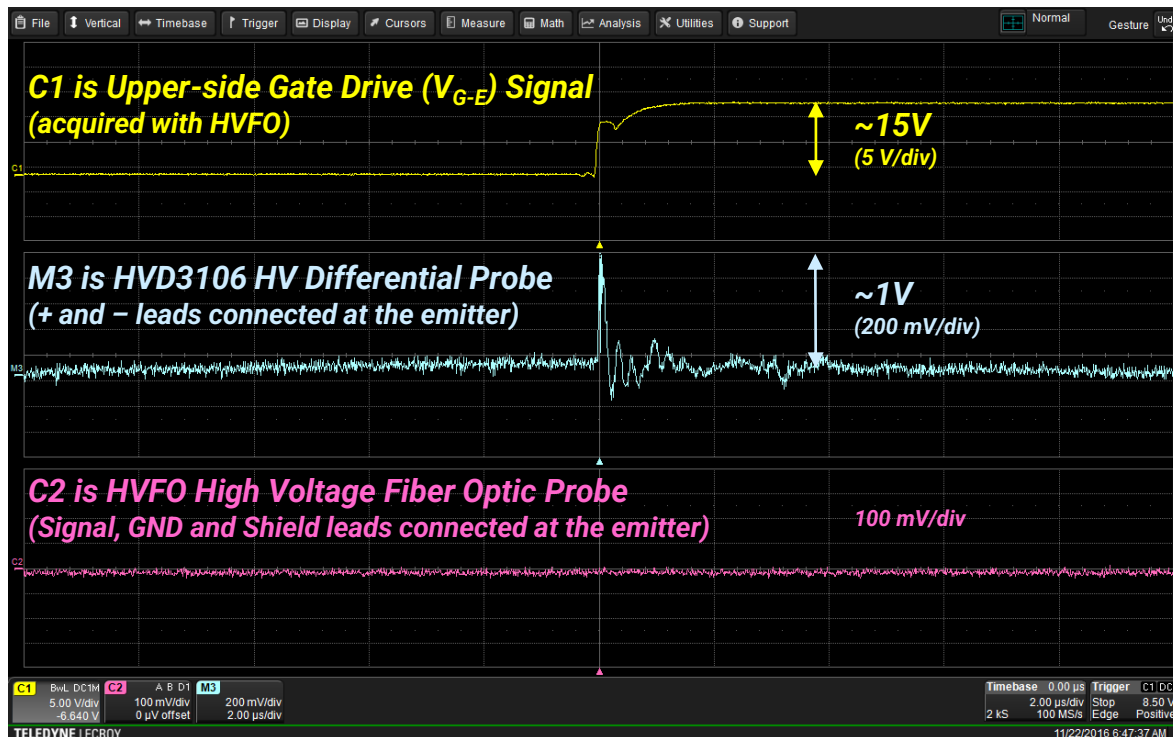


Specifications

- 160dB @ DC
- 110dB @ 1 MHz
- 90dB @ 100 MHz
- 80dB @ 500 MHz
- 75dB @ 1 GHz

共模抑制比(CMRR)的简单验证

- 在测量参考位置将+和 - 引线连接在一起
 - 例如, 上管的发射极或源极
- 采集信号
- 查看干扰
 - 高dv / dt事件期间的测量到的瞬变表示测量的共模干扰



共模抑制比(CMRR)

将现场实际测量与工厂测量的典型CMRR图进行比较



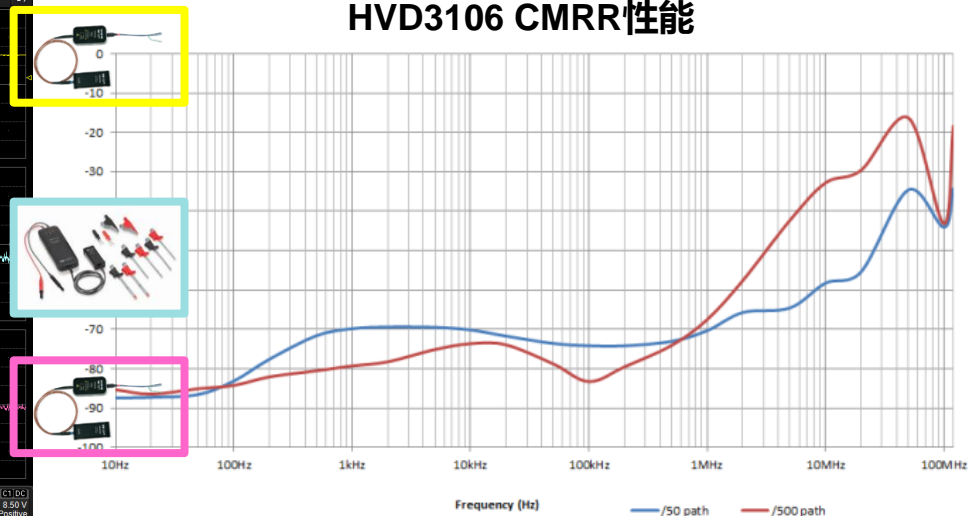
C1 (黄色) 是HVFO测量上管侧栅极驱动信号 (VG-E)

M3 (蓝色) 是HVD3106 HV差分探头其+和-引线在发射极 (VE) 处连接在一起

在栅极转换处测到的1V峰值信号是15V信号的共模干扰。对于该~40ns上升时间 (BW = 0.35 / TRISE = 9MHz), CMRR = 15: 1 (24dB)。

请注意, HVD3106在其类中具有任何探头的最佳CMRR

HVD3106 CMRR性能



红线是500x路径 (在左边的测试中使用的衰减, 对于该共模电压是需要的)

预期的CMRR在9 MHz时约为32 dB

上述数据在受控环境中采用并行电缆以最小化接地环路, 而左侧的测试处于“真实世界”条件。

影响测试的探头因素-测量宽禁带半导体对探头的需求

- 带宽—带宽有足够高，才能采集到足够快的边沿
- 输入电压范围—选择探头量程时，选择靠近待测信号的，降低衰减带来的噪声
- 输入阻抗—地线和延长线尽量短，不要引入过大的寄生电感
- 共模抑制比-选择高共模抑制比的探头，特别是存在大共模电压和高 dv/dt 和 di/dt 的跳变时

电力电子中常用的电压探头种类

Low Voltage

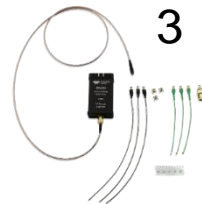
1. Passive, Single-ended
2. Active, Single-ended “FET”
3. Active, Single-ended “Rail”
4. Active Differential
5. Active Differential, 60 V Common-mode



PP Series



ZS Series



RP4030



ZD Series

High Voltage

6. Passive, Single-ended
7. Active, Single-ended (fiber-optic isolated)
8. Active, Differential (conventional high attenuation)
9. Active, Differential (fiber-optic isolated)



DL-HCM Series
(60 V_{CM})

5

PPE or
HVP Series



6



HVFO108

7



HVD Series (1-6 kV_{CM})

