

简介

本应用笔记针对如何为 Microchip 的 mSiC[®] MOSFET 产品系列（特别是 MSCxxxSMBxxx 和 MSCxxxSMCxxx 系列）选择合适的栅极驱动电压提供相关指导。在本文档中，缩写“**MB**”指代 MSCxxxSMBxxx mSiC MOSFET 器件，“**MC**”指代 MSCxxxSMCxxx mSiC MOSFET 器件。文中还讨论了栅极驱动电压的选择如何影响器件性能和工作行为，帮助设计人员优化其电力电子系统的效率、可靠性和稳健性。

为 SiC MOSFET 指定栅极驱动电压

不同制造商在数据手册中对栅极驱动电压规范的定义方式不尽相同，但多数采用的参数与表 1 中所列类似。下面列出了部分术语的定义：

- V_{GS} 是施加在 MOSFET 栅极端子与源极端子之间的电压
- V_{GSon} 是用于导通 MOSFET 的稳态 V_{GS}
- V_{GSoff} 是用于关断 MOSFET 的稳态 V_{GS}
- V_{GSmax} 是制造商允许的最大稳态 V_{GS} （包含正负极限值）
- $V_{GS,OP}$ 是制造商建议的稳态值（包含 V_{GSon} 和 V_{GSoff} ）

部分数据手册中未指定 V_{GSon} 和 V_{GSoff} 。与硅 MOSFET 类似，不同应用需要不同的最优值。

下表列出了栅源电压规范。

表 1. 栅源电压规范

器件系列	特性	符号	条件	值	单位
MB	栅源电压	V _{GSmax}	绝对最大直流值	-10 至 21	V
		V _{GS,OP}	建议的直流工作值	-5 至 18	
		V _{GS,Transient}	瞬态栅源电压	-12 至 23	
MC		V _{GSmax}	绝对最大直流值	-10 至 21	
		V _{GS,OP}	建议的直流工作值	-5 至 18	
		V _{GS,Transient}	瞬态栅源电压	-12 至 23	

Microchip 建议

为了获得最佳的器件性能和系统稳定性，最好使用 $V_{GSon} = +18V$ 和 $V_{GSoff} = -5V$ 来驱动 MB 和 MC 系列的 mSiC MOSFET。尽管在更低的 V_{GSon} 和 V_{GSoff} 绝对值下 mSiC MOSFET 也能正常工作，但设计人员需要分析并了解这种低栅极驱动电压条件会带来哪些额外损耗，这是任何设计都绕不开的工作。因此，最优 V_{GSon} 和 V_{GSoff} 的选择依据各有不同，后续章节将分别说明每种情况下的预期利弊。

目录

简介..... 1

 为 SiC MOSFET 指定栅极驱动电压.....1

 Microchip 建议..... 1

1. 导通状态栅极驱动电压 (V_{GSon})3

 1.1. 导通电阻 (R_{DSon})3

 1.2. $V_{GSon} < 18V$ 的设计.....4

 1.3. V_{GSon} 总结..... 6

2. 关断状态驱动电压 (V_{GSoff}) 7

 2.1. 第三象限导通性能.....7

 2.2. 开关噪声抗扰度 8

 2.3. V_{GSoff} 总结.....9

3. 对器件开关行为的影响..... 10

4. 关键信息..... 11

5. 参考文档..... 12

6. 版本历史..... 13

Microchip 信息..... 14

 商标..... 14

 法律声明..... 14

 Microchip 器件代码保护功能..... 14

1. 导通状态栅极驱动电压 ($V_{GS(on)}$)

使用较低的 $V_{GS(on)}$ 驱动 SiC MOSFET 会产生以下影响：

- 导通状态电阻增加，导致导通损耗增大
- 峰值（饱和）电流能力降低
- 短路耐受时间（Short Circuit Withstand Time, SCWT）延长
- 栅极氧化层使用寿命延长
- 相同栅极电阻条件下的开关损耗增大

