

使用 EiceDRIVER™ 为碳化硅 (SiC) MOSFET 提供高级栅极驱动选项

关于本文档

范围和目的

本应用笔记讨论了碳化硅 (SiC) MOSFET 的基本参数，并推导出栅极驱动的要求。本文档涵盖以下 EiceDRIVER™ 隔离式及电平转换栅极驱动 IC：

- EiceDRIVER™ Compact 隔离栅极驱动器：
 - [1ED3122MC12H](#)、[1ED3124MC12H](#)、[1ED3124MU12F](#)、[1ED3127MU12F](#)、[1ED3142MU12F](#)、[1ED3241MC12H](#)、[1ED3251MC12H](#)
- EiceDRIVER™ Enhanced 隔离栅极驱动器：
 - [1ED3321MC12N](#)、[1ED3491MC12M](#)、[1ED3890MC12M](#)
- EiceDRIVER™ 绝缘体上硅 (SOI) 电平转换栅极驱动器：
 - [2ED1323S12P](#)

这些栅极驱动 IC 系列基于无磁芯变压器提供电气隔离，或基于绝缘体上硅实现结隔离，能良好处理额定高达 2300 伏且具备超快速开关能力的功率晶体管。因此，本文档集中介绍适合的电平转换 (1200 V) 和具有电气隔离的栅极驱动 IC (2300 V)。

请注意，英飞凌采用先进的 CoolSiC™ 沟道 MOSFET 技术，具备众多优势，有助于简化栅极驱动复杂性。这些优势在本文档中会有详细阐述。也请参阅其他高亮 CoolSiC™ 特性的应用笔记。

Note: 本文档不涉及 SiC 双极晶体管或 SiC JFET。

目标读者

本文档供电子系统设计工程师、技术人员和开发者阅读。

目录

目录

关于本文档	1
目录	2
1 概述	3
2 SiC MOSFET 栅极驱动的要求及选项	5
2.1 同步整流	5
2.2 实现短死区时间以提升效率	5
2.2.1 精确传播延迟匹配	6
2.2.2 精确集成滤波器	6
2.3 负向栅极电压	7
2.4 宽栅极电压范围	9
2.5 扩展的共模瞬态免疫 (CMTI) 能力	11
2.6 快速 DESAT 检测与过流保护	12
2.7 有源米勒钳位	16
3 功率耗散	18
3.1 隔离栅极驱动器功率耗散	18
3.2 电平转换栅极驱动器功率耗散	19
4 OFF 状态下具有低 dV/dt 应力单一晶体管拓扑与应用的考虑因素	22
5 总结	23
参考文献	24
文档修订记录	25
声明	26

1 概述

1 概述

针对每款栅极驱动器，表 1 列出了驱动 SiC MOSFET 所需的功能。最重要的参数包括：

- 紧密传播延迟匹配
- 精确输入滤波器
- 宽输出侧供电范围
- 负栅极电压能力
- 扩展的瞬态共模抑制能力
- 有源米勒钳位
- 快速退饱和 (DESAT) 保护

表 1. 对 SiC MOSFETs 至关重要的栅极驱动功能

功能/属性	X3 Compact 系列					F3 系列	2L-SRC 系列	X3 Analog/ X3 Digital 系列	电平转换 SOI 系列
	1ED3122MC12H	1ED3124MC12H	1ED3124MU12F	1ED3127MU12F	1ED3142MU12F				
传播延迟匹配 < 15 ns	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—
精确输入滤波器 < 150 ns	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—	—	✓
宽输出供电范围	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
负栅极电压	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	—
扩展 CMTI (> 200 kV/μs)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	不适用
快速退饱和 (DESAT)	—	—	—	—	—	✓	—	✓	✓
快速过电流保护 (OCP)	—	—	—	—	—	—	—	—	✓
压摆率控制	—	—	—	—	—	—	✓	✓	—
UVLO _{ON} ≥ 12 V	—	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
有源米勒钳位	✓	—	—	✓	—	✓	—	✓	✓
独立输出源与接收端	—	✓	✓	—	✓	✓	—	✓	—

1 概述

功能/属性	X3 Compact 系列					F3 系列	2L-SRC 系列	X3 Analog/ X3 Digital 系列	电平转换 SOI 系列
	1ED3122MC12H	1ED3124MC12H	1ED3124MU12F	1ED3127MU12F	1ED3142MU12F				
最适合使用于	性价比最高， 米勒钳位/负栅极电 压		快速消磁	压摆率控制	可配置参数与 条件监控		半桥		
	1ED3321MC12N	1ED3241MC12H	1ED3251MC12H	1ED3491MC12M	1ED3890MC12M	2ED1323S12P			

工业级应用中最受欢迎的功率变换器拓扑结构主要由半桥配置中连接的功率晶体管组成。对于这种配置，最简单且成本效益最高的选择是 EiceDRIVER™ X3 Compact (1ED31xx) 或带有 2 通道输出的 SOI 栅极驱动器 (2ED1323S12P)。如果不需要栅极驱动器的短路保护，采用 DSO-8 150 mil 和 300 mil 封装的 EiceDRIVER™ X3 Compact (1ED31xx) 系列的都可完美用于驱动 SiC MOSFET。如果需要快速短路保护功能，可选择以下 EiceDRIVER™ Enhanced 系列产品：1ED3321MC12N、1ED3491MC12M、1ED3890MC12M 以及 2ED1323S12P。1ED3491MC12M 和 1ED3890MC12M 属于 X3 系列，提供高级功能，支持高度可配置性和参数监控。该特性提升了设计灵活度，且支持能够进行条件监控。

采用 CoolSiC™ MOSFET 的单晶体管转换器拓扑结构（如升压、降压、正向或反激式）在拥有独立输出源和接收端的情况下，可能会获得最大收益。

2 SiC MOSFET 栅极驱动的要求及选项

2 SiC MOSFET 栅极驱动的要求及选项

2.1 同步整流

在脉冲宽度调制 (PWM) 模式下运行如电机等感应负载时，半桥配置在开关的死区时间和关闭状态期间需要一条续流路径。SiC MOSFET 的体二极管自动提供续流路径。建议开启 MOSFET 的晶体管部分，以支持体二极管的正向操作。此时 MOSFET 的通道在反向状态下工作。这种半桥控制方式通过 MOSFET 通道开通了一条与体二极管并联的路径。这称为同步整流。

这种操作模式的优势在于：通道的压降远低于体二极管的正向电压。这大大降低了续流电流的压降，减少了 MOSFET 的通态损耗。如图 1 所示，体二极管的正向电压相对较高，因此这种操作模式对 SiC MOSFET 至关重要。为提高系统效率，必须尽可能避免仅二极管导通的工作模式。

