

# 功率GaN技术： 高效功率转换的需求

Dilder Chowdhury博士

降低功率损耗是行业面临的一大挑战。随着社会压力的不断增大和越来越多的政府立法要求减少二氧化碳的排放，促使许多行业不断加大投资，以提高电源转换效率和电气化水平。尤其是功率电子设备使用显著增长的行业，如汽车电气化、电信基础设施、服务器存储和工业自动化。这一趋势继而又推高了市场对基于GaN技术的高效率、创新、大功率FET的需求。

在半导体行业，追求功率器件创新的最大动力是提高功率转换效率。与硅(Si)和碳化硅(SiC)解决方案相比，氮化镓(GaN)技术展现了更好的性能优势。具体而言，GaN场效应晶体管(FET)可以较低的系统成本提供最好的效率，同时使系统更轻、更小、温度更低。

自从功率GaN晶体管，特别是硅基氮化镓(GaN-on-Si)器件投放市场之后，产品的性能、可靠性、成本和实用性都得到了显著改善。性能更好的GaN功率晶体管可适用于更高的功率。它们不但符合电动汽车(EV)的车规要求，也非常适合数据中心、电信基础设施等工业应用。

## 汽车电气化引领对效率提升的追求

汽车领域的电气化可能是新型功率GaN技术的最大受益者。对所有的电动汽车(xEV)，高效的功率转换是关键所在，因为任何损耗都会影响电动汽车最重要的性能之一，行驶里程。功率损耗还意味着需要通过散热系统来排出产生的热量，进而导致车辆系统复杂性和车身重量随之增加。

汽车行业正在努力解决电池重量和功率密度等众多问题，同时也迫切需要在以下方面取得显著改进：

- › 改进的高效率功率转换
  - › AC/DC车载充电器
  - › DC/DC电源转换
  - › 驱动电机的DC/AC牵引逆变器
  - › 提高功率密度
  - › 更简单的驱动和控制方案
- › 改进牵引电机
  - › 提高效率
  - › 优化扭矩和功率
  - › 降低损耗
  - › 更高的dv/dt承受能力
- › 改进电池、存储和电池管理系统

提高功率转换效率将在许多方面带来显著益处。例如，将200 kW逆变器的效率从95%提高到99%，就可以将满负载下的功率损耗从10 kW降低到2 kW，仅为之前的五分之一。这样一来，不但损耗可以减少8 kW（由此提高牵引功率），而且降低的冷却需求还可以减少用于冷却的能量消耗以及冷却系统的尺寸和重量。这就能实现更长的行驶里程，或是使用更小的电池达到相同的里程。

这个例子证明了实现超高效率的重要性。硅基氮化镓功率场效应晶体管可以为这一领域提供巨大帮助，它不仅能提供更高效率，而且产能可以灵活扩张以支持xEV的快速发展。简单的硅制造加工（晶圆厂）工艺步骤还为商业化可行性提供了最佳的成本路线图。当前的功率GaN技术可使用650 V器件支持400 V电池系统，以及1200 V功率GaN器件支持800 V的电池系统。两者的功率范围均可达到300 kW。

### 高压硅晶体管已接近能力极限

高压(HV)功率半导体开关是任何功率转换的基本元素。由于没有更好的替代方案，尽管技术过于成熟，硅基绝缘栅双极晶体管(IGBT)目前仍在牵引逆变器市场中占据主导地位。通过Si IGBT的改良以及与SiC二极管的组合应用，效率得到提高，但已经趋近能力极限。而且Si IGBT在根本上存在工作频率和开关速度的限制，并且高温性能和低电流特性较差。

在更高的频率下，Si超结(SJ)技术主导着AC/DC功率因数校正(PFC)和DC/DC功率转换的市场。但是固有的材料限制（包括开关损耗、导通损耗和反向恢复损耗）限制了在高频工作中实现更高效率的能力。