1.1. 导通电阻 ($R_{DS(on)}$)

下图显示了在不同栅极电压下，归一化 $R_{DS(on)}$ （归一化到 25°C、18V 栅极电压下的 $R_{DS(on)}$ ）如何随结温 (T_J) 升高而增加。其中给出了 Microchip 最大的 MB mSiC MOSFET 芯片（1200V，80 m Ω ）和 MC mSiC MOSFET 芯片（1200V，31 m Ω ）的数据。

下面是一些综合观察结果：

- SiC MOSFET 的 $R_{DS(on)}$ 随温度升高的增加量远低于硅 MOSFET（从 25°C 到 175°C，1200V MB 和 MC mSiC MOSFET 增加了 65%，而 1200V 硅 MOSFET 增加了超过 150%）
- 在 $V_{GS(on)} = 15V$ 时， $R_{DS(on)}$ 的偏移不大，而且 T_J 越高，偏移越不明显

图 1-1. 1200V MB 系列器件的归一化 $R_{DS(on)}$ 与温度和 V_{GS} 的关系 (I_D : 6A)

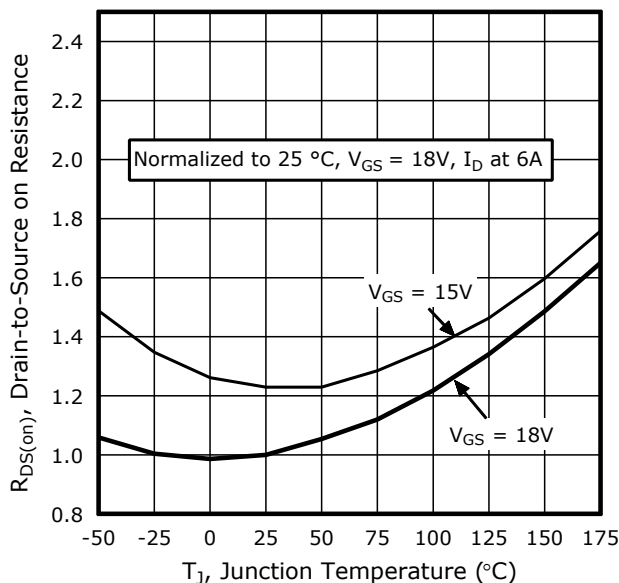
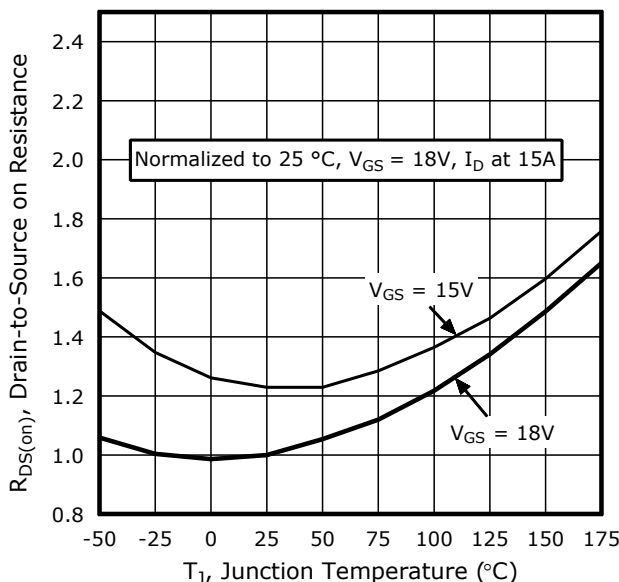


图 1-2. 1200V MC 系列器件的归一化 R_{DSon} 与温度和 V_{GS} 的关系 (I_D : 15A)