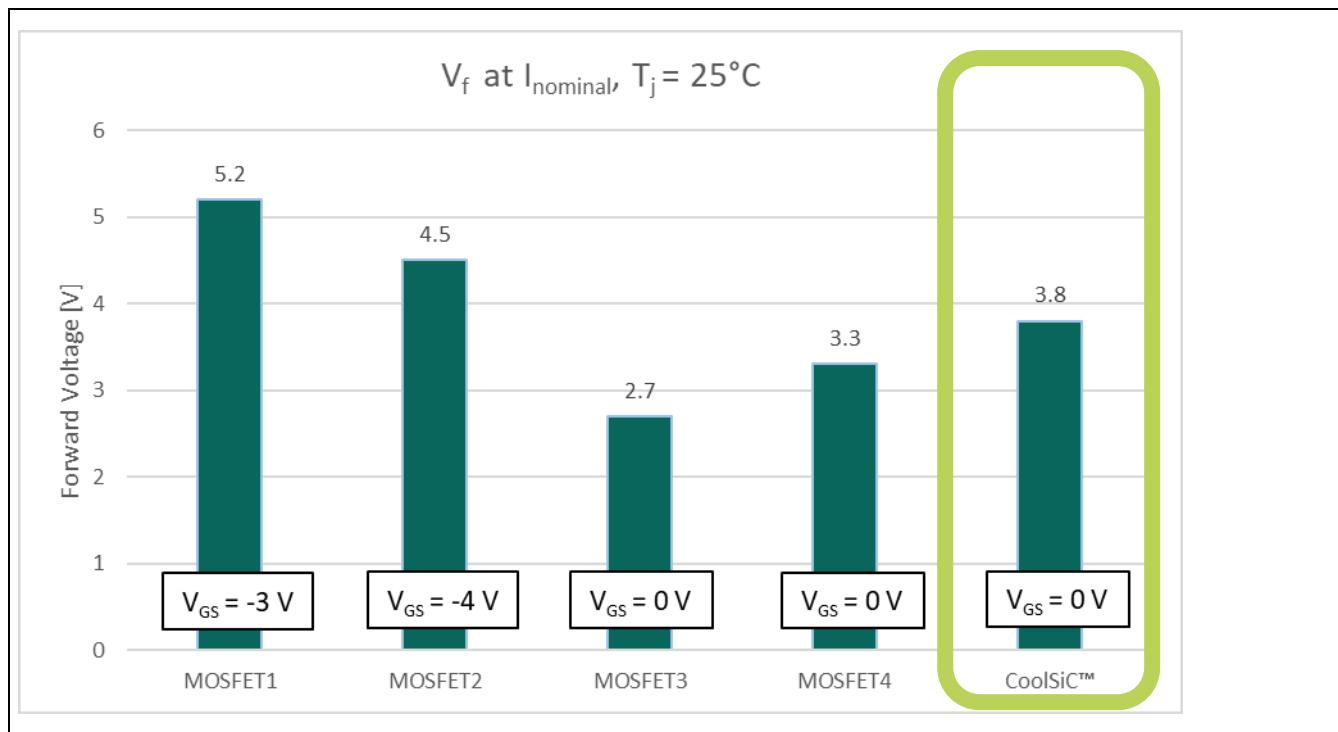


Figure 1 SiC MOSFET 体二极管在最低栅极电压条件下的正向电压

2.2 实现短死区时间以提升效率

在半桥拓扑中，死区时间可防止直通和交叉导通现象。在任意半桥应用中，死区时间是一项重要的安全特性。然而，过长的死区时间可能导致效率降低。因为死区时间内没有能量传输到负载，因此电流仅通过体二极管或限制输出功率。在不发生击穿的情况下尽可能缩短死区时间对高性能电力应用至关重要。要实现这一目标，栅极驱动器最重要的参数是精确的传播延迟匹配和集成滤波器。详情请参阅以下内容。

2 SiC MOSFET 栅极驱动的要求及选项

2.2.1 精确传播延迟匹配

栅极驱动器计算死区时间的参数包括传播延迟以及上升和下降时间。由于上升和下降时间大多数情况下不重要（在几纳秒范围内），因此通常不考虑这些因素。然而，在控制信号从驱动器的输入端传播到输出端的传播延迟方面，情况则有所不同。在同一条件下，任意两个组件间传播延迟的差异称为传播延迟匹配。为缩短死区时间，必须实现栅极驱动器紧密的传播延迟匹配。

EiceDRIVER™ 栅极驱动器的数据手册规范包含温度变化和产品寿命期间的参数波动，以最坏情况作为考量基准。在实际运行条件下，传播延迟匹配通常远小于数据手册中规定的最大值。

Table 2 列出的 EiceDRIVER™ 栅极驱动器具有极严格的传播延迟匹配，并通过减少所需的死区时间来实现高效率。

Table 2 最大传播延迟匹配

栅极驱动器	最大器件间传播延迟
EiceDRIVER™ X3 Compact (1ED31xx)	7 ns
EiceDRIVER™ F3 (1ED332x)	15 ns
EiceDRIVER™ 2L-SRC Compact (1ED32xx)	15 ns
EiceDRIVER™ X3 Analog/Digital (1ED34/38xx)	30 ns

为正确设定死区时间，必须仔细评估 SiC MOSFET 与栅极驱动器的各个组合。功率晶体管的开通和关断传播延迟在各种工作条件下（如栅极电压范围、漏源电压 V_{ds} 、结温 T_{vj} 或栅极电阻）的差异，往往远大于栅极驱动器的传播延迟。因此，SiC MOSFET 的参数可以作为计算死区时间计算的主导依据。

2.2.2 精确集成滤波器

输入控制信号滤波是一种前沿技术，用以避免由电气噪声引起的误触发。电力电子学常使用两种滤波方法：

- 输入端的阻容滤波器
- 在栅极驱动器内部结合短时阻容滤波器和精确的集成滤波器

外部阻容滤波器有助于确保栅极驱动器 IC 的输入引脚电压保持在绝对最大电压额定值以内。这些额定值通常仅针对-0.3V 的负电压。如果不使用阻容滤波器，很可能会因耦合而超出额定值。电容部分负责将电压保持在操作范围内，而电阻部分则限制耦合电流，以减轻 IC 引脚的应力。因此，设计阻容滤波器的最佳方式

2 SiC MOSFET 栅极驱动的要求及选项

是实现较短的滤波时间常数（几纳秒范围内），并将电容器靠近 IC 的引脚。IC 本身应当过滤掉较大的干扰。

此案例研究探讨了两种滤波方法。第一种方法的阻容充电曲线分支相对较平，如图 2 (a) 所示。滤波电阻和滤波电容的元件容差对滤波时间的影响很大。该图表展示了元件容差对滤波时间公差的影响。可以看出，从最小值 t_{\max} 到最大值 t_{\min} 的分布并不相对于目标值 t_{trig} 对称。

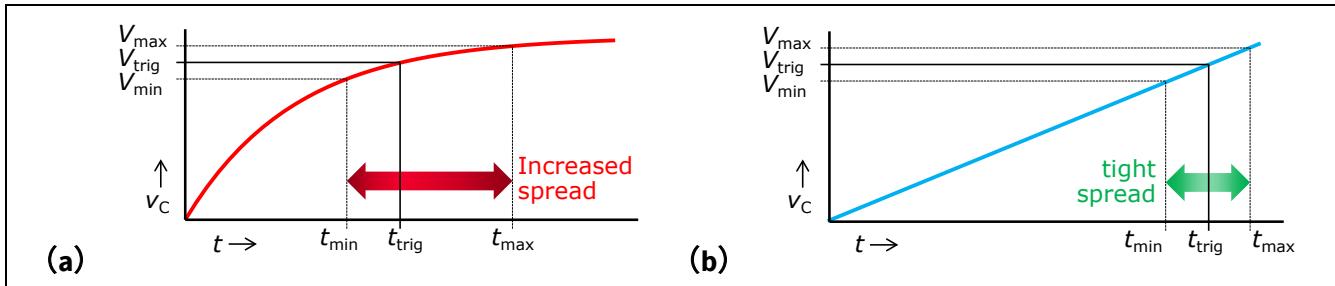


Figure 2 滤波器拓扑结构 (a) RC 滤波器 (b) 带短时 RC 滤波器的集成滤波器

图 2 (b) 是结合了短滤波时间的 RC 滤波器与主导积分滤波器的时间行为。在此情况下，滤波时间相对于目标值的分布相当对称，并且比仅使用单个阻容滤波器时要更紧密。因此，集成了滤波器的解决方案更具优越性。

2.3 负向栅极电压

Figure 3 概述了市场上几款选定的 SiC MOSFET 栅源阈值电压 $V_{GS(\text{th})}$ 。可以看出，英飞凌的 CoolSiC™ 技术提供了最高的栅源阈值电压电平。高栅源阈值电压电平的优势在于可以使 CoolSiC™ MOSFET 仅通过单极性栅极电压运行。如需了解该模式下运行的具体示例和条件，请参阅第 4 章。

