

宽带隙半导体: GaN 与 SiC 的性能和优势对比

作者: Masoud Beheshti

GaN 应用和营销总监

简介

与传统的硅金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 相比, 氮化镓 (GaN) 和碳化硅 (SiC) FET 可提高功率密度和效率。尽管 GaN 和 SiC 均具有宽带隙, 但它门之间存在根本差异, 因此分别适合特定的拓扑和应用。本文目的是比较两者在开关性能、成本和应用方面的差异, 并说明各自提供的技术。

高压功率器件

贝尔实验室的两位工程师在 20 世纪 50 年代发明了 MOSFET, 在电力电子领域取得了重大突破。几年后, 第一个商用 MOSFET 投入生产。

绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 自 20 世纪 80 年代发明以来, 为高功率和高电压应用提供了除硅控整流器和栅极关断晶闸管等传统器件以外的另一种选择。IGBT 在业内日益普及, 广泛应用于交流和直流驱动器、牵引逆变器、不间断电源和感应加热器等应用。在这些应用中, 开关频率通常不高于 20kHz。

GaN 和 SiC 等宽带隙器件的商业化再次改变了电力行业的格局。这些器件在降低栅极驱动损耗的同时, 对 MOSFET 和 IGBT 进行了实质性改良, 包括降低栅极电容 (用于提高开关速度)。例如, GaN 的栅极电荷小于 $1\text{nC}\cdot\Omega$, 而硅片的栅极电荷为 $4\text{nC}\cdot\Omega$ 。这些器件还显著降低了输出电容, 因此设计人员可在不增加相关开关损耗的情况下提高开关频率, 并减小系统中磁性元件的尺寸和重量。典型 GaN 器件的输出电荷为 $5\text{nC}\cdot\Omega$, 而同等硅芯片的输出电荷为 $25\text{nC}\cdot\Omega$ 。

所有这些高压器件都具有自己的特性, 如图 1 所示, 每种器件都有不同的功率级别和开关频率。

GaN 和 SiC 的性能比较

GaN 和 SiC 满足市场上不同的功率需求。SiC 器件可提供高达 1,200V 的电压等级, 并具备高载流能力, 因此非常适合汽车和机车牵引逆变器、高功率太阳能发电场和大型三相电网转换器等应用。

而 GaN FET 通常为 600V, 可在 10kW 及更高范围内作为高功率密度转换器, 应用范围包括消费类产品、服务器、电信和工业电源; 伺服驱动器; 电网转换器; 电动汽车车载充电器和直流/直流转换器。

尽管存在这些差异, 但这两种技术均可用于某些低于 10kW 的应用。以下是两个具体的例子。

单相 PFC

每个功率超过 75W 的线路供电电器产品都需要功率因数校正 (PFC)。PFC 是电网和系统之间的第一个电源转换级, 在任何给定的工作点都会承载全部负载。所以, 其效率和功率密度会直接影响总体系统尺寸。在单相并网应用中, PFC 级通常用于通用交流输入 (85V_{AC} 至 264V_{AC}), 输出电压高达 400V_{DC} 。