1.2. $V_{GSon} < 18V$ 的设计

由于 SiC 的带隙较宽，要使 MOS 栅控晶体管的半导体沟道发生反转，所需的电场比硅要高。若要增加电场，可以提高所施加的 V_{GSon} 或减小栅极氧化层的厚度。提高 V_{GSon} 需要重新设计栅极驱动器，而减小氧化层厚度则可能使器件更容易失效。还有一种办法能获得更大电流，即增大芯片尺寸，但这会增加成本。从技术和商业角度来看，重新设计栅极驱动器显然是最佳选择；但若无法实现理想的 $V_{GSon} = 18V$ ，那就需要做出一些妥协。

1.2.1. 对 R_{DSon} 的影响

当使用较低的 V_{GSon} 来驱动 SiC MOSFET 时，设计人员需要分析 R_{DSon} 在目标结温范围内的变化情况。如果目标 T_J 范围内的 R_{DSon} 始终与 $V_{GSon} = 18V$ 时的 R_{DSon} 相差不大，那么最终设计就可以容忍这些微小差异，并且稳健性极高。对于 MB 和 MC 系列的 mSiC MOSFET，生产测试表明，通过 $V_{GSon} = 18V$ 时的 R_{DSon} 能够有效预测 $V_{GSon} = 15V$ 时的 R_{DSon} ：以 1200V SiC MOSFET 为例，在 $T_J = 25^\circ C$ 时，使用 15V 的 V_{GS} 进行驱动会使 R_{DSon} 高出 25%。不过，当 $T_J = 175^\circ C$ 时，这一代价就降到了只有 10%。

相比之下，若想比较 $V_{GSon} = 18V$ 和 $V_{GSon} = 15V$ 两种情况下的 R_{DSon} ，则需要仔细斟酌。当 V_{GSon} 低于 15V 时，偏差会进一步增大，而且会受器件阈值电压 ($V_{GS(th)}$) 的影响。因此，Microchip 不建议使用低于 15V 的 V_{GSon} 来驱动 MB 和 MC 系列 mSiC MOSFET。如果必须使用低于 15V 的驱动电压，则应为 R_{DSon} 留出足够的设计裕度。如需支持，请联系您当地的 Microchip 销售办事处。

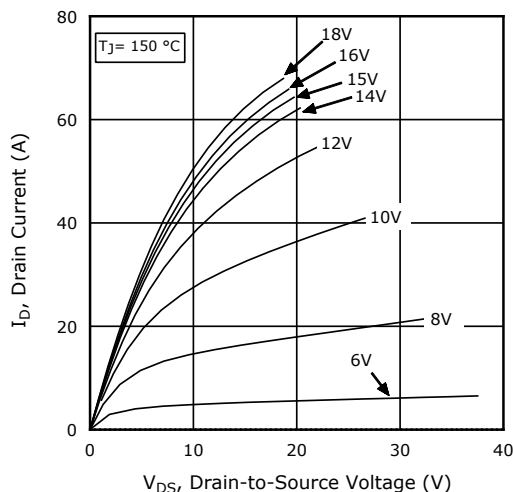
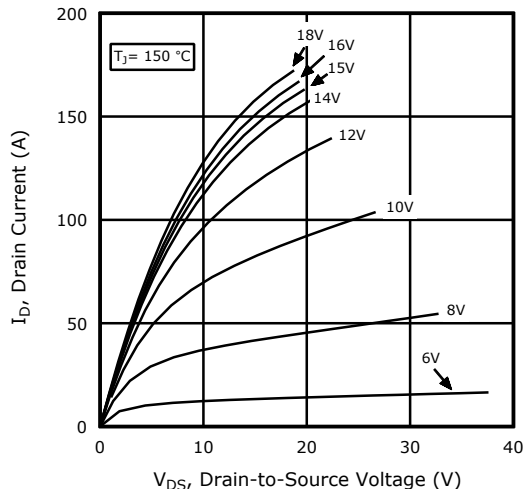
1.2.2. 并联 SiC MOSFET