2 SiC MOSFET 栅极驱动的要求及选项

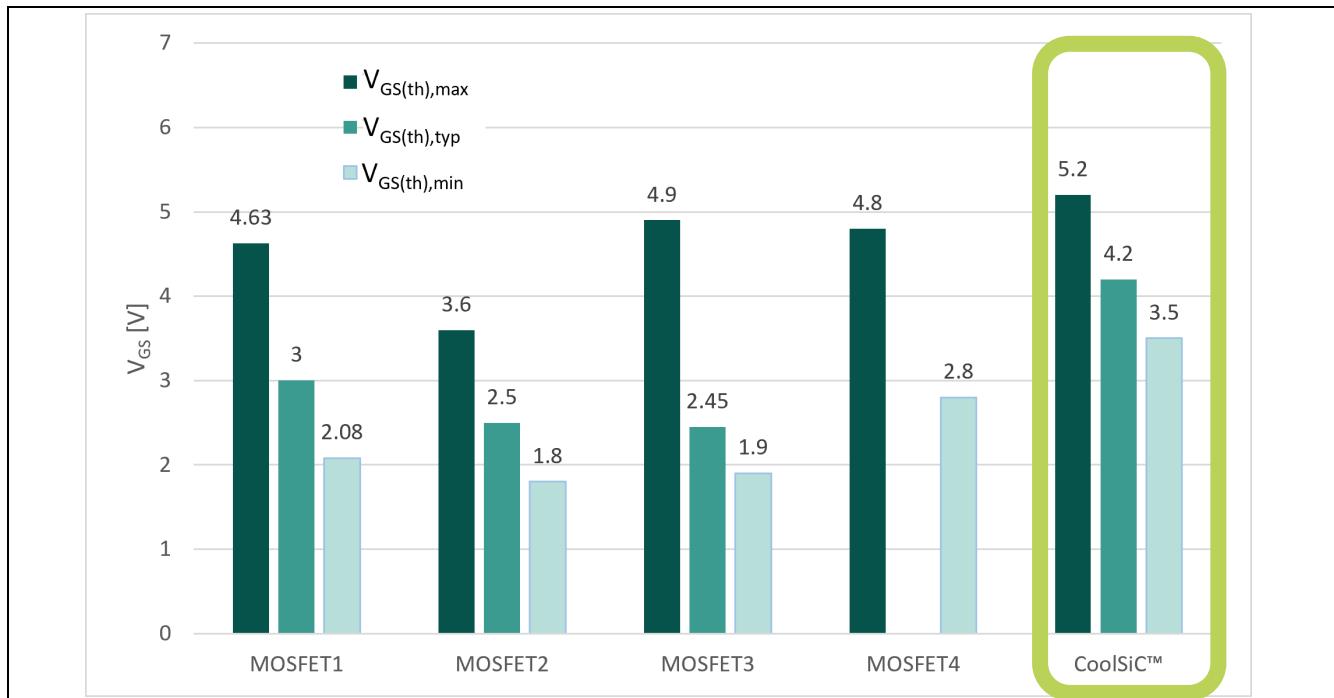


Figure 3 SiC MOSFET 器件的栅源阈值电压范围

在某些情况下，其他制造商的 SiC MOSFET 器件的最小 $V_{GS(th)}$ 在 25°C 时会低于 2V。对于此种性能，即使是轻微的地电平跳动也可能导致 MOSFET 在 0V 关态电压下不受控制地误导通。若再考虑门极电压阈值负温度漂移的影响，情况会更加严重。负的门极关断电压可以改善这一状况，可确保 MOSFET 在嘈杂环境下也能处于关闭 (OFF) 状态。负栅极电压的电平取决于 MOSFET 的栅源阈值电压、栅漏电容与栅源电容的比值。

因此，针对 SiC MOSFET 的驱动 IC 最好具备在负栅压下运行的能力，以确保 SiC MOSFET 能够保持安全稳定的关闭状态。

只要不超过 IC 的最大绝对额定值，任何 EiceDRIVER™隔离及电平转换栅极驱动器 IC 均可用于驱动 SiC MOSFET。尽管如此，建议使用能够工作在负栅极电压下的驱动 IC。表 3 显示了 EiceDRIVER™隔离型及电平转换栅极驱动 IC 在最大输出供电电压范围内的最大额定值： V_{VCC2} 至 V_{VEE2} 、 V_{VCC2} 至 V_{GND2} ，以及 V_{VCC} 至 V_{COMO}

Figure 4 展示了使用双极性供电电压的栅极驱动器的示例电路。Figure 4 (a) 展现了 EiceDRIVER™隔离栅极驱动器 IC 没有提供特定用于负栅源电压的端子时的一种实现方式，例如 X3 Compact (1ED31xx) 器件。Figure 4 (b) 展现了具有专用负栅极电压端子的驱动 IC 的栅极驱动电路，例如 F3 (1ED332x) 器件。

2 SiC MOSFET 栅极驱动的要求及选项

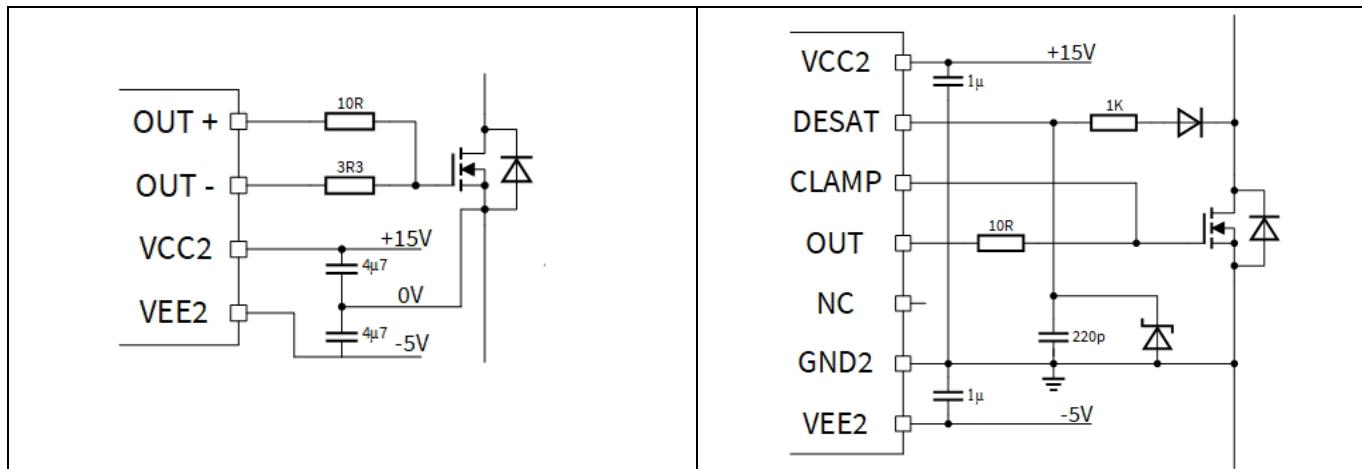


Figure 4 使用负栅极电压的样例原理图 (a) 带虚拟参考点的 EiceDRIVER™; (b) 带负栅极电压功能的 EiceDRIVER™

栅极驱动器的输出侧电压可通过隔离的开关电源 (SMPS) 轻松生成。当仅使用单极性电压进行栅极驱动时，也可以通过自举法生成高侧电源。然而，通常需要使用开关电源来实现栅极驱动的双极性电压。此类开关电源的工作原理见[1]和[3]。然而，这些示例是为适合 IGBT 的栅极电压范围而设计的，因此不能直接用于 SiC MOSFET。需要注意的是，此类开关电源变压器的寄生耦合电容中可能会流过相当大的位移电流。此类电流可能会对应用中的测试功能产生负面影响。2ED1323S12P 不支持负压操作。然而，即使在仅使用单极性电压的情况下，也能驱动 SiC MOSFET 并降低引脚复杂性（无需 VEE2 引脚）。在使用单极性电压驱动 SiC MOSFET 时，建议采用栅极驱动器的有源米勒钳位技术。

2.4 宽栅极电压范围

正栅极-源极间电压决定了 SiC MOSFET RDS(on) 的导通 (ON) 状态。如图 Figure 5 所示，英飞凌 CoolSiC™ MOSFET 在 15 V 栅极电压下即可达到其额定导通状态 $R_{DS(on)}$ ，这能够为众多应用带来的一大优势，因为相较于 IGBT 或传统硅 MOSFET，无需对正栅极电压供应设计做出任何改变。

与其他经审查的 SiC MOSFET 相比，这些器件需要相对较高的栅极电压，甚至高于 IGBT 或传统硅 MOSFET。当然，也可以选择更低的栅极电压，但这会导致稳态通道电阻率增加，从而引起更高的通态损耗。Figure 5 显示了选定 SiC MOSFET 的栅源电压 V_{GS} 的绝对最大额定值。橙色条表示负栅极-源极间电压，绿色条表示正栅极-源极间电压。较浅的阴影条形图展示了根据每个器件数据表推荐的栅源电压电平。栅极驱动 IC 需覆盖正负栅极电压的整个范围，以优化 SiC MOSFET 的操作。

