

# 基于GaN重要特性在设计最佳的功率级及无人机驱动器等领域中的应用

## Application of GaN in the design of optimal power level and UAV driver based on its important characteristics

叶云燕

**摘要:** 本文从氮化镓(GaN)为什么重要特性理念述起,对其设计eGaN FET 具有最佳布局的功率级与逆变器及无人机收缩电机驱动器等多领域的应用作分析研讨,与此同时将对拓展GaN前景应用作简述。

**关键词:** 功率级, 硅基氮化镓, 寄生电感, 双向功率模块, 驱动器

**Abstract:** Starting from the concept of why gallium nitride is important, this paper analyzes and discusses the application of gallium nitride in the design of eGaN FET with optimal layout of power stage and inverter, UAV shrink motor driver and other fields. At the same time, the prospect of GaN is also discussed.

**Keywords:** power level, GaN-on-Si, parasitic inductor, bidirectional power module, driver

### 引言

基于氮化镓(GaN)的系统能够提供更高的效率、显著地减少尺寸和重量以及改善热性能,这在传统硅市场上创造了一个位移循环,并使激光雷达和射频包络跟踪等新领域获得广泛应用。据此本文将从氮化镓为什么重要特性理念述起,对其设计 eGaN FET 具有最佳布局的功率级与驱动逆变器及无人机收缩电机驱动器等多领域的应用作分析研讨。

### 1 氮化镓(GaN)重要应用特征

\* 什么是 GaN、氮化镓为什么重要? 氮化镓可以导电电子效率更高,能承受比硅更高的电场。它在速度、温度、功率处理等方面超过了硅的性能,在各种功率转换和射频应用中正在取代硅基器件。1978年,硅功率 MOSFET 被作为一种速度更快的替代品推出,以取代速度更慢和老化的双极器件。早期采用功率 MOSFET 的应用,双极只是不够快。其采用的典型例子是台式计算机的开关电源,从那时起, MOSFET 就成为半导体行业的首选功率转换器件。

这一转变的动态告诉我们,有四个关键因素控制着一种新的功率转换技术的采用率:即,它是否启用了“重要的新应用? 好用吗? 这对用户来说是不是很划算? 可靠吗?”等四个因素。

现在, GaN 作为老化功率管 MOSFET 的替代品,但为了让它把他作为半导体技术的选择,它必须满足四个要求,所有的新技术必须满足这一要求。那么,具体看看这四个关键属性,可知 GaN 具有那些重要特性?

其一、它是否启用了重要的新应用? GaN 基功率晶体管和集成电路的成功来源于 GaN 与硅相比的速度优势。硅基氮化镓(GaN-on-Si)晶体管的开关速度比 MOSFET 快 10 倍,比 IGBT 快 100 倍。还包括应用程序射频包络跟踪,即可适用于 4G/LTE 基站和光探测及激光测距雷达(能用于自动驾驶汽车、机器人、无人机和安全系统的系统等 GaN 高速切换能力的应用)。GaN 晶体管不仅比 Si MOSFET 和 IGBT 快,而且比 Si MOSFET 小得多——大约小 5 到 10 倍。这就打开了机器人和医疗电子学以及卫星和无人机等领域的许多应用程序。

GaN 的快速开关速度,与亚纳秒的跃迁和产生高电流脉冲的能力,在不到 3 纳秒,允许更长的范围和更高的分辨率在激光雷达的自动驾驶、停车和防撞。

其二、好用吗? GaN 晶体管(特别是 eGaN 场效应管)的行为与老化的功率 MOSFET 非常相似,因此,电力系统工程师可以使用设计经验,如 GaN 晶体管实现高效功率转换。

其三、这是不是很划算? 如今生产的 GaN 晶体管和

集成电路使用类似于硅功率 MOSFET 的工艺, 具有更少的处理步骤, 并且由于 GaN 器件比相应的硅器件小得多, 因此每次制造运行可生产更多的器件。此外, 更低的电压 (500V) GaN 晶体管不需要昂贵的封装与保护。这种封装优势本身就可以减少一半的制造成本, 并结合高制造产量和小的设备尺寸, 已导致从如 GaN 晶体管的成本比硅功率 MOSFET 的成本更低。

其四、关于的可靠性问题 迄今为止, 多家 GaN 晶体管制造商报告了内部压力测试的出色结果。均建立了严格的可靠性计划, 其中包括测试零件的故障点, 以了解数据表限值之间的余量, 更重要的是了解内在故障机制。通过了解固有的失效机制、失效的根本原因以及设备在时间、温度、电气或机械应力下的行为, 可以在一般的操作条件下确定产品的安全工作寿命。图 1 是不同型号 GaN 晶体管产品内部压力测试的安全工作寿命 (GaN 晶体管的短路时间与结温升关系) 典例示意图。通过这不同阶段可靠性报告的数据可知其运行时间是硅电源无法比拟的。