关于 $V_{GSon} < 18V$ 的 SiC MOSFET 并联应用，还有另一点需要说明。从图中可以看出， R_{DSon} 的温度系数在整个相关的 T_J 范围内并不总是正值。举个极端的例子，使用 $V_{GSon} = 15V$ 驱动 1200V SiC MOSFET。在这种栅极驱动条件下，该 SiC MOSFET 在 $T_J = 25^\circ C$ 至 $50^\circ C$ 范围内会呈现出负温度系数。设计时需要防范并联器件之间电流分配不均的风险。不过，如前几段所述，使用 $V_{GSon} = 15V$ 仍然是最简单的方案，适合大多数应用。

1.2.3. 峰值电流能力

使用较低的 V_{GSon} 进行驱动时，无法充分增强 MOSFET 沟道，最大电流也会随之降低。

下图给出了 MSC080SMB120B4N 和 MSC031SMC120B4N 在不同驱动电压下的 I-V 曲线 ($T_J = 150^\circ C$ 时)。

图 1-3. MSC080SMB120B4N 在不同驱动电压下的 I-V 曲线 ($T_J = 150^\circ\text{C}$ 时)图 1-4. MSC031SMC120B4N 在不同驱动电压下的 I-V 曲线 ($T_J = 150^\circ\text{C}$ 时)

请注意, $V_{GSon} = 18\text{V}$ 和 $V_{GSon} = 15\text{V}$ 这两条曲线之间的 R_{DSon} 差距并不大, 而当 V_{GSon} 进一步降到 15V 以下时, R_{DSon} 的差异就会明显增大。下面是一些重要的注意事项:

- 基于最大电流设计的过流保护方案可能无法正常触发。设计人员必须考虑到 V_{GSon} 较低时 R_{DSon} 的变化会更大
- 小信号跨导 (g_m) 在 V_{GSon} 较低时会更大。由于在漏源电压较高的条件下 V_{GS} 可能处于中间范围, 这一效应可能引发开关不稳定, 进而导致器件失效

注: 峰值短路电流取决于 V_{GSon} 的精确值和持续时间。更多信息, 请参见下一节。

1.2.4. 短路耐受时间

使用较低的 V_{GSon} 进行驱动时, 短路条件下的最大电流会降低, 从而可以延长 SCWT。

对于可能发生短路的应用, 必须注意以下几点:

- 数据手册中给出的 SCWT 是典型的失效时间, 其定义为从短路发生到器件不再维持正常电气功能所经历的时间。事实上, 当产生的潜热造成不可逆的损坏时, 实际失效发生在器件关闭之后。换句话说, 失效并非发生在测得失效的那一刻。由于存在延时, 数据手册中的 SCWT 只能作为典型值供参考

- 更合理的要求是指定数量的器件在指定数量的短路事件后仍正常工作
- 可以通过增加器件的尺寸，或使用多个在源极负反馈时降低驱动电流的器件来延长 SCWT

如需更多指导和建议，请联系您当地的 Microchip 销售团队。

1.3. V_{GSon} 总结

Microchip 的 MB 和 MC 系列 SiC MOSFET 可在+15V 驱动电压下运行，与在建议的+18V 驱动电压下运行相比，性能损耗很小。如上述图表所示， R_{DSon} 在 25°C 下的增加量远大于 100°C - 150°C 下的增加量。如果芯片发热，则系统受导通损耗的影响通常小于受 25°C 下差异的影响。虽然相同栅极电阻下的开关损耗可能会略高，饱和电流也会较低，但换来的好处是更长的 SCWT。

2. 关断状态驱动电压 (V_{GSoff})

Microchip 的 MB 和 MC 系列 MOSFET 属于常闭功率晶体管。若要在稳态期间保持关断，并非必须使用负 V_{GSoff} 。之所以使用负电压是为了降低开关损耗并提升开关稳定性。

