

SiC 器件在大功率 LD 驱动源模块中的应用

贺 涛, 杨爱武, 郑 毅, 朱 虹
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要:介绍了 SiC 功率器件的应用优势并将其应用到了大功率 LD 驱动源模块中;对 SiC MOSFET 的开关参数及特性进行了分析,并设计了一种简单实用的 SiC 隔离驱动。本文应用 SiC 器件设计了一款 120V/120A 全 SiC LD 驱动源模块,功率模块主电路拓扑采用四路交错并联 Buck 电路,电路中的开关管和二极管全部使用 SiC 功率器件,功率模块最高效率达到 98%。

关键词:碳化硅器件;LD 驱动源模块;交错并联 Buck;碳化硅驱动电路

中图分类号:TN386 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.09.017

Application of SiC power device in high power LD driver

HE Tao, YANG Ai-wu, ZHENG Yi, ZHU Hong

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract:The advantages of SiC power device is introduced, and it is used for high power LD driver. The switch parameters and dynamic characteristics of the SiC MOSFET were analyzed, then a simple and practical isolated drive circuit was designed. A 120V/120A all-SiC LD driver power module was proposed, and its main circuit uses Four-interleaving Buck circuits, the switching tube and the diodes in this circuit all use SiC devices. In addition, the maximum efficiency of the all-SiC module can reach up to 98% and it has a high reliability.

Key words:SiC devices; LD drive power module; interleaving Buck; SiC drive circuit

1 引 言

近年来,功率 MOSFET 和绝缘栅双极晶体管(IGBT)等电力电子器件在各个领域的应用越来越广,这些器件的结构和制造工艺基本接近其材料特性决定的理论极限。随着 LD 功率电源对开关器件性能要求越来越高,通过新材料来提高其性能成为一种趋势。

碳化硅(SiC)材料作为一种宽禁带(禁带宽度 $E_g = 3 \times \text{Si}$)半导体材料^[1],同常用的硅材料相比,不但击穿电场强度高(临界击穿电场 $E_c = 10 \times \text{Si}$)、热稳定性好,还具有载流子饱和漂移速度高(电子饱和速度 $V_{\text{sat}} = 2 \times \text{Si}$)、热导率高($\lambda = 3 \times \text{Si}$)

等优势。目前采用 SiC 材料的肖特基二极管(Schottky Barrier Diode, SBD)、SiC JFET 和 SiC MOSFET 都已取得广泛应用,大幅度降低了生产成本。

SiC 功率器件可以提高系统的功率密度,在实现大功率输出的同时降低电源损耗、提升系统效率;SiC 器件可以工作在更高的频率,提升功率电源变换系统的反应速度;SiC 器件还具有高温环境下正常工作的能力^[2]。因此 SiC 器件可用于太阳能逆变器、电网功率控制、铁路牵引、机器人、汽车电子(混合动力汽车,燃料电池汽车和纯电动汽车)和航空电子等领域中。

本文首先对 SiC 器件的特性进行了分析,在此

基础上设计了一种简单实用的 SiC 隔离驱动电路;应用 SiC 器件设计了一款 120V/120A 全 SiC LD 驱动源模块,功率模块主电路拓扑采用四路交错并联 Buck 电路,并进行了仿真和实验。

2 功率电源中的 SiC 器件

MOSFET 和二极管是功率电源中使用较多的器件,下面对 SiC MOSFET 和 SiC 肖特基二极管的性能优势进行分析。

2.1 SiC MOSFET

SiC MOSFET 作为一种新型宽禁带半导体器件,与 Si MOSFET 相比具有高温、高频、高功率密度等优点^[3]。

表 1 给出了功率等级 1200 V/20 A 的 Si 和 SiC 器件对比,IXFK20N120P 为 IXYS 公司的 Si MOSFET,C2M0160120D 为 Cree 公司(现改名为 Wolfspeed)的 SiC 器件。表 1 为两种 MOSFET 的输入电容 C_{iss} 、输出电容 C_{oss} 、转移电容(密勒电容) C_{rss} ,由表 1 可看出,相同功率等级下的 SiC MOSFET 寄生电容远小于 Si MOSFET;寄生电容越小,电平转换时间可以越短、开关速度更快。