### 功率GaN逐步成为替代方案

相比之下，诸如GaN和SiC的宽带隙(WBG)材料没有反向恢复损耗，开关损耗非常低（因为具备高速开关的特性）和更低的导通损耗。同时具有更高临界电场和更高迁移率的WBG材料能够在更高的电压下提供最低的导通电阻 $RDS_{(on)}$ ，具备明显更好的开关品质因数。WBG器件开始进入市场，前景十分广阔，并能摆脱Si IGBT和Si SJ器件许多固有的局限性。

一些由于二极管反向恢复的问题而难以使用Si SJ FET的开关应用拓扑，现在可以使用功率GaN FET，通过更简单的控制方案就能充分发挥器件数量少和高效率的优势。GaN功率晶体管支持更快的开关速度和更高的工作频率，有助于改善信号控制，为无源滤波器设计提供更高的截止频率，降低纹波电流，从而帮助缩小电感、电容和变压器的体积。继而构建体积更小的紧凑型系统解决方案，最终实现成本节约。

图1是GaN高电子迁移率晶体管(HEMT)的剖面图，在GaN和氮化镓(AlGaN)层的界面处存在自发极化和压电极化，形成二维电子气(2DEG)。Epi通过种晶层在硅衬底上形成。先生长GaN和AlGaN的渐变层，然后生长纯GaN层。最后一层很薄的AlGaN形成2DEG。2DEG的电子迁移率非常高，因此得名。

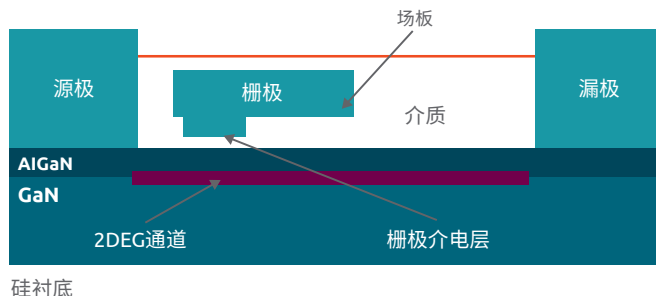


图1 GaN HEMT结构

### 共源共栅的简单性和稳健性

当前的功率GaN FET有两个主流方向：增强型（E-mode，单芯片常关器件）和耗尽型（D-mode，双芯片常关器件）。目前E-mode栅极有稳定性和漏电流的问题，而驱动双芯片常关（或者说共源共栅配置）的D-mode器件非常简单并稳健。所以，对于可高达1 MHz开关频率的操作，共源共栅GaN FET最为适合。

硅基GaN的双芯片常关配置大大简化设计。Nexperia GaN FET提供±20 V的栅极耐压额定值、4 V栅极阈值电压（真正0 V关断功能）和低栅极电荷。因此，使用简单的0–8、10或12 V的硅驱动器即可。相比之下，SiC技术通常需要15 V以上的驱动电压，大驱动电流以及具有栅极负压驱动能力的驱动器才能可靠的关闭器件，因此会增加成本以及驱动和开关损耗。Nexperia GaN器件还内置出色的反向并联二极管，可实现可靠的反向续流导通。共源共栅版本为栅极驱动设计提供了很大的自由度，并可满足汽车客户对稳健性的需求。

图2显示了可靠的低压(30 V) 硅MOSFET与D-mode GaN FET的共源共栅配置,消除E-mode器件脆弱的栅极结构引起的担忧并大幅简化使用方法。低压硅基的栅极结构是非常成熟的技术,而且工程师都已熟练使用。

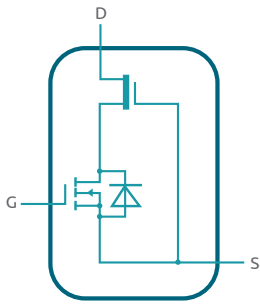


图2 共源共栅电路图

低压硅MOSFET的反向恢复电荷( $Q_{rr}$ )非常低(见图3),不会影响功率GaN技术发挥全部潜力。此外,驱动共源共栅器件也非常简单。图4显示了不同偏置情况的共源共栅器件的操作。功率GaN FET可以双向导通,以实现更简单的双向功率转换。

