

# 碳化硅栅极驱动器：电力电子行业的颠覆性技术



**Nagarajan Sridhar**  
Strategic Marketing Manager – SiC and Smart Isolated Drivers  
High Power Drivers

**TI POWER**

## 引言

实现二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 减排以防止全球变暖成为了全球密切关注的焦点。通过减排和减少将化石燃料作为能源使用这两种措施双管齐下，我们每天使用的应用实现了多种颠覆性成果，如今朝着高效率、稳健且紧凑的系统趋势发展。在经济方面，还体现为让消费者实现能源节约。

例如，汽车制造商致力于开发和销售混合动力电动汽车/电动汽车 (HEV/EV)，预计到 2021 年将达到 800 万辆 [1]。为实现碳减排目标，电机驱动器、光伏逆变器和数据中心服务器等工业大功率产品也在朝着更高的系统效率、更长的使用寿命和更紧凑的解决方案迈进。

通过实现以下特性，电力电子产品（以及功率半导体器件）在满足上述苛刻要求方面起着至关重要的作用：

- 更低的功率损耗
- 高频运行
- 更高的结温
- 高电压运行
- 增强的热耗散

本文将探讨碳化硅 (SiC) 作为功率半导体开关及其生态系统（尤其是栅极驱动器）的价值，从而实现 CO<sub>2</sub> 减排及其相关优势，此外，文中还将介绍栅极驱动器和隔离要求。

## 大功率半导体选型现状

以前，硅基功率半导体开关一直是并且仍然是大功率应用设计人员的主要选择，他们通常根据电压和功率等级进行选型。图 1 根据高压应用的电压要求，展示了两种常用的硅基功率半导体：金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 和绝缘栅双极晶体管 (IGBT)。

	Si-MOSFET	IGBT
Voltage Ratings	20~650V	≥650V
Optimal V <sub>GS</sub>	0~15V	-10~15V
Max. Limit	(±20V)	(-10~20V)

图 1. 基于电压等级的常用硅基功率半导体。

总线电压需高于 400V 的应用（例如 EV、电机驱动器和串式逆变器 [2]、[3]）需要具备 650V 以上电压等级的功率半导体开关。此外，此类应用是几千瓦到 1MW 的高功率解决方案。

目前，您可将 IGBT 用作最高 1,200V 的电力电子开关管。一些应用的电压甚至越来越高，其中电流等级和传导损耗会降低。其中一些应用的电压为 1,200V 至 1,700V，例如多相电机驱动器。

## 为何选择 SiC?

如前所述，为了实现 CO<sub>2</sub> 减排目标，设计人员亟需实现更高的系统效率、更长的使用寿命和更紧凑的解决方案。遗憾的是，MOSFET 和 IGBT 已接近其理论极限。目前用于高压 (>650V)/大功率应用的 IGBT 在超过 1kV 的电压下已达到其绝对极限。

SiC FET 作为一种颠覆性材料问世，它具有比硅出色的材料特性，包括低导通电阻、高热导率、高击穿电压和高饱和速度，如表 1 所示。

属性	定义	Si	SiC-4H
E <sub>G</sub> (eV)	带隙能量	1.12	3.26
E <sub>BR</sub> (MV/cm)	临界电场击穿电压	0.3	3.0
v <sub>s</sub> (x10 <sup>7</sup> cm/s)	饱和速度	1.0	2.2
μ (cm <sup>2</sup> /V.s)	电子迁移率	1400	900
λ (W/cm.K)	热导率	1.3	3.7

表 1. SiC 的固有材料特性。

SiC 的击穿电压比硅高 10 倍，因此其导通电阻比硅

更低，从而可实现高电压运行和低传导损耗。SiC 的带隙能量是硅的三倍，因此系统能够在更高的结温下运行。硅基功率器件在 150°C 的结温 (T<sub>j</sub>) 下运行，相比之下，SiC 的 T<sub>j</sub> 更高 (大于 200°C)，因此可在环境温度达到 175°C 或更高的环境中运行。例如，HEV 引擎盖下方的功率转换器就是在这种环境下工作的。

