

采用 TO263-7 (D²PAK) 封装的 CoolSiC™ 1200 V G2 MOSFET

关于本文档

范围和目的

本应用笔记介绍了新一代采用 TO263-7 封装、适用于工业电力应用的 CoolSiC™ 1200 V 沟道 MOSFET，旨在阐述这一新产品系列的特性。本文档涵盖重要的应用话题，旨在帮助设计出业界性能最高、可靠性最强的系统。

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 简介	3
1.1 目标应用.....	3
1.2 技术特点与优势.....	3
1.3 .XT 互连技术	4
2 扩展的工业级工作温度范围	5
3 器件选择	6
4 CoolSiC™ 1200 V G2 MOSFET 的开关行为	9
4.1 选择第二代 CoolSiC™ MOSFET 的栅极电阻.....	10
5 体二极管反向恢复.....	12
5.1 缩短死区时间以带来额外效益.....	13
6 单极栅极驱动与寄生导通稳健性	15
6.1 建议的 MOSFET 驱动.....	16
7 不同运行条件下的损耗对比	17
7.1 硬开关拓扑：AC-DC 有源前端	17
7.2 软开关拓扑：低电压侧转换器.....	18
8 SiC MOSFET 电路的 PCB 布局	19
参考文献	20
版本历史	21
声明	22

1 简介

1 简介

1.1 目标应用

在电力电子领域，碳化硅 (SiC) MOSFET 在如下应用中扮演着关键角色：

- 能量存储系统
- 电动汽车充电解决方案
- 高频开关电源
- 电机驱动器
- 光伏逆变器

在任何工业级应用中，SiC MOSFET 的效率和性能有助于满足高功率需求并确保可靠性。相较于硅基功率开关，其具备的优越特性包括高温耐受性、低导通电阻和快速开关，因此是严苛环境应用的理想选择。

1.2 技术特点与优势

英飞凌 1200 V Gen2 CoolSiC™ MOSFET 采用垂直沟槽型元胞结构及最新栅极氧化层工艺。这种设计降低了导通电阻并优化了电场控制，从而提高了开关速度并降低了损耗。第二代碳化硅技术，降低器件热阻，从而提高功率电路的能源效率。

Gen2 CoolSiC™ MOSFET 采用紧凑型设计，在恶劣环境中具备长久寿命和可靠性。它们降低了冷却需求，在高频应用中表现出色，并且与任何采用其上一代技术（英飞凌 CoolSiC™ Gen1）的系统完全兼容。

Gen2 CoolSiC™ MOSFET 的主要特性包括：

- 能在高温下运行
- 阻断电压高
- 开关速度快
- 导通电阻低
- 热导率高
- 具备雪崩和短路承受能力

这些特性使得 Gen2 CoolSiC™ MOSFET 成为跨多种应用实现高效和提升功率转换的首选产品。图 1 展示了两款英飞凌 CoolSiC™ 系列重要 MOSFET 性能指标的比较。这些性能参数可转化为与应用相关的优势，如在不同的电力转换应用中实现更快的开关速度、更小的系统死区时间和更低的开关损耗。

1 简介

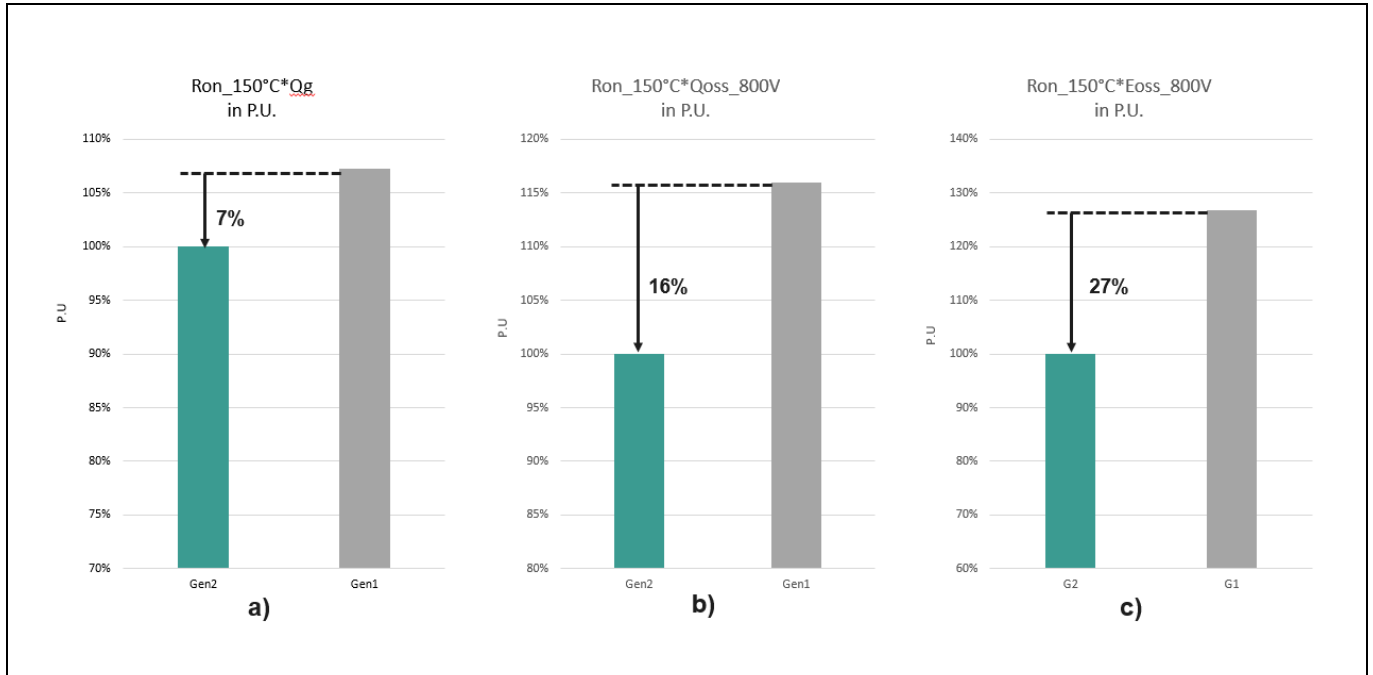


图 1. SiC MOSFET 性能指标：(a) 150°C 下的导通电阻 × 总栅极电荷；(b) 150°C 下的导通电阻 × 输出电容电荷；(c) 150°C 下的导通电阻 × 输出电容能量。

Gen2 的技术提升使得 D2PAK CoolSiC™ 产品系列得以进一步扩展， $R_{ds(on)}$ 从 Gen1 最小的 30 mΩ 扩展至 Gen2 的 8 mΩ。低 SiC MOSFET R_{DSon} 等级提供更优的功率处理能力，从而使得电子系统中实现更高的功率密度。处理更高功率水平的能力有助于减少元件数量、实现紧凑的系统设计和改善热管理。这些器件具有更高的集成潜力，并支持高电压应用，对于强调功率密度、效率和空间的应用至关重要。

1.3 .XT 互连技术

英飞凌的 .XT 芯片互连技术解决了设计挑战，实现了在保持稳定热性能的同时缩小外形尺寸。采用 .XT 技术的新一代 1200 V CoolSiC™ MOSFET，因其改进的芯片连接工艺，使得结到壳的热阻抗降低了 12%。因此，可以实现更高输出电流并延长器件寿命。 .XT 技术采用扩散焊接方法，以最小化焊料空洞并降低焊料层厚度。关于 D²PAK 的不同 PCB 配置 的详细比较，已在 [1] 中说明。

2 扩展的工业级工作温度范围

2 扩展的工业级工作温度范围

SiC MOSFET 因其可在高于传统硅基 MOSFET 的温度下运行而广为人知。尽管不同 SiC MOSFET 技术和制造商之间的具体温度评级可能有所差异，但许多 SiC MOSFET 被设计为在高达 175°C 的结温下可靠运行。英飞凌的 Gen2 CoolSiC™ MOSFET (2 代) 可在累计 100 小时的时间内运行至 200°C。该器件规格的引入旨在提高过载条件下的可靠性，并为工程师在系统设计上提供更多自由度。

