

应对电源功率模组设计挑战及其氮化镓的EGaN FET和集成电路的选用

EGaN FET and integrated circuit selection of gallium nitride to meet the challenge of power module design

鲁思慧

摘要: 本文将应对电源功率模组完整设计挑战相关的的技术特征问题作研讨, 并由此拓宽出以EGaN FET提高效率降低总成本的各种类型DC-DC转换器设计方案为典例作分析说明。

关键词: 电源功率模组, 增强型氮化镓, DC-DC转换器, 电子设计自动化

Abstract: In this paper, the technical characteristics related to the challenge of complete design of power module are discussed, and then the design scheme of various types of DC-DC converters with EGaN FETs to improve efficiency and reduce total cost is extended as an example for analysis.

Keywords: power supply power module, enhanced gallium nitride, DC-DC converter, electronic design automation

前言

电动汽车、新能源、光伏、风电等领域广泛使用高功率开关电源功率模组。IGBT 和 MOSFET 是模组中常用器件。这些技术, 以及为实现高达 1700 伏特电压、1600 安培电流、温度稳定和低电磁辐射的复杂指标带来的设计挑战。这是因为新能源产品广泛使用高功率开关电路, 简称电源功率模组。电源功率模组通常不是单一器件的封装, 而是多片 IGBT, 或 MOSFET, 以及二极管的电路组合。对这种多器件的模组, 如果设计正确, 高电压、大电流、稳定的温度和低电磁辐射是可以实现的。其这四个维度的指标在模组本身密度较大的情况成为设计面临的挑战。如图 1 所示为电源功率模组四个维度的设计挑战示意图。

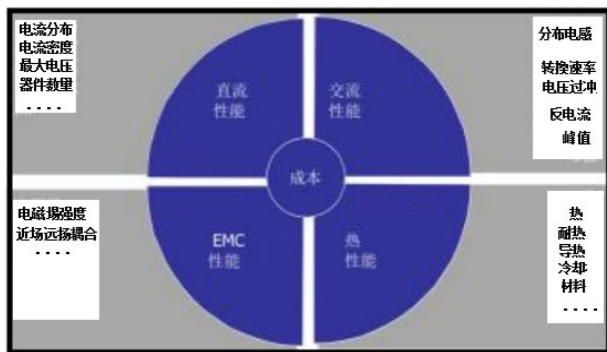


图 1 所示为电源功率模组四个维度的设计挑战示意图

问题的由来: 应该说电源功率模组包含多个转换技术, 而其中典型是 DC-DC 电源转换, 尤其是在降低数据中心能耗中的核心。数据中心平均每个机架使用 3kW 到 5kW 的功率来驱动服务器、存储和网络机架。人工智能 (AI)、5G 和大数据的采用, 正在导致更多的智能, 需更高的功率来驱动服务器、存储和网络机架。这是因为网络机架、服务器板上的空间非常宝贵, 服务器特别是那些为执行高端计算功能 (如人工智能) 而设计的服务器需要更多的功率, 许多系统正在迁移到 48V 配电电压架构, 该架构能够显著降低配电损耗并增加功率密度。由此采用高效的 GaN FET 和 IC 实现了新的 48V 机架设计, 减少了云数据中心的能源支出, 降低了冷却要求, 提高了整体电力使用效率 (PUE)。

据此, 为实这些目标的实现, 值此本文将应对电源功率模组完整设计挑战的相技术特征问题作研讨, 并由此拓宽出以 EGaN FET 提高效率降低总成本的各种类型 DC-DC 转换器设计方案为典例作分析说明。

1 面对电源功率模组的所需技术导引出新型设计方法

实践证明, 单一的设计工程师不可能预测某个设计变化会带来的上述四个方面的影响。例如, 简单的器件布局

变化就会影响所有的指标, 流向所有器件的电流不再是均匀分布的(直流响应), 模组中不同器件的开关行为变化(AC 响应), 这两种电气领域的变化必然引起热和电磁兼容性的变化。模组中的所有器件应该实现静态损耗和开关损耗的均衡以及同样的温度, 同时应较低的 EMC 辐射来确保高可靠性和避免现场失效。

由此可以想象, 即使在快速断路器(1 毫秒反应时间)工作情况下, 一个失效(比如短路)也会释放 2000 焦耳的能量(这么大能量足以把 70 公斤的成年男人抛到空中 3 米高度, 会导致电动汽车的整体失效)。