8



DL-ISO

9

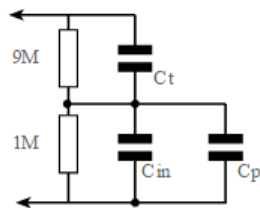
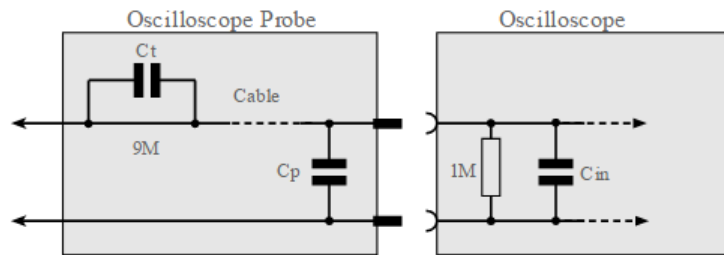
1 - 低压无源单端探头

Parameter	Value
Bandwidth	500 MHz
Voltage Range (SE)	~400Vpk
Voltage Range (DM)	N/A
Voltage Range (CM)	N/A
Voltage Offset	N/A
Loading	10M Ω 15pF Z _{IN} =30 Ω @500 MHz
Attenuation	10x
CMRR	N/A

- 坚固、可靠、价格低廉
- 非常常见

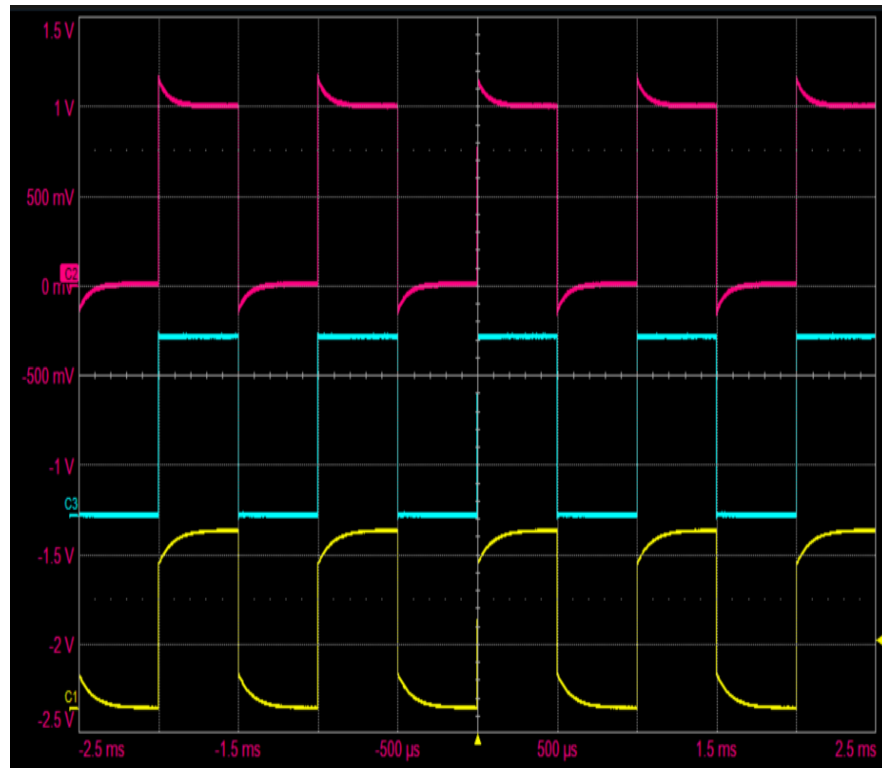


无源探头的补偿

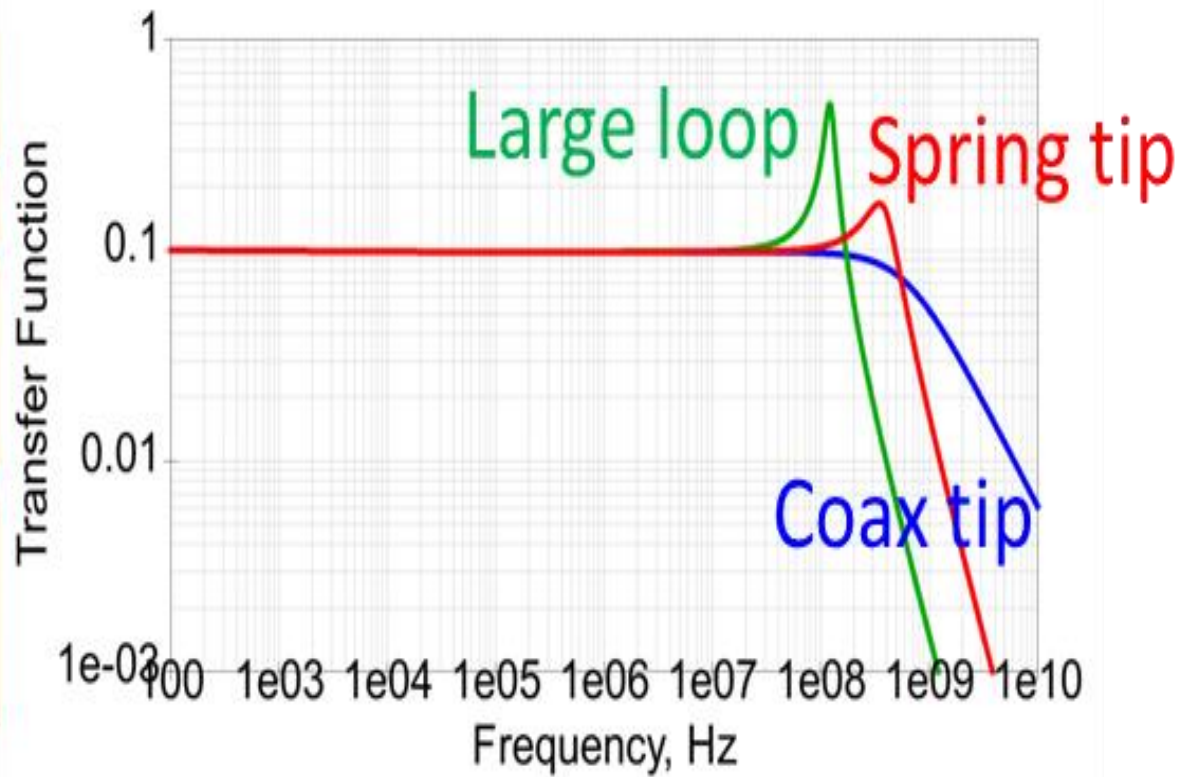


为了使电路提供平坦的响应，电阻器和电容器的电位转移效应必须相同：

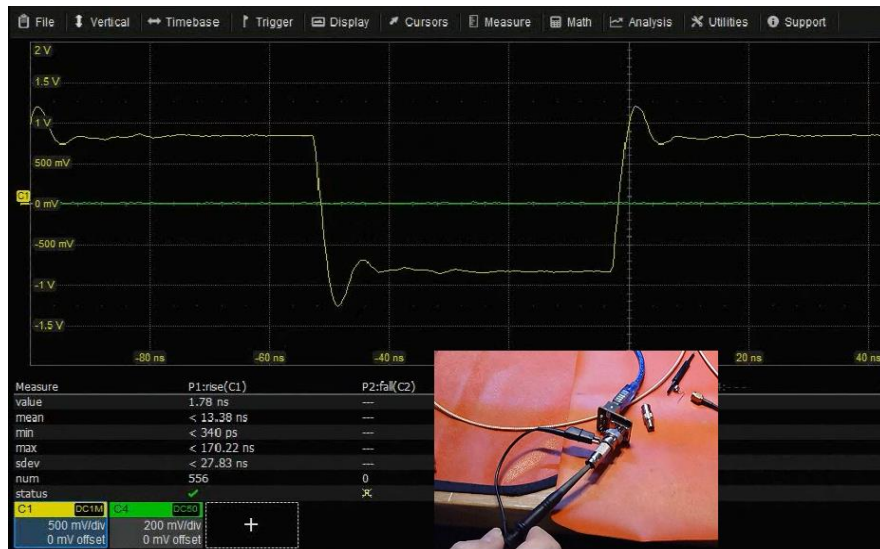
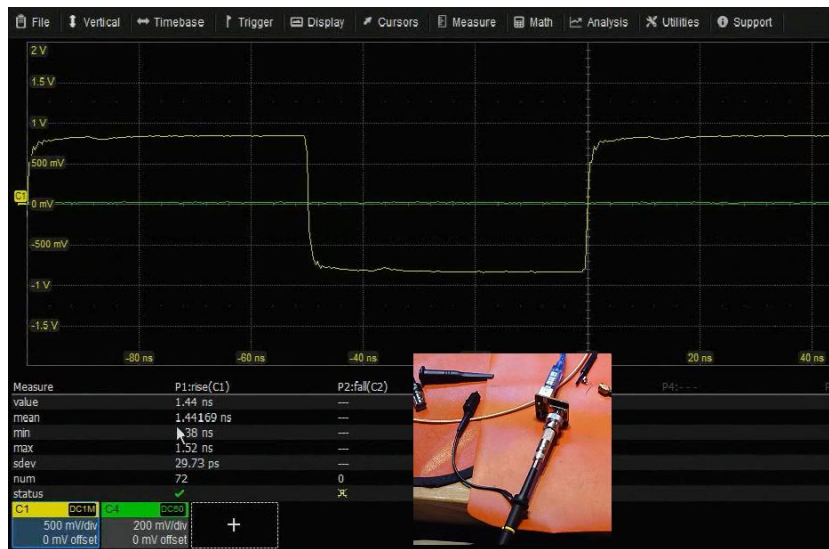
$$\frac{C_t}{C_p + C_{in}} = \frac{1M\Omega}{9M\Omega}$$



不同连接前端的影响



不同连接前端的影响



■ 同轴适配器:

- 上升时间: 1.4ns

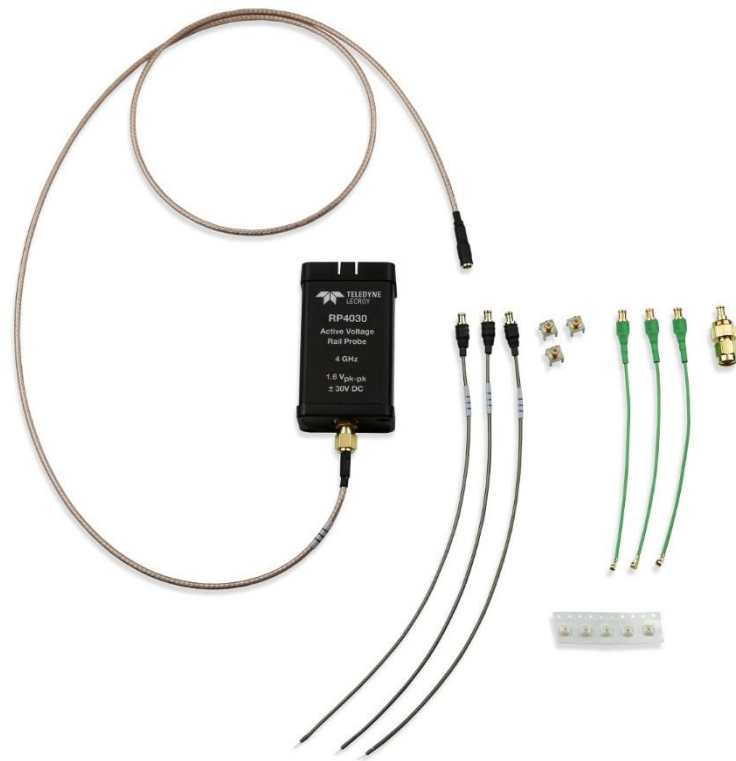
■ 鳄鱼夹

- 上升时间: 1.8ns
- 信号带有过冲

3 – 电源完整性探头

Parameter	Value
Bandwidth	Up to 4 GHz
Voltage Range (SE)	800 mVpk
Voltage Range (DM)	N/A
Voltage Range (CM)	N/A
Voltage Offset	60V
Loading	50k Ω 0.1 μ F
Attenuation	1.2x
CMRR	N/A

- 专门用于探测直流电源（电压）轨（例如 1.1、1.5、1.8Vdc）
- 大电压偏移允许偏移 DC 并将增益设置为高灵敏度（例如 10 mV/div）



5 - 高共模有源差分探头

Parameter	Value
Bandwidth	1 GHz
Voltage Range (SE)	N/A
Voltage Range (DM)	80V
Voltage Range (CM)	80V (DC+peak AC)
Voltage Offset	60V
Loading	200 k Ω 0.6 pF $Z_{IN}=2.5k\Omega@100\text{ MHz}$
Attenuation	7.8 to 70x
CMRR	80 dB @ 10 kHz 55 dB @ 1 MHz 50 dB @ 100 MHz

- 48V 电源转换的理想选择



DL-HCM Series is ideal for 48V power conversion



AP033 has lower CM rating, but higher sensitivity for shunt resistor measurements



The image displays the DL-HCM Series High Common Mode Differential Probe, a black cable with a probe head and a connector. The probe head is labeled 'DL-HCM' and 'TELEDYNE LECROY'. The connector is labeled 'AP033'. The probe is shown in a coiled position. Below the main image is a schematic diagram showing the probe connected to a circuit. The diagram includes labels for 'Probe Head', 'Probe Cable', 'Probe Connector', and 'Probe Head Connector'. The schematic shows the probe connected to a circuit with a shunt resistor and a common mode choke. The probe is used to measure the voltage across the shunt resistor. The schematic also shows the probe connected to a common mode choke. The probe is used to measure the common mode voltage across the choke. The schematic includes labels for 'Probe Head', 'Probe Cable', 'Probe Connector', and 'Probe Head Connector'. The schematic also shows the probe connected to a common mode choke. The probe is used to measure the common mode voltage across the choke.