使用负 V_{GSoff} 驱动 SiC MOSFET 会产生以下影响：

- 存在源极电感时，会减慢器件关断过程。使用负 V_{GSoff} 可消除这种影响
- 负 V_{GSoff} 可提供更多裕度来避免开关瞬变期间误导通（也称为直通或跨导）
- 硅 IGBT 使用负 V_{GSoff} 已有数十年之久。负栅极驱动并非 SiC 独有
- 具有分布式晶体管的复杂模块需要更高（更大的负） V_{GSoff} 来避免不稳定。单晶体管分立设计可通过使用极小的负 V_{GSoff} 实现
- 对于反激式应用，通常可以将 V_{GSoff} 设为 0。在简单的半桥配置中，按照良好的设计规范，选用 -2V 到 -3V 的 V_{GSoff} 较为合适，这样可在器件的使用寿命内尽量减小 V_{th} 偏移。对于更大功率的半桥设计，则可能需要更低的负驱动电压（甚至低于 -5V）来确保稳定性。

2.1. 第三象限导通性能

与硅 IGBT 不同，SiC MOSFET 可以双向导通电流。下图给出了 Microchip 的 MSC030SMB120B4N 和 MSC031SMC120B4N 的第三象限性能；简单来说，就是漏极电压反向时的漏极电流。如果 MOSFET 沟道处于关断状态，则由内部二极管承载反向漏极电流。当 $V_{GSoff} = -5V$ 时，所有电流都流过内部二极管。随着 V_{GS} 升高，沟道开始形成，但即便在 $V_{GS} = 0V$ 时也仍然存在明显的压降，这说明大部分反向电流还是由内部二极管承载。开关瞬变过后，可以使沟道导通，让反向电流流过，然后利用同步整流技术进一步降低导通损耗。

图 2-1. MSC030SMB120B4N 的第三象限 I-V 曲线

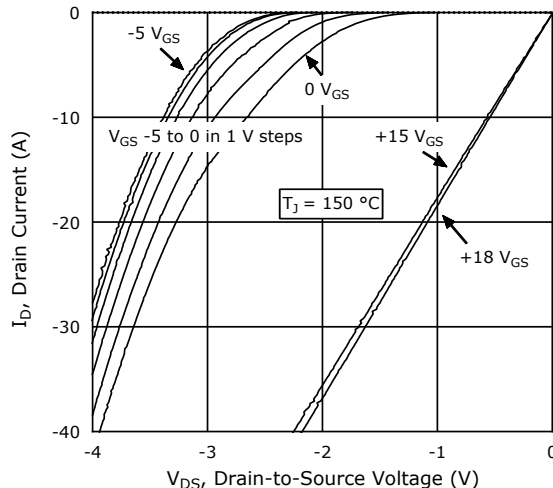
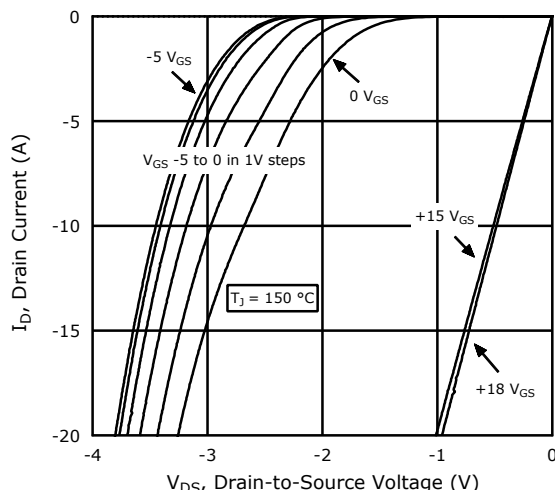


