

勒钳位功能在隔离驱动中的应用

1. 功率器件的米勒效应简介

功率器件 Si MOSFET、SiC MOSFET 以及 IGBT 的任意两个端口之间都会存在着寄生电容，以 Si MOSFET 为例，其寄生电容分别为 C_{gs} 、 C_{gd} 、 C_{ds} ，如图 1 所示。

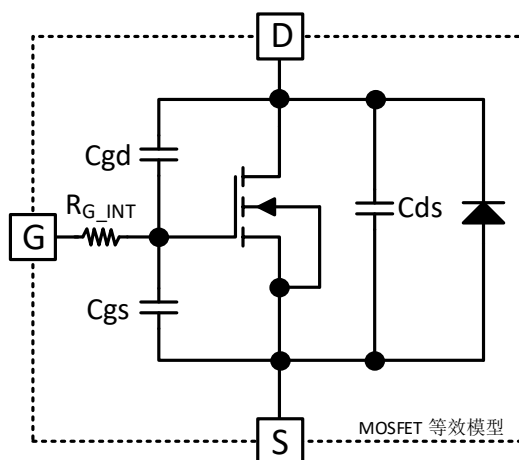


图 1 MOSFET 的寄生电容示意图

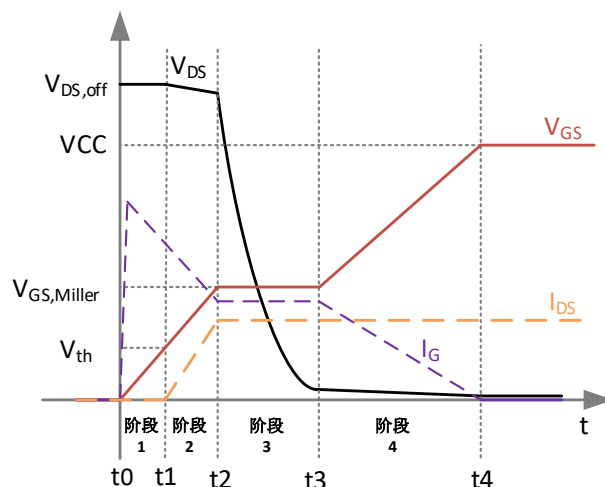


图 2 MOSFET 开通过程

MOSFET 管的 C_{gd} 会引起米勒效应：在 MOSFET 开通过程中， V_{gs} 上升到某一电压，持续一段时间后， V_{gs} 又继续上升，使得导通时间变长，开通损耗加剧，具体过程如下（如图 2）：

- 阶段 1($t_0 \sim t_1$)， V_{gs} 电压上升， I_g 主要给 C_{gs} 充电；
- 阶段 2($t_1 \sim t_2$)， V_{gs} 电压达到开启阈值 $V_{gs(th)}$ ，MOSFET 开始导通， I_{ds} 快速上升， V_{ds} 开始略微下降； V_{gs} 继续上升，为 C_{gs} 充电，直至进入米勒平台；
- 阶段 3($t_2 \sim t_3$)，随着 V_{ds} 大幅快速下降，驱动电流 I_g 除了继续为 C_{gs} 充电外，还有为 C_{gd} 充电，这段时间 V_{gs} 几乎没有增加，这段时间就是米勒平台；
- 阶段 4($t_3 \sim t_4$)，随着 C_{gd} 逐渐充满，MOSFET 完全导通， V_{gs} 继续增加，直到接近 V_{cc} 。

2. 桥式电路中的米勒效应

2.1. 米勒效应引起的额功率管误导通现象

功率器件如 Si MOSFET、SiC MOSFET、IGBT 可以看作是一个受门极电压控制的开关。当门极电压大于开通阈值时，功率器件就会开通，而当门极电压低于开通阈值时就会关断。但是在实际的应用中，由于器件及外围线路寄生参数的影响，会导致原本关断的功率器件会误开通。