SiC MOSFET 在短时间内承受过载条件的能力，对于各种应用来说是一个重要的考量。在工业电机驱动中，突发的负载变化、额外的扭矩需求甚至电源波动都可能导致过载状况，此时提高结温裕度将非常有用。太阳能逆变器是展示过载条件的另一个好例子。因为电网电压波动会影响电力转换器的运行，因此是展示过载条件的另一个好例子。电压跌落会影响变换器的输出功率，临时增加功率损耗，在严重情况下，甚至可能导致系统完全脱离电网。在电动汽车充电应用中，充电器电压波动至关重要：一旦输入电压下降，电流会暂时上升，给电力器件带来额外压力。

图 2 显示了由于更高的温度限制，8 mΩ 器件扩展的功率耗散能力示例。蓝色曲线代表了受 175°C 结温限制的典型半导体功率。相比之下，CoolSiC™ Gen2 的红色曲线显示，在相同的操作点下，能提供 29% 的额外电流。

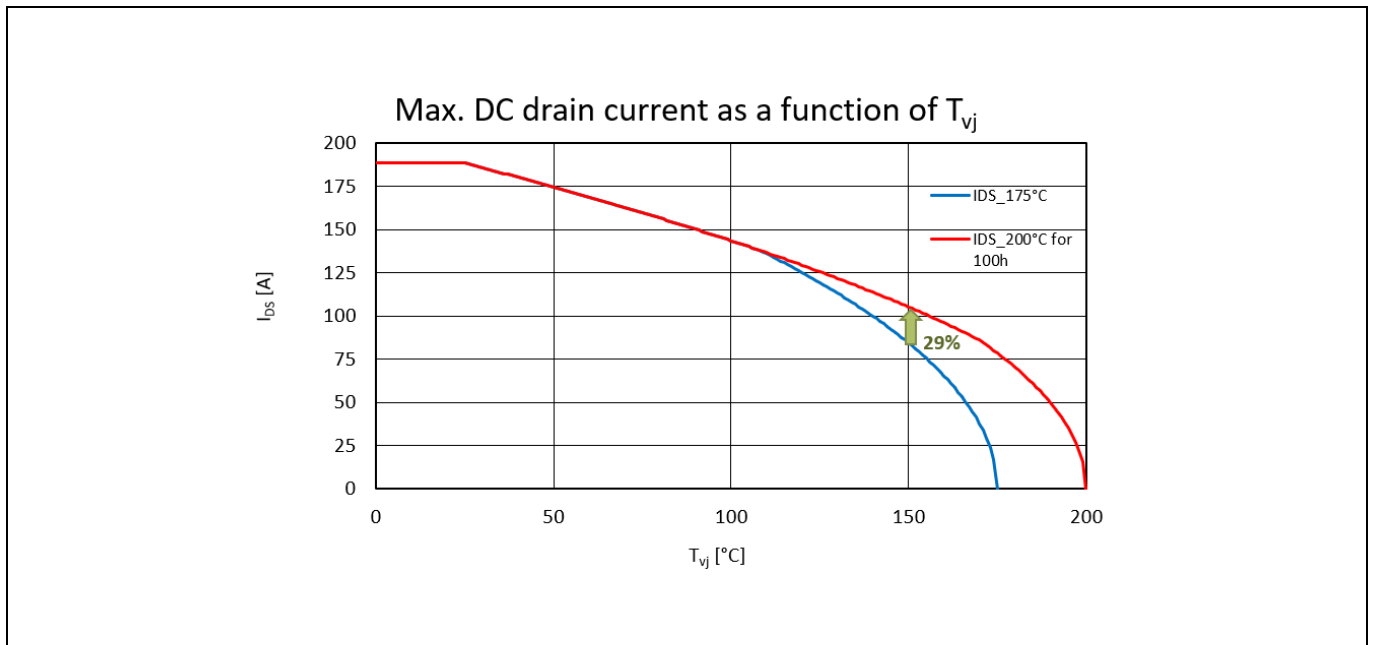


图 2. 器件 (IMBG120R008M2H) 在 200°C 结温下的功率耗散。

如前所述，Gen2 CoolSiC™ MOSFET 已被认证可在高达 200°C 的温度下运行，累计时间可达 100 小时。我们以太阳能逆变器为例，展示这一数值范围对应用的意义：在电网电压严重跌落 2 秒的极端情况下，每天允许在 200°C 的条件下操作 50 次，持续 10 年时间。

3 器件选择

3 器件选择

在选择适用于任何应用的正确 MOSFET 时，必须考虑多种因素，以确保最佳性能、可靠性和效率。本章提供了选择适合新电源系统的 Gen2 器件以及替换现有 Gen1 器件的指导原则。

在 Gen2 CoolSiC™ MOSFET 系列产品中，特定型号的命名规则保持不变。图 3 展示了 CoolSiC™ 产品系列的命名规则图例。通过检查定义器件技术或代数的封装代码和产品系列代码，可以快速选择特定类型的器件。在选定这两个参数后，可以进一步考虑家族产品组合内的电压等级、 $R_{ds(on)}$ 等级或电流能力切换的详细选择。

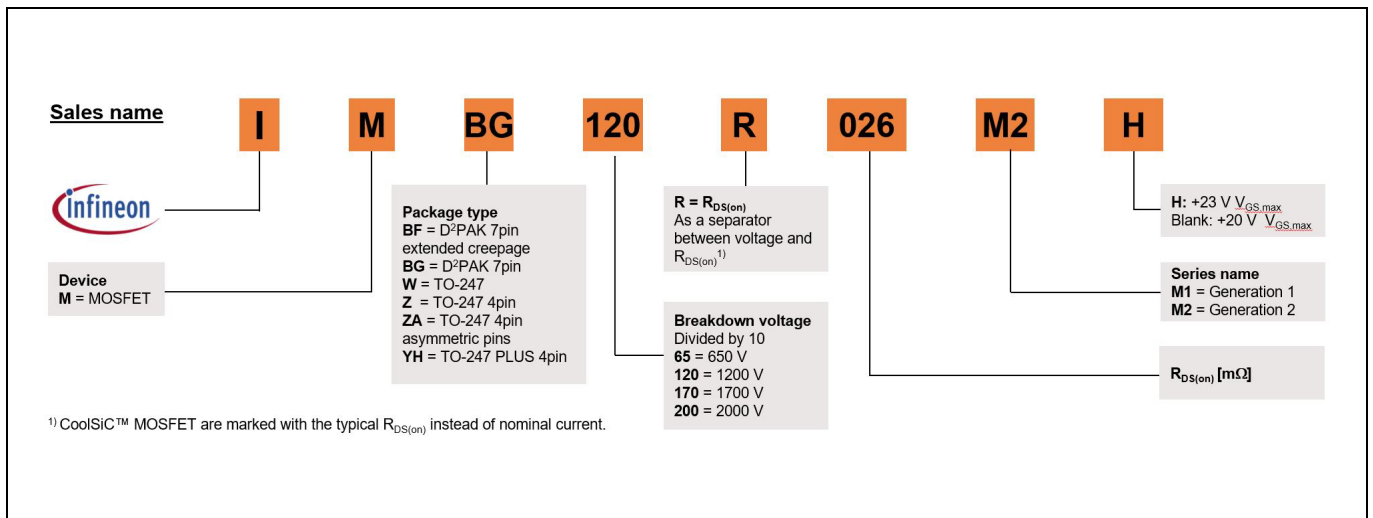


图 3. CoolSiC™命名规则图例。

为特定应用选择具有特定电压和电流额定值、开关频率条件以及热系统的 MOSFET 时，总是需要进行一定的折衷优化。

选择 MOSFET 的首要决定因素是系统的运行电压。如今，几款电压等级已成为行业标准。因此，在此方面做出正确的决策非常简单，由系统的最大电压指导即可。典型的经验法则是，在器件的最大电压额定值与操作系统总线电压之间保留 30% 的余量（例如，1200V 的 SiC MOSFET 通常用于最高 900V 的系统母线电压）。选择 $R_{ds(on)}$ 的等级更为复杂。事实上， $R_{ds(on)}$ 的值是影响通态损耗的重要参数。根据与上一代产品名称的比较，英飞凌的 CoolSiC™ 系列中没有两个顺器件的 $R_{ds(on)}$ 值是相同的。这是因为产品名称通常包括 25°C 时的导通电阻值，由于技术改进，Gen2 器件的该值略有不同。图 4 展示了 IMBG120R026M2H Gen2 和 IMBG120R030M1H Gen1 的导通电阻随结温变化的关系。曲线显示了在不同栅极电压下的工作特性，分别为 +15 V（虚线）和 +18 V（实线）。