为了减小尺寸同时符合行业效率标准, 设计人员使用了不同的拓扑。例如, 80 PLUS[®] 钛金级电源的效率级别为 96%。

图 1. 高压功率器件映射

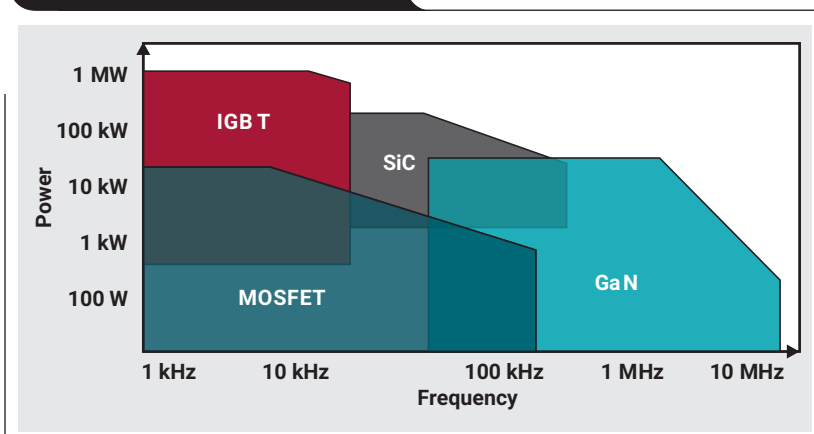


图 2a 所示的双升压拓扑常用于 1kW 以上的高功率系统。SiC 二极管和新一代超结 (SJ) MOSFET 晶体管的引入, 帮助人们提高了功率密度和效率。但是, 在过去的十年里, 这些改进已处于停滞。

图 2b 所示的图腾柱拓扑将功率器件和电感器的数量减少一半, 同时可显著提高密度和效率, 为双升压 PFC 提供了一种具有成本效益的替代方法。我们可提供使用 SiC 或 GaN 器件的图腾柱解决方案。但在这个拓扑中, GaN 比 SiC 具备更多优势, 包括:

- **零反向恢复。**与 MOSFET 不同, GaN FET 的横向结构内没有 PN 结, 因此, 这些器件中没有体二极管和相关的反向恢复损耗。由于 SiC FET 结构中存在体二极管, 所以它会出现反向恢复损耗。典型的 SiC FET 有大于 85nC 的反向恢复电荷。
- **较低的开关能量。**GaN 的开关能量比 SiC 低 50% 以上, 可直接降低 PFC 级的损耗。在关键模型图腾柱应用中, 可以实现大于 1MHz 的开关频率。
- **更快的开关速度。**具有集成栅极驱动器的新一代 GaN 器件开关速度可达 150V/ns, 损耗比 SiC 低 82%, 比分立式 GaN FET 低 63%。
- **更低的死区损耗。**在 PFC 工作期间, 每个开关周期都设置了一个短时间段 (也称为死区时间), 使半桥的两个开关不同时导通。死区时间及关联的电压和电流会导致每个周期出现损耗, 而自适应死区时间等复杂控制算法有助于降低这类损耗。使用高级驱动器功能 (例如, 理想二极管模式), 可将死区时间损耗降低 67% 以上 (与 SiC 和分立式 GaN 相比), 而且无需复杂的固件或硬件控制。

图 3 是双升压 PFC、SiC 图腾柱和 GaN 图腾柱间的损耗分类比较。在这个应用中, GaN 可提供超低的损耗和超高的效率。这些优势使设计人员不仅可以提高功率密度, 而且显著降低散热器和风扇等冷却元件的成本和尺寸。