表 1 两种器件结电容对比

Tab. 1 The junction capacitor of two devices comparison

器件型号	C_{iss}/pF	C_{oss}/pF	C_{rss}/pF
IXFK20N120P	11100	600	60
C2M0160120D	525	47	4

2.2 SiC 肖特基二极管(SBD)

与普通 Si 二极管相比, SiC 二极管的反向阻断电压更高,反向恢复时间更短;将其应用到功率电源中可以提高开关频率、减小二极管开关损耗。

功率二极管的反向恢复时间是二极管的一个重要参数,也是制约大功率电源变换器性能的一个重要因素。普通 Si 快恢复二极管有电导调制效应,当电流变化率很大时反向恢复时间很长,反向恢复电流尖峰大,会在开关过程中产生很大的电流电压尖峰,增加了功率器件的损耗,降低了电源变换器的效率。SiC SBD 由于没有电导调制效应,与普通器件相比基本没有反向恢复,因而其开关损耗较小、开关速度较快,而且其开关特性不随温度变化而变化。

3 SiC MOSFET 的开关特性与驱动电路设计

SiC MOSFET 开关速度快,其漏源极电压变化率和漏极电流变化率较大,导致 SiC MOSFET 开关特性对电路的寄生参数比较敏感,漏源极电压和漏极电流的开关波容易因线路寄生参数出现震荡^[4]。

SiC MOSFET 对驱动的要求不同于普通 Si MOSFET,为发挥其优良的性能,需要对 SiC MOSFET 驱动电路单独进行设计。开关管开通时,较高的正向开通电压有利于减小导通损耗,但是 SiC MOSFET 的开关速度快、漏源极电压变化率大;受到驱动回路中寄生电感和开关管结电容的影响后,容易在 SiC MOSFET 栅极上出现电压尖峰,导致其栅极被击穿,因此正向驱动电压不宜过高。另外 SiC MOSFET 栅源极间开通门限电压较低,为了防止误导通,关断时驱动要设置负电压,以保证电路的可靠性。

为充分发挥 SiC MOSFET 的优势,其栅极驱动电平极限要求一般为 $-5\text{ V}/+25\text{ V}$ ^[5],通常为了保证驱动可靠,需要适当降低。驱动电路的电容放置在驱动芯片附近,以提供更好的充放电回路。驱动电阻需要合理选择,避免过/欠阻尼影响驱动波形质量。

图 1 为本文设计的高效可靠 SiC MOSFET 隔离驱动电路示意图,使用超快 MOSFET 驱动芯片,其驱动峰值电流达到 9 A 且有较强的驱动电容负载的能力。驱动电路用隔离电源模块和隔离通信芯片实现了驱动部分的全隔离,加强了驱动的抗干扰能力。

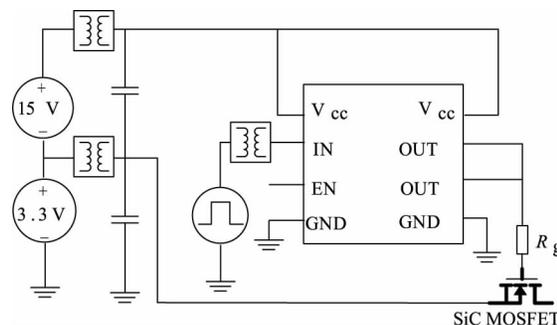


图 1 SiC MOSFET 隔离驱动电路示意图

Fig. 1 The Schematic of SiC MOSFET isolated drive circuit

图 2 为驱动波形,驱动电压选择 $-3.3\text{ V}/+15\text{ V}$,驱动电阻 R_g 为 $6.2\ \Omega$;图 2(b)、2(c)分别为驱动波形的上升沿和下降沿,驱动波形上升时间和下降时间均在 80 ns 以下。