3 器件选择

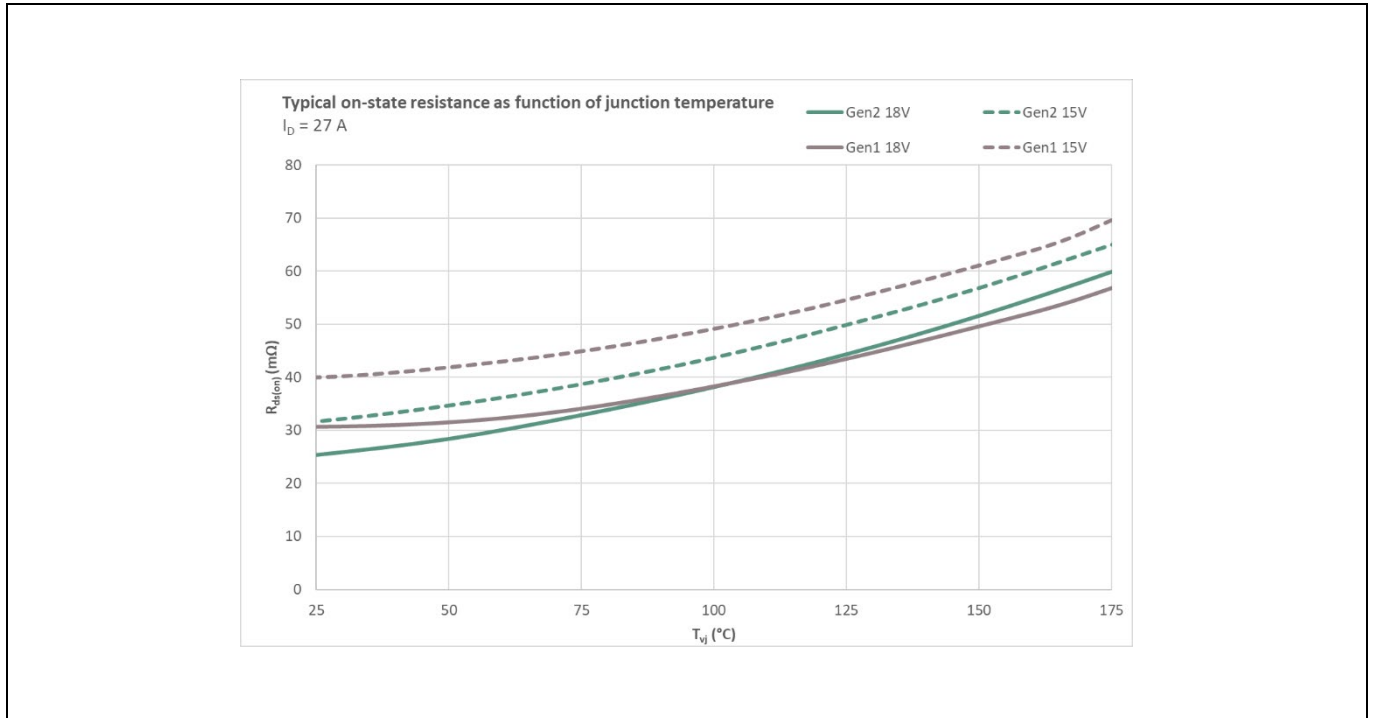


图 4. 二代 (IMBG120R026M2H) 与一代 (IMBG120R030M1H) 器件在+15V 和+18V 栅极电压下的导通电阻特性，作为结温的函数。

Gen2 MOSFET 在垂直元胞内具有改进的沟道区域。沟道电阻在总电阻中的贡献明显较小，而漂移层的贡献则更为突出[2]。因此，通态曲线具有略微更强的正温度系数特性。根据 CoolSiC™ Gen2 数据手册，我们的产品在 150°C 时的最大 $R_{ds(on)}$ 值是市场最高的。该值已考虑最坏情况，可作为设计参数使用。

SiC MOSFET 的典型栅极至源极驱动电压为+18 V。在用新的 Gen2 器件替换 Gen1 器件时，比较两器件的导通电阻特性至关重要（见图 4）。应根据最恶劣工况下的热条件选择器件，通常这一工况是重载操作。基于此，可以进行更精确的匹配选择。此外，Gen2 器件的 R_{DSon} 温度依赖性更同，因此显著改善了轻载运行的损耗与结温。在接下来的章节中，我们将讨论选定应用中器件损耗的整体分布，以突出 Gen2 器件的优势。

英飞凌 CoolSiC™ 技术的另一重要特性是其保证的短路能力，这使得英飞凌 SiC MOSFET 能够安全应用于马达驱动场景。此类特性通常通过使用+15 V 的栅源电压驱动器件来改善。图中虚线所示，在相同条件下（例如在 100°C 工作温度下），Gen2 器件的导通损耗显著低于 Gen1 器件（Gen2 器件的 $R_{DS(on)}$ 比 Gen1 的低 15%）。因此，CoolSiC™ 技术在电机驱动应用、和需要+15 V V_{GS} 驱动的一般应用中的性能更为吸引人。

3 器件选择

除了通态损耗之外，SiC MOSFET 越来越倾向于工作在更高的开关频率，这使得开关损耗成为选择 SiC MOSFET 时的另一个重要因素。MOSFET 的栅极电荷和电容值可以作为选择适合所需开关频率器件的参考。Gen2 MOSFET 的寄生电容相较于前一代有所降低。这意味着 Gen2 产品相较于 Gen1，在开关瞬态方面更快，且开关损耗更低，因此能够实现更高的开关频率和更低的栅极驱动器损耗。第二章详细讨论了第二代 CoolSiC™ 产品的开关行为。

最终，选择合适的 SiC MOSFET 必须考虑器件的热性能。基于此，器件的热阻抗值越小，根据具体的优化策略，越能实现更高的输出功率或更低的操作温度。由于 Gen2 器件的连接工艺改进，使得 R_{th} 热阻提高了 12%，优于前一代 SiC MOSFET，因此在相同的结温抬升情况下，能够实现 12% 更高的输出功率。

4 CoolSiC™ 1200 V G2 MOSFET 的开关行为

4 CoolSiC™ 1200 V G2 MOSFET 的开关行为

理解 SiC MOSFET 的开关行为对于在各种应用中优化电力转换器设计至关重要。SiC MOSFET 的一大特点是其快速的开关速度，这归功于材料的高电子迁移率。这一特性实现了 ON 和 OFF 状态之间的迅速转换，从而降低了开关损耗、提高了整体效率。

英飞凌 1200 V Gen2 CoolSiC™ MOSFET 技术对器件的电容性质进行了改进。如表 1 所示，输入电容和输出电容分别显著降低了 13%和 19%。在负载相对较小的条件下运行时，Gen2 器件的输出电容改进更为显著。输入电容值决定了所需的栅极驱动功率。因此，若在系统中采用英飞凌 CoolSiC™ Gen2 功率开关，可降低栅极驱动器损耗，并优化驱动电路。

表 1. Gen2 和 Gen1 器件的寄生电容

参数	符号	值	
		IMBG120R026M2H	IMBG120R030M1H
输入电容	C_{iss}	1990 pf	2290 pf
输出电容	C_{oss}	85 pf	105 pf
反向传输电容	C_{rss}	7.4 pf	11 pf

降低开关损耗是高性能电子设计的关键目标。Gen2 CoolSiC™ MOSFET 的开关损耗相比前代产品有所降低。SiC MOSFET 的开关行为受多种因素影响，如工作温度、器件导通的电流以及施加在开关上的栅极电阻等。图 5 显示了 IMBG120R026M2H 器件和 IMB120R030M1H 器件开关特性的温度依赖性。在 150°C 下对比两款器件的开通和关断损耗曲线，结果显示 Gen2 器件的开关行为分别改善了 7%和 23%。