图 2. 双升压 PFC 与图腾柱 PFC

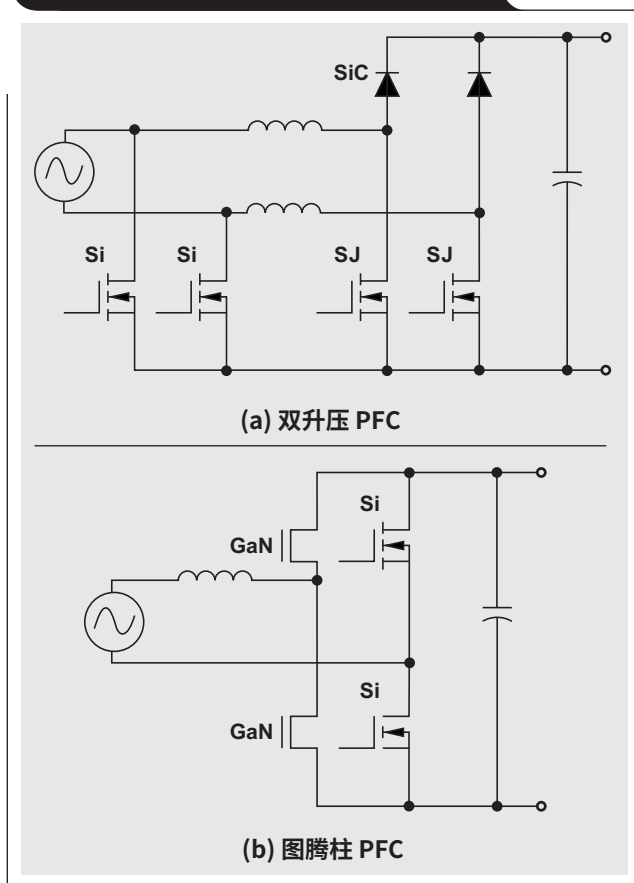
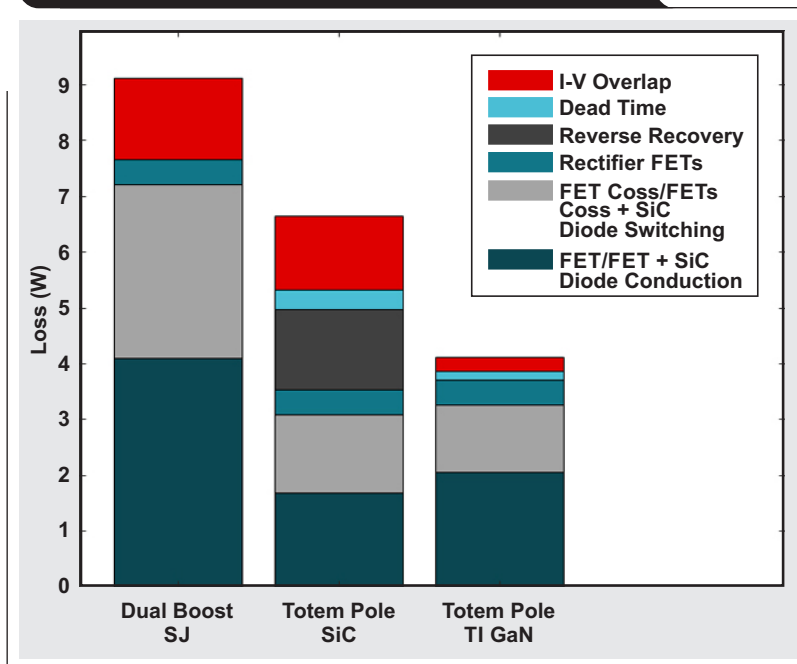


图 3. 超结 (SJ)、SiC 和 GaN 间的 1kW PFC 损耗分类比较



三相电网转换器

与单相 PFC 应用相比,连接到三相电网的电源通常在更高的交流和直流总线电压等级下运行。交流输入通常为 480V 线电压,并且根据具体应用,直流总线电压可达 900V 或更高。尽管不能选择两级转换器 600V GaN FET,但使用 TI GaN 的多层拓扑确实是一个可行的替代方案。多级电路通过堆叠和控制较低电压器件的各种配置来支持电压更高的三相电网应用。

与使用 1,200V SiC 或 IGBT 的两级转换器相比,GaN(如图 4 所示)在多级转换器应用中具有的一些优势,包括:

- **出色的开关品质因数 (FOM)**。如前所述,GaN 在反向恢复、开关能量和速度以及死区时间损耗方面比 SiC 更具优势。将 600V GaN FET 与 1,200V SiC 或 IGBT 进行比较时,这些优势更加突出。
- **较低的系统成本**。这包括通过使用表面贴装器件降低制造成本,以及显著降低电磁干扰元件数量、磁滤波器尺寸和冷却要求。
- **更好的热分布**。这对于使用对流冷却的应用尤其重要,并支持设计人员对大量功率器件进行散热。
- **更高的系统密度**。由于这些转换器的开关频率更高,所以可显著减小整个系统内无源器件和散热器的尺寸。

表 1 汇总了 GaN 在多级电网转换器中所具备的优势。

表 1. 比较多级转换器中的 IGBT、SiC 和 TI GaN 器件

典型运行条件	IGBT	SiC	TI GaN
频率 (kHz)	20	100	140
开放式框架功率密度 (W/in ³)	73	170	211
效率 (%)	98.3	98.9	99.2