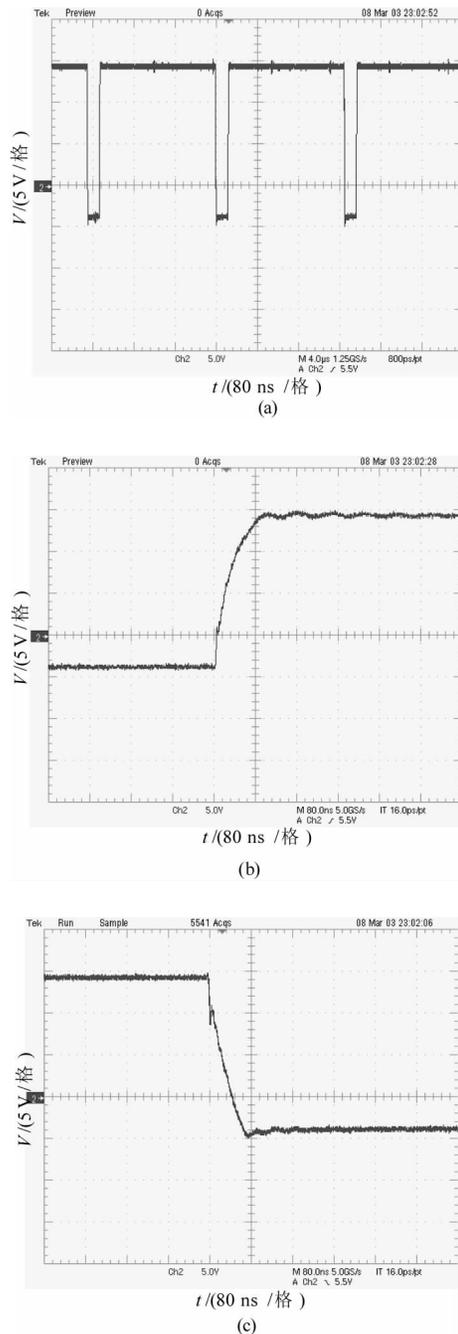


图2 驱动波形

Fig. 2 Driving circuit waveforms

4 四路交错并联 LD 驱动模块

本文 LD 驱动电源输出电流较大且 LD 对电流比较敏感,需要较高的输出电流波形质量;单个 Buck 变换器在输出电流较大时会出现效率和电感过热等多方面的问题, Buck 变换器的交错并联技术可以有效降低输出的电流纹波^[6],减小电路中电感元件的体积,减小输出滤波电容值。本文采用四路交错并联 Buck 变换器电路示意图如图 3 所示,开关管 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 的控制信号依次相差 $1/4$

周期,二极管 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 为续流二极管。开关管 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 均选用 Cree 公司 SiC MOSFET C2M0040120D,二极管 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 均为泰科天润半导体公司的 SiC 肖特基二极管 G2S12040B。

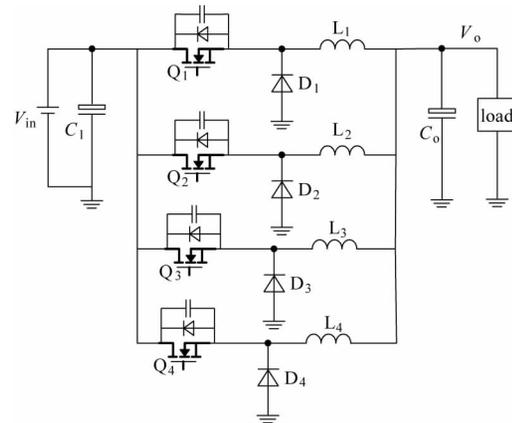


图3 四路交错并联 Buck 变换器电路示意图

Fig. 3 The 4-module interleaved Buck circuit

图 4 为四路交错并联 Buck 变换器中四路的总电感电流 i_L 以及四路分别的电感电流 i_{L1} 、 i_{L2} 、 i_{L3} 、 i_{L4} ;由图中可以看出总电感电流纹波由于四路相位的差异明显减小,变换器的输出电流纹波也随之降低;采用这种变换器拓扑结构,可以有效提高大功率 LD 驱动源的输出电流质量。