设计工程师还需考虑对电流的依赖性，并采取适当的散热管理策略，以充分利用 Gen2 CoolSiC™ MOSFET 的整体开关性能。

4 CoolSiC™ 1200 V G2 MOSFET 的开关行为

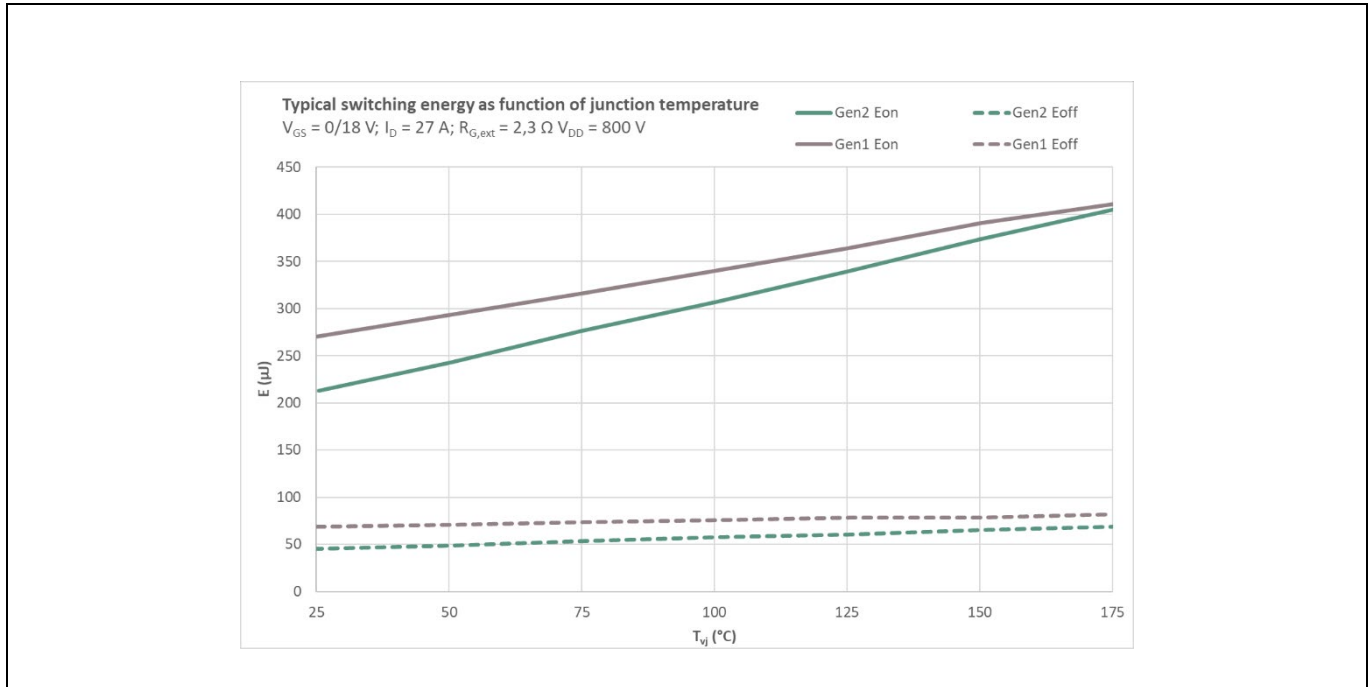


图 5. Gen2 (IMBG120R026M2H) 与 Gen1 (IMBG120R030M1H) 器件的开关损耗随结温变化的函数。

4.1 选择第二代 CoolSiC™ MOSFET 的栅极电阻

所应用的栅极电阻显著影响 SiC MOSFET 的开关行为及其整体性能。栅极电阻是工程师可以操控的关键参数，用以优化晶体管开关状态的转换。

较低的栅极电阻有助于更快地充放电栅极电容，从而实现更迅速的开关转换。该特性可以降低开关损耗，提高整体效率。低栅极电阻有助于 ON 和 OFF 状态之间更迅速的转换，这对于降低功率耗散至关重要。

在另一端，较高的栅极电阻会减缓开关过程，因为它增加了驱动电路的时间常数。虽然这可能降低电压过冲和振荡的风险，但同时也可能导致更高的开关损耗。提高栅极电阻可以软化开关转换过程，从而潜在降低电磁干扰 (EMI) 并缓解电压尖峰。然而，过高的栅极阻抗可能会影响开关速度和效率。

图 6 展示了 Gen2 CoolSiC™ MOSFET 器件 IMBG120R026M2H 及其相应 Gen1 IMBG120R030M1H 器件在不同栅极电阻值下的能量损失。鉴于前述原因，为充分利用 CoolSiC™ MOSFET 的速度，建议在设计系统时采用最高不超过 25 Ω 的栅极电阻值。具体的栅极电阻值取决于器件的 R_{ds(on)} 等级。图 6 显示，无论 MOSFET 的技术如何，栅极电阻值超过 25 Ω 会导致每个开关周期的开启能量损耗接近 1 毫焦，因此大致产生每千赫兹开关频率 1W 的开关损耗。

4 CoolSiC™ 1200 V G2 MOSFET 的开关行为

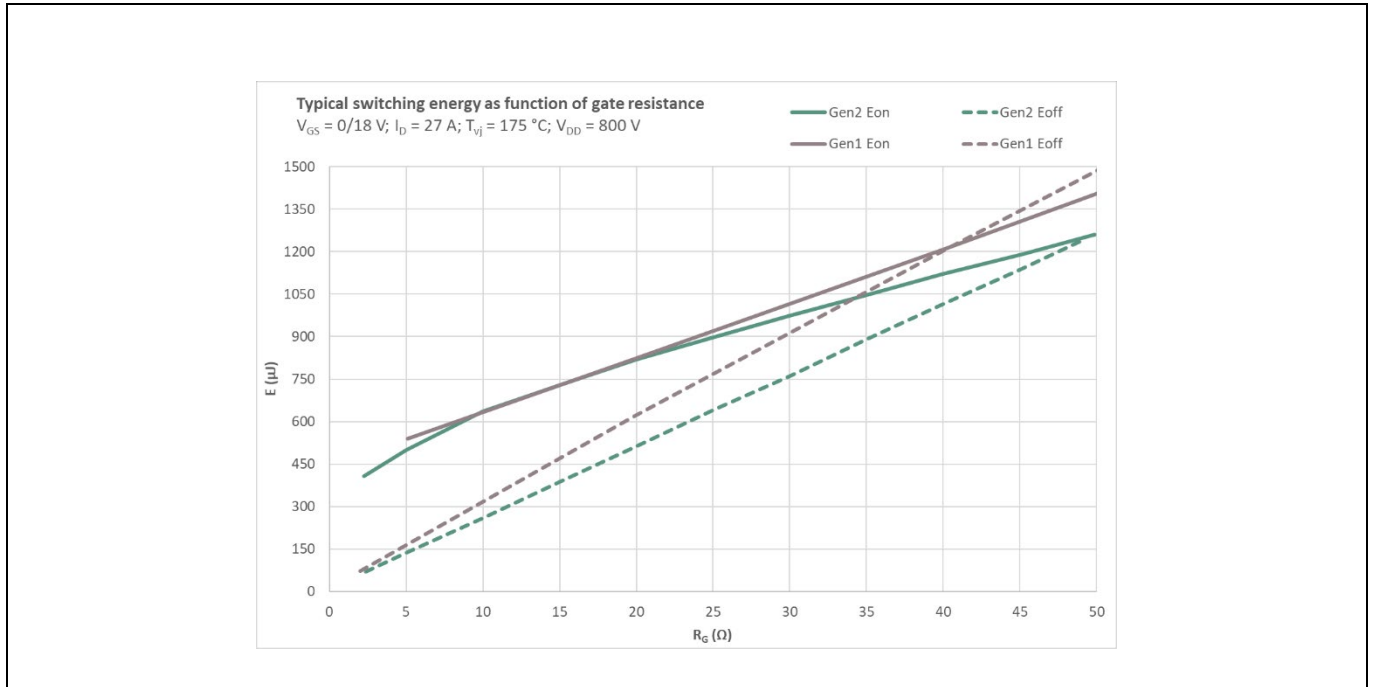


图 6. Gen2 (IMBG120R026M2H) 与 Gen1 (IMBG120R030M1H) 器件在外部栅极电阻下的开关损耗。

若 R_g 足够低，则 CoolSiC™ Gen2 技术则会展现出其相较于前代产品的优势。例如，当外部栅极电阻为 5 Ω 时，Gen2 器件的开关损耗比 Gen1 器件的低大约 7%。在电气单元方面，如果开关频率为 60 kHz，在图 6 所示相同条件下，Gen2 开关的开关损耗比 Gen1 器件减少了 2.5 W。

正如所述，选择合适的栅极阻抗实际上是在开关速度、损耗和稳健性之间的权衡。工程师需细致分析应用的具体需求，并对栅极电阻进行相应调整，以实现业绩最佳的 SiC MOSFET 性能。然而，无需修改栅极电路，即可通过简单的即插即用方式，用对应的 Gen2 MOSFET¹ 替换第一代器件，从而实现更佳功率耗散以及系统效率和寿命的提升。