2 SiC MOSFET 栅极驱动的要求及选项

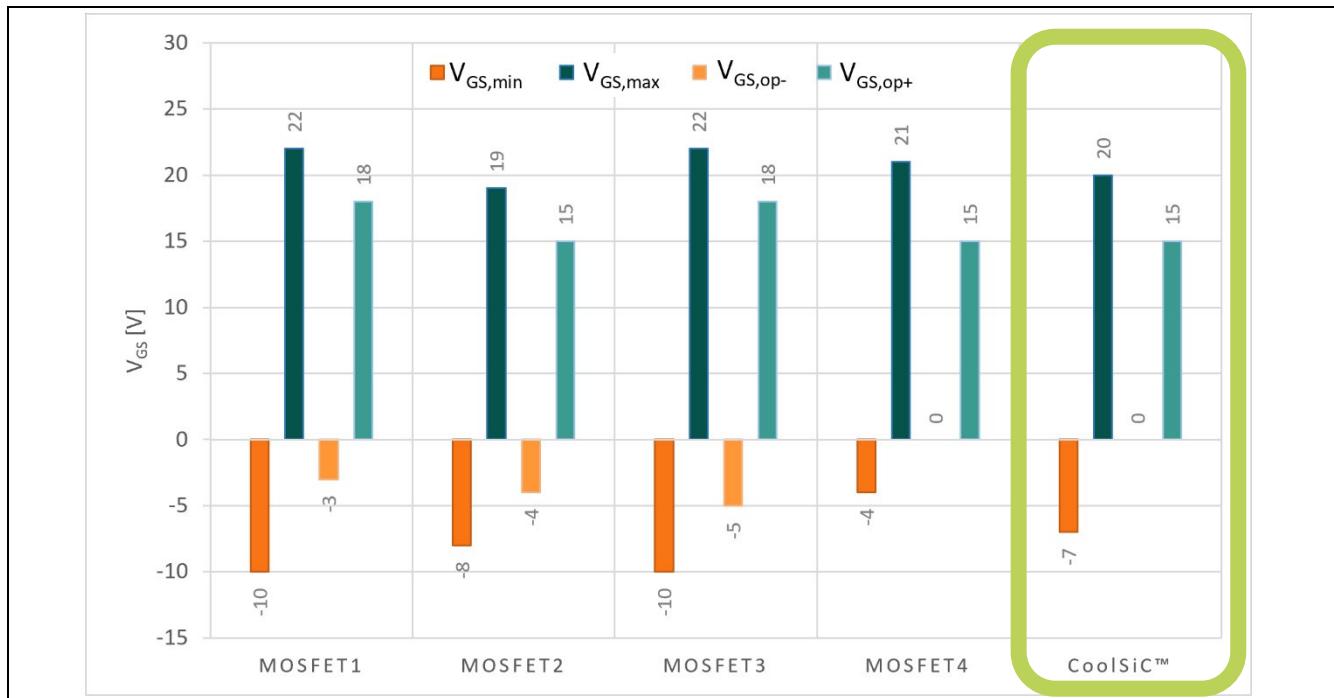


Figure 5 SiC MOSFET 的栅源电压范围 (深色: 绝对最大额定值, 浅色: 根据数据手册推荐的电压范围)

如 Figure 5 所示, MOSFET 3 的最高推荐栅极电压为 22 V。MOSFET 1 和 MOSFET 2 的电压范围也超出 19 V。然而, CoolSiC™可在总供电电压范围低于 $V_{GS(on)} - V_{GS(off)} = 20$ V 的情况下驱动, 并且在关断过程中无需负压。理论上, 任何最大供电电压额定值为 20 V 的 EiceDRIVER™都能够实现这一目标。电压尖峰可能会轻易超出最大额定值, 但持续时间非常短暂。因此, 建议选择额定电压至少为 25 V 的 EiceDRIVER™隔离或电平移位栅极驱动器 IC, 用于输出以下供电范围 ($V_{VCC2} - V_{VEE2}$, $V_{VCC2} - V_{GND2}$, 或 $V_{VCC} - V_{COM}$) , 以实现可靠的栅极驱动电路设计。表 3 列出了所讨论产品的参数。

2 SiC MOSFET 栅极驱动的要求及选项

表 3. 适用于驱动 SiC MOSFETs 的输出电压参数

栅极驱动器	最大输出供电范围 $V_{VCC2} - V_{VEE2} / V_{VCC2} - V_{GND2} / V_{VCC} - V_{COM}$	最小负栅极电压
X3 Compact (1ED312x)	40 V	$V_{VCC2} - 40$ V
X3 Compact (1ED314x)	35 V	$V_{VCC2} - 35$ V
F3 (1ED332x)	40 V	-22 V
2L-SRC Compact (1ED32xx)	40 V	$V_{VCC2} - 40$ V
X3 Analog/Digital (1ED34/38xx)	40 V	-40 V
2ED1323S12P	25 V	0 V

2.5 扩展的共模瞬态免疫 (CMTI) 能力

SiC MOSFET 具备极快的开关速度。这种快速电压切换会导致共模噪声从隔离栅极驱动器的输出端注入到输入端，因此要求栅极驱动 IC 具备高共模瞬态抗干扰能力。

EiceDRIVER™ 采用无磁芯变压器技术实现输入输出间电气隔离的隔离栅极驱动器 IC，对电压干扰具有极强的稳健性。因此，这些栅极驱动器在市场上具有业界最佳的 CMTI 性能和等级，最高可达 $300 \text{ kV}/\mu\text{s}$ 。现行 IEC 60747-17 标准对磁性和电容耦合器的测量程序进行了规定。需要进行 CMTI 测试，以测量施加电压斜率的上升沿和下降沿。这确保了不同驱动 IC 的 CMTI 规格之间具有较好的可比较性。

Table 4 EiceDRIVER™ CMTI 能力

CMTI 能力	器件系列			
	EiceDRIVER™ Compact		EiceDRIVER™ Enhanced	
200 V/ns	X3 Compact (1ED312x)	2L-SRC Compact (1ED32xx)	X3 Analog (1ED34x1)	X3 Digitl (1ED38x0)
300 V/ns	X3 Compact (1ED314x)		F3 (1ED332x)	

由于输入输出结隔离（这些器件不具备电气隔离功能）不同，电平转换产品无需进行 CMTI 测试。

2 SiC MOSFET 栅极驱动的要求及选项

2.6 快速 DESAT 检测与过流保护

SiC MOSFET 在过流条件下不具有明显的饱和特性。因此，短路电流电平很容易达到额定电流值的十倍。因此，在短路条件下，SiC MOSFET 的行为与 IGBT 不同，后者会发生退饱和现象，短路电流被限制在标称电流的四倍以内。CoolSiC™ 的短路承受时间相对较短，大约为 2 至 3 μ s。快速检测和快速关断对于 SiC MOSFET 的可靠运行及长久寿命至关重要。适用于 SiC MOSFET 的过载处理技术包括快速的 DESAT 功能和过流保护。

若 DESAT 电路的响应速度设计得足够快，则广泛使用的 IGBT 的退饱和检测电路同样可用于 SiC MOSFET。它基于对 IGBT 通态期间漏源极电压的监测。在 IGBT 开启过程中，需要前沿消隐功能，以防止在二极管反向恢复过程中产生的集电极电流尖脉冲引起 DESAT 误触发。此外，由于功率二极管及 IGBT 本身的几种寄生效应，以及在电流换向期间的布局串扰，需要所谓的 DESAT 消隐时间，该时间范围约为几微秒 (μ s)。如此长的消隐时间对如前所述的 SiC MOSFET 来说是不可接受的。SiC MOSFET 的栅极驱动器应具备快速反应能力，电路设计应确保在短路情况下，通常在 1 μ s 至 3 μ s 的时间内激活保护功能。良好的布局优化至关重要，既可以确保安全检测到短路条件，也可以避免因接地反弹或信号串扰引起的误触发 DESAT。如需进一步了解 DESAT 组件调整，请参阅驱动 IC 的技术描述： R_{DESAT} 、 C_{DESAT} 、和 D_{DESAT} 。

遵循所有的 PCB 良好布局规范可适当避免此类效应。小型化 PCB 环路走线就是规则之一。如图 6 所示，该项规则可使 MOSFET 栅极电流路径中的栅极驱动器 IC 电源与包括直流母线的主体电流路径分离，以防止可能导致开关电流感应耦合的寄生杂散电感。