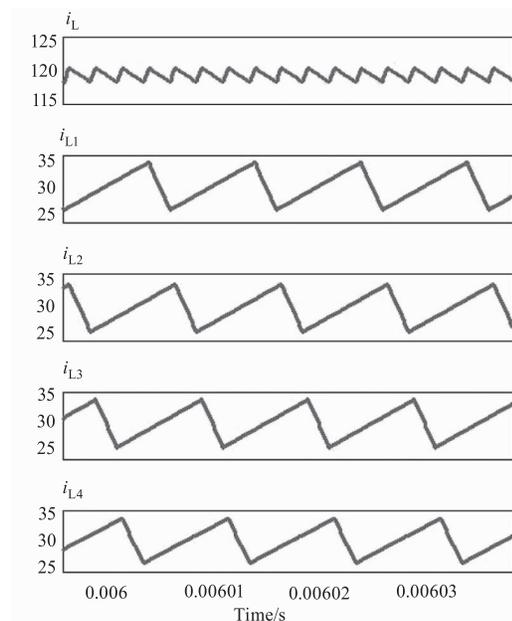


图4 四路交错并联 Buck 电路的电感电流

Fig. 4 Inductor current of 4-module interleaved Buck circuit

本文中的全 SiC 功率模块主功率电路采用四路交错并联 Buck 变换器,通过霍尔元件采样输出电流进行闭环控制。LD 驱动源功率模块

输出电压/电流为 120 V/120 A; 输出电流纹波 $\Delta I_{\text{opp}} \leq 0.5\% I_o$; 图 5 LD 驱动源模块效率曲线为驱动源模块效率曲线, 变换器最高效率达到 98% 以上。

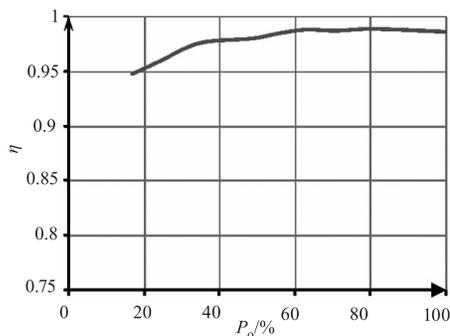


图 5 LD 驱动源模块效率曲线

Fig. 5 The efficiency curve of LD Driver

5 结论

SiC 器件与常用硅材料器件相比具有很大优势。本文基于 SiC MOSFET 开关速度快、寄生电容较小等特点, 设计了一种结构简单、性能稳定的 SiC MOSFET 隔离驱动电路, 实际使用中有着很好的效果。本文应用 SiC 器件设计完成了 120 V/120 A 四路交错并联 LD 驱动源模块, LD 驱动源模块效率较高、输出电流纹波小, 工作可靠, 结果证明了 SiC 器件在应用方面的可行性和优势。

参考文献:

- [1] Robert J Callanan, Anant Agarwal, Al Burk, et al. Recent progress in SiC DMOSFETs and JBS diodes at cree [C]. IEEE Industrial Electronics Society, 2008; 2885 - 2890.
- [2] A K Agarwal. An overview of SiC power devices [C]. International Conference on Power, Control and Embedded Systems, 2010; 1 - 4.
- [3] James A Cooper. Status and Prospects for SiC Power MOSFETs [J]. IEEE Transaction on Electron Devices, 2002, 49(4): 658 - 664.
- [4] FAN Chunli, ZHAO Chaohui, YU Chenglong, et al. Simulation of parasitic inductance influence on SiC MOSFET switching performance in buck converter [J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2015, 18(2): 63 - 68. (in Chinese)
范春丽, 赵朝会, 余成龙, 等. 寄生电感对 Buck 变换器中 SiC MOSFET 开关特性的影响 [J]. 上海电机学院学报, 2015, 18(2): 63 - 68.
- [5] LI Lei, NING Puqi, WEN Xuhui, et al. Comparative performance study of 1200 V SiC MOSFET and Si IGBT [J]. Journal of Power Supply, 2016, 14(4): 32 - 38. (in Chinese)
李磊, 宁圃奇, 温旭辉, 等. 1200 V 碳化硅 MOSFET 与硅 IGBT 器件特性对比性研究 [J]. 电源学报, 2016, 14(4): 32 - 38.
- [6] Xunwei Zhou, Fred C Lee. Investigation of candidate VRM topologies for future microprocessors [J]. Power Electronics IEEE Transactions, 2000, 15(6): 1172 - 1182.