SiC 的高饱和速度和电子迁移率降低了开关损耗，并提高了系统工作频率。反过来，这些优势可减少无源元件数量，从而减少系统的尺寸和重量。SiC 的热导率是硅的三倍，可降低系统的冷却需求。

所有这些特性都有助于实现高效、稳健且紧凑的系统。图 2 所示为 SiC 的材料特性值及其相应的系统优势。

在汽车应用方面，紧凑的系统能够更轻松地将电力电子设备集成到牵引电机中，从而减小 HEV/EV 的整体重量和尺寸。加之更高的效率和稳健的特性，这可以显著

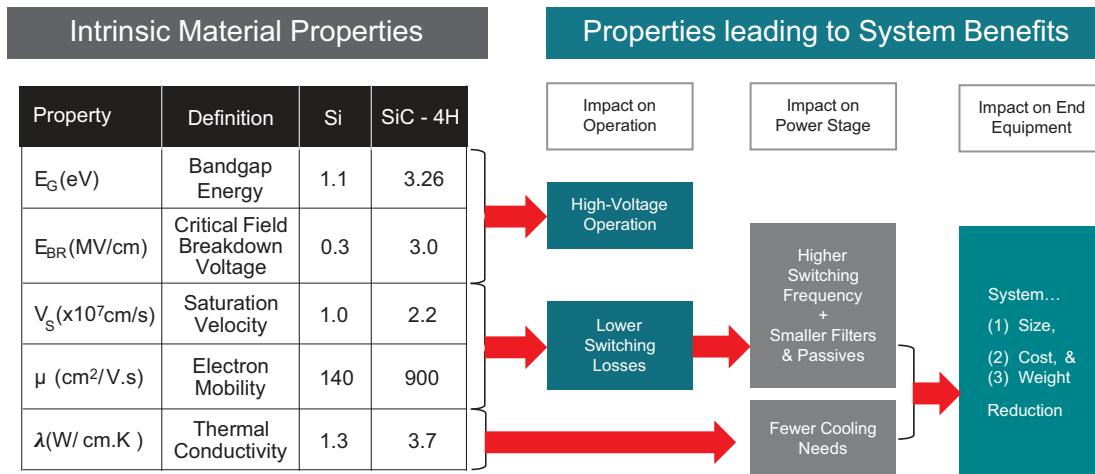


图 2. SiC 的材料特性及系统优势。

增加行驶里程数，从而帮助消费者节约更多能源。

## SiC 生态系统中的栅极驱动器

理想情况下，系统级高功率解决方案（例如牵引逆变器、驱动器和光伏逆变器）有三个半导体元件：控制器、栅极驱动器和功率半导体（本文为 SiC）。因此，了解如何驱动 SiC 功率器件至关重要。这些开关根据控制器的指示导通和关断，以便在电力电子电路中进行高效的电力传输。

栅极驱动器是一个关键元件，可充当控制器和功率器件之间的一个接口。可将栅极驱动器想象成一个放大器，它接收控制器信号并将其放大，从而驱动功率器件。鉴于 SiC FET 的出色特性，确定对栅极驱动器的要求非常关键。

其中包括：

- 25-30V 高电源电压，从而通过低传导损耗实现高效率
- 高驱动强度（通常大于 5A），从而实现低开关损耗
- 快速短路保护，SiC 电源开关比硅基开关（MOSFET 和 IGBT）更快，因此可实现快速响应
- 更小的传播延迟和变化，实现高效和快速的系统控制
- 高 dv/dt 抗扰度，确保稳定运行

这些要求对于 SiC 与硅基 MOSFET 和 IGBT 栅极驱动器来说是独特的，如表 2 所示。

SiC 栅极驱动器的一个独有特性是快速过流保护，而不是 IGBT 栅极驱动器的去饱和。对于相同的额定电流和电压，IGBT 到达有源区域时集电极和发射极之间的电压明显降低 ( $V_{CE}$ )（通常为 9V）