2 SiC MOSFET 栅极驱动的要求及选项

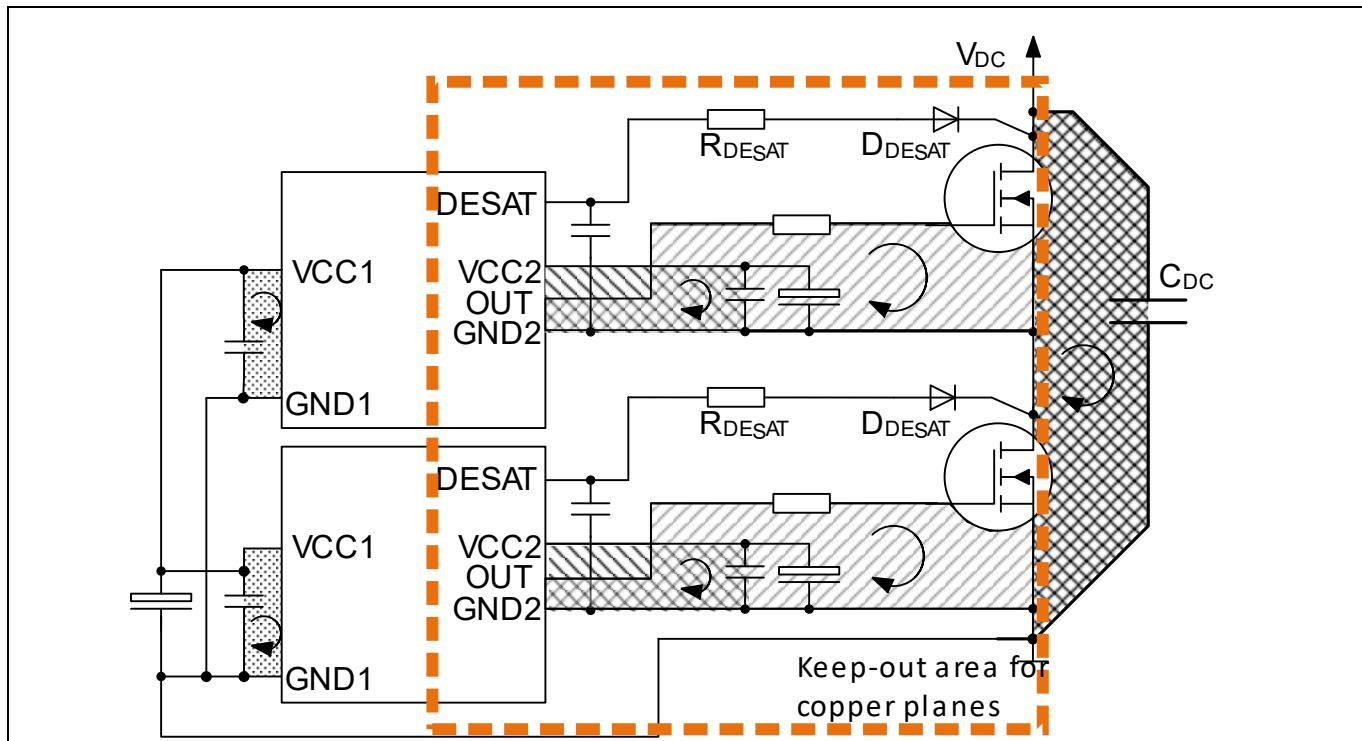


Figure 6 适合快速 DESAT 检测功能的布局示例

应特别注意避免寄生电容耦合。SiC MOSFET 的快速开关速度与 IGBT 的开关速度不可同日而语。因此，建议避免栅极驱动电路区域受到连接至 GND1、GND2 或直流 V_{DC} 平面的影响，以防止因高 dV/dt 而产生不必要的电容耦合。然而，请注意这种方法可能会与栅极驱动器 IC 的冷却需求产生冲突，后者可能需要特定的铜区。

DESAT 二极管 D_{DESAT} 与电阻器 R_{DESAT} 的布局以及 DESAT 感测轨迹的布线应避免产生感应耦合和电容耦合，以确保生成的 DESAT 信号具有最小的干扰和延迟。

以下 EiceDRIVER™ Enhanced 系列栅极驱动器产品提供 DESAT 功能。

- F3 (1ED332x)
- X3 Analog (1ED34xx)
- X3 Digital (1ED38xx)

EiceDRIVER™ SOI 栅极驱动器 2ED1323S12P 具备一种针对短路事件的其他保护特性：过流保护 (ITRIP 输入引脚)。该特性可以检测直流总线上的过流事件。当集成电路检测到过流事件时，会关闭输出，并将故障使能引脚 (RFE) 拉至 VSS。

2 SiC MOSFET 栅极驱动的要求及选项

电流过流保护启动的电平由连接至 ITRIP (如图 7 所示) 的电阻网络 (如 R_0 、 R_1 和 R_2) 及 ITRIP 阈值 $V_{th,OCP}$ 决定。电路设计人员需要确定 DC 总线允许的最大电流水平，并选择电阻 R_0 、 R_1 和 R_2 ，确保节点 V_x 的电压在该电流水平下达到过流阈值 $V_{th,OCP}$ 。

$$V_{th,OCP} = R_0 * I_{DC-} * \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

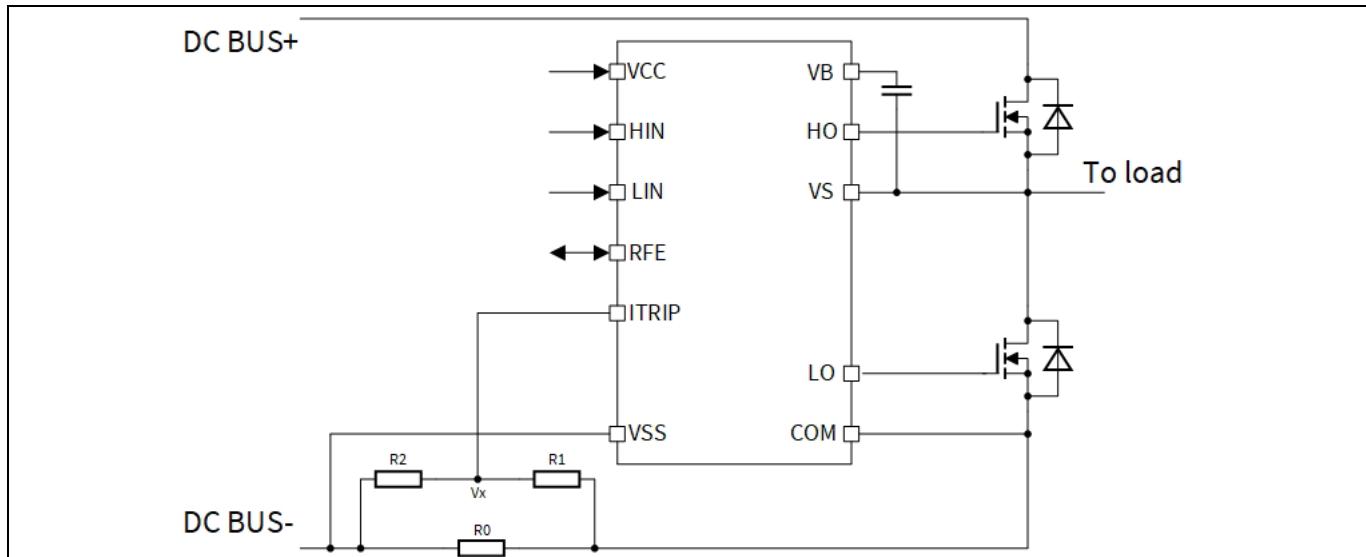


Figure 7 编程过电流保护

在电机控制应用中，电阻 R_0 的典型值一般是 50 mΩ。如示波器截图 Figure 8 所示，此保护措施响应迅速 (650 ns)。

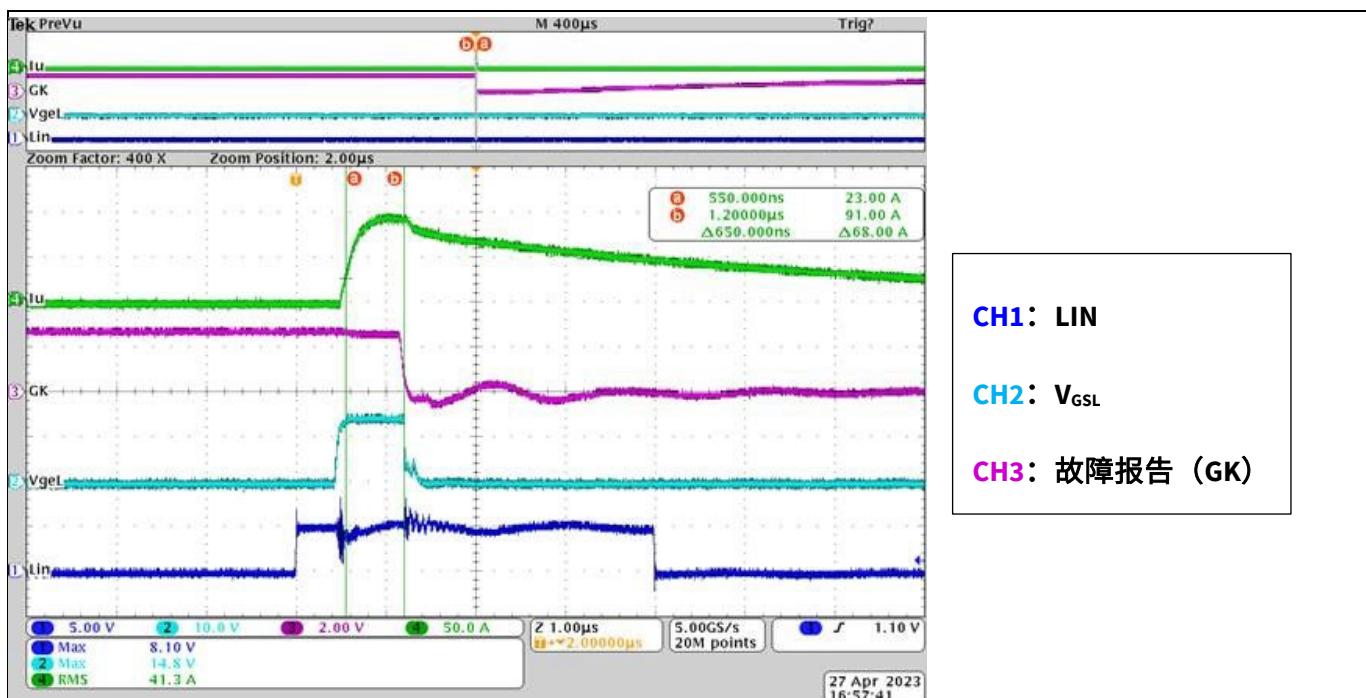


Figure 8 ITRIP 实验室测量响应

2 SiC MOSFET 栅极驱动的要求及选项

在需要多个器件的应用中，如三相电路，此保护可以通过两种不同的方式实现：桥臂同轴电阻保护或单同轴电阻保护。

图 9 所示的桥臂同轴电阻保护配置可确保每个桥臂都进行过流检测。这种实施方案需要在每个桥臂上设置一个电阻网络，且每个单独的器件都能够独立于其他栅极驱动器，在发生故障时关闭自身的输出。