总之，Gen2 CoolSiC™ MOSFET 的较低开关损耗是下一代电力电子系统中的一个关键要素。

¹选取标准是基于在 100°C 时匹配 $R_{\text{DS(on)}}$

5 体二极管反向恢复

5 体二极管反向恢复

基于 SiC MOSFET 的高频转换器利用器件固有的续流体二极管，在 MOSFET 处于关闭状态时允许电流从源极导通至漏极。这种条件通常发生在半桥配置的死区时间内。SiC 体二极管通常具有较高的正向电压和相关的双极性反向恢复电荷，因此会产生更高的导通能量和开关损耗。本章将展示 CoolSiC™ Gen2 体二极管的开关行为实验结果，并讨论为最小化其损耗推荐的驱动策略。

SiC MOSFET 中的体二极管反向恢复现象是其广为人知的特性，其影响已在众多公开文献中得到了详尽分析。当 MOSFET 从导通状态转为非导通状态时，在 MOSFET 通道关闭后，体二极管会短暂地在反向方向上导电。这种反向恢复效应会导致不必要的功率损耗增加。若要减少这些损耗，器件制造商需要对体二极管特性进行细致的优化。另一方面，功率设计工程师必须考虑到反向恢复时间和二极管特性，以确保系统的高效和可靠运行，特别是在那些具有非常快开关速度或严格效率要求的应用中。

在图 7 中，展示了 IMBG120R026M2H Gen2 器件和 IMBG120R030M1H Gen1 器件的体二极管反向恢复电流波形。在高温条件下进行了测量，此时二极管的性能更为关键，也更容易退化。可以看出，Gen2 器件的二极管峰值和电流过冲的持续时间与上一代相当。波形整体形状显示，Gen2 二极管的软特性与 Gen1 相当，没有高 di/dt 电流尖脉冲。快速电流瞬态可能导致过冲电压，这会对电路中的器件及其他组件造成应力。

Note: 该测量基于 746 MHz 带宽的电流传感器。

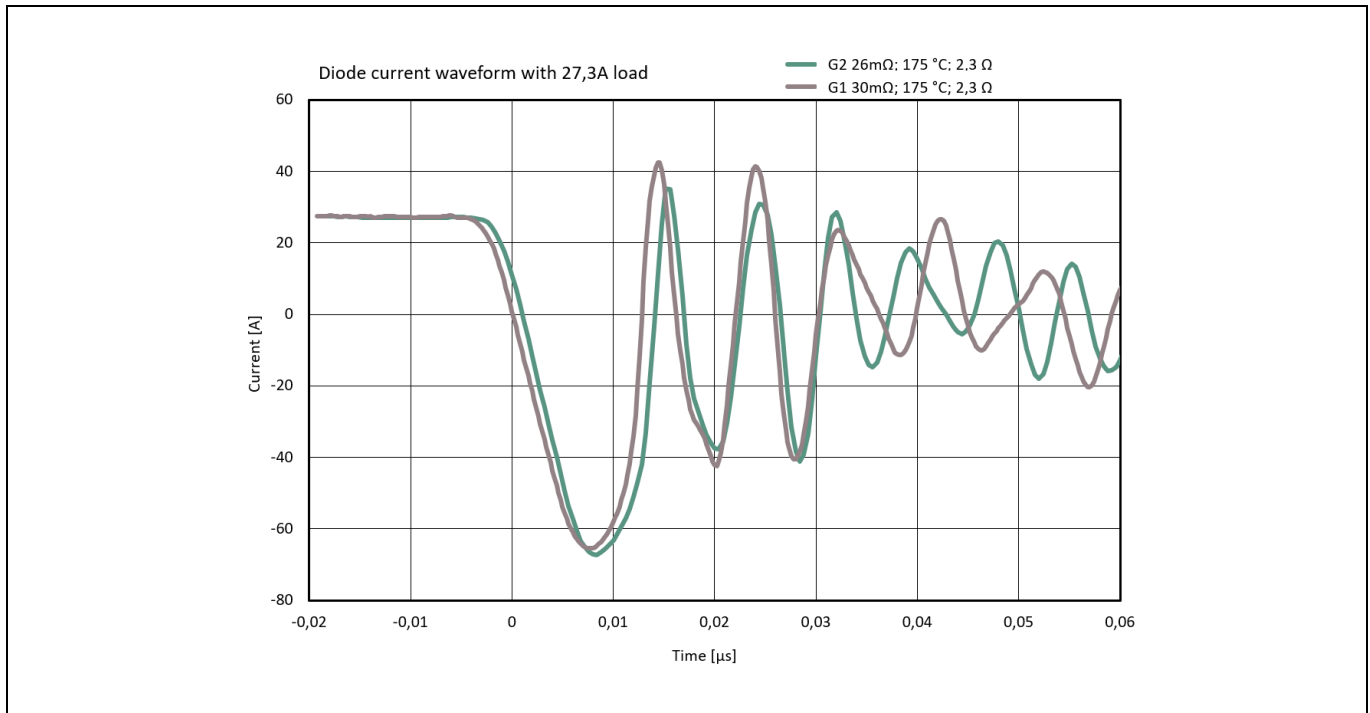


图 7. Gen2 (IMBG120R026M2H) 和 Gen1 (IMBG120R030M1H) 器件的恢复电流波形。

5 体二极管反向恢复

5.1 缩短死区时间以带来额外效益

体二极管的导通时间长度对反向恢复损失及互补 SiC MOSFET 的开通损失有着重要影响。除了减少二极管造成的损失外，死区时间还会影响电力变换器的动态响应。优化后的死区时间能够更好地再现 AC-DC 或 DC-AC 变换器中的正弦波形。

当今的 MOSFET 能够实现数十纳秒 (ns) 级的开关。图 8 展示了 Gen2 CoolSiC™ MOSFET 推荐的死区时间操作范围。开关损耗曲线显示，调节死区时间有可能显著降低器件的恢复损失和开通损失。绿色标记区域（即从 150 ns 到 250 ns 之间）代表了推荐的死区时间控制范围。现代驱动电路，尤其是使用 SiC 开关时，可以实现这一范围。通过采用推荐值，相较于器件的标称值，可降低 20% 的开通损耗，40% 的反向恢复损耗。如需进一步了解死区时间对 E_{rec} 影响，请参阅[4]。