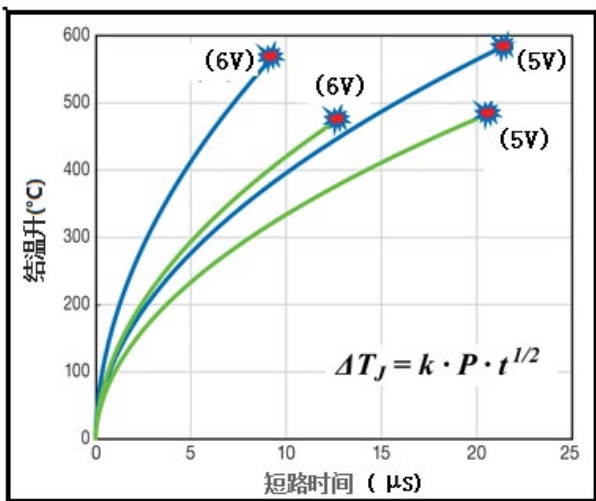


图 1 是不同型号 GaN 晶体管产品内部压力测试的安全工作寿命示意图

\* 重要结论 GaN 取代硅 MOSFET 的四个必要属性已经实现。但这仅仅是 GaN 的开始。即使是市场上最新的器件, 如果能在 GaN 的理论极限下制造, 其体积也要大 300 倍左右。GaN 影响功率转换系统性能的最重要的机会来自于在同一衬底上集成功率级和信号级器件的内在能力。其目标是在单个硅基氮化镓芯片上实现完整的系统,

用户提供逻辑电平输入, 然后输出高性能电源转换。体积小, 速度更快, 成本更低, 而且集成度更高。由此可得出为什么是 GaN 重要结论。

## 2 关于 eGaN FET (氮化镓场效应晶体管) 具有最佳布局的功率级设计方案

\* 起因 eGaN FET 的开关速度比 Si mosfet 快得多, 需要更仔细地考虑 PCB 布局设计来从而使寄生电感的最小化。因寄生电感会导致更高的超调电压和较慢的开关转换。故 eGaN FET 应避免这些不必要的影, 并最大限度地转换器的性能。由此应须知设计最佳功率级布局的关键步骤。

\* 先分析寄生电感对开关性能的影响

如图 2 所示, 三种寄生电感可以限制开关性能: 其一是功率回路电感 (Loop), 其二是栅极回路电感 Lg1 与 Lg2, 其三是共源电感 (Ls1 与 Ls2)。芯片级封装 eGaN FET 可消除了晶体管内的任何显著电感, 而印刷电路板 (PCB) 是主要的贡献者。每个寄生电感都是总面积的结果, 由动态电流路 (Gate Loop) 径及其返回循环所包含。

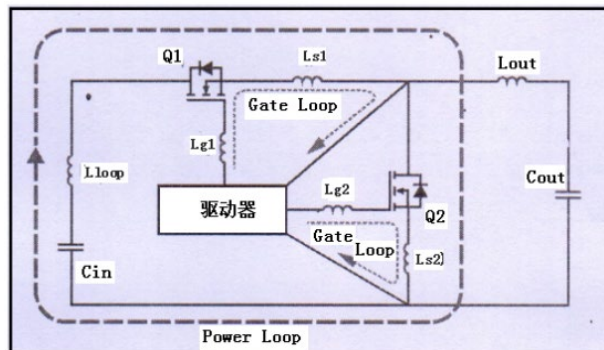


图 2 为 eGaN FET 功率级的等效电路电感和动态电流回路突出显示

\* 基于 eGaN FET 的功率级的优化布局

GaN FET 能够比 Si MOSFET 更快地切换, 需要更仔细地考虑 PCB 布局设计以最小化电感。寄生电感导致较高的过冲电压和较慢的开关转换。

通过利用内部 PCB 层形成优化的返回路径, 可以实现最小的功率回路和栅极回路电感。去耦电容器靠近高压侧晶体管的漏极, 而 PCB 通孔用于连接地端子。其中电介质厚度可保持电感低。这种最佳布局技术的示例如图 3 所示。栅极驱动必须位于离栅极和信号源非常近的地方以驱