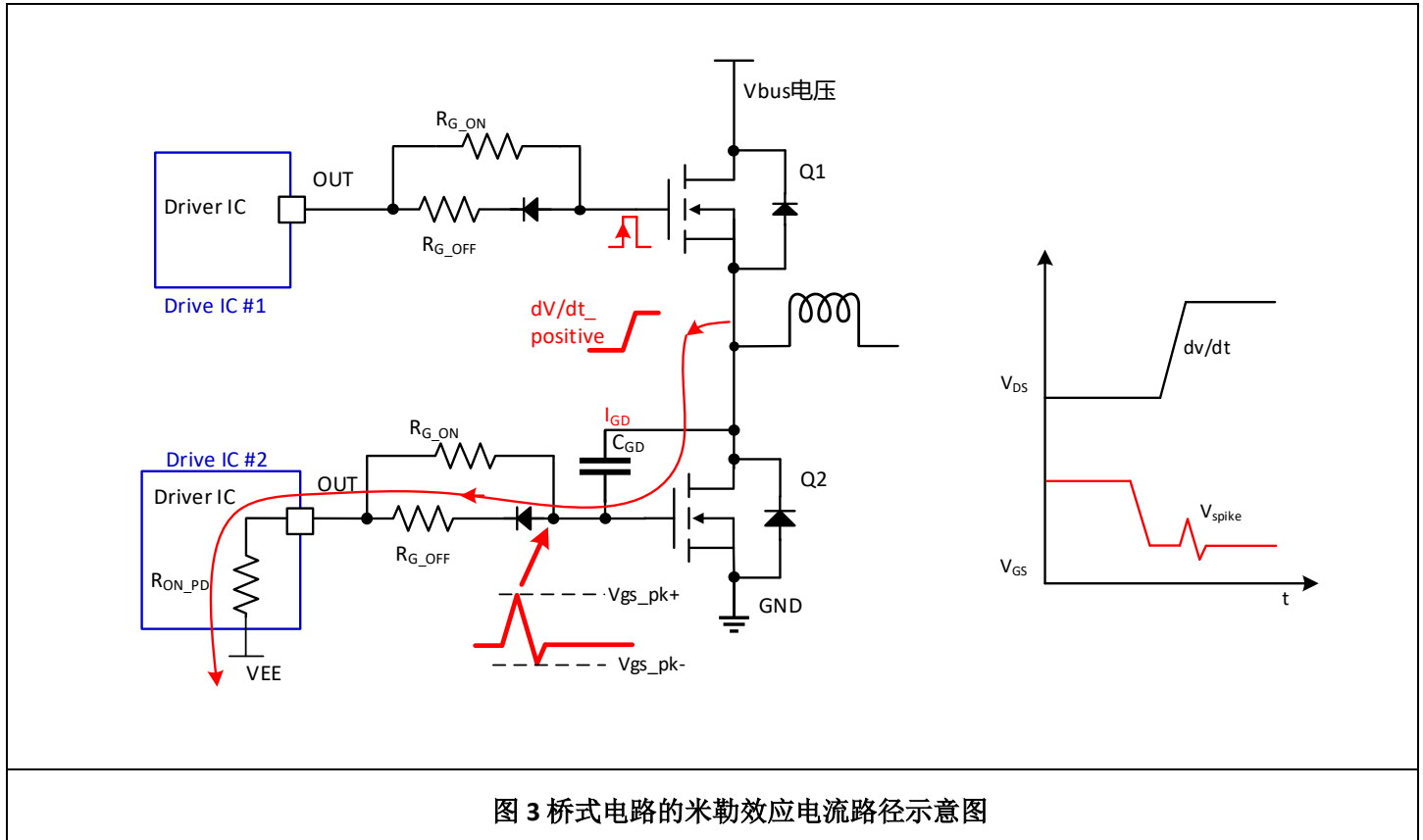


图3显示了桥式电路中米勒效应带来的误开通现象，当低边功率 MOSFET Q2 处于关断状态下，随着高边功率管 Q1 导通，Q2 的 V_{ds} 电压快速的上升产生高的 dv/dt ，从而在 Q2 电容 C_{gd} 中产生位移电流 (I_{gd})。这个位移电流流经 Q2 栅极电阻 R_{G_ON}/R_{G_OFF} 和驱动芯片#2 的下拉 MOS 的导通电阻 R_{ON_PD} 后会在 V_{GS} 上产生一个电压尖峰 (V_{spike})。如果这个电压尖峰超过了 MOSFET 的开通阈值，从而导致功率管 MOSFT 误开通。正常情况下，几十纳秒的脉冲电流可能不会直接损坏功率器件，然而，额外的损耗是少不了的，导致功率管的结温升高，降低器件的寿命。另外产生的振荡会干扰驱动电路和控制电路，造成工作异常。该米勒效应现象严重时引起上下管的直通，从而引起炸管。

2.2. 桥式电路的米勒效应原理分析

如图 3 所示，当下管 Q2 保持关闭，在上管 Q1 开通瞬间，桥臂中点电压快速上升， dv/dt 的大小，取决于上管 Q1 的开通速度。该 dv/dt 会驱动下管 Q2 的栅漏间的寄生电容 C_{GD} ，形成米勒电流 I_{GD} 。 $I_{GD}=C_{GD} \cdot (dv/dt)$ ， dv/dt 越大，米勒电流 I_{GD} 越大。米勒电流 I_{GD} （红色线）的路径： $C_{GD} \rightarrow R_{OFF} \rightarrow \text{Drive IC \#2} \rightarrow \text{负电源轨 VEE}$ ，产生左负右正的电压。