图 2-2. MSC031SMC120B4N 的第三象限 I-V 曲线



2.1.1. 内部二极管稳健性

mSiC MOSFET 的内部二极管没有任何使用限制，但并非所有 SiC MOSFET 供应商都能做到这一点。最近的第三方测量结果表明，竞争对手的器件在内部二极管退化方面表现不一：有的在 168 小时后导通损耗增加了 20%，有的则在不到 10 小时内导通损耗就翻了一倍以上。有关商用 SiC 功率 MOSFET 内部二极管可靠性的更多信息，请参见 5. 参考资料。这种退化机制称为复合增强型位错运动，该现象在业内已是众所周知，而且此前在 SiGe、CdS 和 GaAs 等其他半导体材料中也曾观察到。在充分了解特定 SiC 器件特性的情况下，可以减弱此类影响。

我们建议放心使用 mSiC MOSFET 的内部二极管。如有任何疑问，请联系您当地的 Microchip 销售办事处。

2.2. 开关噪声抗扰度

如果在高速硬开关应用中 SiC MOSFET 的 $V_{GSoff} = 0V$ ，则有几项重要的预防措施需要留意。在深入探讨这些预防措施之前，有必要先介绍一下阈值电压和夹止电压。

下表摘自 Microchip 的 1200V、80 mΩ MB mSiC MOSFET 和 1200V、31 mΩ MC mSiC MOSFET 的数据手册，两者均采用带源极检测引脚的 4 引脚凹槽 TO-247 封装。按照行业惯例，标称阈值电压 (V_{th}) 是在 $V_{GS} = V_{DS}$ 、 $T_J = 25^\circ C$ 且漏极电流仅为 0.75 mA (MB 器件) 和 1.75 mA (MC 器件) 的条件下测得。由于与 V_{th} 相关的漏极电流非常小，因此在实际设计中，夹止电压 (V_p) 参数更具参考价值。 V_p 指的是在特定 V_{DS} 下产生给定漏极电流时所需的 V_{GS} 值。

表 2-1. MSC080SMB120B4N 的栅源阈值电压

符号	特性	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$V_{GS(th)}, 25^\circ C$	25°C 下的栅源阈值电压	$V_{GS} = V_{DS}$, $I_D = 0.75 \text{ mA}$, $T_J = 25^\circ C$	1.9	3	5	V

表 2-2. MSC031SMC120B4N 的栅源阈值电压

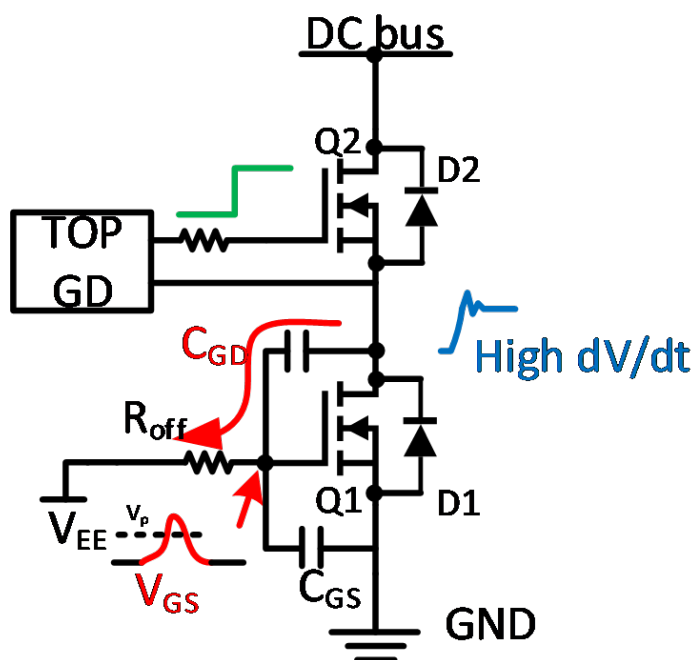
符号	特性	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$V_{GS(th)}, 25^\circ C$	25°C 下的栅源阈值电压	$V_{GS} = V_{DS}$, $I_D = 1.75 \text{ mA}$, $T_J = 25^\circ C$	1.9	3	5	V

