

氮化镓(GaN)和碳化硅(SiC)晶体管之间的差异

作者：安森美

几十年来，硅一直主导着晶体管世界。但这种情况已在逐渐改变。由两种或三种材料组成的化合物半导体已被开发出来，提供独特的优势和卓越的特性。例如，有了化合物半导体，我们开发出了发光二极管（LED）。一种类型是由砷化镓（GaAs）和磷砷化镓（GaAsP）组成。其他的则使用镓和磷。

问题是，化合物半导体更难制造，也更贵。然而，与硅相比，它们具有显著的优势。新的更高要求的应用，如汽车电气系统和电动汽车（EVs），正发现化合物半导体能更好地满足其严格的规格要求。

氮化镓（GaN）和碳化硅（SiC）功率晶体管这两种化合物半导体器件已作为方案出现。这些器件与长使用寿命的硅功率横向扩散金属氧化物半导体（LDMOS）MOSFET和超级结MOSFET竞争。GaN和SiC器件在某些方面是相似的，但也有很大的差异。本文对两者进行了比较，并提供了一些实例，以助您为下一个设计做决定。

宽禁带半导体

化合物半导体被称为宽禁带（WBG）器件。若不评介晶格结构、能级和其他令人头疼的半导体物理学，我们只说WBG的定义是一个试图描述电流（电子）如何在化合物半导体中流动的模型。

WBG化合物半导体具有较高的电子迁移率和较高的带隙能量，转化为优于硅的特性。由WBG化合物半导体制成的晶体管具有更高的击穿电压和对高温的耐受性。这些器件在高压和高功率应用中比硅更有优势。

与硅相比，WBG晶体管的开关速度也更快，可在更高的频率下工作。更低的“导通”电阻意味着它们耗散的功率更小，从而提升能效。这种独特的特性组合使这些器件对汽车应用中一些最严苛要求的电路具有吸引力，特别是混合动力和电动车。

GaN和SiC晶体管正变得唾手可得，以应对汽车电气设备的挑战。GaN和SiC器件的主要卖点是这些优势：

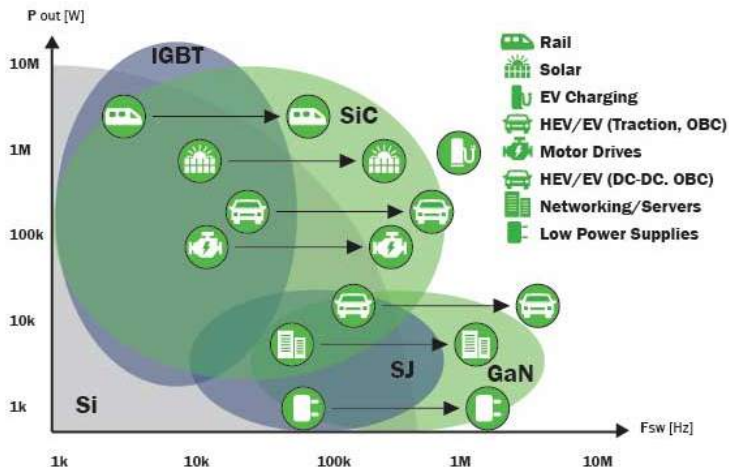


图1. 显示了流行的高压、大电流晶体管和其他器件的功率能力与开关频率的关系，以及主要的应用。

- 高电压能力，有650 V、900 V和1200 V的器件。
- 更快的开关速度。
- 更高的工作温度；以及
- 更低导通电阻，功率耗散最小，能效更高。

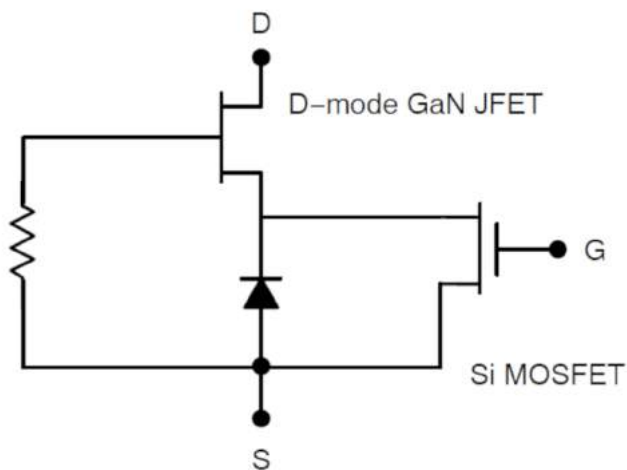


图2. 双裸片双场效应管(FET)级联电路将GaN晶体管转换为常关断器件，实现了大功率开关电路中的标准增强型工作模式

GaN晶体管

在射频(RF)功率领域，GaN晶体管被发现有早期的商机。该材料的本质使耗尽型场效应晶体管(FET)得以发展。耗尽型(或D型)FET被称为假态高电子迁移率晶体管(pHEMT)，是天然“导通”的器件；由于没有门极控制输入，存在一个自然的导通通道。门极输入信号控制通道的导通，并导通和关断该器件。

由于在开关应用中，通常“关断”的增强型(或E型)器件是首选，这导致了E型GaN器件的发展。首先是两个FET器件的级联(图2)。现在，标准的e型GaN器件已问世。它们可以在高达10兆赫频率下进行开关，功率达几十千瓦。

GaN器件被广泛用于无线设备中，作为频率高达100 GHz的功率放大器。一些主要的用例是蜂窝基站功率放大器、军用雷达、卫星发射器和通用射频放大。然而，由于高压(高达1,000V)、高温和快速开关，它们也被纳入各种开关电源应用，如DC-DC转换器、逆变器和电池充电器。