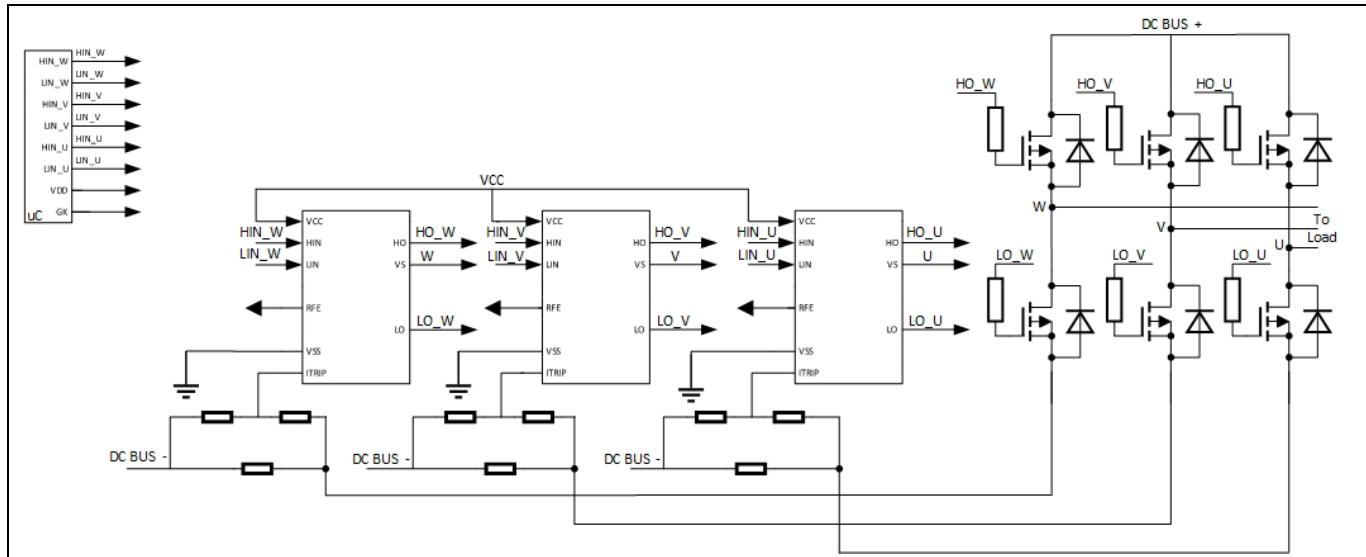


Figure 9 桥臂电流同轴电阻保护配置

另一方面，单同轴电阻保护配置通过依赖 RFE 引脚和菊花链配置，减少了外接电阻的数量。

如 Figure 10 所示，栅极驱动器进行菊花链连接。三个故障启用 RFE 引脚已连接在一起。ITRIP 感应仅在第一个 IC 上使用，其余两个 ITRIP 引脚通过连接至 VSS 而被禁用。仅对 RFE 引脚配置一次可编程故障清除时序元件 R_{RFE} 和 C_{RFE} 。发生故障时，无论是 ITRIP、UVLO，还是外部命令引起的，通过将连锁的 RFE 引脚拉低至 VSS，三个 HVIC 均会被停用。

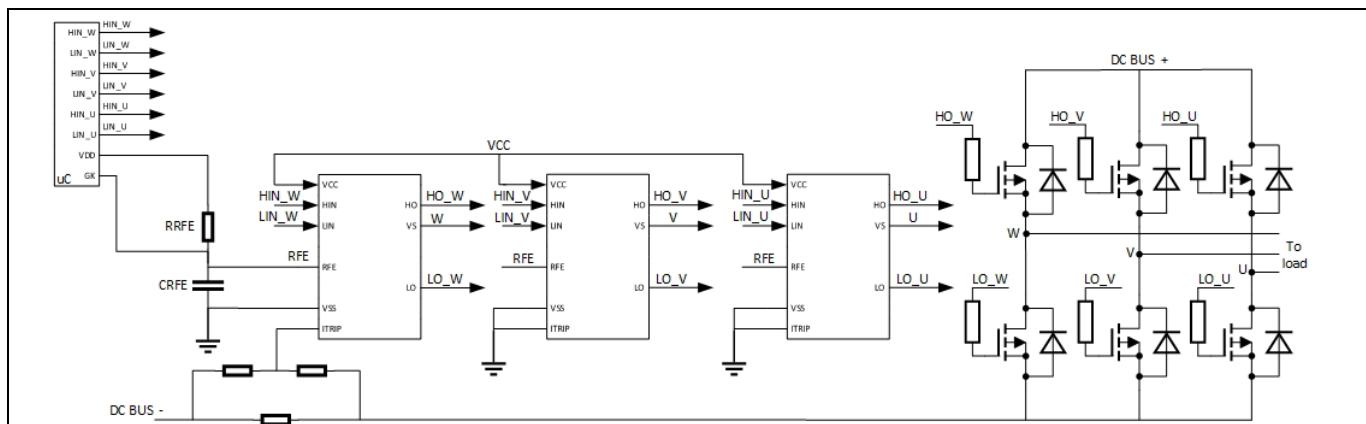


Figure 10 单电流取样电阻和菊花链配置

过流保护功能已集成在 EiceDRIVER™电平转换 SOI 器件 2ED1323S12P 中。

2 SiC MOSFET 栅极驱动的要求及选项

2.7 有源米勒钳位

有源米勒钳位是一种广泛使用的技术，用以避免由寄生 dV/dt 引起的意外导通。如图 Figure 11 所示，该功能直接使用一个 CLAMP 端子与功率晶体管的栅极相连。在 OFF 状态下，它会下拉栅极。通过监测相同终端的栅极电压来监视关闭状态的条件。一旦栅极电压低于特定阈值，钳位功能会即刻激活。该阈值通常为 $V_{CLAMP} = V_{VEE2} + 2V$ 或 $V_{COM} + 2V$ 。

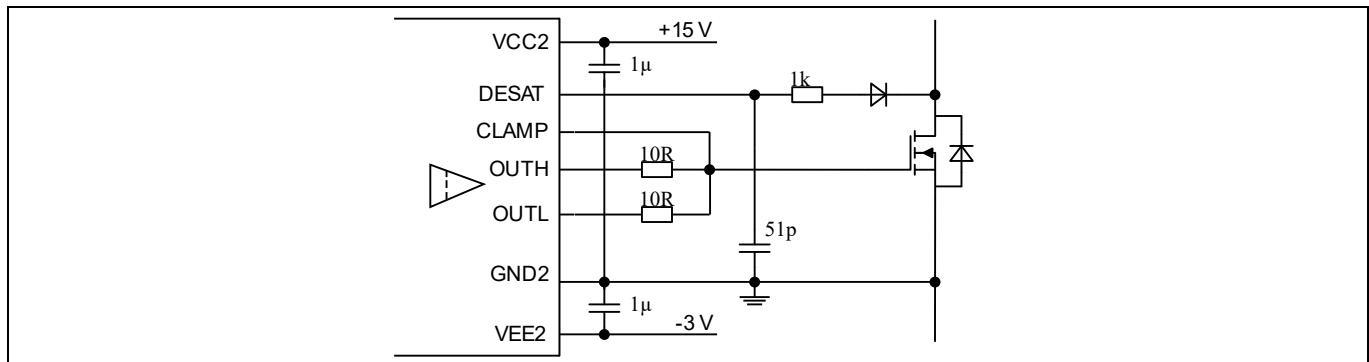


Figure 11 有源米勒钳位功能实施原理图示例

监测比较器的阈值 V_{CLAMP} 是以 IC 内可用的最低电压为基准的。最低电压会出现在 VEE2 端子或 EiceDRIVER™ 隔离栅极驱动器系列中的 COM 端子以及 2ED1323S12P。