6 - 高压无源单端探头

Parameter	Value
Bandwidth	500 MHz
Voltage Range (SE)	Up to 6kV typical
Voltage Range (DM)	N/A
Voltage Range (CM)	N/A
Voltage Offset	N/A
Loading	10M Ω 7.5pF Z _{IN} =50 Ω @500 MHz
Attenuation	100x
CMRR	N/A



- 对某些应用来说，是个不错的选择，但衰减比很高（所以噪声也很大）

8 - 高压有源差分探头

Parameter	Value
Bandwidth	~100 MHz
Voltage Range (SE)	N/A
Voltage Range (DM)	2kV to 8kV
Voltage Range (CM)	1kV to 6kV
Voltage Offset	1kV to 6kV
Loading	10M Ω 2.5pF Z _{IN} =1k Ω @100 MHz
Attenuation	50-2000x
CMRR	85 dB @ 60 Hz 65 dB @ 1 MHz



- 许多应用的最佳选择，但也有其局限性

9 – 高压光隔离探头

Parameter	Value
Bandwidth	1GHz
Voltage Range (SE)	N/A
Voltage Range (DM)	Up to 2.5kV
Voltage Range (CM)	Up to 60kV
Voltage Offset	1.5kV
Loading	Up to 18MΩ
Attenuation	由前端决定
CMRR	Up to 160 dB

- 用于测量上管 V_{GS} 和 V_{DS} 的完美探头



DL-ISO 高压光隔离探头

氮化镓 (GaN) 和碳化硅 (SiC) 半导体器件验证分析的理想探头

- 带宽: 350 MHz, 700 MHz和1 GHz
- 输入电压: 2 V 到 2500 V
- 共模电压: 60 kV

更高的测量精度

- 1.5% 的系统增益精度
- 精确的增益校准
- 160 dB CMRR

	DL03-ISO	DL07-ISO	DL10-ISO
Bandwidth	350 MHz	700 MHz	1 GHz
Common mode range	60 kV		
Differential range	2 - 2500 V		
Gain accuracy	1.5%		
CMRR	160 dB		



DL-ISO high voltage tips

- Six tips available now:
 - 2 V (DL-ISO-2V-TIP)
 - 10 V (DL-ISO-10V-TIP)
 - 40 V (DL-ISO-40V-TIP)
 - 200 V (DL-ISO-200V-TIP)
 - 1000 V (DL-ISO-1000V-TIP)
 - 2500 V (DL-ISO-2500V-TIP)

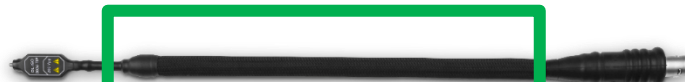
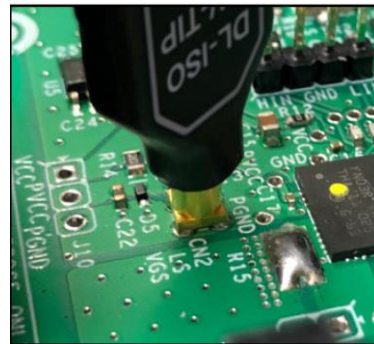
Accessory kit (DL-ISO-ACC-KIT)

- The application will determine which tip(s) the customer needs:
 - Sensors: $\pm 1\text{V}$ or $\pm 5\text{V}$
 - MOSFET Gate Drives: $\pm 5\text{V}$ or $\pm 20\text{V}$
 - IGBT Gate Drives: $\pm 20\text{V}$ or $\pm 40\text{V}$
 - Drive outputs: Up to DC bus voltage



DL-ISO Probe Tips

- 通过 MMCX 连接到客户设备的探头接口
- 前端具有高品质同轴电缆，可提高 EMI/RF 抗扰度，减少杂散噪声拾取

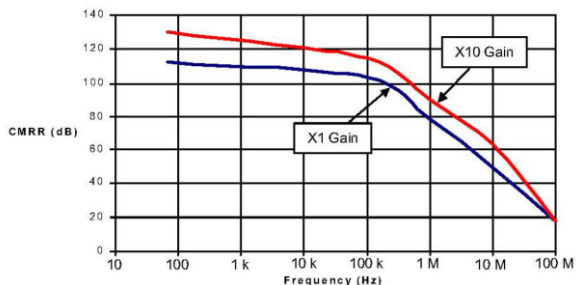


共模抑制比(CMRR)

光纤隔离探头DL-ISO的CMRR远远优于传统的HV差分探头/放大器

DA1855A (from Operator's Manual)

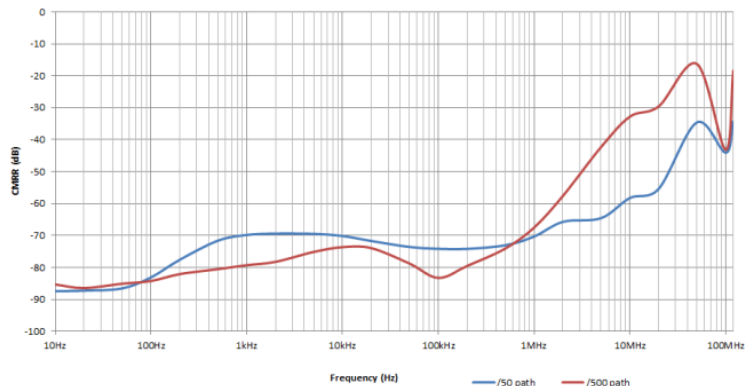
DA1855A Typical CMRR



Specifications

100dB @ 100 kHz
50dB @ 10 MHz

HVD3106 (from Operator's Manual)

