

高频驱动电路与高效 GaN HEMT 电源模块的实现

侯明金

(深圳中瀚蓝盾电源有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要 功率器件栅极驱动电路是电源模块的重要组成部分, 在电源转换和能量获取领域起着关键的作用。功率器件栅极驱动电路被广泛用于汽车电子、移动快充、通信基站等领域。栅极驱动电路作为电源模块的基础部分, 其速度和功耗将直接影响电路的整体性能。为了满足当前电源模块高效大功率的要求, 需要针对氮化镓器件设计一款高频驱动电路, 并搭建形成高频高效的电源模块。本文设计了一款高频驱动电路与 GaN HEMT 高效电源模块, 并测试平台电路结构的可行性以及频率、效率等特性。

关键词 高频驱动电路 电源模块 GaN HEMT

中图分类号: TN86

文献标识码: A

文章编号: 1007-0745(2022)05-0001-03

现阶段, 为了减小开关电源设备的体积, 提高电源转换效率, 电源逐步向高功率密度、低损耗、高频化方向发展, 其中, 高频化对功率器件的驱动电路提出了新要求。传统硅(Si)器件栅极驱动电路中包含耗能元件, 高频工作时, 驱动损耗显著增加, 已成为限制开关电源发展的关键因素之一。宽禁带功率半导体器件的应用, 极大地促进了驱动电路技术的发展。宽禁带器件具有导通电阻小、寄生参数小、工作频率高的优点, 在减小电源体积和提高效率方面具有显著优势。目前, 共栅共源氮化镓高电子迁移率晶体管(Cascode Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor, Cascode GaN HEMT)是由低压MOS管和高压常通GaN组成^[1]。

1 GaN 器件驱动电路设计基本原则

Cascode型GaN器件是由一个常闭型低压SiMOSFET和常开型高压耗尽型GaN器件共源共栅而成。在进行高频GaN驱动电路设计时需要着重考虑以下三个方面的因素:

1. 驱动电压的选择: 确保功率器件完全导通, 降低由导通阻抗造成的能量损耗, 同时避免由于功率器件栅源极电压过低, 驱动噪声干扰造成功率器件误导通。

2. 栅极驱动电路设计: 栅极驱动电路及参数的合理匹配, 控制开通关断速度, 避免器件开通过快造成的振铃或者开通过慢造成的功率损耗。

3. 器件布局: 优化功率器件及驱动电路布线, 降低由印制电路板的寄生参数造成的影响^[2]。

这里选取型号为TPH3206的高压型GaN功率器件。其栅极电压最大范围为 $\pm 18V$, 最低导通阈值典型值为2.1V。

选取驱动芯片SI8230, 驱动电压为10V。该芯片是一款大电流输出隔离型驱动器, 具有高瞬态电压抑制(du/dt)能力, 且具有死区配置电路, 可根据外部配置电阻不同, 设置不同的死区时间。

2 Cascode GaN HEMT 原理

GaN是横向器件, 漏极和源极穿过AlGaIn层与下层二维电子气(Two-Dimensional Electron Gas, 2DEG)形成欧姆接触, 并形成电流通道, 当2DEG被耗尽时, 半绝缘GaN缓冲层阻碍电流流通。GaN器件关断时, 需在栅极和源极之间施加负压将2DEG耗尽。GaN为常通器件, 漏极与源极之间反向耐压低, 不适用于功率变换电路。为了解决这一问题, 已有公司采用Cascode结构开发出了适用于高压的GaN器件。Transphorm公司650V高压GaN器件就采用了低压MOS与高压常通GaN级联的结构制备GaN器件。本文以TP65H300G4LSG器件为例, 研究一种适用于Cascode GaN的高频驱动电路。

GaN器件开关频率可达到数十MHz, 若沿用传统耗能型驱动电路, 会导致电源效率降低。因此, 在高频应用中, GaN驱动电路设计尤为重要, 它将会直接影响器件的可靠性和稳定性。自GaN器件商用以来, 研究者们就着手探寻低功耗、高可靠性的驱动电路。提出了常通型GaN HEMT器件栅极谐振驱动电路, 该

类型器件正常情况下为常通状态,极易造成短路故障。该振驱动电路不仅节能,还可以缩短电源启动时间,但多谐振驱动波形为准方波,幅值波动大,而增强型 GaN 器件驱动电压范围窄(通常最大电压为 6V),不利于谐振元件参数选取^[3]。因此, GaN 器件的高频驱动电路仍具有研究价值。