由此可见， V_p 的值取决于 V_{DS} ，而后者因 MOSFET 的架构而异。沟槽型 MOSFET 的 V_p 变化范围要比平面型 MOSFET 大得多。因此，为确保安全运行，在设计沟槽型 MOSFET 时会使 25°C 下的 V_{th} 高于实际所需值。这意味着平面型 MOSFET 在 V_p 方面拥有更大的设计裕度，而这正是开关噪声抗扰度的关键所在。

开关噪声抗扰度的实际裕度应当通过最高可能 V_{DS} 以及最大允许 T_J 下的 V_p 来设置。对于我们当前的 MB 和 MC 系列 mSiC MOSFET，Microchip 保证在 $V_{GS} = 0V$ 且 $T_J = 175^\circ C$ 的条件下能够正常关断。使用负 V_{GSoff} 可以提供更大的 V_p 裕度，这不仅能增强开关稳定性，也是防止误导通最可靠的办法。

在半桥配置中，误导通往往是由米勒电容（漏栅电容 C_{GD} ）引发，如下图所示。当顶部器件 Q2 导通时，较高的中点（相桥臂输出） dV/dt 会在 C_{GD} 上产生电流，该电流在栅极电阻 (R_{off}) 两端产生电压差。该电压差会使底部器件 Q1 的 V_{GS} 高于其稳态关断电压 (V_{EE})。该电压有可能高到足以导通 Q1，但 V_p 上的裕度可防止发生这种误导通。

图 2-3. 半桥配置中开关引发的误导通



2.3. V_{GSoff} 总结

基于上述讨论，Microchip 不建议使 $V_{GSoff} = 0V$ 。对于没有直通危险的单端拓扑（如反激式、降压或升压拓扑），可以使 $V_{GSoff} = 0V$ 。如果必须使 $V_{GSoff} = 0V$ ，则应优先考虑栅源环的设计。具体而言，设计人员应尽量降低以下三个参数：寄生漏栅电容、栅源环电感，以及栅源环与主电流换相环之间共用的电感。

3. 对器件开关行为的影响

在非最优的 V_{GSon} 和 V_{GSoff} 电压条件下驱动 MOSFET 会对器件损耗产生显著影响。当 V_{GSon} 较低且 V_{GSoff} 较高时，开关瞬变期间的 $V_{GSon} - V_{GSoff}$ 步长将减小；在相同栅极电阻下，流过器件栅极的充放电电流将会降低，进而导致开关速度下降。与此同时，较低的 V_{GSon} 不仅会导致开关器件的 R_{DSon} 增大，还会降低其在开关瞬变期间的 g_m 。这两个因素均会延长导通瞬变期间 MOSFET 输出电容 (C_{OSS}) 的放电时间。因此，随着 V_{GSon} 的降低，器件 V_{DS} 在导通期间的下降速率变缓，尤其是在大电流负载条件下。同理， V_{GSon} 越低，器件 I_D 的上升速率也越慢。换句话说，器件的 $\frac{d(V_{DS})}{dt}$ 和 $\frac{d(I_D)}{dt}$ 会随着 V_{GSon} 的降低而减小。

在 SiC MOSFET 中，导通损耗通常高于关断损耗。因此，器件的总开关损耗主要取决于导通损耗。相应地，由于导通压摆率会随着 V_{GS} 的变化而发生显著改变，因此器件的总开关损耗也将呈现明显差异。

4. 关键信息

本应用笔记针对 MB 和 MC 系列 mSiC MOSFET 的栅源电压规范以及最优栅极驱动电路设计注意事项提供了相关指导。关键信息如下：

- 为了获得最佳的开关性能和导通性能，建议使用 $V_{GSon} = +18V$ 且 $V_{GSoff} = -5V$ 的驱动方案
- 上述建议值可在一定范围内浮动。MB 和 MC 系列 MOSFET 可在 +15V 下工作，此时电流能力与导通效率略有下降，但可换取更长的 SCWT
- 不建议使用低于 15V 的 V_{GSon} 驱动现有的 MB 和 MC 系列 mSiC MOSFET。若因设计所限无法避免，请联系 Microchip 寻求帮助
- Microchip 保证在 $V_{GS} = 0V$ 且 $T_J = 175^{\circ}C$ 的条件下能够正常关断。但是，使用负 V_{GSoff} 可以围绕 V_p 留出更大的裕度，这不仅能增强开关稳定性，也是防止误导通最可靠的办法。