功率管关断状态下米勒效应引起的栅极电压 V_G 计算公式如下：

$$V_G = I_{GD} \cdot R_{G_OFF} + I_{GD} \cdot R_{ON_PD} + V_D + V_{EE}$$

这个电压叠加在功率器件 Q2 的栅极和源极上，当其超过 $V_{GS(th)}$ 时，将会使 Q2 出现误开通，从而造成上下管的直通现象。

2.3. 抑制米勒现象的常用措施

- 1) 使用栅极电压的负压进行负偏置，使功率器件的 V_{GS} 电压在关断状态的负压足够“负”；
- 2) 提高功率器件栅极的门槛电压（设计选型时选择相当较高 $V_{GS(th)}$ 的器件）；
- 3) 选择具有更好 C_{GD}/C_{GS} 比（电容性分离器）的功率管，较小的 C_{GD} 和较大的 C_{GS} ，使器件关闭时的残余 V_{GS} 最小化；此外，在功率管的栅极和源极(发射极)之间并联适当大小的电容，进而改善 C_{GD}/C_{GS} 比；
- 4) R_G 数值适当减小（ R_{G_OFF} 是米勒现象影响程度的主要贡献者之一，数值越大，米勒现象越糟糕）；
- 5) 减慢对管的功率器件的开断速度，以降低 dV/dt 的影响，即减少了 I_G 的瞬间电流；
- 6) 使用具有米勒钳位功能的驱动芯片。

2.4. 对比 IGBT/ Si MOSFET 和 SiC MOSFET 对驱动芯片米勒钳位的需求

在功率半导体的寄生参数中，除了寄生电容 C_{GD} ，还有另外一个寄生电容 C_{GS} ，部分 I_G 电流将会通过该电容直接到功率管源极。在功率栅极和源极之间外接个电容 C_{GS} 也可以降低密勒效应，但需要注意的是额外电容 C_{GS} 将影响 IGBT 的开通特性。为了抑制或衰减不需要的振荡，可以用一个小电阻和电容串联。

外接个电容 C_{GS} 分流是一种原始的思路，外接电容不但会影响开关速度，对于更高漏源电压系统应用来说，相对作用并不明显。集成电路时代一定会考虑用有源器件来实现同样或更好的功能，这就是米勒钳位功能。不同的功率器件对米勒钳位功能的需求有所不同，下面简单对比一下 IGBT/Si MOSFET 和 SiC MOSFET 的特点。

表格 1 比较 SiC MOSFET 与 Si MOSFET/IGBT 特点

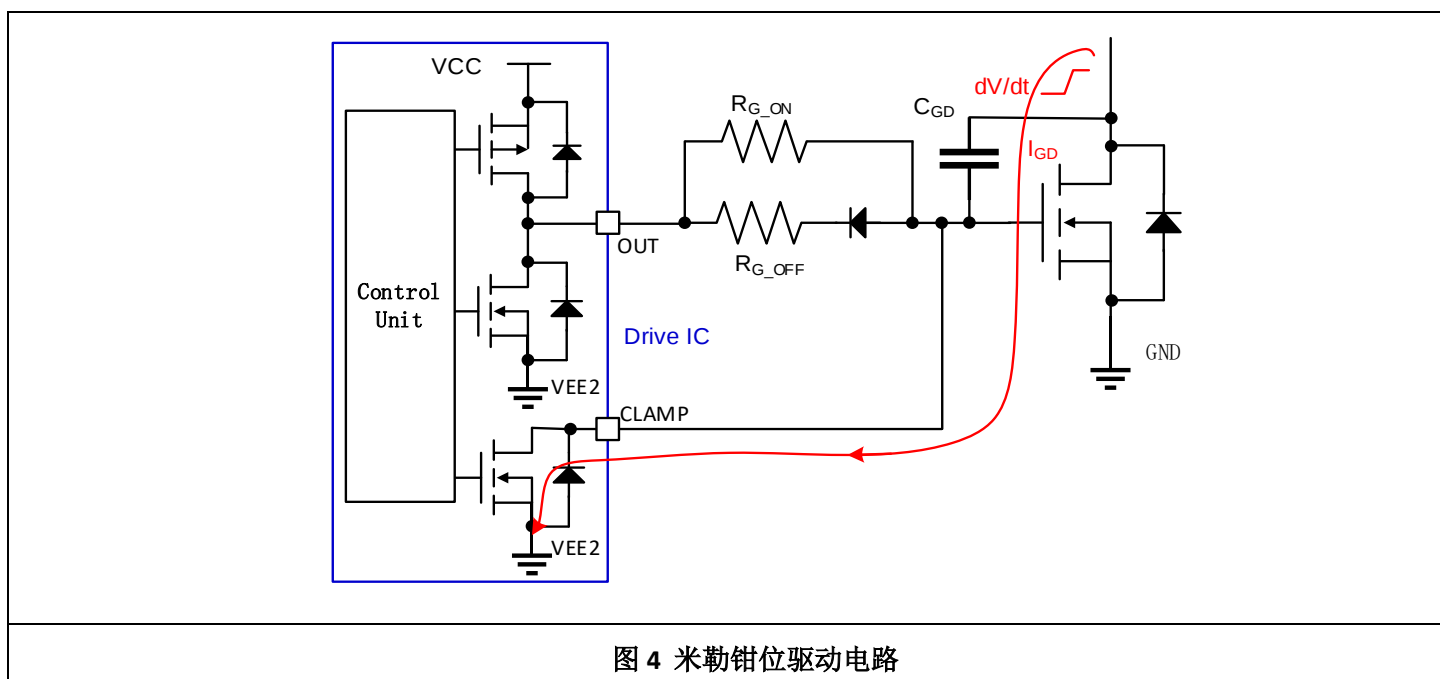
参数和性能指标	IGBT/ Si MOSFET	SiC MOSFET	说明
开通速度 dV/dt	相对稍慢	相对更快	1.米勒电流， $I_G=C_{GD} \cdot dV/dt$ ，开通速度越快，米勒电流 I_g 越大； 2.一般情况下，SiC MOSFET 的开通速度通常大于 IGBT/Si MOSFET，但米勒电容 C_{gd} 相对较小。
米勒电容 C_{GD}	较大	较小	
栅极开启电压阈值 $V_{GS(th)}$	3~6V	1.8~3.5V	1.开启电压越低，越易出现米勒现象； 2. IGBT/Si MOSFET 的 $V_{GS(th)}$ 普遍高于 SiC MOSFET；