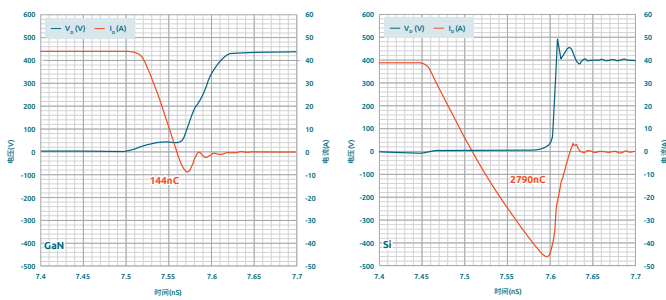


图3  $Q_{rr}$ , GaN FET与Si FET的反向恢复电荷对比

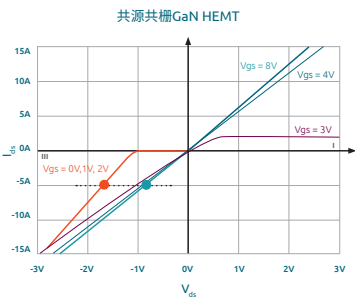
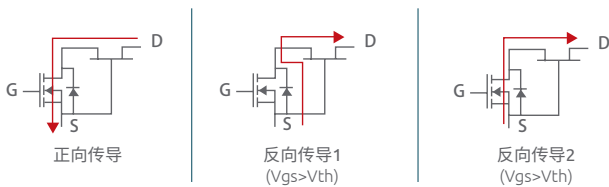


图4 GaN FET操作

## 应用与性能

无论是AC/DC PFC、DC/DC转换器(图5)还是牵引逆变器(图6),大多数拓扑的基本结构都是半桥(图7)。那么在一个简单的升压转换器中,将GaN FET与Si FET进行比较,GaN FET表现出了卓越的性能。

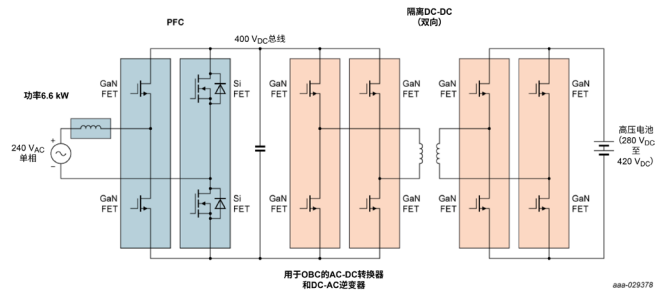


图5 AC-DC PFC级和隔离式DC-DC配置

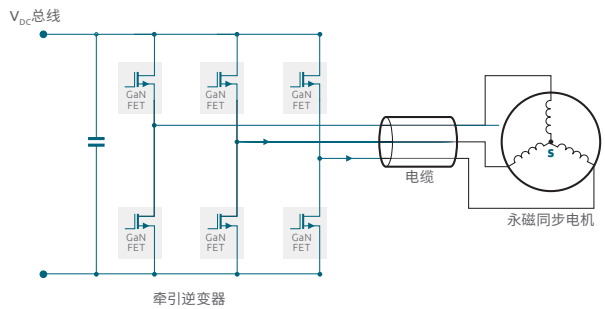


图6 牵引逆变器

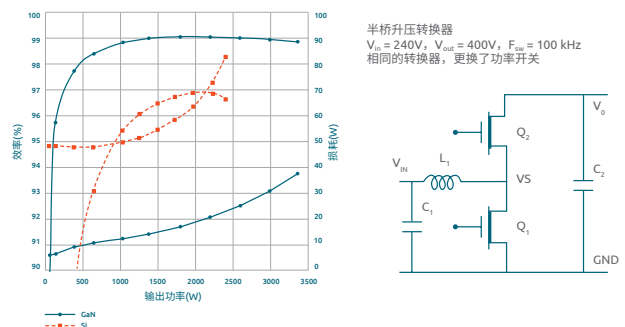


图7 半桥升压转换器(GaN器件对比Si CoolMOS)