SiC晶体管

SiC晶体管是天然的E型MOSFET。这些器件可在高达1 MHz的频率下进行开关，其电压和电流水平远高于硅MOSFET。最大漏源电压高达约1,800V，电流能力为100安培。此外，SiC器件的导通电阻比硅MOSFET低得多，因而在所有开关电源应用(SMPS设计)中的能效更高。一个关键的缺点是它们需要比其他MOSFET更高的门极驱动电压，但随着设计的改进，这不再是缺点。

SiC器件需要18至20伏的门极电压驱动，导通具有低导通电阻的器件。标准的Si MOSFET只需要不到10伏的门极就能完全导通。此外，SiC器件需要一个-3至-5 V的门极驱动来切换到关断状态。不过，专用门极驱动IC已被开发出来满足这一需要。SiC MOSFET通常比其他替代品更贵，但其高压、高电流的能力使它们很适合用于汽车电源电路。

WBG晶体管的竞争

GaN和SiC器件都与其他成熟的半导体竞争，特别是硅LDMOS MOSFET、超级结MOSFET和IGBT。在许多应用中，这些老的器件正逐渐被GaN和SiC晶体管所取代。

例如，在许多应用中，IGBT正在被SiC器件取代。SiC器件可在更高的频率下开关（100 千赫+与20 千赫），从而允许减少任何电感或变压器的尺寸和成本，同时提高能效。此外，SiC可以比GaN处理更大的电流。

总结GaN与SiC的比较，以下是重点：

- GaN的开关速度比Si快。
- SiC工作电压比GaN更高。
- SiC需要高的门极驱动电压；以及
- 超级结MOSFET正逐渐被GaN和SiC取代。SiC似乎是车载充电器（OBC）的最爱。随着工程师们发现较新的器件并获得使用经验，这种趋势无疑将持续下去。

汽车应用

许多功率电路和器件可用GaN和SiC进行设计而得到改善。最大的受益者之一是汽车电气系统。现代混合动力车和纯电动车含有可使用这些器件的设备。其中一些流行的应用是OBC、DC-DC转换器、电机驱动器和激光雷达(LIDAR)。图3指出了电动车中需要高功率开关晶体管的主要子系统。

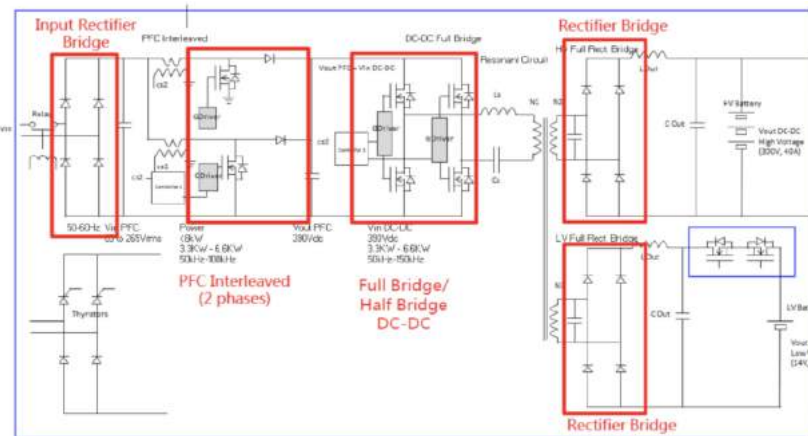


图3. 用于混合动力车和电动车的WBG车载充电器（OBC）。交流输入经过整流、功率因数校正（PFC），然后进行DC-DC转换（一个输出用于给高压电池充电，另一个用于给低压电池充电）。

DC-DC 转换器。这是个电源电路，将高的电池电压转换为较低的电压，以运行其他电气设备。现在电池的电压范围高达600或900伏。DC-DC转换器将其降至48伏或12伏，或同时降至48伏和12伏，用于其他电子元件的运行（图3）。在混合动力电动车和电动车（HEVEVs）中，DC-DC也可用于电池组和逆变器之间的高压总线。

车载充电器（OBCs）。插电式HEVEV和EVs包含一个内部电池充电器，可以连接到交流电源上。这样就可以在家里充电，而不需要外部的AC-DC充电器（图4）。

主驱电机驱动器。主驱电机是高输出的交流电机，驱动车辆的车轮。驱动器是个逆变器，将电池电压转换为三相交流电，使电机运转。

LIDAR。LIDAR指的是一种结合了光和雷达方法来探测和识别周围物体的技术。它用脉冲红外激光扫描360度的区域，并检测反射光。这些信息被转化为大约300米范围内的详细三维图像，分辨率为几厘米。它的高分辨率使其成为车辆的理想传感器，特别是自动驾驶，以提高对附近物体的识别能力。LiDAR装置在12-24伏的直流电压范围内工作，该电压来自于一个DC-DC转换器。

由于GaN和SiC晶体管具有高电压、大电流和快速开关的特点，为汽车电气设计人员提供了灵活和更简单的设计以及卓越的性能。

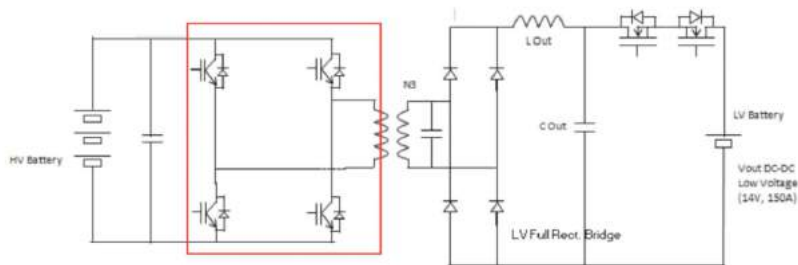


图4. 一个典型的DC-DC转换器用于将高电池电压转换为12和/或48伏。高压电桥中使用的IGBT正逐渐被SiC MOSFET所取代。