栅极负压极限值	-20~-30V	~-10V	1. IGBT/Si MOSFET 的负压极限能力明显由于 SiC; 2. 应用中, SiC MOSFET 的负压驱动电压多为-2~-5V,而 IGBT/Si MOSFET 的负压驱动电压通常在-7~-15V;
---------	----------	-------	--

通常, SiC MOSFET 漏极的 dV/dt 相对于 IGBT 更高, 同功率规格的 SiC MOSFET 的开关速度是硅 Si MOSFET 和 IGBT 的两倍以上, 不过在 SiC MOSFET 的米勒电容 C_{GD} 相对更小。综合而言, SiC MOSFET 米勒电流相对更大, 更容易误开通。Si MOSFET 和 IGBT 的栅极耐负压极限可达-30V, 而 SiC MOSFET 只有-8V, SiC MOSFET 对驱动电压负值的忍耐能力明显低于硅 MOSFET 和 IGBT, 使得 SiC MOSFET 在实际应用中驱动负电压通常在-2~-4V 的水平, 使用负电压进行关断的电压幅度明显少于 Si MOSFET 和 IGBT。SiC MOSFET 的开启电压 $V_{GS(th)}$ 是 1.8V~3.5V, 比 Si MOSFET 和 IGBT 的开启电压 $V_{GS(th)}$ 要低一半左右, $V_{GS(th)}$ 越低, 越容易误开通, 而且 $V_{GS(th)}$ 会随着 TJ 温度上升而下降, 所以在高温时, $V_{GS(th)}$ 将变得更低, 也更容易导致误开通。