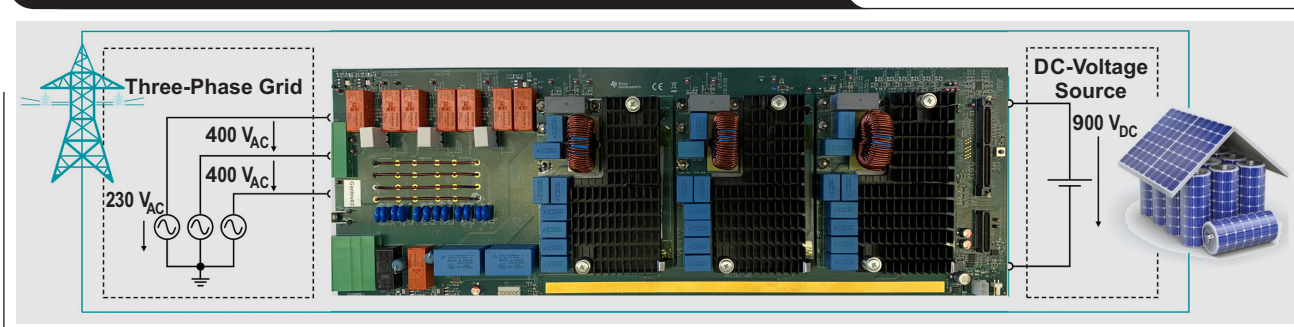
GaN 和 SiC 成本比较

如前所述,GaN 通过消除有源和无源器件,使用更小、更轻的磁性元件,并降低系统的冷却需求,可实现显著的系统级成本节约。但是,实现的节省远不止这些。GaN 有望进一步降低器件成本。

无论采用何种器件技术,任何半导体集成电路或场效应晶体管 (FET) 的成本都涉及几个不同参数,其中包括:

- **基板成本**。给定技术的基础材料或晶圆。
- **晶圆制造**。在晶圆上构建半导体器件的多步流程。
- **折旧**。每个器件分摊的资金成本。
- **每片晶圆产出的芯片数**。单片晶圆上的器件裸片数。
- **封装**。将裸片组装到最终封装所需的材料和成本。
- **测试**。确保最终器件满足数据表规格所需的成本。
- **良率**。制造过程中的总体器件良率。

图 4. 使用 TI GaN 的 900V、5kW 双向交流/直流转换器



为减少论述篇幅，将忽略上表中的封装、测试和良率项，因为从长期来看，它们对大多数功率半导体器件的影响是相似的。目前，折旧也不予赘述，那就只从基板、制造和每片晶圆产出芯片数的相关成本来确定 GaN 和 SiC 对成本的不同影响，并用公式 1 来表示：

$$\text{Device cost} = \frac{\text{substrate} + \text{fabrication}}{\text{chips per wafer}} \quad (1)$$

每片晶圆产出的芯片数是晶圆尺寸、器件 $R_{DS(on)}$ 和给定技术的热阻率等各种因素的函数。SiC 通常具有比 GaN 和硅片更好的热阻率，因此，每片晶圆能产出更多的芯片。但这只是总成本计算的一部分。

GaN 和 SiC 之间的主要差异在于基板成本。GaN 器件基于标准和现成的硅基板而构建，其制造方式与每年制造数十亿半导体集成电路的方式类似。此外，在硅基板上，制造商可以利用现有的制造工艺和工具，包括采用 300mm 晶圆。