3 典型的开关电源电路

高频信号波形生成器产生方波信号;固定死区模块控制驱动波形不同时为高,并产生固定死区时间;电平搬移模块提升驱动波形的电平。

典型开关电源电路工作流程如下:高频信号波形生成器输出方波信号,经过固定死区时间模块分为两支信号,分别记为 P_1 、 P_2 ;其中 P_1 用于控制下管的通断; P_2 波形进入电平搬移模块,将波形高电平搬移后用于上管的驱动;通过 V_H 、 V_L 波形的控制,输出节点 V_{sw} 信号频率与 P_{wm} 波形频率一致,经过滤波模块产生直流电平 V_0 信号。

传统驱动方式会引起器件的意外开启。当下管导通时, V_{sw} 电位迅速被拉到零电平,栅极电压 V_H 也会随之被拉到零电平。由于栅极电压 V_H 滞后于 V_{sw} 电压到达零电平,使得上管器件的 V_{gs} 产生瞬间的高电平,导致上管意外开启。此时可能使上管和下管同时打开,产生部分损耗。针对此现象,本电路后续版本将进行优化^[4]。

功率器件自身的特性很大程度上决定了系统性能的上限。由于传统功率器件具有寄生的 PN 结,当驱动波形处于死区状态时二极管会导通,出现反向导通电流,使电路功耗增加。传统功率器件自身导通电阻和寄生电容较大,造成的导通损耗和输出电容损耗也很大。传统功率器件的电子迁移率以及电压工作范围有限,限制了传统功率器件在高频、高压领域的发展^[5]。

4 GaN HEMT 电源技术研究

4.1 HEMT 简介

随着高频无线通讯产业的发展,同时满足特殊领域的发展,因此对具备高速、高压、高频、耐高温、耐腐蚀等特性的晶体管需求越来越迫切,从而使具备这些特性的器件即高电子迁移率晶体管(High Electron Mobility Transistor HEMT)得到广泛研究和发展。

在 HEMT 器件中,由于异质结接触两种半导体的禁带宽度不同,电子会从宽禁带半导体流向窄禁带半导体中,从而在半导体界面的窄禁带半导体一侧形成

量子阱。当宽禁带半导体的掺杂浓度较高,异质结间的导带差较大时,会形成很高的势垒,限制量子阱中的自由电子在垂直异质结接触面方向的移动,故称这个量子阱为二维电子气(2 Dimensional Electron Gas)。2-DEG 就是 HEMT 中的沟道,由于沟道所在的窄禁带半导体通常是不掺杂的,沟道中的自由移动电子远离掺杂的宽禁带半导体中电离杂质的散射,载流子能获得很高的电子迁移率。

4.2 GaN 基器件

第三代半导体材料,即禁带宽度大于 2.2eV 的宽禁带半导体材料,包括 CdS(2.42eV)、SiC(3.2eV)、ZnO(3.32eV)、GaN(3.42eV)、ZnS(3.68eV)、金刚石(5.45eV)、AlN(6.20eV)等。在电子器件方面,对 SiC 和 GaN 的研究相对比较成熟, GaN 材料拥有电子饱和迁移率很大,并且化学性质很稳定,有很高的击穿电压以及更高的电流能力等特点。

4.3 GaN 基器件的结构

AlGaIn/GaN HEMT 基本层结构由缓冲层、GaN 沟道层、本征 AlGaIn 隔离层和掺杂 AlGaIn 层组成。为提高器件的击穿特性,降低栅漏电流,还可在掺杂层上再生长帽层,可由非掺杂的 GaN 或 AlGaIn 组成。AlGaIn 掺杂层 Al 组分一般为 0.15 至 0.3,掺杂浓度范围一般为 $10^{18}cm^{-3}$ 至 $2 \times 10^{19}cm^{-3}$ 。其基底材料主要有蓝宝石、SiC、Si 这三种,蓝宝石成本比较低,散热性能良好,但与 GaN 界面处会有晶格失配,影响器件性能;SiC 具有良好散热性能和化学稳定性,并且与 GaN 有较小的晶格失配,但是成本高昂;而 Si 虽然散热等性能没那么良好,但是其成本低廉,并且可以做到很大尺寸。目前常用的基底材料一般是蓝宝石或者 SiC。

4.4 GaN 和 AlGaIn 的极化效应

所谓“极化现象”是由于 III-V 族复合半导体中离子键和共价键同时存在,离子键的电子并不完全通用。在离子键的影响下, V 族原子吸收电子。它比 III 族原子大,这使得电子与 V 族原子的键合更强。电子云密度越高,该基团越靠近 V 族原子,而电子越靠近受限离子之间的线的中心,云密度离子键几乎为零。

对于离子半导体,当晶格变形时,正负离子核之间会发生偏转,导致半导体产生电场。由于基团的强离子性,这就是所谓的“压电效应”。氮化物 III 族压电系数远大于其他化合物,其方向与其他化合物相反。此外,由于纤锌矿结构的对称性低, III 族氮化物如果