动的每个晶体管,而旁路电容器和栅极电阻的位置应使栅极电流方向与功率回路正交。这很关键,将使栅极返回电流路径从电源回路中分离出来到源端,从而减小共源电感。

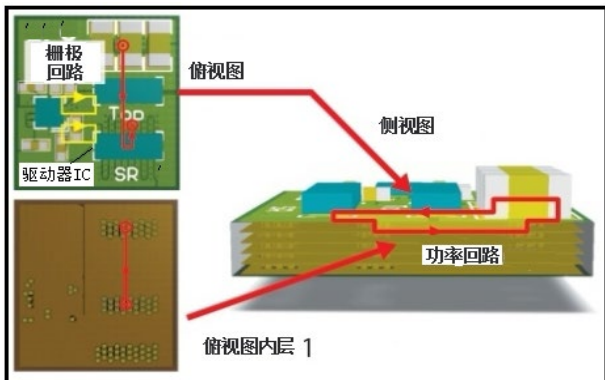


图3 基于eGaN FET的功率级的优化布局,突出显示动态电流循环路径

\* 优化布局如何有利于变换器性能

具有eGaN FET的系统优于基于Si的设计,该优化布局技术进一步增强了这些优势。图4展示了在500kHz下工作的48V至12V降压转换器中的eGaN优势,将eGaN FET(如EPC2045 100V eGaN FET)与封装中的100V Si MOSFET(如S308型)进行了比较,但微型芯片规模(如EPC2045)比更大的Si消耗更低的回路电感。图4显示,由于较低的回路电感和GaN的快速切换能力,eGaN版本在保持与Si版本相同的峰值过冲电压的同时,实现了5倍的电压转换率。更快的切换优势对系统性能有着巨大的影响。

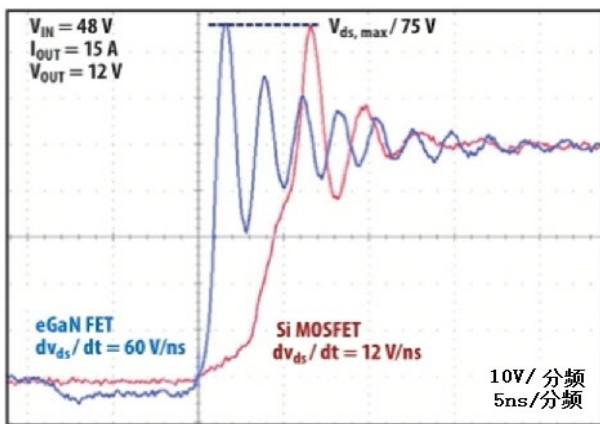


图4 为在最佳布局中,48-12V降压转换器(见上图左端)与eGaN FET(见图中左下端蓝字)的开关节点波形的比较(以100V Si MOSFET为例,见图中下端红字)。

\* 单片 eGaN 半桥集成电路

由于eGaN IC的单片集成提供了环路电感的进一步改进。故GaN单片功率级在1MHz(蓝线)在48和12V下运行时(10A)总功率损耗比硅MOSFET解决方案低50%。

\* 结论

随着eGaN FET更快的开关速度,需要改进的封装和布局技术,以最小化寄生电感并充分利用这些先进器件。芯片级eGaN FET将封装电感降低到接近零,同时实现超低电感PCB电源回路。优化PCB布局是实现基于eGaN FET设计的最大性能能力的关键步骤。

### 3 GaN FET 应用举例

#### 3.1 带 GaN FET 的双向功率模块应用

\* 典例应用:如何为48V轻度混合动力汽车设计一个2kW 48V / 12V带GaN FET的双向功率模块。

环境压力迫使人们迅速采用更新、更清洁、更高效的交通方式。到2025年,预计每10辆售出的汽车中就有1辆是更节能的48V轻度混合动力汽车。这些系统将需要48V / 12V双向变换器,功率从1.5kW到6kW不等。这些系统的设计重点是尺寸、成本和高可靠性。而GaN电源转换解决方案完美支持这些新型号中使用的48V至12V双向转换器。

应用GaN电源转换解决方案开发的新型设计模板,(如EPC9165型)可用于帮助快速启动2kW双向变换器的设计。它是一个同步降压/升压转换器与其他支持电路,包括电流传感器和温度传感器。新型设计模板与由dsPIC33CK256MP503数字控制器开发的控制器板一起提供数字控制和管家电源。

利用新型电力电子器件的优势,如开发模板中使用的高可靠性eGaN FET。该eGaN FET使我们实现比更传统的MOSFET设计具有4倍更好的性能。在相同的5V栅极电压下,GaN FET的栅极电荷至少比MOSFET低5倍。GaNFET的其他重要优势包括低输出电容、更快的电压转变、零反向恢复和更小的物理尺寸。