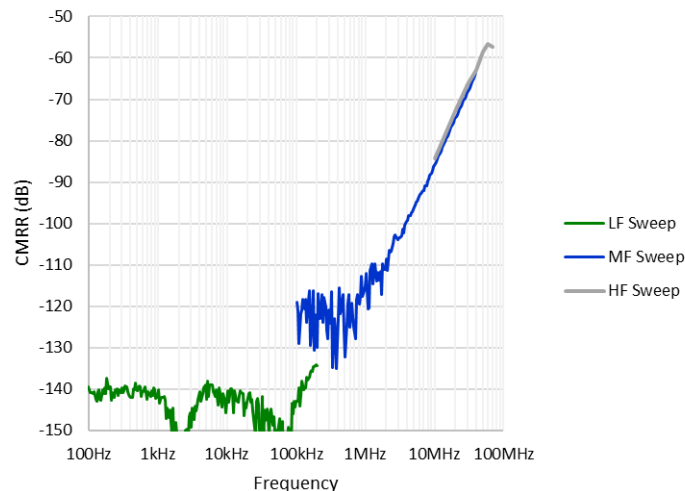


Specifications

80dB @ 60 Hz
65dB @ 1 MHz
40dB @ 5 MHz
30dB @ 100 MHz

DL-ISO

Common Mode Rejection Ratio with 1x Tip



Specifications

160dB @ 100 Hz
110dB @ 1 MHz
90dB @ 100 MHz
80dB @ 500 MHz

测量 V_{GS} 和 V_{DS}

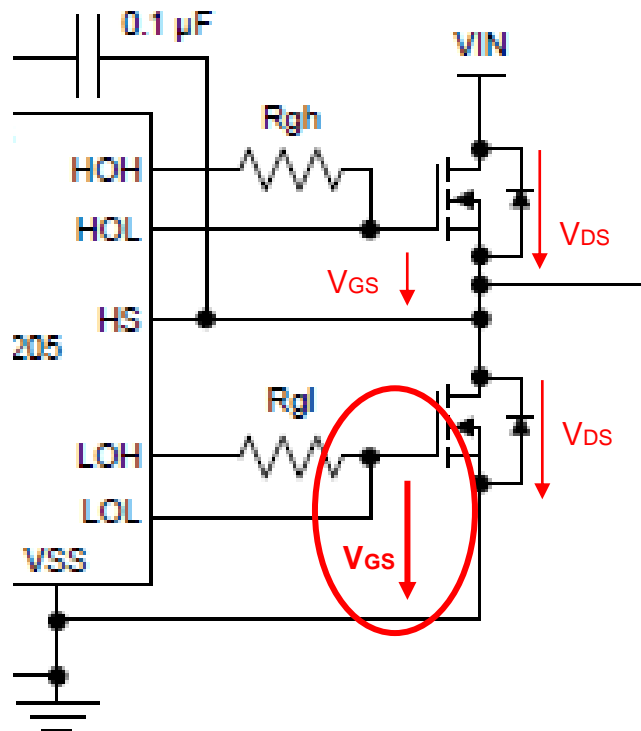


TELEDYNE LECROY
Everywhereyoulook™

使用什么探头测量 V_{DS} 或 V_{GS}

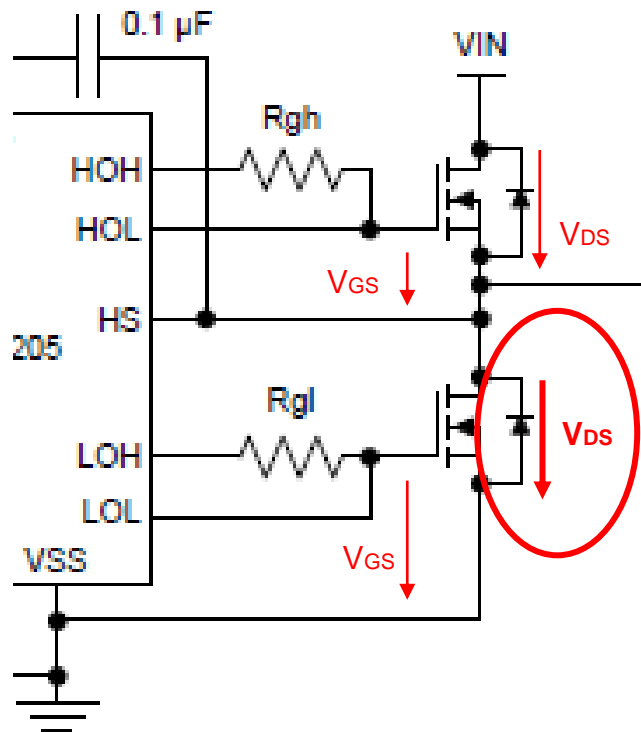
- 可以使用哪种探头取决于：
 - 功率器件的类型 -> SiC or GaN
 - 开关频率和开关上升时间(dV/dt)
 - 栅极信号 dv/dt 可以由栅极驱动器主动控制
 - 电压范围 -> 48V 的汽车或 >100V 的电源应用
 - 测量上管还是下管

测量下管栅极驱动信号



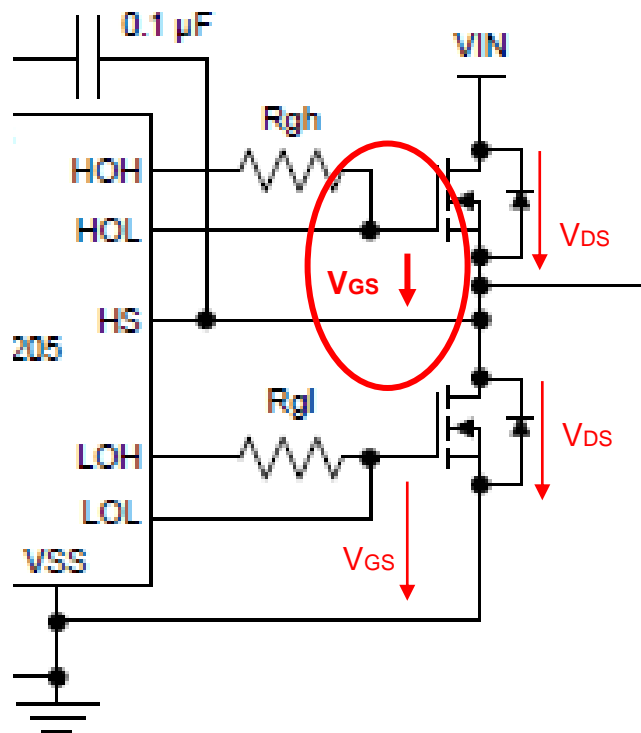
Probe		Limitations
Passive Probe	✓	Up to 350MHz
PPE, PHV	✓	Up to 350MHz, Noise performance not the best because of ÷100/1000 attenuation
HVD3x06A	✓	Up to 120MHz -> not for GaN
HVD3220	✓	Up to 400MHz Noise performance not the best
DL-HCM	✓	Best solution for this measurement
HVFO108	✓	Up to 150MHz -> not for GaN Noise performance not the best
DL-ISO	✓	A Differential Probe or Passive Probe might perform better in terms of the noise performance

测量下管漏极信号



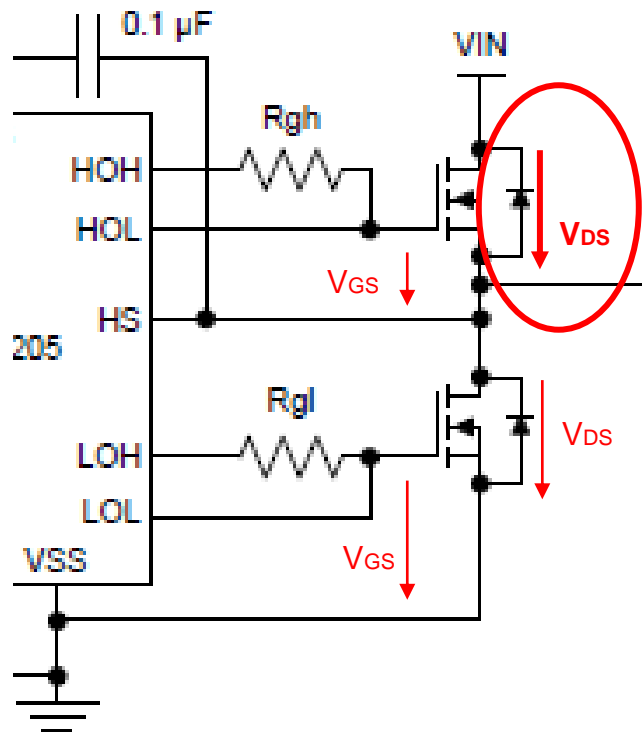
Probe		Limitations
Passive Probe	✓	Up to 350MHz max. 400V
PPE, PHV	✓	Up to 350MHz
HVD3x06A	✓	Up to 120MHz -> not for GaN
HVD3220	✓	Up to 400MHz Up to 2kV
DL-HCM	✓	Max. 80V -> Automotive applications
HVFO108	✓	Up to 150MHz -> not for GaN Max. 40V
DL-ISO	✓	Best solution for this measurement