开关管	Si MOSFET	Si IGBT	SiC
开关频率	高 (>20kHz)	中低 (5kHz-20kHz)	高 (>50kHz)
基本保护	无	有 - 去饱和, 米勒钳位	有 - 电流感测, 米勒钳位
VDD 最大值 (电源)	20V	30V	30V
VDD 范围	0-20V	10 至 20V	-5 至 25V
工作电压 VDD	10-12V	12-15V	15-18V
UVLO	8V	12V	12-15V
CMTI	50-100V/ns	<50V/ns	>100V/ns
传播延迟	越小越好 (<50ns)	高 (不严重)	越小越好 (<50ns)
电源轨电压	高达 650V	>650V	>650V
典型应用	电源 - 服务器、数据通信、电信、工厂自动化、车载和非车载充电器、太阳能微伏逆变器和串式逆变器 (<3kW)、400V 至 12V 直流/直流转换器 - 汽车	电机驱动器 (交流电机)、UPS、集中式和串式太阳能逆变器 (>3kW)、汽车牵引逆变器	PFC - 电源、光伏逆变器、用于 EV/HEV 的直流/直流和用于 EV 的牵引逆变器、电机驱动器、铁路

表 2. 将 SiC 与 MOSFET 和 IGBT 栅极驱动器进行比较。

与 SiC MOSFET 相比。IGBT 会自动限制电流增加。对于 SiC，漏电流  $I_D$  随着漏源电压差 ( $V_{DS}$ ) 的增加而继续增加，最终导致更快的击穿，如图 3 所示。因此，对于 SiC 栅极驱动器而言，具有快速保护和快速故障报告（通常为 400ns）功能至关重要。

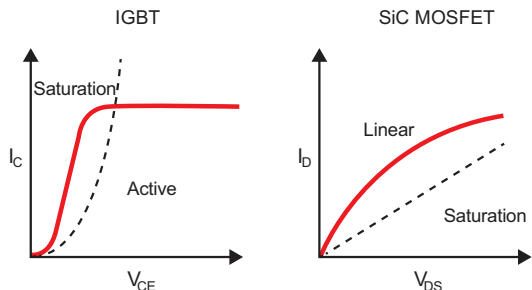


图3. SiC MOSFET 和 IGBT 之间的电流-电压 (I-V) 特性差异。

栅极电压必须具有高  $dv/dt$  才能适应 SiC 的高开关速度，因此需要低阻抗驱动器以实现稳健运行。

SiC 用于高压/大功率应用，并且涉及到人机界面 (HMI)，因此几乎所有用于 SiC 的栅极驱动器都是隔离的。

### 数字隔离需求

电隔离技术通过隔离电气系统的功能部分，防止直流电流或不受控制的瞬态电流在这些功能部分之间流动。但是，数据和能量仍需要通过电隔离栅。这种隔离栅可采用光学、磁性或电容隔离技术。其中，数字隔离器包含电容隔离和磁隔离，它通过隔离栅以数字方式传输数据。和磁隔离一样，电容隔离利用数字电路对传入信号进行编码和解码，从而使信号通过隔离栅。

从根本上说，电容只能通过交流信号，不能通过直流信号；此外，它们在保持高数据速率和低功耗的同时不易受到磁噪声的影响。因为 SiC 栅极驱动器具有高数据速率和高抗噪性（共模瞬态抗扰度高于 150V/ns），因此适合使用电容隔离。