EiceDRIVER™ Compact 隔离栅极驱动器 IC，配备有源米勒钳位功能。

- X3 Compact: 1ED3122MC12H、1ED3127MU12F
- 2L-SRC Compact: 1ED3251MC12H

在 EiceDRIVER™ Enhanced 系列隔离栅极驱动器 IC 中，具备有源米勒钳位与 DESAT 组合功能的产品有：

- F3 (1ED332x)
- X3 Analog (1ED34x1)
- X3 Digital (1ED38x0)

在 X3 Digital 系列中，X3 Analog 和 1ED3890 的 1ED3491 栅极驱动器提供的是米勒钳位驱动器，而非内置米勒钳位。米勒钳位驱动器可驱动一个外部 MOSFET，该 MOSFET 能够非常靠近 PCB 上 SiC MOSFET 的栅极和源极端子。因此，在实际应用中，尤其是在 PCB 上栅极驱动器与 SiC MOSFET 相距一定距离时，有源米勒钳位功能得到显著提升。

最后，2ED1323S12P 电平转换栅极驱动器同时提供了有源米勒钳位功能和过电流 (ITRIP) 保护。

2 SiC MOSFET 栅极驱动的要求及选项

这些集成了有源米勒钳位功能的栅极驱动 IC，非常适合于开关过程中涉及高 dV/dt 以及仅使用单极性电压进行栅极驱动的应用场景。

3 功率耗散

3 功率耗散

3.1 隔离栅极驱动器功率耗散

计算栅极驱动器 IC 的功耗对于防止出现极高工作条件至关重要。本部分介绍了如何计算一般栅极驱动器 IC 的功耗。

影响 EiceDRIVER™产品功率耗散的主要因素包括：

- 输入侧工作供电电流
- 输入侧偏置电流
- 输出端静态电流
- 输出侧栅极荷损失

这些单值可以通过以下方程式计算得出。

1. 测量工作电流 $I_{q,in}$ ，以获取应用的最大开关频率。功率晶体管不应连接。

$$P_{d,VCC1} = I_{q,in} \cdot V_{VCC1,max} \quad (1)$$

逻辑输入端的输入偏置电流包括：

$$P_{d,bias} = n \cdot I_{IN} \cdot V_{VCC1,max} \quad (2)$$

这里的 n 表示栅极驱动器 IC 的输入端子数量。此部分的功耗通常相比于供电电压的功耗是非常小的。

2. 输出侧部分持续根据静态电流 $I_{q,out}$ 耗散功率。这是由以下产生：

$$P_{d,VCC2} = I_{q,out} \cdot (V_{VCC2} - V_{VEE2}) \quad (3)$$

输出侧静态电流值也应在最大开关频率下测量，此时不应连接功率晶体管。

3. 通过计算功率晶体管的总栅极荷 Q_{Gtot} 、供电电压 $V_{VCC2} - V_{VEE2}$ 、开关频率 f_s 及外部栅极电阻，来估算输出部分的损耗。由于许多设计在开通和关断时使用不同的电阻器，因此必须考虑开通和关断的不同情况。这会产生一个特定的损耗分布，取决于：

- 外部栅极电阻 $R_{Gon,ext}$ 与 $R_{Goff,ext}$
- 栅极驱动器输出部分的内部阻抗， $R_{Gon,IC}$ 和 $R_{Goff,IC}$
- SiC MOSFET 的内部栅极阻抗， $R_{G,int}$

3 功率耗散

$$P_{d,on} = \frac{1}{2} Q_{G,tot} \cdot (V_{VCC2} - V_{VEE2}) \cdot f_S \cdot \frac{R_{Gon,IC}}{R_{Gon,ext} + R_{Gon,IC} + R_{G,int}} \quad , \text{ for turn-on} \quad (4)$$

$$P_{d,off} = \frac{1}{2} Q_{G,tot} \cdot (V_{VCC2} - V_{VEE2}) \cdot f_S \cdot \frac{R_{Goff,IC}}{R_{Goff,ext} + R_{Goff,IC} + R_{G,int}} \quad , \text{ for turn-off} \quad (5)$$

$P_{d,on}$ 与 $P_{d,off}$ 之和是栅极驱动导致的输出级损耗。

4. 在最高开关频率下运行时的最终功率耗散是这两部分产生的功率耗散总和：

$$P_d = P_{d,VCC1} + P_{d,bias} + P_{d,VCC2} + P_{d,on} + P_{d,off} + P_{d,add} \quad (6)$$

5. 某些栅极驱动器可能具有额外的功耗部分或不同的损耗分配，例如 DESAT 功能或有源米勒钳位。这部分在方程式 (6) 中用术语 $P_{d,add}$ 表示。分析每个功能对功率耗散的影响至关重要。

数据表展现了具体的布局。在这些布局中，给定的结至周围环境热阻 ($R_{th(j-a)}$) 是有效的。请注意，不同的布局可能导致不同的热阻抗。因此，通过实验额外检测封装温度，始终是良好的工程实践。

3.2 电平转换栅极驱动器功率耗散

在电平转换产品中，驱动 IC 消耗的功率主要来自以下几个部分：

- 静态损耗
- 输出级损耗
- CMOS 损耗
- 电平转换损耗
- 自举二极管损耗
- 漏电流损耗

3 功率耗散

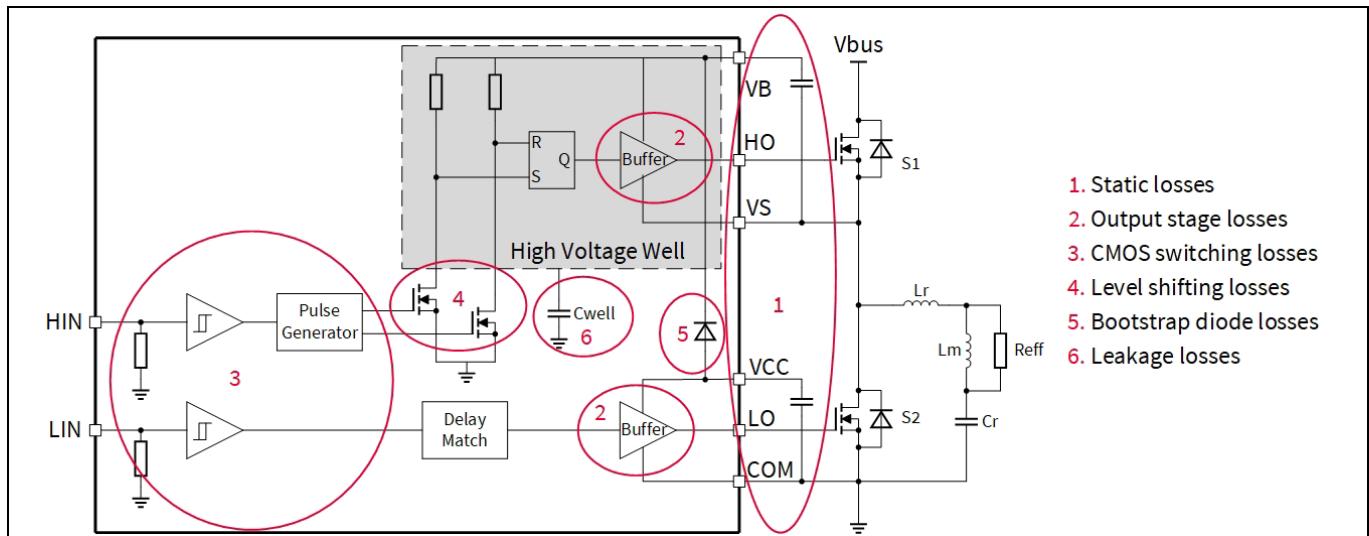


Figure 12 栅极驱动器内不同电平转换的功率损耗

输出级是栅极驱动器 IC 功耗的主要来源。外部栅极电阻也会影响栅极驱动器 IC 的功耗。外部栅极电阻越大，栅极驱动器消耗的功率越小。

在栅极驱动 IC 内部，包括以下不同类型的损耗：

1. 静态损耗是基于特定供电电压及待机/启动充电电流计算得出的：

$$\text{Static losses in the low side} = V_{CC} \times I_{QCC} \quad (7)$$

$$\text{Static losses in the high side} = V_{BS} \times I_{QBS} \quad (8)$$

$$\text{Static losses at input stage} = \frac{1}{2} \times \frac{V_{CC} \times V_{CC}}{R_{pullup}} \quad (9)$$