然而今天的电源功率模组设计流程依赖多次样机测试。一般需要至少十次物理样机才能得到满足以上指标的工作电源功率模组。这不仅仅是成本的问题, 时间上也花费很多。同时, 设计师需要考虑不同技术路径。从器件工艺, 比如硅、碳化硅、氮化镓, 到制造工艺, 像键合线、无线模组, 到其他新的互连技术。

值此对一个电源功率模组的所需技术概况以及典型的技术挑战, 应该用的新型设计和验证方法, 来减少样机次数, 缩短产品上市时间, 提高电源功率模组的质量和可靠性, 从而提高差异化的竞争能力。那么一个电源功率模有哪些典型的技术路径挑战呢? 仅对此作研讨。

设计师需要考虑由不同技术路径时的挑战

据此将从硅、碳化硅、氮化镓器件工艺到新的无线模组、互连技术等制造技术述起。

* 器件工艺 -- 主导市场的 Si IGBT 的主导技术面临的挑战

高压应用的基础是宽禁带半导体。高压器件在材料特性上, SiC MOSFET 和 GaN HEMT 与 Si IGBT 相比, 具有较高的击穿电场, 较高的热传导率, 在理论上, SiC 和 GaN 器件应该更有吸引力。可是为什么 Si IGBT 仍然在主导市场呢? 这因从硅材引发所至。随之引发出如下新的要求:

A. 硅

市场上广泛采用纯硅基器件。由于大量生产、众所周知的生产流程和电特性, IGBT 取代了结型晶体管、闸流晶体管和 Si MOSFET。一个原因是, 即使在上世纪七十年代也需要承载超过 1000V 电压并控制超大电流的器件。而结型晶体管和闸流晶体管只能在 600V 以下工作。而且,

硅 IGBT 成熟的结构和制作流程, 可在 12 英寸晶圆上大大降低了成本, 并改善了电特性和性能。如见图 2 给出典型的 Si IGBT 横截面。这是一个绝缘栅双极性晶体管, 触点称为集电极、发射极和栅极。

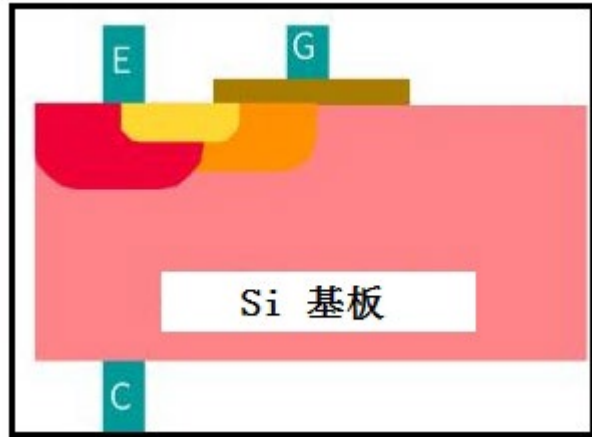


图 2 为硅 IGBT 横截面图

集电极连接到硅基板上, 触点区域 P 掺杂。发射极触点在 N 掺杂区域(黄色)和 P 基区域(红色)之间。栅极与 MOS 栅极类似。硅 IGBT 的基本材料是硅基板。这从图 2 的横截面可以看出输入电容的存在, 电容是开关频率的重要参数。接下来的两个部分是硅 IGBT 和 SiC MOSFET 及 GaN HEMT 的比较。

B. 碳化硅

碳化硅是 50% 硅和 50% 碳合成的 IV-IV 族半导体。这是硅和碳的 200 种可能组合中唯一稳定的混合。这种混合物在高压应用中有不同的多型体。4H-SiC 是最合适的多型体, 与硅 IGBT 相比, 具有三倍的带隙, 更好的热传导性能, 更低的输入电容, 所以有更高的开关频率。即使碳化硅 MOSFET 到处都可以得到, 但在电动汽车市场仅占大约 10% 的份额。图 3 是基于碳化硅的典型 MOSFET 横截面。触点的像硅 MOSFET 一样, 称为栅极、漏极和源极。该结构与硅 IGBT 相比必须应该有另一个优点。当电源功率模块驱动感性负载, 如马达, 硅 IGBT 需要并联续流二极管, 而碳化硅 MOSFET 就不需要。在过去几年, 碳化硅 MOSFET 的本体二极管得到增强, 其反向电流比快速续流二极管的电流小。