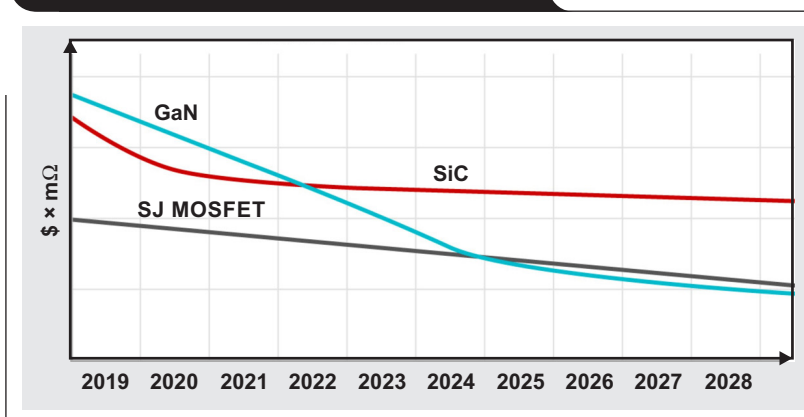
SiC 不仅具有相当高的原材料成本，而且需要专用的制造工艺。SiC 制造工艺的一项关键要求是需要超过 2500°C 的温度，这会给制造商带来高昂的能源成本。表 2 估计了高压功率器件的归一化基板和制造成本。

表 2. 功率器件的归一化器件成本

技术	归一化基板和制造	每片晶圆产出的归一化芯片数	归一化器件成本
超结 (SJ) MOSFET	1.0	1.0	1.0
GaN	3.0	2.4	1.3
SiC	10.3	4.3	2.4

为简化成本分析，我们不讨论折旧。但是，在预测成本趋势和比较 SJ MOSFET、SiC 和 GaN 时，折旧是一项关键因素。这些器件在不同的成熟阶段，有不同的折旧模型。事实上，使用 GaN 可在未来节省超高的成本。市场广泛采用可提高制造利用率和加快资本折旧，因而可随着时间的推移降低总成本。图 5 比较了三种技术的预计成本趋势。

图 5. 使用 FET 技术的相对成本预测



结束语

MOSFET 晶体管的发明彻底改变了电力电子领域，并使工程师能够做以前不可能做的事情。几年后，宽带隙 GaN 和 SiC 器件的商业化再次将不可能变成现实。

SiC 和 GaN 可满足不同的电压、功率和应用需求，但它们也都适用于某些终端设备。SiC 器件可提供高达 1,200V 的电压等级，并具备高载流能力，因此非常适合汽车和机车牵引逆变器、高功率太阳能发电场和大型三相电网转换器等应用。而 GaN 具有出色的开关品质因数、固有的制造和成本优势以及更高的开关频率，已成为许多设计人员在 10kW 以下应用中的优选器件。无论是 USB Type-C® 适配器、千瓦级电信整流器、集成机器人电机驱动器，还是电动汽车车载充电器等产品，设计人员都能通过工具让其成为更环保、更轻巧和更具成本效益的产品设计的理想之选。

相关网站

产品信息：
氮化镓 (GaN) FET 系列

TI 全球技术支持

TI 支持

感谢您的订购。要查找有关您支持需求的答复或联系我们的支持中心, 请访问

www.ti.com.cn/support

中国: <http://www.ti.com.cn/guidedsupport/cn/docs/supporthome.tsp>

日本: <http://www.tij.co.jp/guidedsupport/jp/docs/supporthome.tsp>

技术支持论坛

在 TI 的 E2E™ 社区 (工程师对工程师) 中搜索数百万个技术问题和答案, 请访问

e2e.ti.com

中国: <http://www.deyisupport.com/>

日本: <http://e2e.ti.com/group/jp/>

TI 培训

从技术基础到高级实施, 我们提供点播和直播培训以帮助您实现下一代设计。即刻体验, 请访问

training.ti.com

中国: <http://www.ti.com.cn/general/cn/docs/gencontent.tsp?contentId=71968>

日本: <https://training.ti.com/jp>

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。TI 建议用户在下订单前查阅全面的全新产品与服务信息。TI 对应用帮助、客户应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不承担任何责任。有关任何其他公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的批准、担保或认可。

A011617

E2E 是德州仪器 (TI) 的商标。80 PLUS 是 Clearesult Consulting, Inc 的注册服务标志。USB Type-C 是 USB Implementers Forum, Inc 的注册商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产。

© 德州仪器 (TI) 公司 2020 年版权所有。
保留所有权利。



ZHCT333

重要声明和免责声明

TI“按原样”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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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](#) 或 [ti.com](#) 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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2021，德州仪器 (TI) 公司