综上所述, SiC MOSFET 更容易发生误开通现象。为降低误开通风险, 在 SiC MOSFET 的驱动电路中推荐使用米勒钳位功能的驱动芯片。

2.5. 通过增加米勒钳位功能来抑制米勒效应



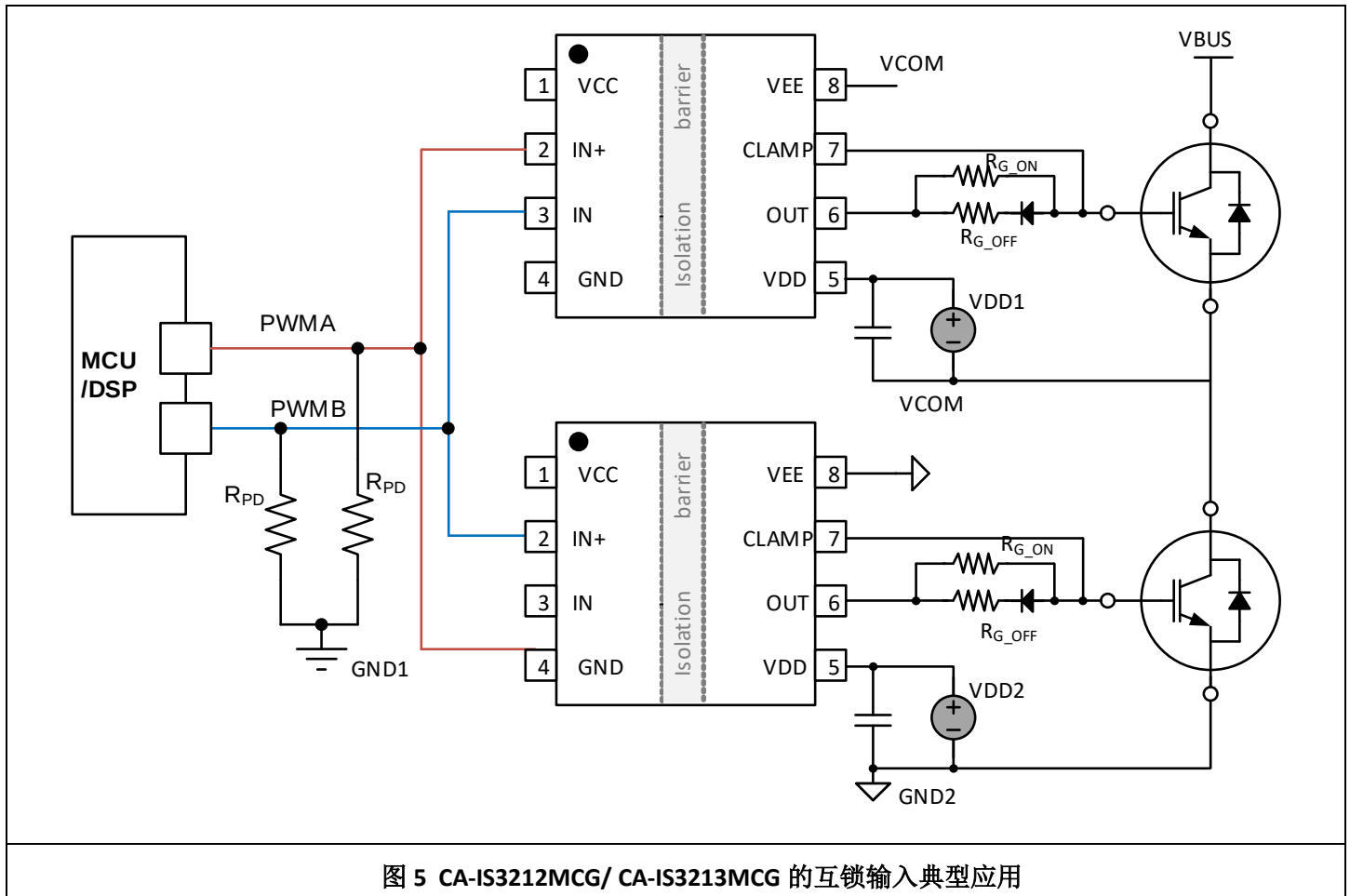
如图 4, 驱动芯片的米勒钳位脚 (Clamp) 直接连接到功率管的栅极, 米勒电流 I_{GD} (红色线) 会流经 $C_{GD} \rightarrow$ Clamp 脚 $\rightarrow$ 芯片钳位 MOS 漏源 CLAMP $\rightarrow$ 负电源轨 VEE2, 形成了一条更低阻抗的栅极电荷泄放回路。流过米勒电容的电流大部分由驱动芯片的内部晶体管分流, 而不是流经输出驱动器 OUT。驱动芯片的米勒钳位功能仅在被驱动的功率管关闭期间有效, 不影响功率管的开启和关断。

3. 川土微电子具有米勒钳位功能的隔离驱动芯片

3.1. CA-IS3212MCG/CA-IS3213MCG

CA-IS3212MCG/CA-IS3212MCG 基于电容隔离的单通道栅极驱动器。CA-IS3212MCG 具有 4A/5A 峰值的拉/灌电流能力的单通道增强隔离栅极驱动器。CA-IS3213MCG 具有高达 15A 峰值的拉/灌电流能力的单通道增强隔离栅极驱动器。CA-IS3212 通过 SiO₂ 电容隔离技术实现控制侧与驱动侧的电气隔离，同时具有良好的器件一致性以及 >150V/ns 的共模瞬态抗扰度 (CMTI)。

CA-IS3212MCG/CA-IS3213MCG 提供 CLAMP 引脚 5A/4A 驱动能力。芯片内部米勒钳位功能的内部比较器的翻转电压阈值为 2V(参考源 VEE)，应用中直接去被驱动的功率管的栅极相连。当功率器件关断期间，若栅极电压低于 VEE+2V 时，芯片内部比较器翻转，使得芯片内部的功率管被打开，为栅极电压提供一条更低阻抗的路径到负电源 VEE，从而确保达到抑制由于米勒效应误开通功率管的效果。图 5 为 CA-IS3212MCG/CA-IS3213MCG 互锁接法的典型应用。



3.2. CA-IS3215/16X 系列

CA-IS3215/6X 是一系列基于电容隔离的集成多种保护功能的单通道增强隔离栅极驱动器，具有高达 $\pm 15\text{A}$ 峰值的拉/灌电流能力，可用于驱动 SiC、IGBT 和 MOSFET 等功率器件。CA-IS3215/6 具有以下多重保护功能：快速过流和短路检测、有源短路保护、有源米勒钳位、主动下拉、短路钳位、软关断、故障报告、控制和驱动侧电源 UVLO，同时针对 SiC 和 IGBT 开关行为进行了优化，并提高了可靠性。