四颗 IGBT 和四个续流二极管构成的半桥电源功率模块, 使用碳化硅技术, 就只需要四颗碳化硅 MOSFET 即可。

易于平衡电路的 DC 行为、AC 行为、器件温度和较低的 EMC 辐射。更小的尺寸，更好的热传导性能利于系统集成和降低电磁辐射。

C. 氮化镓

氮化镓 (GaN) 也是电源电路的重要材料，其材料特性完美匹配超高频电路的需要，可以实现大电流密度和大器件尺寸，但是目前，氮化镓器件的使用不超过 1%。对于氮化镓器件，一般不用 IGBT 或 MOSFET 命名，而是称为高电子迁移率晶体管，即 HEMT。

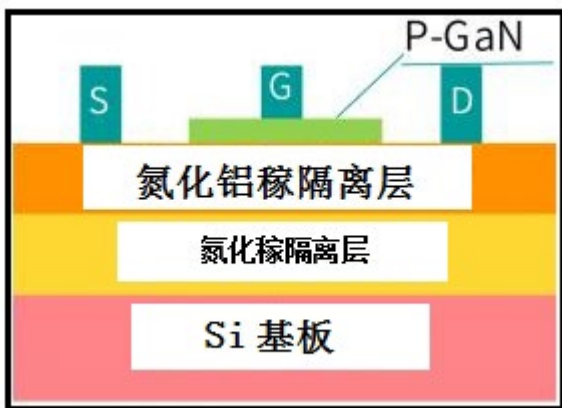


图 3 为 GaN HEMT 横截面图

图 3 是 GaN HEMT 的横截面示意图。这种器件使用多种材料，构成混合结构。该结构类型比硅和碳化硅应有一定的优势。比如，氮化镓器件有更好的输出功率与频率比。从表 1 中，可以看到应有更高的开关频率。

表 1 为 GaN 工艺概览

GaN HEMT 属性	
半导体	Gallium Nitride
最大电压	< 650 V
最大电流	< 55 A
最大开关频率	50 MHz
带隙	3.4 eV
热传导率	2.3 W / cm · K
电动汽车市场占有率	<1%

氮化镓器件没有在电动汽车的电源电路中广泛使用另一个原因是氮化镓器件是典型的耗尽型器件。在栅极电压为 0 时，就导通，对电源电路的控制电路来说是不适用的。这只是阻碍氮化镓器件在电力市场应用的两个例子。

由上可知，此电源功率模块设计师的挑战是在给定产品需求的基础上，选择最合适的工艺和技术，如电特性、热特性、成本和尺寸。因而，对器件和工艺支持方便交换的设计流程才是最需要的。

2 电源功率模组如何应对上述挑战

对于电源功率模组上述挑战的如何应对，值对以 GaN 所构建的功率集成模块的 (DC-DC) 转换器为例作重点研讨。

* 应用特征 应该说增强型氮化镓 (eGaN) 的 eGaN FET 和集成电路，其典例见相比较的图 4a 与效率特性图 4b 所示。在以下应用中所提供的高性能比要最好的硅功率 MOSFET 高出许多倍的 (DC-DC) 转换器、遥感技术 (激光雷达)、电机驱动及用于电动汽车、机器人和无人机以及低成本卫星。

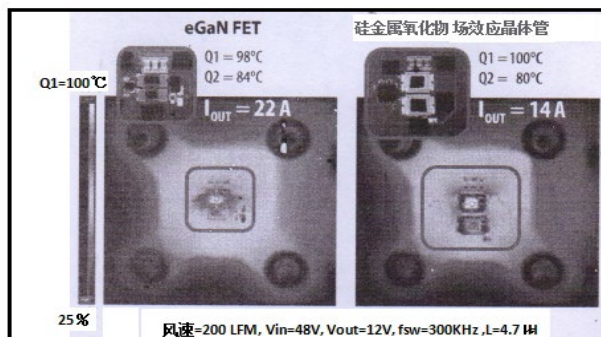


图 4a 增强型氮化镓 (eGaN) 的 eGaN FET 形状示意图

上图 4a 为 GaN 晶体管及集成电路的散热效率更高，可实现前所未有的高功率密度外形示意，它基于 eGaN FET 器件的设计提供高出 60% 输出功率、仅占面积减半。