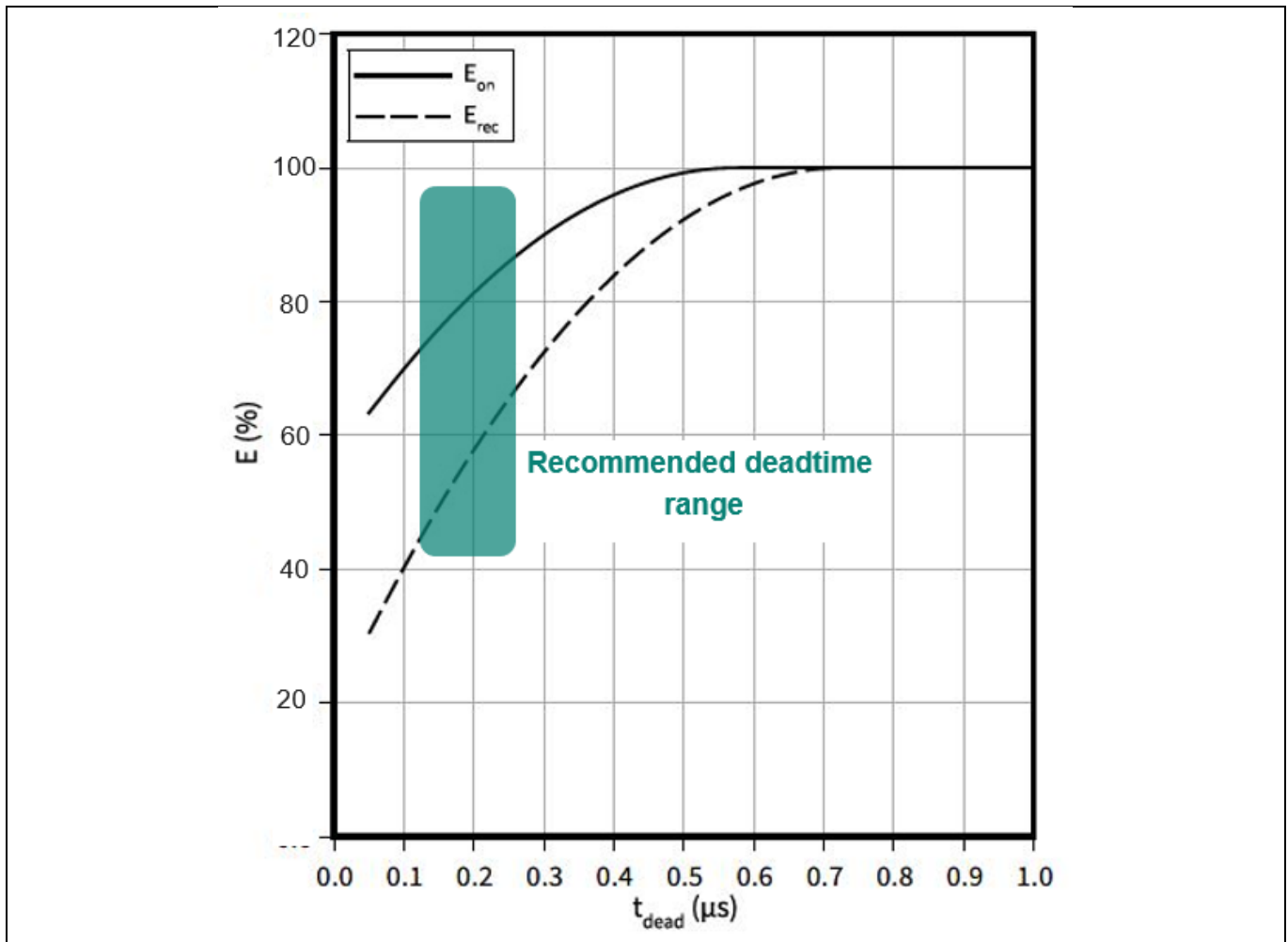


图 8. 推荐死区时间范围及其相应的能量损耗特性。

实际上，采用 SiC MOSFET 可以进一步减少死区时间。然而，值得注意的是，应用极低死区时间的可行性取决于并将会更加强烈地依赖于多种其他因素，这些因素与功率开关的速度、栅极驱动器的速度以及电路中的寄生元件有关，例如杂散电感和电容。

5 体二极管反向恢复

在选择死区时间时，系统设计师应当仔细检查并考虑以下因素：

- 短死区时间与潜在的直通风险之间的权衡
- 确保所选电源开关和栅极驱动器的适当匹配，以使器件能够支持一定的死区时间值。

如前所述，死区时间限制受多种因素影响，如器件及电路中的寄生参数、栅极驱动器的速度以及切换电流的大小。取代 Gen1 CoolSiC™ MOSFET 时采用最为匹配的 Gen2 器件，可实现更快的开关速度，减少 30% 的死区时间。即使在进行简单的即插即用 MOSFET 替换时，这也提供了更宽的设计余量。

6 单极栅极驱动与寄生导通稳健性

6 单极栅极驱动与寄生导通稳健性

SiC MOSFET 中可能由于 C_{GD} 及栅极驱动电路[6]中的电容电流无意中将器件驱动至导通状态，而发生寄生导通现象 (PTO)。这通常与电路中寄生元件的存在有关。导致 PTO 最常见的原因因为极端高的 dV_{DS}/dt 、较低 MOSFET 阈值电压以及电路中放大不必要瞬态的大寄生元件。

SiC MOSFET 在功率电路中能够非常快速地切换高电流。由于杂散电感和高速开关的影响，功率开关的栅极信号容易发生畸变。这会在栅极端产生一定的电压振铃，进而驱动器件进入导通状态。为应对这一不受欢迎的行为，通常会在封装中提供一个专用的驱动开尔文源引脚。此外，SiC MOSFET 技术可设计具有更高的阈值电压，并且可最小化栅漏与栅源之间的寄生电容比值，以降低感应电压及其对器件状态的影响。

Gen2 CoolSiC™产品在 25°C 和 175°C 时的阈值电压分别为 5.1V 至 3.2V。这些阈值电压水平为控制信号提供了较大的噪声安全极限。此外，CoolSiC Gen2 技术改进了寄生电容 C_{DG} 与 C_{GS} 的比例，从而减少了栅极信号的干扰。这有助于提高寄生导通稳健性。图 9 Gen2 (IMBG120R026M2H) 和 Gen1 (IMBG120R030M1H) 器件的阈值电压与栅极引脚产生的感应电压之间的差值。展示了器件阈值电压 (浅绿色部分) 和电容感应栅极电压 (深绿色部分) 的范围。由于 Gen2 器件改善了 C_{DG}/C_{GS} 的比例，因此其电压余量超过了 1V。

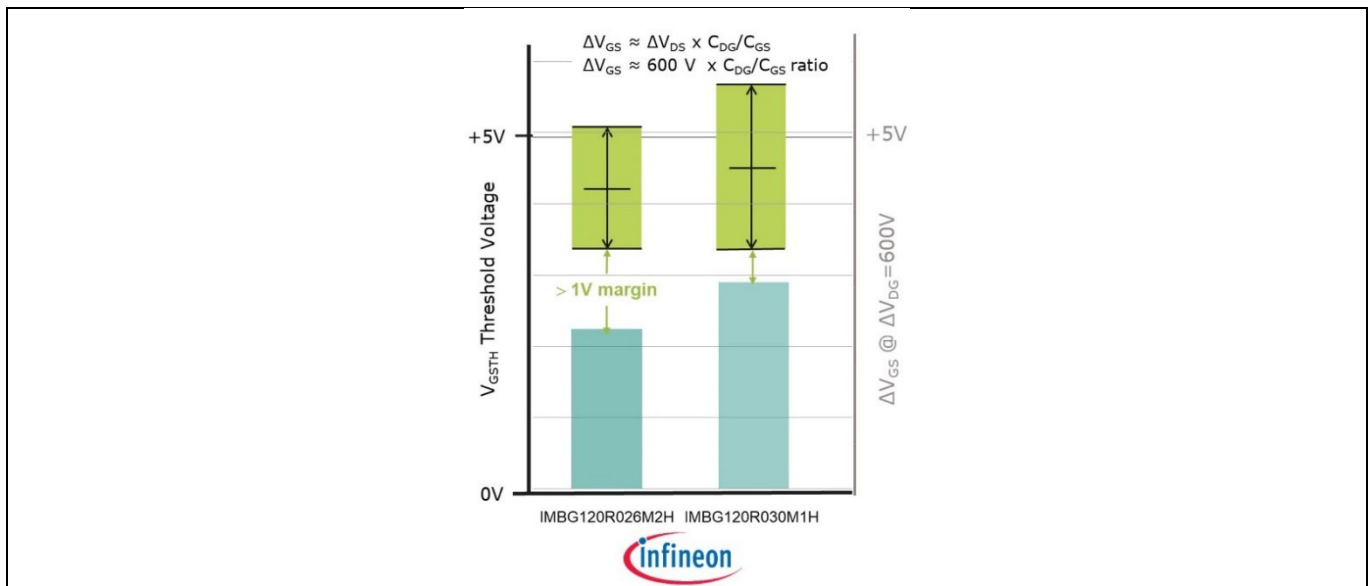


图 9. Gen2 (IMBG120R026M2H) 和 Gen1 (IMBG120R030M1H) 器件的阈值电压与栅极引脚产生的感应电压之间的差值。

6 单极栅极驱动与寄生导通稳健性

6.1 建议的 MOSFET 驱动

与 MOSFET 功率器件可靠性相关的一条通用原则是，尽量减小断态到通态的 V_{GS} 电压跃变。若是早期 SiC MOSFET 技术，推荐使用单极性 V_{GS} 操作方法来优化栅极氧化层的可靠性。随着多年来 SiC MOSFET 技术的不断发展，栅氧层及其制造工艺的可靠性已显著提高。因此，当今的 SiC MOSFET 被设计为能在特定限度内耐受负栅极电压。这有利于在存在高开关瞬态时，提高抗寄生导通 (PTO) 的余量。

使用负压可以使得 MOSFET 进入更为安全和可靠的关断状态，或提升其关断特性。工程师应遵循数据手册中指定的电压水平。D2PAK 封装的 Gen2 CoolSiC™ MOSFET 显著提高了允许的 V_{GS} 范围，与上一代相比，具体范围如表 2 所示。负瞬态值和静态值可以低至 -10 V 和 -7 V。正极瞬态值可高达 +23V，静态值可达 +20V。瞬态栅极源电压值表示允许的栅极过冲和欠冲水平。静态栅源电压指的是可以施加在 MOSFET 栅极上的直流电平。