上管栅极驱动信号



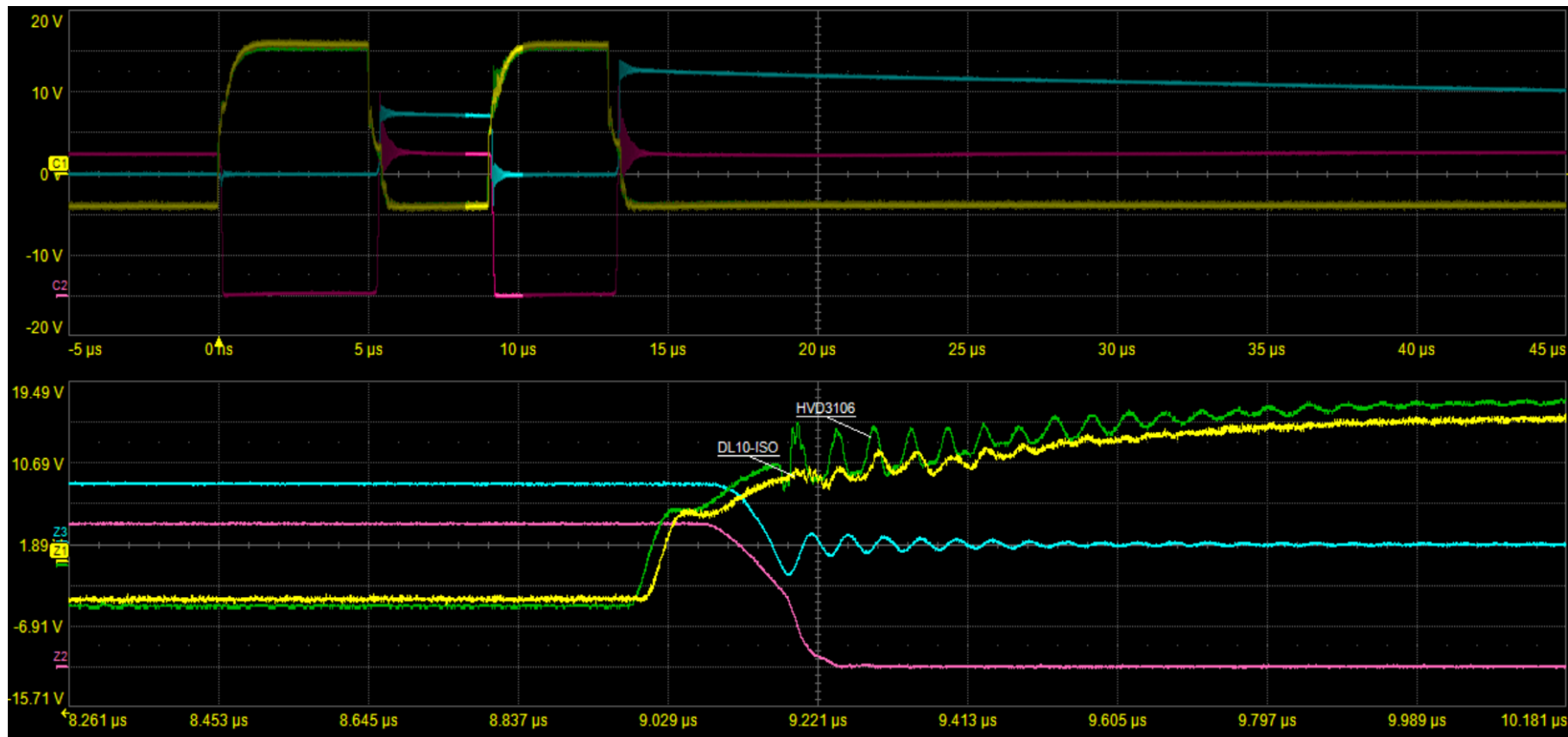
Probe		Limitations
Passive Probe	✗	Signal is not GND referenced, only V_G -Gnd could be measured on a DC-Bus <400V
PPE, PHV	✗	Signal is GND referenced, only V_G -Gnd could be measured
HVD3x06A	✓	Up to 120MHz -> not for GaN Up to 2kV DC-Bus
HVD3220	✓	Up to 400MHz Up to 2kV DC-Bus
DL-HCM	✓	Max. 60V DC-Bus
HVFO108	✓	Up to 150MHz -> not for GaN, should work for SiC, the higher the DC-Bus the better the performance
DL-ISO	✓	Best solution for this measurement up to 2.5kV DC-Bus