由于没有反向恢复损耗和很小的开关交越损耗,GaN FET损耗显著降低。如果 $dV/dt$ 能够接近 $200V/ns$ ,将实现近乎理想的导通和关断损耗。GaN开关非常迅速,经常在千兆赫兹频率的射频放大器中使用。虽然在这么高频率下,GaN会工作在较低电压,但确实展现了它的高频开关能力,而高低压器件使用的是相同的GaN HEMT结构。

由于GaN器件开关非常快并且可以用于高 $dV/dt$ 和高 $dI/dt$ 的应用,因此必须注意PCB布板优化。为了尽可能降低寄生电感,布板优化对于使用功率GaN至关重要。

为了最大限度提高表面贴封装的性能和低寄生电感、大电流，高性能模块必不可少。

目前，由于电机绕组的限制，在牵引逆变器中使用GaN器件需要大幅降低其开关速度。dV/dt被限制在10 V/ns左右，然而GaN器件仍具有优化电机的巨大潜力，采用40 kHz的频率可以显著提高其功率密度。

### 质量和可靠性

功率GaN FET技术目前显示出良好的质量和可靠性，因为多家供应商已经达到JEDEC（电子工程设计发展联合会）和AEC（国际汽车电子协会）Q101的质量标准。这些是证明功率GaN技术可靠性必须满足的最低标准。

但是，对于GaN器件，现有的质量标准还不够，因为材料是新的，器件工作原理也截然不同。例如，众所周知的功率GaN FET的动态RDS<sub>(on)</sub>（即电流崩塌现象）。与动态Rds(on)有关材料品质、电荷陷阱和相应的去陷阱都可以衡量，并随着测量结果越来越好（现在动态RDS(on)漂移约为10%），市场对于使用GaN FET的信心逐渐增强。

超出AEC Q101标准的要求，为了验证GaN FETs在实际工作条件下的可靠性，我们准备了几块工作在连续电流模式的半桥电路板，上下管都分别使用一颗GAN063-650WSA。这些器件配置成同步升压转换器(BOOST)，工作条件如下，连续运行1,000小时：Vin = 200 V，Vout = 480 V，Pout = 800 W，Tj = 175°C，频率 = 300 KHz。在1,000小时的测试过程中，所有电路板和器件都没有出现任何性能下降的迹象。在这个高温开关测试之后，还测试了所有器件的动态Rds(on)的偏移、漏电流和栅极阈值电压。所有参数都是稳定的，参数偏移量都在允许范围内。

我们的器件具有800 V的瞬态耐压能力，此规格通过实测保证，可消除对于电压尖峰的顾虑。同样还有其他一些过应力测试，例如电压和温度；我们针对破坏性测试和应用情况下估算随着时间的失效率(FIT)，定义了不同的加速因子。随着产品出货量的增加，实际的现场故障率将被确定。

### 已做好上市准备

功率GaN技术已准备好进入高效率功率转换市场。我们看到它已经开始在非汽车领域中被采用，并且很快将凭借更低损耗和更高功率密度的优势，应用在汽车领域。尽管Si技术在市场上已经占据主导地位，但它已经发展至极限。随着优势日益显著以及用量不断增长，功率GaN技术将成为高效率功率转换的新标准。

了解更多详情，请访问[www.nexperia.com/gan-fets](http://www.nexperia.com/gan-fets)

© 2020 Nexperia B.V.

保留所有权利。未经版权所有者优先书面同意，禁止复制本文全部或部分内容。本文档中所提供的信息不构成任何报价或合同的一部分，且被认为是准确可靠的，如有变更，恕不另行通知。对于使用本文档所产生的任何后果，出版方概不承担任何责任。出版内容既不传达也不暗示专利或者其他工业或知识产权下的任何许可。

[nexperia.com](http://nexperia.com)

发布日期:

2020年6月