表 2. 数据手册中给出的栅极电气参数

Gate-source voltage, max. transient voltage ²⁾	V_{GS}	$t_p \leq 0.5 \mu s, D < 0.01$	-10...23	V
Gate-source voltage, max. static voltage	V_{GS}		-5...20	V

选择合适的开启电压 V_{GS} 对器件性能具有重大影响。 $R_{ds(on)}$ 特性依赖于施加的栅极电压。当 V_{GS} 从 15V 增加到 18V 时， $R_{ds(on)}$ 显著降低。Gen2 CoolSiC™ MOSFET 扩展的静态栅极电压范围非常适合 +18V 驱动应用。仅在某些特定情况下（例如在需要短路能力的产品应用中，通常首选 15V）考虑使用较低电压驱动 Gen2 CoolSiC™ 器件的栅极。

英飞凌 CoolSiC™ MOSFET 的栅极氧化物可靠性已通过多年的应用证明。从系统级角度来看，单极性或双极性栅极驱动方案之间的成本差异可以忽略不计。

Note: 为确保功率开关长期稳定运行，器件应在数据手册[4]中指定的栅极电压范围内操作。

7 不同运行条件下的损耗对比

7 不同运行条件下的损耗对比

7.1 硬开关拓扑：AC-DC 有源前端

图 10 显示了硬开关拓扑中单个开关的损耗详情。不同的损耗包括：

- 通态损耗（紫色）
- 开通切换损耗（绿色）
- 关断切换损耗（黄色）
- 反向恢复损失（浅绿色）

由此可见，二极管反向恢复损耗在整体器件损失中占比微乎其微。在相同工作条件下，对 IMBG120R026M2H Gen2 和 IMBG120R030M1H Gen1 器件进行比较，结果显示 Gen2 器件的导通损耗降低了 0.7 W (3.5%)，总开关损耗减少了 5.75 W (22.87%)。由于其损耗降低且 $R_{th,j-c}$ 热阻更优，该器件的整体工作结温也降低了 12°C。

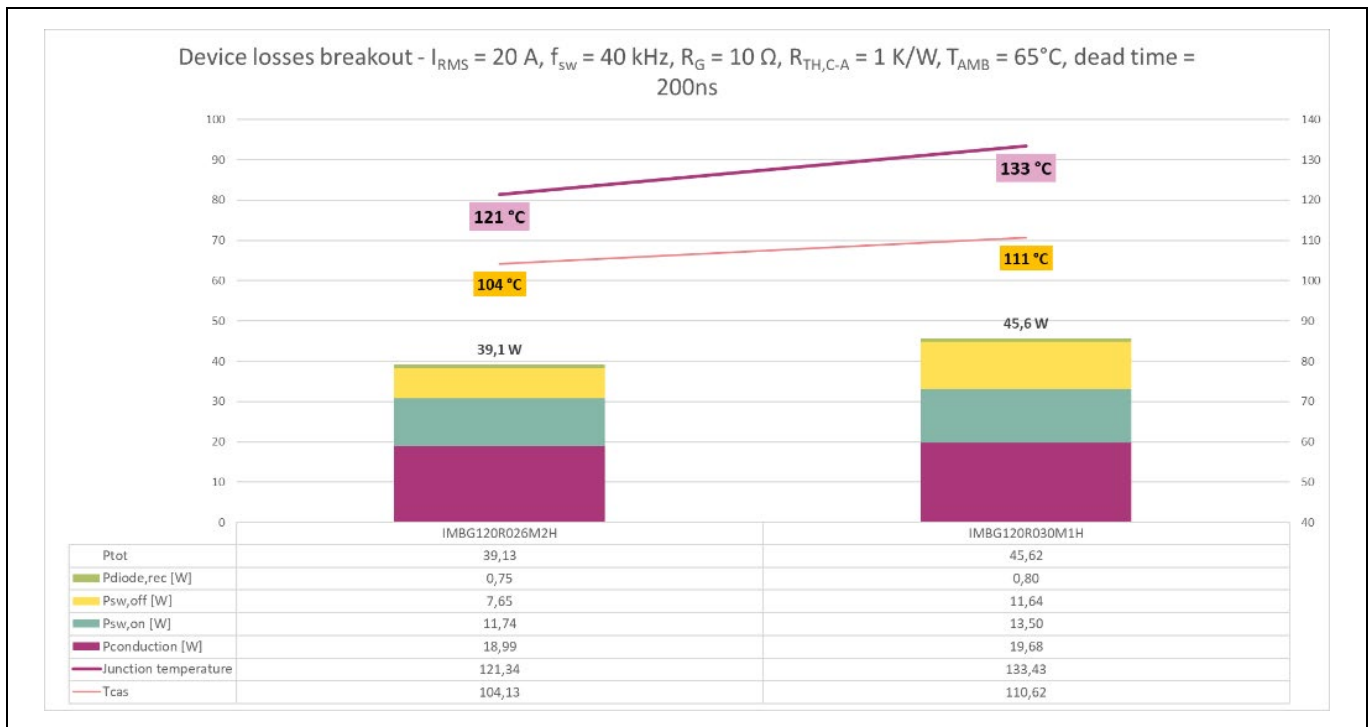


图 10. 比较交流-直流拓扑中单个开关的损耗分解，对象为 Gen2 (IMBG120R026M2H) 与 Gen1 (IMBG120R030M1H) 器件。

7 不同运行条件下的损耗对比

7.2 软开关拓扑：低电压侧转换器

在软开关拓扑中，主要的损耗来源于导通阶段（紫色）和关闭切换阶段（黄色）。图 11 显示了单个切换的损耗分解。在相同工作条件下，IMBG120R026M2H Gen2 与 IMBG120R030M1H Gen1 器件的比较显示，Gen2 器件的导通损耗降低了 2.4 W（11.3%），总开关损耗减少了 12.1 W（41.37%）。其整体工作结温还降低了 2°C。