TI 最近推出了业内先进的隔离式栅极驱动器系列 UCC217xx，具有快速集成式检测能力，适用于 IGBT 和 SiC MOSFET。该系列器件不仅提供先进的监控和保护功能，还能提高汽车和工业应用（如牵引逆变器、车载充电器、驱动器和并网系统大功率调节器）的总系统效率。通过集成元件，这些器件可缩短检测时间以防范过流事件，同时确保系统安全关断。UCC217xx 系列利用电容隔离技术，最大限度延长绝缘栅的使用寿命，同时还提供高增强隔离等级、快速的数据速度和高密度封装。该系列使用 SiC MOSFET 可进一步提高系统优势，具体如下：

- **增强系统性能：**该器件  $\pm 10A$  的高峰值驱动强度最大限度地提高了开关性能并降低了损耗，同时 200ns 的过流检测可实现快速系统保护。
- **增强系统级可靠性：**UCC217xx 系列利用电容隔离技术和先进的增强隔离等级以及高达 12.8kV 的浪涌抗扰度，可延长绝缘栅的使用寿命。此外，这些器件可确保准确的数据通信，共模瞬态抗扰度 (CMTI) > 150V/ns

- **减小系统尺寸：**栅极驱动器可通过集成的缓冲器和传感器减少外部元件，同时通过隔离的模拟-脉宽调制传感器提供准确的温度、电流或电压感测，从而简化系统级诊断并防止开关故障。

## 系统级优势和挑战

SiC FET 的开关速度比 IGBT 快，这是因为在 SiC 关断期间没有尾电流。但是，这种尾电流可在关断期间抑制振铃，这实际上是 IGBT 的一个优势（尤其是在电机驱动应用中），因为任何误导通和由此产生的过冲都可能损坏系统。基于 SiC 的应用面临的系统级挑战是如何通过栅极电阻或缓冲器控制振铃。

开关速度越快，则磁性元件和电容滤波器尺寸越小，从而减小系统尺寸和降低成本。如前所述，鉴于高热导率，系统还应该降低冷却需求。

一些系统解决方案供应商仍然认为，减小系统尺寸和降低成本不足以抵消 SiC 所带来的高元件成本。基于 SiC 的系统开发仍处于早期阶段，因此目前成本会很高。然而，随着市场的广泛推广，实现规模经济后，SiC 成本自然会下降，从而实现系统级成本效益。

## 总结

为满足 CO<sub>2</sub> 减排要求，具有高功率密度、可靠且紧凑的解决方案

成为牵引逆变器、车载充电器、光伏逆变器和电机驱动器等大功率应用的一种趋势。SiC 作为一种颠覆性材料问世，它具有比硅出色的材料特性，包括低导通电阻、高热导率、高击穿电压和高饱和速度。SiC FET 栅极驱动器的独特性使其成为 SiC 生态系统中的关键元件，鉴于其具有高电压和高功率水平，它在保护 HMI 和智能系统方面非常重要。因此，隔离式栅极驱动器成为 SiC 栅极驱动器的标准。

TI 为开关管提供多种 SiC 隔离式栅极驱动器，包括 UCC217xx、UCC21521C、UCC53xx 和 ISO545x/585x 系列。

## 参考文献

1. Strategy Analytics, 2017. <https://www.strategyanalytics.com/access-services/automotive/powertrain-body-chassis-and-safety/reports/report-detail/hev-ev-market-forecast-oct-2017?slid=353165&spg=1#>.
2. Z. Chen, Y. Yao, D. Boroyevich, K.D.Ngo, P. Mattavelli and K. Rajashekar, "A 1200-V, 60-A SiC MOSFET multichip phase-leg module for high-temperature, high-frequency applications," IEEE Transactions on Power Electronics 29, No. 5 (2014), 2307-2320.
3. Z. Liang, P. Ning and F. Wang, "Development of advanced all-SiC power modules," IEEE Transactions on Power Electronics 29, No. 5 (2014), 2289-2295.

**重要声明：**本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 重要声明和免责声明

TI 提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保或其他要求。这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 的销售条款 (<https://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com.cn](https://www.ti.com.cn) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122  
Copyright © 2021 德州仪器半导体技术（上海）有限公司