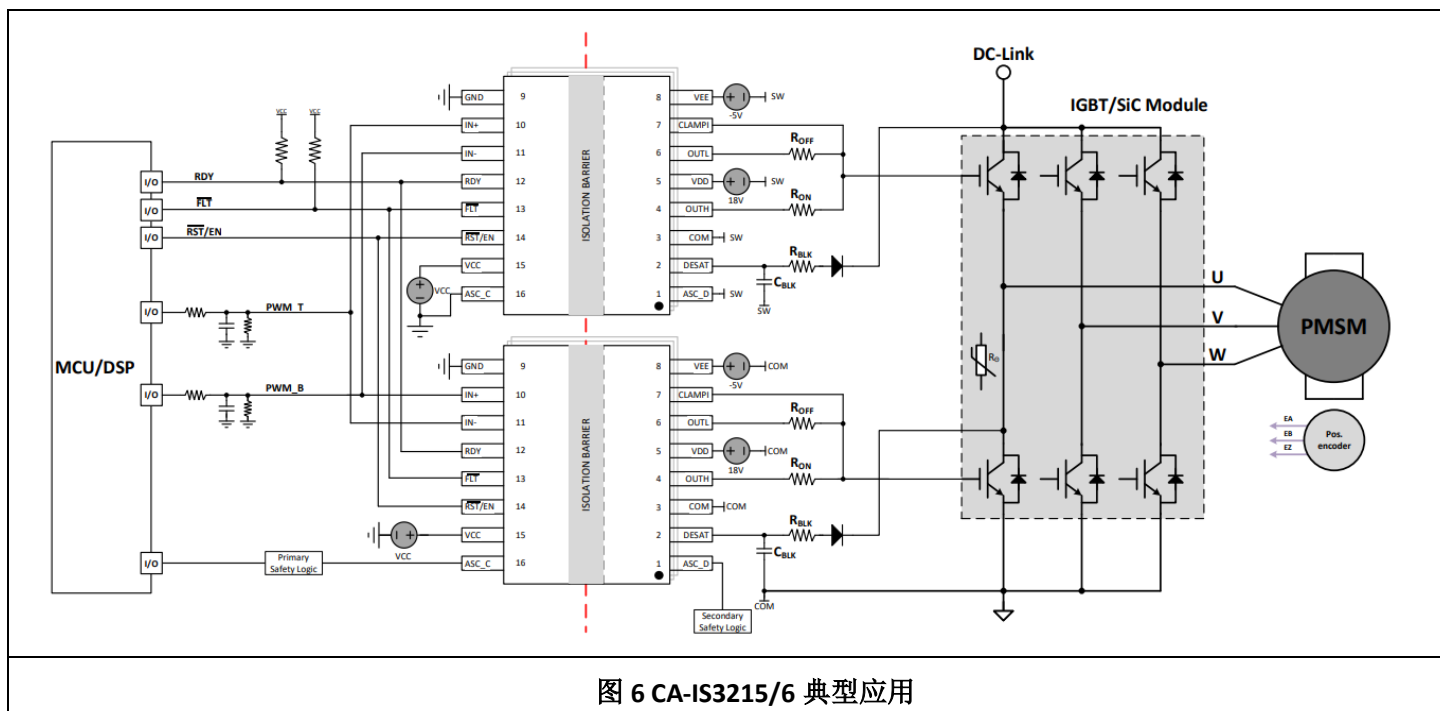


图 6 CA-IS3215/6 典型应用

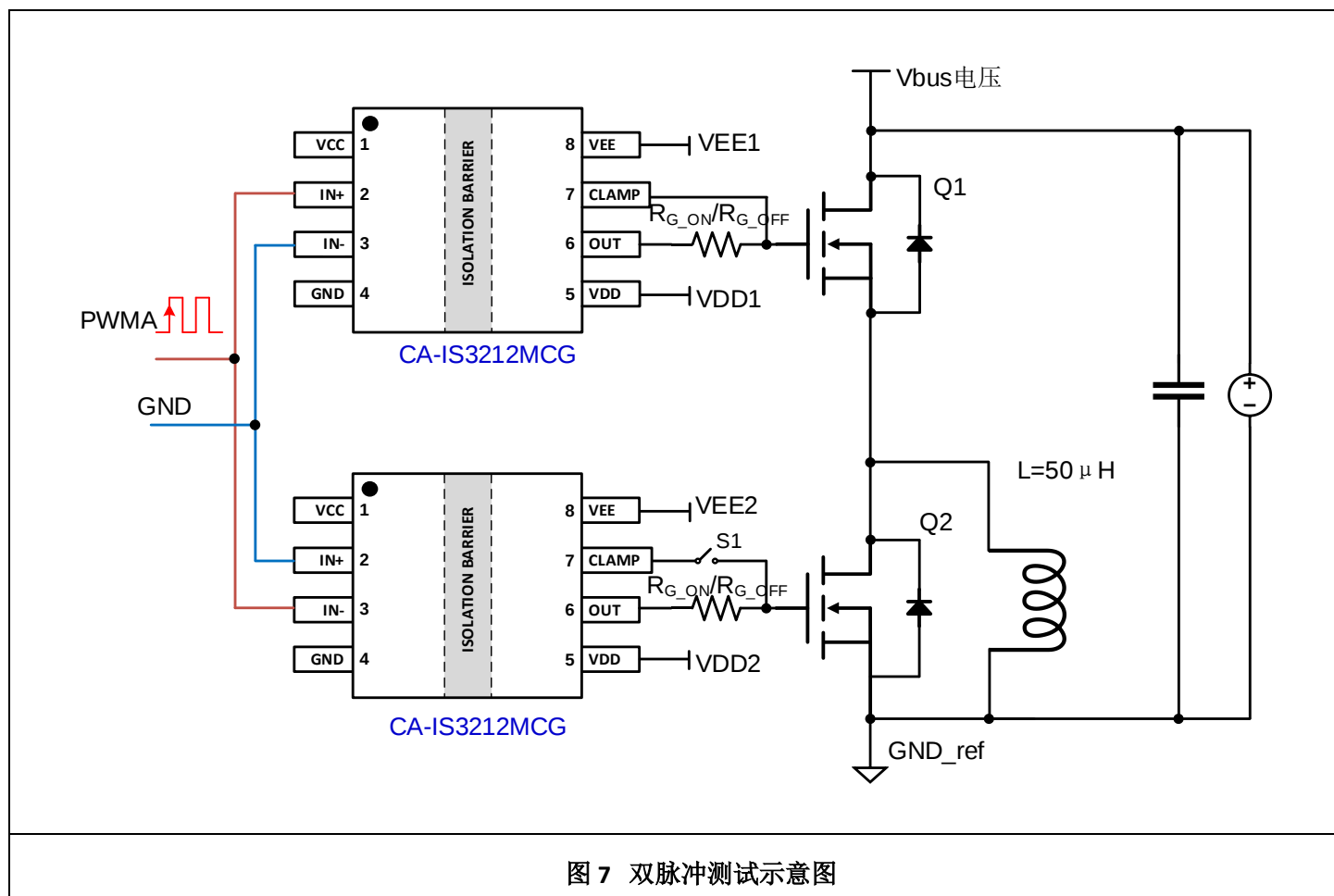
4. 在双脉冲平台上对比米勒钳位功能

4.1. 双脉冲平台简介

在应用中，因功率器件厂家提供的参数与实际工况有差异，可通过双脉冲平台获取功率管的开关特性，如寄生二极管的反向恢复电流、开通关断时间、关断电压 V_{DS} 尖峰等。

双脉冲测试通常以半桥形式测试，所谓双脉冲，半桥的一个桥臂保持关断，另一个桥臂给定两个脉冲驱动信号，进行测试开关特性。

如图 7，上管(Q1)作为开关管接收脉冲 PWMA 信号，下管(Q2)处于关断状态，上管(Q1)靠体二极管续流负载电感 L 的电流。在上管(Q1)开通状态下，由于米勒效应的存在，下管(Q2)栅极电压将会产生一定的波动。因此，通过对 CA-IS3212MCG 的 CLAMP 钳位引脚连接或者不连接 Q2 的基极，比较两种情况下驱动电压的差异来说明米勒钳位对抑制米勒现象的抑制作用。



4.2. 对比有/无米勒钳位两种情况的实验

4.2.1. 实验配置

- 1) $V_{DD1}=15V$, $V_{DD2}=15V$, $V_{EE1}=-5V$, $V_{EE2}=-5V$;
- 2) 上管/下管的驱动芯片 CA-IS3212MCG 互锁输入接法, 使得上管输入双脉冲, 第一个脉冲 $3\mu s$, 第二个脉冲 $1.5\mu s$, 下管恒定 $V_{GS}=0V$;
- 3) $V_{bus}=400V$; $I_D=40A$; $R_{G_ON}/R_{G_OFF}=5.6\Omega$; $L=100\mu H$;
- 4) 功率管型号: 华润华晶公司的 CRG40T120AK3S, $1200V/40A$ 的 IGBT, 其中反向传输电容 $C_{res}(C_{GD})$ 为 $111pF$, 输入电容 $C_{ies}(C_{GS})$ 为 $6618pF$ 。

注:

- 1) CA-IS3212 具有 $IN+$ 和 $IN-$ 引脚的 PWM 内部互锁功能, 用于防止同相位桥击穿问题, 本实验中, 输入采用互锁的方式连接;
- 2) 电感取值 $100\mu H$, 使得在 $400V$ 输入电压下, 第一个脉冲峰值电流到 $12A$, 第二个峰值电流到 $18A$ 。

