

[开关器件]

无反向恢复的Si基MOSFET + SiC二极管混合电力电子器件

文/浙江大华系统工程有限公司 王友波

浙江大学 邱凯

提出了一种利用成熟且廉价的硅基MOSFET和SiC二极管组合器件，利用SiC二极管解决硅基器件的反向恢复问题，并且拥有硅基器件的成熟度，可以满足高可靠性的车载充电机应用。

如何快速、安全、高效地为电动汽车充电成为电动汽车充电器设计的核心问题。目前传统充电器采用单向充电结构，但单向结构的充电器无法利用电池的动态储能特性，为满足需求，充电器的结构由单向转变为双向。

开关器件对于双向充电器的性能起到决定性的作用。开关器件的选择中，由于拖尾电流的存在，使得IGBT开关速度难以提高，导致充电器整体体积偏大，严重影响充电器功率密度；当充电器工作在逆变器模式下时，传统Si基MOSFET，由于体二极管反向恢复的问题，增大了开关损耗，降低了充电器的可靠性；SiC基的MOSFET作为新兴产品，虽然开关速度较Si基MOSFET快且体二极管反向恢复较小，但由于其技术的不成熟及成本高的问题，无法大规模推广。因此本文提出了一种基于低成本硅基MOSFET的组合器件，既有较高的开关频率，又解决了传统Si基MOSFET体二极管反向恢复的问题。

组合器件的结构

为解决传统Si基MOSFET体二极管反向恢复问题，组合器件采用高压SiC基MOSFET串联低压SiC基MOSFET，再并联SiC二极管的结构，如图

1所示。其中 S_1 为高压Si基MOSFET， S_2 为低压Si基MOSFET，其源极与 S_1 源极相连，D为SiC基二极管，其阴极与 S_1 漏极相连，其阳极与 S_2 漏极相连。当 S_1 、 S_2 同时开通时，电流通过 S_1 、 S_2 沟道；当 S_1 、 S_2 关断时，由于 S_2 体二极管存在，使得反向电流只流经SiC二极管V。由于SiC二极管反向恢复极小，因此这种组合器件结构解决了传统高压Si基MOSFET体二极管反向恢复的问题。

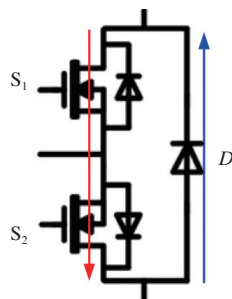


图1 组合器件结构

试验验证

1. 分立元件搭建MOSFET模块

针对600 V/10 A的应用场合，使用分离元件搭建MOSFET模块。如图2所示，其中 S_1 为高压Si基MOSFET， S_2 为低压Si基MOSFET，V为SiC二极管。元件具体参数如表1、表2所示。

基金项目：2017年杭州市重大科技创新项目资助（20172011A010）

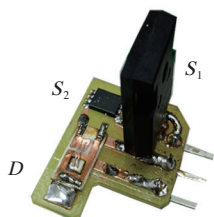


图2 组合器件实物图

表1 Si基MOSFET元件参数

型号	供应商	V_{ds}/V	$R_{ds}/m\Omega$	I_D/A	Q_g/nC
S ₁ IPZ60R040C7	Infineon	65	40	73	107
S ₂ BSC0501NSI	Infineon	30	1.9	100	11.4

表2 SiC二极管元件参数

型号	供应商	V_r/V	V_f/V	I_f/A	Q_c/nC
V CPW2-0650-S006B	CREE	650	1.5	19	15

(1) 双脉冲测试电路模态分析

为得到MOSFET模块的开关速度、过冲等动态特性，对组合器件进行双脉冲测试。图3为双脉冲测试原理图。为更好地分析组合器件在开关过程中的工作特性，现对双脉冲测试电路模态进行分析。

模态一： t_0 时刻，下组合器件S₃、S₄开通。此时电压源向电感充电，电感电流线性增加。当 t_1 时刻开关管关断时此模态结束。

模态二： t_1 时刻，下组合器件S₃、S₄关断由于S₄体二极管的存在，此模态可以看作电感电流向S₄结电容与二极管V₁结电容充电，S₄结电容两端电压等于S₄体二极管导通压降。上组合管两端电压 v_{d1} 下降至0时，V₁导通，此模态结束。