上管漏极信号

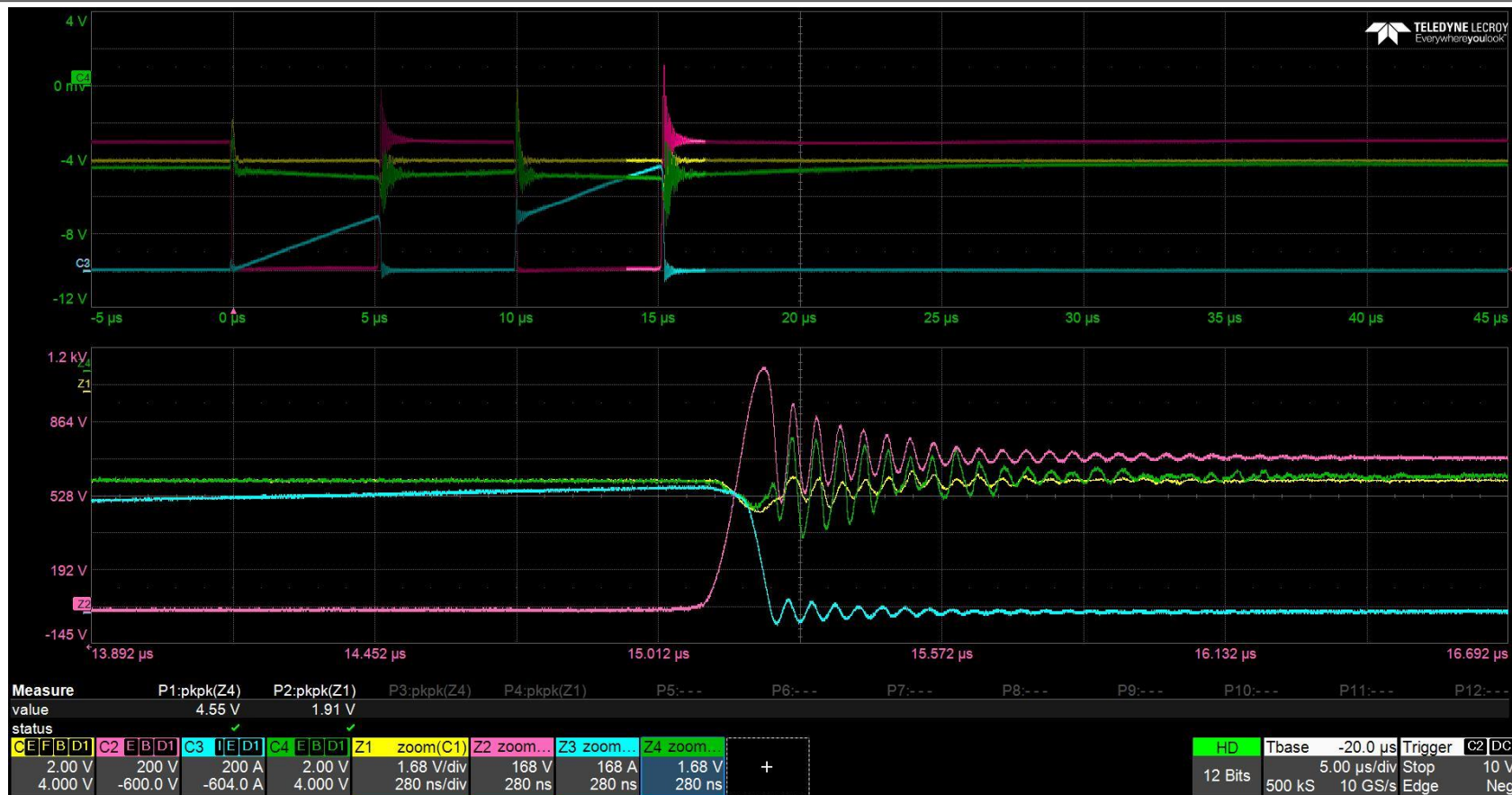


Probe		Limitations
Passive Probe	✗	Signal is not GND referenced, only V_D or V_S could be measured up to 400V
PPE, PHV	✗	Signal is not GND referenced, only V_D or V_S could be measured
HVD3x06A	✓	Up to 120MHz -> not for GaN Up to 2kV
HVD3220	✓	Up to 400MHz Up to 2kV
DL-HCM	✓	Max. 80V
HVFO108	✓	Up to 150MHz -> not for GaN, should work for SiC, max. input voltage 40V
DL-ISO	✓	Best solution for this measurement up to 2.5kV

上管Vgs测试 (DL-ISO VS.HVD3106)



Crosstalk测试 (DL-ISO VS.HVD3106)



测试ID



TELEDYNE LECROY
Everywhereyoulook™

在基于 SiC 或 GaN 的系统上测量电流

- 电流探头
 - 基于霍尔效应的电流探头的最大带宽是100MHz
 - SiC 和 GaN 设计无法添加环线来连接电流探头
 - 由于信号上升时间长，因环线添加的电感会改变半导体的开关行为
 - 通常设计非常紧凑，以至于无法使用电流探头
- 分流电阻
 - 可以工作，但这只适用于表征设置，不适用于批量生产，因为 PCB 上缺少空间并在设计中增加了电感和电容



DL-ISO 高压光隔离探头

氮化镓 (GaN) 和碳化硅 (SiC) 半导体器件验证分析的理想探头

- 带宽: 350 MHz, 700 MHz和1 GHz
- 输入电压: 2 V 到 2500 V
- 共模电压: 60 kV

更高的测量精度

- 1.5% 的系统增益精度
- 精确的增益校准
- 160 dB CMRR

	DL03-ISO	DL07-ISO	DL10-ISO
Bandwidth	350 MHz	700 MHz	1 GHz
Common mode range	60 kV		
Differential range	2 - 2500 V		
Gain accuracy	1.5%		
CMRR	160 dB		



WaveRunner 8000HD示波器捕获一切细节

8通道, 12-bit, 2 GHz高精度示波器

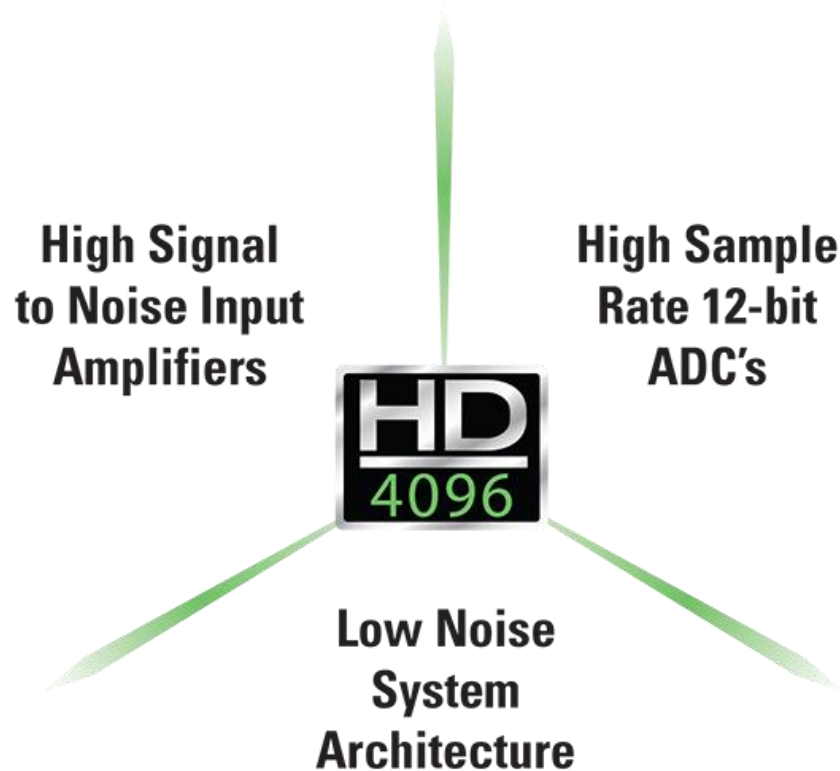
- 最高精度
 - HD4096技术始终提供12bit性能
 - 16倍接近完美
- 最多通道, 最高灵活性
 - 8模拟通道和16数字通道
 - 使用OscilloSYNC™ 技术可以组成16模拟通道
 - 没有模拟通道和数字通道的折中
- 最长存储深度
 - 具有5 Gpts存储深度, 并且可以简便的检索数据



力科HD4096 高分辨率技术

业内只有力科采用系统方式实现高分辨率

- 系统方式 = “12 bits all the time”
 - 12Bits ADC
 - 高信噪比前端放大器
 - 低噪声系统架构
- 优势 = “16x closer to perfect”
 - 干净、清晰的波形
 - 更低的本底噪声
 - 更高的有效比特位 (ENOB)
 - 更多的信号细节
 - 4096垂直电平 (vs. 256)
 - 无与伦比的测量精度
 - 0.5% 增益精度
 - 更高的通道隔离度