5. 参考文档

本应用笔记中引用了以下文档：

- M. Kang et al., "Body Diode Reliability of Commercial SiC Power MOSFETs," 2019 IEEE® 7th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), 2019, pp. 416-419

6. 版本历史

版本历史部分汇总了文档中所做的更改，并按照出版物版本从新到旧的顺序列出。

版本	日期	说明
A	2025 年 10 月	初始版本

Microchip 信息

商标

“Microchip”的名称和徽标组合、“M”徽标及其他名称、徽标和品牌均为 Microchip Technology Incorporated 或其关联公司和/或子公司在美国和/或其他国家或地区的注册商标或商标（“Microchip 商标”）。有关 Microchip 商标的信息，可访问 <https://www.microchip.com/en-us/about/legal-information/microchip-trademarks>。

ISBN: 979-8-3371-3356-0

法律声明

提供本文档的中文版本仅为了便于理解。请勿忽视文档中包含的英文部分，因为其中提供了有关 Microchip 产品性能和使用情况的有用信息。Microchip Technology Inc. 及其分公司和相关公司、各级主管与员工及事务代理机构对译文中可能存在的任何差错不承担任何责任。建议参考 Microchip Technology Inc. 的英文原版文档。

本出版物及其提供的信息仅适用于 Microchip 产品，包括设计、测试以及将 Microchip 产品集成到您的应用中。以其他方式使用这些信息都将被视为违反条款。本出版物中的器件应用信息仅为您提供便利，将来可能会发生更新。您须自行确保应用符合您的规范。如需额外的支持，请联系当地的 Microchip 销售办事处，或访问 www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-support-services。

Microchip “按原样”提供这些信息。Microchip 对这些信息不作任何明示或暗示、书面或口头、法定或其他形式的声明或担保，包括但不限于针对非侵权性、适销性和特定用途的适用性的暗示担保，或针对其使用情况、质量或性能的担保。

在任何情况下，对于因这些信息或使用这些信息而产生的任何间接的、特殊的、惩罚性的、偶然的或附带的损失、损害或任何类型的开销，Microchip 概不承担任何责任，即使 Microchip 已被告知可能发生损害或损害可以预见。在法律允许的最大范围内，对于因这些信息或使用这些信息而产生的所有索赔，Microchip 在任何情况下所承担的全部责任均不超出您为获得这些信息向 Microchip 直接支付的金额（如有）。如果将 Microchip 器件用于生命维持和/或生命安全应用，一切风险由买方自负。买方同意在由此引发任何一切损害、索赔、诉讼或费用时，会维护和保障 Microchip 免于承担法律责任。除非另外声明，在 Microchip 知识产权保护下，不得暗或以其他方式转让任何许可证。

Microchip 器件代码保护功能

请注意以下有关 Microchip 产品代码保护功能的要点：

- Microchip 的产品均达到 Microchip 数据手册中所述的技术规范。
- Microchip 确信：在正常使用且符合工作规范的情况下，Microchip 系列产品非常安全。
- Microchip 注重并积极保护其知识产权。严禁任何试图破坏 Microchip 产品代码保护功能的行为，这种行为可能会违反《数字千年版权法案》（Digital Millennium Copyright Act）。
- Microchip 或任何其他半导体厂商均无法保证其代码的安全性。代码保护并不意味着我们保证产品是“牢不可破”的。代码保护功能处于持续发展中。Microchip 承诺将不断改进产品的代码保护功能。