2. 输出级的损耗是通过计算 SiC MOSFET 的总栅极荷来确定的。它驱动了 SiC MOSFET 的总栅电荷 $Q_{G,tot}$ 、供电电压 V_{CC} 、开关频率 f_s 、外部栅极电阻 $R_{Gon,ext}$ 与 $R_{Goff,ext}$ ，以及 SiC MOSFET 的内部电阻 $R_{G,int}$ 。由于许多设计在开启和关闭时使用不同的电阻器，因此必须考虑不同的开启和关闭情况。这导致输出部分的损耗具有特定的分布：

$$\text{Turn on losses: } P_{d,on} = \frac{1}{2} \times Q_{G,tot} \times V_{CC} \times f_s \times \frac{R_{Gon,IC}}{R_{Gon,ext} + R_{Gon,IC} + R_{G,int}} \quad (10)$$

$$\text{Turn off losses: } P_{d,off} = \frac{1}{2} \times Q_{G,tot} \times V_{CC} \times f_s \times \frac{R_{Gon,IC}}{R_{Gon,ext} + R_{Gon,IC} + R_{G,int}} \quad (11)$$

3 功率耗散

3.CMOS 损耗可根据特定开关频率和供电电压进行计算：

$$CMOS \text{ losses} = Q_{COMS} \times V_{CC} \times f_s \quad (12)$$

$$Junction \text{ capacitance switching losses} = \frac{1}{2} \times C_J \times V_{BUS}^2 \times f_s \quad (13)$$

4.给定开关频率和供电电压下的电平转换损耗计算如下：

$$Loss \text{ per level shifter (ON)} = (V_{BUS} + V_{CC}) \times I_{LSON} \times t_{on} \times f_s \quad (14)$$

$$Loss \text{ per level shifter (OFF)} = (V_{BUS} + V_{CC}) \times I_{LSOFF} \times t_{off} \times f_s \quad (15)$$

5.自举二极管损耗根据给定的开关频率和供电电压进行计算：

$$Dynamic \text{ losses in boot diode} = EB \times f_s \times 2 \times \frac{I_{QBS} + (Q_{G,tot} \times f_s)}{10^{-3} \times \frac{V_{BUS}}{400}} \quad (16)$$

$$Static \text{ losses in boot diode} = \frac{(V_{TH} + 2 \times [I_{QBS} + (Q_{G,tot} \times f_s)] \times R_D) \times 2 \times [I_{QBS} + (Q_{G,tot} \times f_s)]}{2} \quad (17)$$

6.漏电流损耗是根据特定的开关频率和供电电压进行计算的：

$$Leakage \text{ loss} = I_{LEAK} \times V_{BUS} \quad (10)$$

与隔离栅极驱动器的情形类似，与 DESAT 或有源米勒钳位等特定功能相关的任何其他因素都应单独进行分析。

4 OFF 状态下具有低 dV/dt 应力单一晶体管拓扑与应用的考虑因素

4 OFF 状态下具有低 dV/dt 应力单一晶体管拓扑与应用的考虑因素

本章阐述了在单晶体管拓扑中 SiC MOSFET 栅极驱动的特殊条件。单 SiC MOSFET 的流行拓扑结构包括升压、降压或反激变换器。例如，在升压拓扑中，低侧基准的开关并不一定需要使用隔离栅极驱动器。然而，非隔离式驱动器常常会受到严重的接地反弹影响。这可能导致驱动 IC 发生锁定或因杂散电感阻碍正常开关过程而引起额外的开关损耗。另一方面，隔离栅极驱动器因具有较大的偏移电压范围，不会受到接地反弹的影响，从而提供了额外的栅极驱动性能，这在单晶体管拓扑结构中体现的尤为明显。新型电平转换产品在抵抗接地反弹（瞬态负电压）方面具备更高的可靠性。因此，最好具体应用具体分析。

MOSFET 的寄生开启在半桥配置中可能构成挑战，但在单一晶体管拓扑结构中则不是问题。因此，通常只需单极性栅极电压就足以控制 SiC MOSFET。CoolSiC™ MOSFET 的栅源阈值电压 $V_{GS,th}$ 较高（如第 2.3 节所述），具有特殊优势。因此，这些器件对由噪声触发的导通具有极高的稳定性。像升压或反激变换器只需使用单极性非隔离电源，从而大大简化了栅极驱动电路的设计。

单极性栅极驱动器电源可用于那些开关速度受限的驱动应用中。此类应用考虑电机使用寿命，经常将 dV/dt 限制在 5 V/ns 以内。如 Figure 3 所示，英飞凌的 CoolSiC™ 晶体管具有较高的栅源阈值电压。因此，即使是在半桥配置中，由 dV/dt 触发的寄生导通现象也极为罕见。此外，可通过第 2.7 节中介绍的有源米勒钳位技术支持仅使用正栅极电压的应用。

5 总结

5 总结

SiC MOSFET 相较于传统硅基系统具有多项优势，包括更高的效率和功率密度。栅极驱动器是任何电力电子系统中的关键部件，为了充分利用 SiC MOSFET 的优势，选择合适的栅极驱动器对任何设计都是至关重要的。英飞凌的 EiceDRIVER™ 栅极驱动器具备驱动 SiC MOSFET 所需的所有特性，如高栅极电流、有源米勒钳位、快速的 DESAT 保护功能、极佳的部件间传播延迟匹配性，以及同类产品中最佳的 CMTI 性能。

EiceDRIVER™ 栅极驱动器搭配英飞凌的 CoolSiC™ MOSFET，能实现业界最佳的系统性能。

参考文献

参考文献

- [1] 英飞凌科技股份有限公司: EVAL-1ED3142MU12F-SiC, 评估板描述, 2023。
- [2] 英飞凌科技股份有限公司: EVAL-1ED3124Mx12H, 评估板描述, 2019。
- [3] 英飞凌科技股份有限公司: EVAL-1ED3122Mx12H, 评估板描述, 2019。
- [4] 英飞凌科技股份有限公司: EVAL-1ED3121Mx12H, 评估板描述, 2019。
- [5] 英飞凌科技股份有限公司: EVAL-1ED32xxMC12H, 评估板描述, 2021。
- [6] 英飞凌科技股份有限公司: EVAL-1ED32xxMC12H, 评估板描述, 2021。
- [7] 英飞凌科技股份有限公司: EVAL-1ED3321MC12N, 评估板描述, 2022。
- [8] 英飞凌科技股份有限公司: EVAL-1ED3890Mx12M, 评估板描述, 2021。
- [9] 英飞凌科技股份有限公司: EVAL-1ED38x0DCT, 评估板描述, 2021。
- [10] 英飞凌科技股份有限公司: EVAL-1ED3491Mx12M, 评估板描述, 2020。
- [11] 英飞凌科技股份有限公司: 英飞凌基于绝缘体上硅 (SOI) 技术的高压栅极驱动 IC (HVICSS) 的优势 (Advantages of Infineon's high-voltage gate driver ICs (HVICSS) based on its silicon-on-insulator (SOI) technology), 绝缘体上硅级别转换栅极驱动器描述, 2019。

文档修订记录

文档修订记录

文档修订	提交日期	变更说明
V1.0	2017-04-05	首次发布
V1.1	2018-06-24	更新 1EDC 系列和 1EDS-SRC 系列的产品范围
V1.2	2024-04-22	更新部件

Trademarks

All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

Edition 2024-07-17

Published by

Infineon Technologies AG
81726 Munich, Germany

© 2024 Infineon Technologies AG.
All Rights Reserved.

Do you have a question about this document?

Email: erratum@infineon.com

Document reference

AN2017-04_ZH

重要提示

本文档所提供的任何信息绝不应当被视为针对任何条件或者品质而做出的保证（质量保证）。英飞凌对于本文档中所提及的任何事例、提示或者任何特定数值及/或任何关于产品应用方面的信息均在此明确声明其不承担任何保证或者责任，包括但不限于其不侵犯任何第三方知识产权的保证均在此排除。此外，本文档所提供的任何信息均取决于客户履行本文档所载明的义务和客户遵守适用于客户产品以及与客户对于英飞凌产品的应用所相关的任何法律要求、规范和标准。

本文档所含的数据仅供经过专业技术培训的人员使用。客户自身的技术部门有义务对于产品是否适宜于其预期的应用和针对该等应用而言本文档中所提供的信息是否充分自行予以评估。

警告事项

由于技术所需产品可能含有危险物质。如需了解该等物质的类型，请向离您最近的英飞凌科技办公室接洽。

除非由经英飞凌科技授权代表签署的书面文件中做出另行明确批准的情况下，英飞凌科技的产品不应当被用于任何一项一旦产品失效或者产品使用的后果可被合理地预料到可能导致人身伤害的任何应用领域。