不受外力变形,也会产生极化效应,称为自发极化。AlGaIn/GaN HEMT中的极化由两种极化组成:PPE压电极化和PsP自发极化。对于GaN和AlGaIn,极化效应与生长过程有关,生长过程的差异会导致Ga面极化和N面极化方向相反的两种形式。MOCVD生长的AlGaIn/GaN HEMT属于Ga板的极化方向,从Ga原子到相邻的N原子极化方向。

5 氮化镓高频高效电源模块

5.1 氮化镓高频高效电源模块

本文研究的氮化镓高频高效电源模块。整体电路由高频驱动电路和功率输出级组成。死区最小化处理电路和非重叠模块以及电平搬移模块共同组成了高频驱动电路。

本模块集成死区时间调节与非重叠模块于一体。非重叠功能能够严格控制高侧功率管和低侧功率管驱动信号不同时输出高电平,这样可以防止两个功率器件同时开启,能够有效抑制大电流直通现象。死区时间调节功能能够将驱动波形同时为低电平的时间减小,提高整个周期内电源系统的转换效率。

5.2 GaN 电源模块的高频驱动电路

该模块由可调数字电容电阻延迟阵列模块、电压偏置生成电路与高速比较器处理模块组成。利用纳秒级别的快速比较器实现兆赫兹频率的非重叠信号处理。

电路工作原理如下:偏置电压生成电路产生两路参考电平作为高速比较器的基准信号,分别记为 V_{REF1} 、 V_{REF2} 。 P_{WM} 波经过可调数字电容电阻阵列将上升沿和下降沿微调后,产生 P_{IN} 信号连接到两个比较器中。比较器 C_{OMP1} 将高频方波作为正端输入信号,电平 V_{REF1} 为负端输入信号,若方波信号高于参考电平时输出为高电平;反之,为低电平^[6]。

电路通过调节偏置电压模块产生不同的参考电平,能够有效控制高低两侧驱动波形的非重叠效应和死区时间。 P_1 信号的上升沿和下降沿均向外拓展, P_2 信号的上升沿和下降沿均向内收缩,但是 P_1 的上升沿始终迟于 P_2 的下降沿; P_2 的上升沿始终迟于 P_2 的下降沿。由于 V_{REF1} 比 V_{REF2} 高且始终存在一个微小的压差 ΔV ,因此 P_1 和 P_2 的波形也不会出现同时为高电平的现象,即电路波形是非重叠的;由于两个参考电平的压差很小,则输出的 P_1 和 P_2 的死区时间也会减小。

5.3 GaN 电源模块的功率输出级

氮化镓器件相较于传统功率器件具有诸多优势。

氮化镓具有更低的导通电阻,更小的输入电容,产生更少的导通损耗;氮化镓器件的高频特性和高压特性优于其他类型器件,具有更广阔的应用范围;氮化镓晶体管通过不同材料形成的二维电子气(2DEG)来导电,因此不存在硅基器件的体二极管反向恢复问题;氮化镓功率器件可以实现较高的压摆率,因此可以比传统器件更快地进行频率转换。

氮化镓器件主要分为两种:具有隔离栅极结构的氮化镓器件和具有栅极注入技术的氮化镓器件。后者的栅极结构具有箝位行为的优点,可以防止栅极过冲。本文采用的氮化镓器件是增强型NMOS器件,易于驱动电路的搭建。

6 结语

综上所述,基于AlGaIn/GaN异质结材料制造的高电子迁移率晶体管(HEMT)因其具有高的饱和漂移速度、大的导带不连续性以及强的自发极化和压电极化效应,成为大功率、高温、高频应用中具有发展潜力的器件。特别是在大功率应用方面,GaN基HEMT比GaAs基HEMT和Si基LDMOS表现出更优越的器件性能而成为目前国际研究热点。

参考文献:

- [1] 岳改丽,向付伟,李忠.CascodeGaN高电子迁移率晶体管高频驱动电路及损耗分析[J/OL].电工技术学报,2021-09-13:1-10.<https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210243>.
- [2] 张晋梅,田世野,申惠琪,等.一种适用于常开型功率器件的新型谐振门极驱动电路设计[J].电气传动,2021,51(16):10-15.
- [3] 张驰.基于GaN HEMT器件的新能源电动汽车车载充电器的研究与设计[D].陕西科技大学,2021.
- [4] 周德金,何宁业,宁仁霞,等.GaN HEMT栅驱动技术研究进展[J].电子与封装,2021,21(02):41-52.
- [5] 简天宇.用于增强型GaN HEMT功率器件的驱动电路设计[D].北京工业大学,2020.
- [6] 张志文.高频GaN智能栅驱动电路关键技术研究[D].电子科技大学,2020.