在满载情况下,eGaN FET在500kHz开关频率下可以96%的效率运行,与硅基解决方案相比,可实现1kW/相位,由于在100kHz最大开关频率下电感电流的

限制, 硅基解决方案限制为 600W/ 相位。此外, 该解决方案是可伸缩的; 两个变流器可并联 4kW, 三个变流器可并联 6kW, 或仅一相可并联 1kW。

### 3.2 为电动自行车和无人机收缩电机驱动器

实际上是如何使用评估板(如 EPC9173 型)设计 eBike(电动自行车)电机驱动逆变器的分析。值此以 EPC9173 型评估板为例作分析。

\*GaN 是电机驱动应用游戏规则的改变者。对于设计师来说, 要利用这项技术, 快速可靠的投放市场至关重要。这是因为可使用最先进的电子产品和技术易于设计出一个有价值的工具, 以加快投放市场。该类工具(如 EPC9173 型)允许电动自行车和无人机的设计人员增强电机系统的尺寸、性能、范围、精度和扭矩, 同时简化设计节约成本。那么它有哪些应用特征可以用于电动自行车和无人机收缩电机驱动器呢?

\*应用特征 EPC9173 集成了所有必要的电路来运行一个高性能的三相无刷直流电机, 以 48V 输入 1.5kW 输出, 三相逆变器使用六个 EPC23101 GaN 集成电路。是得益于 GaN IC 的高功率密度和高导电性, EPC9173 可提供高达 25A 的电流。RMS(有效值)在每支腿和支持 PWM 开关频率高达 250 千赫下的自然对流被动散热器。由此产生的电流输出波形质量与较小的转矩振荡和总的系统效率可增加电机驱动系统的性能。此外, 这种逆变器的极小尺寸允许集成到电机外壳中, 从而实现最低的 EMI 和最高的密度和最低的重量。

EPC9173 逆变器参考设计板包括支持电动自行车电机驱动的完整逆变器所需的所有电路, 包括: 三相变频器基六个 GaN 集成电路、直流母线电容器、稳压辅助电源, 带调节电路的电压、电流和温度传感器保护功能。

### 3.3 48 伏汽车电源

对于 2kW-4kW 48V-12V 转换器, GaN 器件允许硅 MOSFET 解决方案的五倍频率。此外, 与四分之一的电感, 电感器的大小和损耗减少, 允许每相和高达 40% 的电流更低的系统成本和一半的大小的阶段的一半。尽管尺寸较小, 效率提高达 98%, 比 MOSFET 的解决方案高出 2% 以上。

## 4 GaN 应用前景

GaN 作为一种技术仅仅处于起步阶段, 只是在过去几年才被商业化, 而硅器件已经存在了 70 多年。随着 GaN 技术的不断发展, 其最终用途越来越广泛, 性能也逐年提高, 未来前景看好。在电力转换领域, 硅正在耗尽气体, 氮化镓技术正在提供更快的开关速度, 更小的尺寸, 更高的效率, 现在, 更低的成本。由此可知 GaN 是一种改变我们的生活方式, 应用前景广泛的特新材料。为此例举以下领域。

\*数据中心服务器 云的发展迫使数据中心也相应增长, 而数据中心是能源的主要消耗者。用于减少能量损失的一种手段是消除从数据中心的输入到负载的最终点时的电力转换的整个阶段。通常, 电源转换分为两个阶段, 从背板上的 48V 到处理板上的分配的 12V, 并最终在电源投入使用为数字芯片供电的实际点约为 1V。凭借 GaN 的高开关速度、小尺寸和更高的效率, 电源设计人员现在能够在负载点直接从 48V 转换到所需的 1V 范围, 而无需中间的 12V 停止点。考虑到支持云基础设施所需的计算能力和数据中心的快速扩张, 这种单级架构的潜在节能效果是巨大的。

\*电机驱动 对电动汽车的需求日益增长, 需要高效紧凑的电机驱动器。GaN FET 和 ICS 使逆变器的设计能够提高电机效率, 同时减小尺寸、重量和成本; 这使得电机系统更小、更轻、噪音更低、扭矩更大、范围更广、精度更高。这些优势为电动自行车、电动自行车以及吸尘器和无人机等个人机器人提供了更小、更轻、更高效的电机系统。

\*无线电源 无线电源的出现是 GaN 启用的另一个可识别的应用。不再需要电线——我们可以剪断电线。无线充电的手机已经上市, 平板电脑、电脑, 甚至移动推车上的医疗器械也不甘落后。汽车中控台不仅将成为手机无线充电的来源, 而且很快将成为汽车整个信息娱乐和导航系统的充电来源。最终, 整个家庭可以配备发射器和中继器, 将无线供电的灯, 电视和其他家用电器。GaN 晶体管正在支持这一令人兴奋的、迅速崛起的应用……并改变着我们的生活方式。