HD高分辨率示波器系列



	HDO4000A	HDO6000B	WaveRunner 8000 HD	WavePro HD	WaveMaster 8000 HD
HD Technology	HD4096 12 bits	HD4096 12 bits	HD4096 12 bits	HD4096 12 bits	HD4096 12 bits
Bandwidth	350 MHz – 1GHz	350 MHz – 1 GHz	350 MHz – 2 GHz	2.5 GHz – 8 GHz	20GHz-65GHz
Input Channels	4	4	8	4	4
Sample Rate	2.5 GS/s	10 GS/s	10 GS/s	20 GS/s	320GS/S
Analysis Capability	Exceptional	Advanced	Advanced	Exceptional	Exceptional

SiC动态参数测试-双脉冲测试

1. Oscilloscope



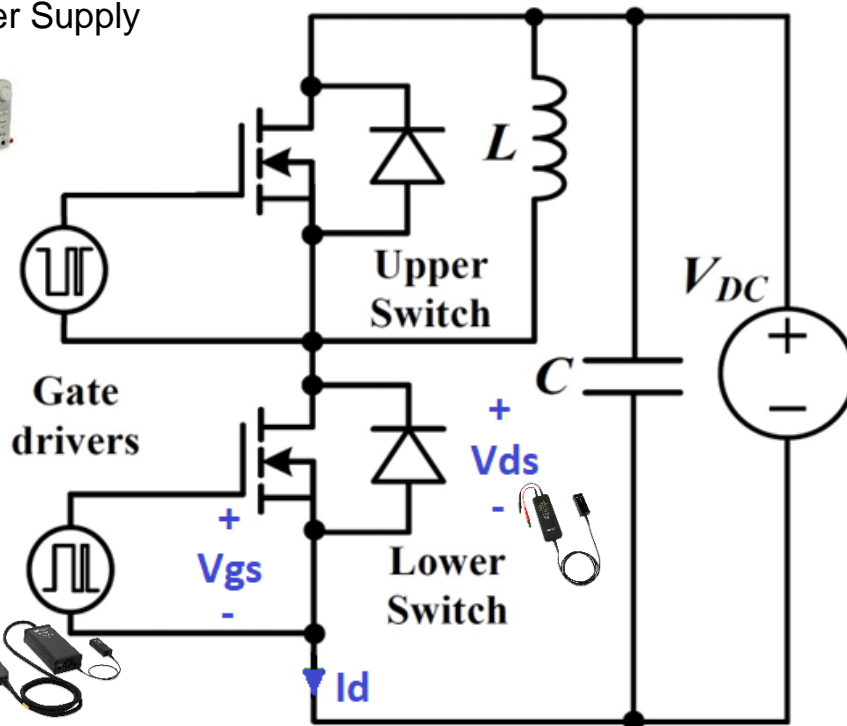
4. Auxiliary Power Supply



3. AWG



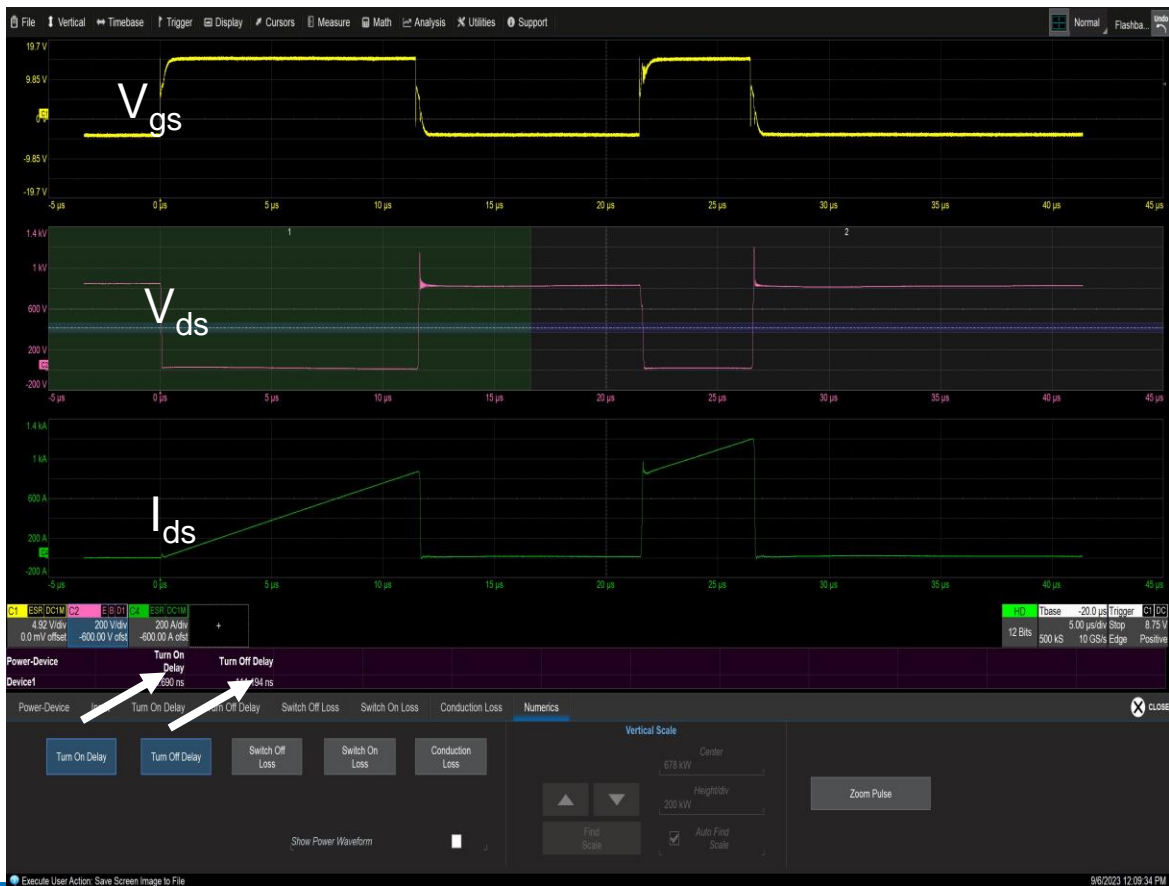
2. Probes



5. High Voltage Power Supply

双脉冲测试软件 (Power Device)

- 依据JEDEC标准
- 自动完成turn on/off delays, switching losses等参数的计算测量
- 支持单脉冲, 双脉冲以及多脉冲



动态参数测试系统

特励达力科和合作伙伴联合开发的全自动化动态测试系统

- 测试效率更高，速度更快
- 支持单脉冲，双脉冲，以及多脉冲的测试
- 更高的精度，搭配12bit高精度示波器和光隔离探头
- 更大的灵活性，可以支持定制各种封装的模块



Teledyne LeCroy



用于电气、物理层、逻辑和协议层测试的广泛工具

Protocol Analyzers and Test Appliances

Oscilloscopes

Electronic Test Equipment

Modular Data Acquisition

Sensors and Calibrators



用于串行数据标准和下一代技术的广泛测试解决方案



专家级测试服务和世界一流的培训和教育服务

Seminars and Webinars

Austin Labs Testing and Training

Frontline Test Services

Consulting

Device and Systems Testing



Questions?



TELEDYNE LECROY
Everywhere you look™