4.2.2. 理论推算

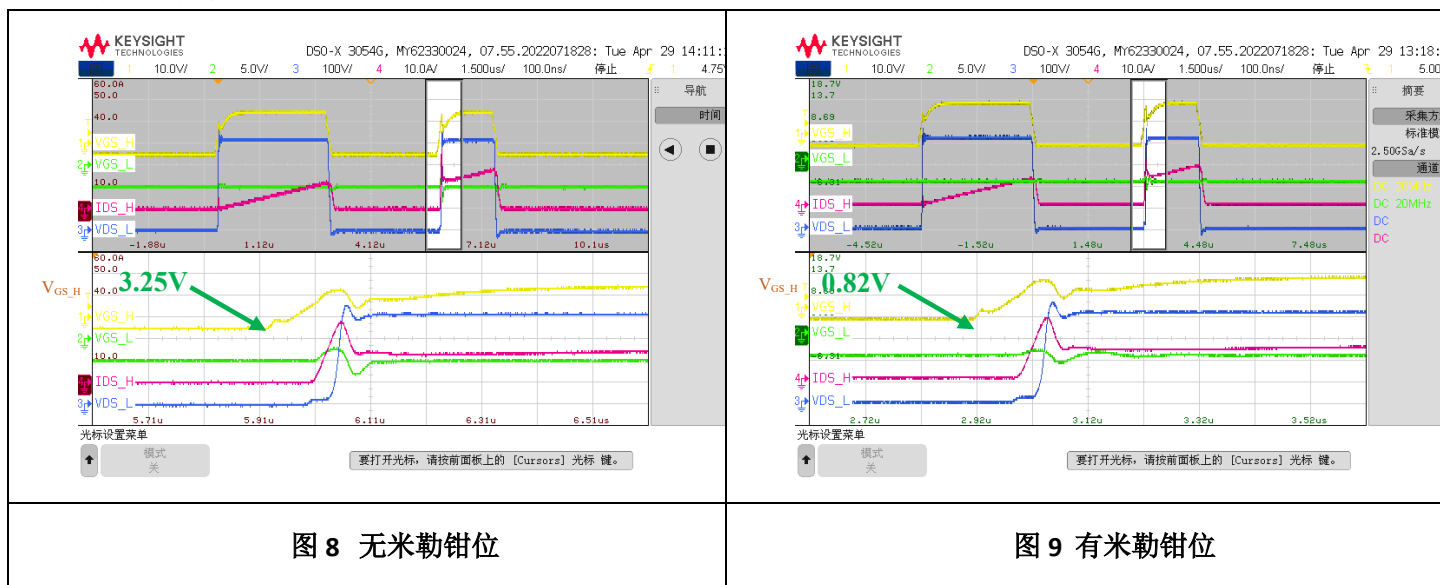
根据上述分析, $V_G=I_{GS}*R_{G_OFF}+I_{GD}*R_{ON_PD}+V_D+V_{EE2}$, 驱动电阻驱 R_{G_ON}/R_{G_OFF} 取 5.6Ω , 分别计算有无米勒钳位功能的 V_{GS} 预计值如下。

参数	C_{GD} (pF)	dv/dt (kV/us)	R_{G_ON}/R_{G_OFF} (Ω)	R_{ON_PD}/R_{ON_CLMP} (Ω)	V_{gs_spk} (V)
无米勒钳位	111	10	5.6	0.6	6.82
有米勒钳位	111	10	0	0.6	0.6

注:

- 1) R_{ON_OUTL} 表示驱动芯片 CA-IS3212MCG 输出低电平时的芯片内部下拉 MOS 导通阻抗;
- 2) R_{ON_CLAMP} 表示驱动芯片 CA-IS3212MCG 输出低电平时的芯片内部米勒钳位 MOS 导通阻抗;
- 3) V_{gs_spk} 电压值以负压 V_{EE} 为参考;
- 4) dv/dt 为 Q2 的 V_{DS} 的变化斜率值, 为预估值。

4.2.3. 实验结果与总结



从以上的图 8 和图 9 实测波形可知，无米勒钳位时，下管栅极电压被抬高到 3.25V(相对于 VEE 电压)；有米勒钳位时，下管栅极电压被抬高到 0.82V(相对于 VEE 电压)，米勒钳位功能对米勒效应有明显抑制效果。

测试值和理论计算有一定的偏差， C_{GD} 的值基于一定条件下的测试值，和实际应用时会有一定的误差， dv/dt 的值也略有偏差，此外，双脉冲测试板的寄生参数也会带来一定的影响。

5. 总结

在驱动功率器件特别是 SiC MOSFET 时引入米勒钳位功能效果非常显著，采用川土微电子的 CA-IS3212MCG/CA-IS3212MCG 带有米勒钳位功能的单通道隔离栅极驱动芯片，在中小功率场景下，可以使用单电源供电，减少系统的复杂度；在大功率场景中，配合双电源供电，能够更为可靠地抑制误开通，可以极大程度提高系统的安全性。

修订历史

修订版本	修订时间	修订内容
Rev 1.0	2025/4/25	初始版本

重要声明

上述资料仅供参考使用，用于协助 Chipanalog 客户进行设计与研发。Chipanalog 有权在不事先通知的情况下，保留因技术革新而改变上述资料的权利。

Chipanalog 产品全部经过出厂测试。针对具体的实际应用，客户需负责自行评估，并确定是否适用。Chipanalog 对客户使用所述资源的授权仅限于开发所涉及 Chipanalog 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，Chipanalog 对此概不负责。

商标信息

Chipanalog Inc.®、Chipanalog®为 Chipanalog 的注册商标。



<http://www.chipanalog.com>