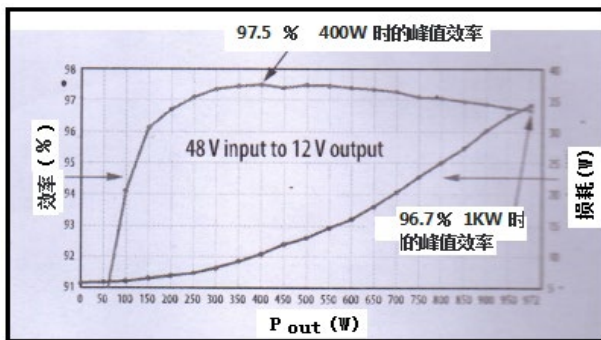


图 4b 为 eGaN 晶体管及集成电路更高效高效率示意图

上图 4b 为 eGaN 晶体管及集成电路更高效与提高效率及功率更高特性的示意图。

当今高效电源转换的氮化镓场效应管提供了比传统更高的性能和更小的解决方案 (即 MOSFET 的高功率密度) 其应用它包括 DC-DC 转换, 电机驱动器, 并为 12V-20V 的同步整流 (如典型的 EPC2619 型)。其典型的如氮化镓功率场效应管和集成电路, 是新一代 eGaN 器件, 其功率密度是上一代产品的两倍。技术指标为具有 R 型 RDS(on) 只有 4 毫欧, 只有一个微小的 1.5 毫米 × 2.5 毫米足迹。最大 RDS(on) 的面积为 15 毫米, 比 80V 硅 MOSFET 小五倍。具体应用特征有二: 其一、典型的 RDS(on) × QGD (负载电容), 这是硬开关应用中的功率损耗的指示, 这使得开关频率比硅 MOSFET 高 10 倍, 并且没有效率损失, 从而产生最高的功率密度。这使得更适用于高频硬开关 24 伏 -48 伏应用, 如降压, 降压 - 升压, 升压转换器使用的理想选择; 其二、典型的 RDS(on) × QOSS (输出电荷), 这是在软开关应用中的功率损耗的指示, 是 87 毫欧比 80V 硅 MOSFET 好 2 倍。这使得非常适合软开关应用, 如基于 LLC 的 DCX DC-DC 转换器的初级整流全桥。

需指出 RDS(on) 欧姆的意思是场效应管 FET 漏极 D 与源极 S 之间导通时 D、S 之间的电阻, 单位是欧姆, on 表示导通。

* 降压 (BUCK) 转换器的 GaN FET 选型工具的使用

用于降压转换器的 GaN FET 选型计算器是一个进一步改善了的产品选型工具, 可用于降压转换器估计值和计算值。设计人员输入设计参数后, 得出以功耗排序的可选器件, 从而确定参数的权衡。这个选择工具旨在找出最适合的 GaN FET 以满足特定功率系统设计的要求。

例如 GaN FET 热量计算器为 PCB 上的氮化镓器件的热性能参数快速提供估算值。氮化镓器件既要通过强制对流进行板面冷却, 也要通过由散热器和散热片组成的热解决方案进行背面冷却。该热量计算器的估算值考虑了 PCB 的结构 (尺寸、堆叠和通孔密度)、晶片尺寸、功耗、TIM 材料和散热器解决方案。

* 应用与优势

在应用上: 该 eGaN FET 可专为高密度 DC-DC 转换器; 太阳能优化器; 以及同步整流转换为 12V-20V 的充电器, 适配器和电视电源。除此之外也为系列电机驱动应

用而设计, 例如 28V-48V 的电动自行车, 电动滑板车和电动工具的转换。

由此可概括增强型氮化镓 (eGaN) 晶体管及集成电路在应用上的优势: 氮化镓晶体管是一种宽带隙器件, 与传统硅晶体管相比, 由于具有卓越的传导性能, 因此在相同的导通电阻 (RDS(on)) 条件下, 可实现更小尺寸及更低电容。尤其在开关应用中, 增强型 (常闭型) 的工作模式让功率设计师可发挥氮化镓器件的优势, 使得在速度、电压过冲及振铃方面可实现前所未有的开关性能。反向恢复 (QRR) 在高频时也可减少损耗。其开关性能可实现更高功率密度、更高频率、更高开关精确度、更高总线电压及更少电压过冲。

最后值得提示的是在 eGaN FET 和集成电路的 (DC-DC) 转换器应用上可用相应开发板, 它是采用了 GaN FET 的半桥。可专为 80V 的最大器件电压和 20A 的最大输出电流。其目的是简化电力系统设计人员的评估过程, 以加快其产品的上市时间。

3 选择不同的 DC-DC 开关电源拓扑方案是应对电源功率模组设计挑战的重要举措

众所周知, 根据电能转换的需求, 电源管理包括三个主要的场景: 交流转直流 (AC-DC)、直流转直流 (DC-DC) 以及直流转交流 (逆变), 其中 DC-DC 的应用应该是尤为广泛的。DC-DC 转换器一般由控制电路、开关管 (二极管或三极管)、电感线圈、电容等元器件构成, 其根据反馈电路提供的信号, 通过控制开关器件的“开关”动作将输出电压稳定在所需的电压水平上, 因此也被称为“DC-DC 开关电源”以区别于其他的稳压电路。

采用不同的 DC-DC 开关电源拓扑, 可以实现降压、升压和升降压三类操作, 其中尤以降压 DC-DC 的应用场景更为丰富。凡是所需电压低于系统中的可用电压时, 都会使用到降压转换器; 在一些更复杂的配电架构中, 还会采用多次 DC-DC 降压转换操作以达到提高效率、简化系统的目的。

在此重点分析降压 DC-DC 电源管理器件应该如何选?