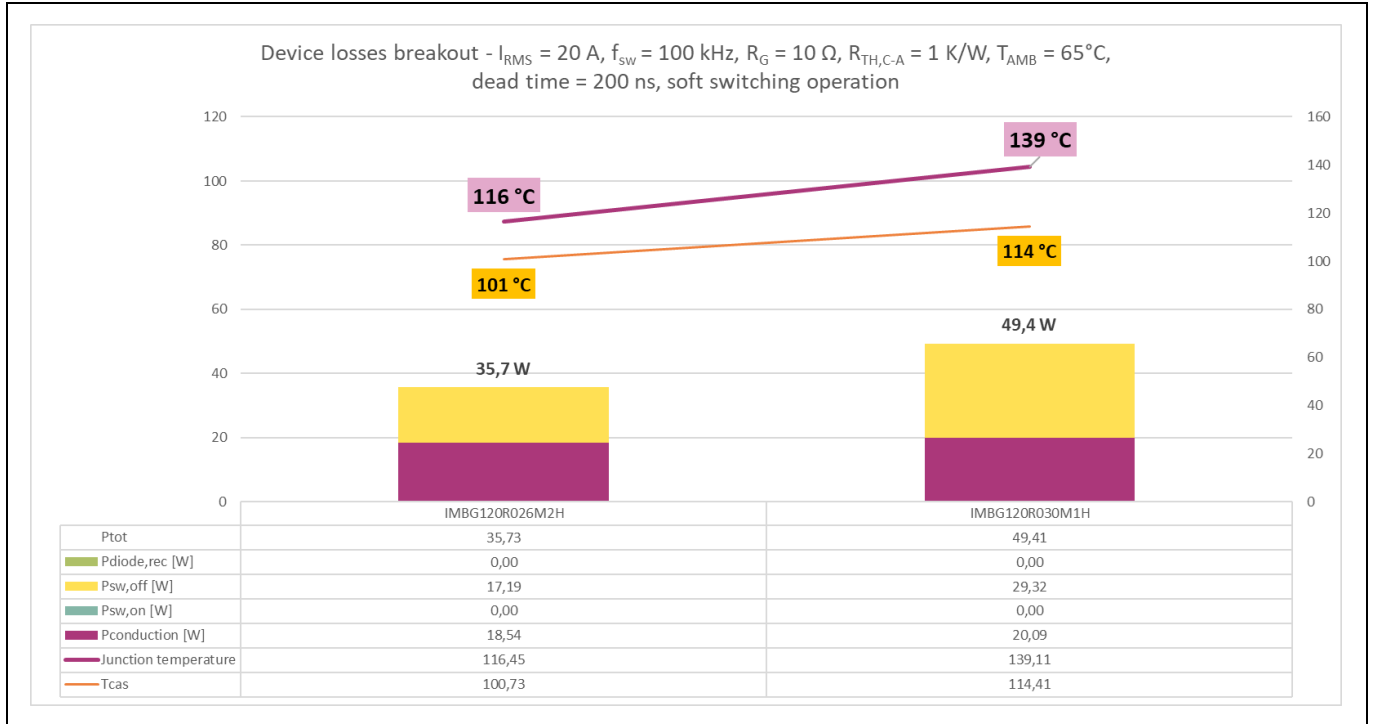


图 11. 比较 Gen2 (IMBG120R026M2H) 与 Gen1 (IMBG120R030M1H) 器件在 DC-DC 拓扑中单个开关的损耗分解

8 SiC MOSFET 电路的 PCB 布局

8 SiC MOSFET 电路的 PCB 布局

图 12 展示了一种针对英飞凌 CoolSiC™ MOSFET D²PAK 设计建议的三相电源板布局。电路板由采用绝缘金属基板的 TO-263-7 封装的 MOSFET 组成。栅源回路与功率分开，以避免噪声对驱动信号的干扰。为降低环路电感，电源走线被设计得尽可能短。门极电阻尽可能靠近功率 MOSFET 的栅极引脚放置，而栅极驱动器 IC 位于第二块标准 FR-4 PCB 上，通过信号接头与 IMS 板互联。

最重要的构件通过以下标识符进行强调：

- 1) 高压 MOSFET
- 2) 低功耗 MOSFET
- 3) 旁路电容器
- 4) 栅极电阻网络
- 5) 栅极信号连接器
- 6) V 相电路
- 7) U 相电路

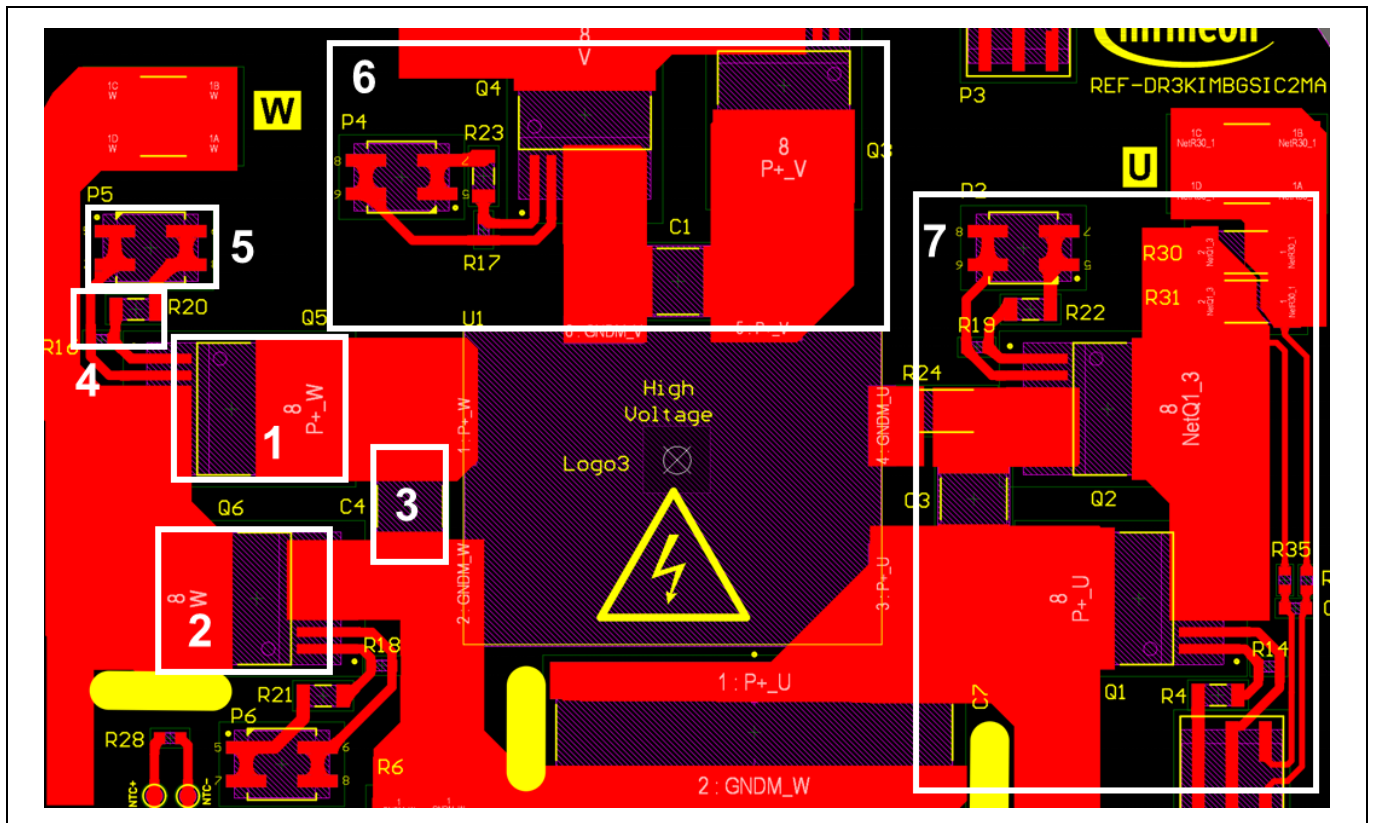


图 12 基于 IMS 板上 SMD MOSFET 的伺服驱动电源电路 PCB 布局示例

参考文献

参考文献

- [1] 英飞凌应用笔记 Z8F80405158

适用于汽车应用、采用 TO263-7 封装的 1200-V Gen1p CoolSiC™ MOSFET (1200-V Gen1p CoolSiC™ MOSFET in TO263-7 package for automotive applications)

https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-AppNote_1200-V_Gen1p_CoolSiC™_MOSFET_in_TO263-7_package_for_automotive_applications-ApplicationNotes-v01_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c85ecb347018602157f190aa5

- [2] 英飞凌应用笔记 AN2017-46

CoolSiC™ 1200 V SiC MOSFET 应用笔记

https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-CoolSiC™_MOSFET_1200V-SiC_trench_power_device-ApplicationNotes-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462617643590161c27fbcda0aae

- [3] 英飞凌：应用笔记 AN2018-09

CoolSiC MOSFET 栅极驱动电压窗口指南 (Guidelines for CoolSiC™ MOSFET gate drive voltage window)

https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Guidelines_for_CoolSiC™_MOSFET_gate_drive_voltage_window-ApplicationNotes-v01_30-EN.pdf?fileId=5546d462636cc8fb0163b098fe26306a&redirId=266653

- [4] 索科尔 (Paul Sochor)、胡纳尔 (Andreas Huerner)、赫尔 (Michael Hell)、埃尔佩尔特 (Rudolf Elpelt)：理解快速开关应用中 SiC MOSFET 体二极管的关断行为 (*Understanding the Turn-off Behavior of SiC MOSFET Body Diodes in Fast Switching Applications*)；PCIM 欧洲数字交易日 2021，国际电力电子、智能运动、可再生能源与能源管理展览会；ISBN：978-3-8007-5515-8

<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=9472262>

- [5] 英飞凌：应用笔记 AN_2112_PL18_2112_024619

使用功率 MOSFET 进行设计 (Designing with power MOSFET)

https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Designing_with_power_MOSFET-ApplicationNotes-v01_02-EN.pdf?fileId=8ac78c8c7ddc01d7017e6c619a490f47

- [6] CoolSiC™ MOSFET 单管寄生导通特性表征 (The parasitic turn-on behavior of discrete CoolSiC™ MOSFET)

https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Bodos_Parasitic_turn-on-Article-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4626df6ee62016dfdd129330f0b

版本历史**版本历史**

文档修订	提交日期	变更说明
版本 1.0	2024-07-12	对应英文版的修订：首次发布 (Initial release)

Trademarks

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

Edition 2024-07-12

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

AN-2024-02_ZH

重要提示

本档所提供的任何信息绝不应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，本档所提供的任何信息均取决于客户履行本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外，英飞凌科技的产品不应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。