* 不同的降压 DC-DC 类型

由于是进行降压转换, 因此电源设计时, 降压 DC-DC 经常会被拿来与线性稳压电源 (LDO) 进行比较。

相较而言,LDO 电路简单、成本较低,同时具有负载响应快、输出纹波小、噪声小等特点;而降压 DC-DC 则在高效率、支持更宽的输入工作电压和更大的压降、支持更大的电流和功率、输出电压灵活可调等方面独具优势。

*** 电压调制方式**

降压 DC-DC 按照其控制方式的差异可分为 PFM (脉冲频率调制) 和 PWM (脉冲宽度调制) 两种类型。PFM 的工作原理是:保持固定的开关脉冲宽度,通过改变脉冲输出的频率来调整和控制输出电压并使其以达到稳定状态。这种方式的优点是在轻负载时具有较高的效率,而缺点则是变化的频率使得通过滤波消除噪声难以实现,容易对其他电路造成干扰。

*** 输出反馈方式**

降压 DC-DC 转换器为了维持电压稳定,会将输出反馈至控制电路。按照输出反馈的方式,可将其分为电压模式控制、电流模式控制和迟滞控制三种类型。在电压模式下,反馈环路反馈的是输出电压信号,这也是基本方式。其优点在于控制简单、抗噪性好、导通 (ON) 时间短;缺点则是相位补偿电路比较复杂。

*** 变压整流方式**

除了上面提到的电压调制和输出反馈方式的不同,降压 DC-DC 转换器在变压器整流方式上还有异步整流和同步整流的区别。异步整流,是指在电路中是通过上侧晶体管的

开关,控制下侧整流二极管的导通 / 关断,使电流流向或不流向二极管。这种方式电路简单且比较牢靠,在工业设备等应用中广泛采用。同步整流与异步整流方式主要的区别在于,将异步整流架构中的下侧二极管换成了晶体管,因此可以有效降低输出端开关的损耗,实现更高的效率,但由于需要确保上下两侧晶体管的同步性,电路会更为复杂。

4 后话

(1) 一个系统级 (包括电源功率模组等) 设计,如果其供电电源设计不合理,验证不全面,会影响整个电子系统的稳定性。带给我们设计师的挑战就是越来越多的电源系统设计需要考虑“模拟信号”,“开关损耗”,“散热”和“EMC 问题”,否则是无法快速、正确地设计出成功的电子产品。为此首先,在设计阶段,系统的原理图模块化设计,方便实现设计复用,缩短设计周期;集成的仿真和 EMI 电路分析环境确保概念设计阶段电路功能和性能满足设计指标,从而减少失误导致的设计反复。由此可拓展应用 EDA (电子设计自动化) 可提供一个完整的电源功率模块的设计和验证流程,见图 5 所示。

(2) 如今应对电源功率模组挑战的高效电源转换氮化镓场效应管已问世较多,在此选用 EPC2619 型就是一典型例。



图 5 所示为完整的电源功率模块的设计和验证流程

上接162页

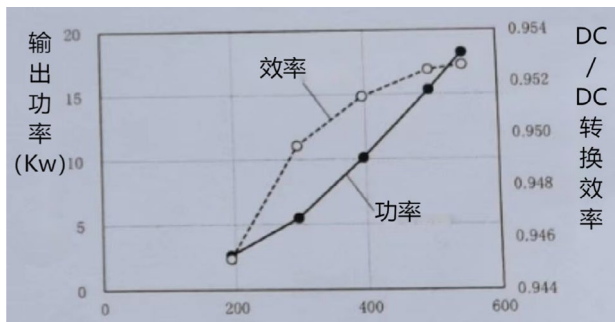


图 6: 功率传输实验结果

通过对第 3 代无线轮毂电动机的开发已证实:高功率且高效率的无线供电是可行的。今后,不仅要进一步的高功率、高效率这样的高性能化,而且、应促进有关实用的控制开发,以及耐久性等研究工作的开展。

原文出处: 东京大学 清水 修,藤本博志,电气自动车的大量普及のために