模态三： $t_1 \sim t_2$ 阶段，V₁导通，构成电感电流回路。当 t_2 时刻，下组合器件S₃、S₄开通，此模态结束。之后模态重复模态一至模态三过程，文中不再赘述。

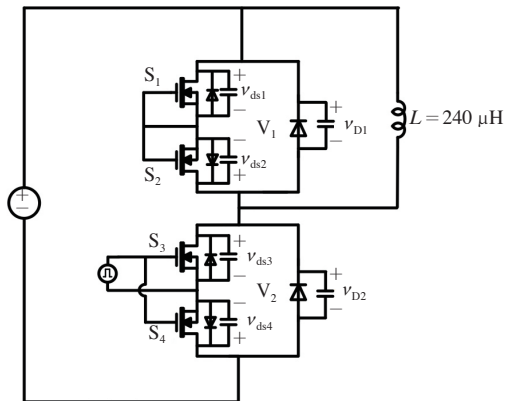


图3 双脉冲测试原理图

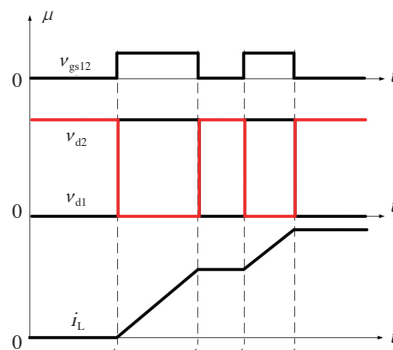


图4 双脉冲测试电路波形图

(2) 分立元件搭建MOSFET模块双脉冲测试

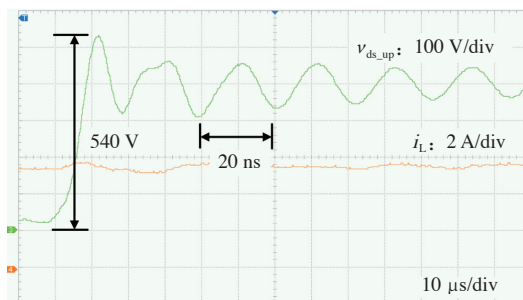
测试条件如表3所示。图5为双脉冲测试波形图，按照由上到下的次序依次为上组合管S₁、S₂两端电压与流过电感L电流。测试结果图5a与理论分析相符，验证了组合管功能。从测试结果图5b可以看出，MOSFET模块的关断过程大概持续10 ns，关断时MOSFET模块两端电压有着140 V的电压过冲，并且有着周期为20 ns的高频振荡。

表3 双脉冲测试条件

门极驱动电压 V_g/V	驱动电阻 $/\Omega$	母线电压 $/V$	导通电流 $/A$
10	10	400	9



(a)



(b)

图5 双脉冲测试波形图

2. 裸芯片搭建MOSFET模块

为减小在使用分立元件搭建MOSFET模块过程中由于器件封装引入过大寄生电感的问题，选用裸芯片搭建MOSFET模块，图6为裸芯片搭建

MOSFET模块桥臂，其中 S_1 、 S_3 为高压MOSFET， S_2 、 S_4 为低压MOSFET， V_1 、 V_2 为SiC二极管。

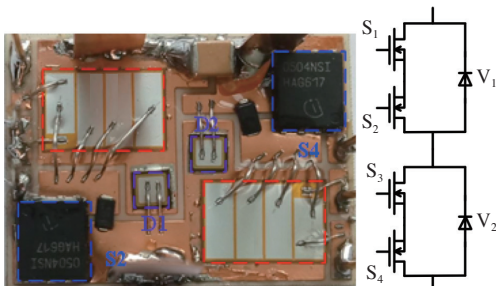


图6 裸芯片搭建MOSFET模块实物图

裸芯片搭建MOSFET模块双脉冲测试。在与分立元件搭建的MOSFET模块相同的双脉冲测试条件下，得到测试结果如图7所示。

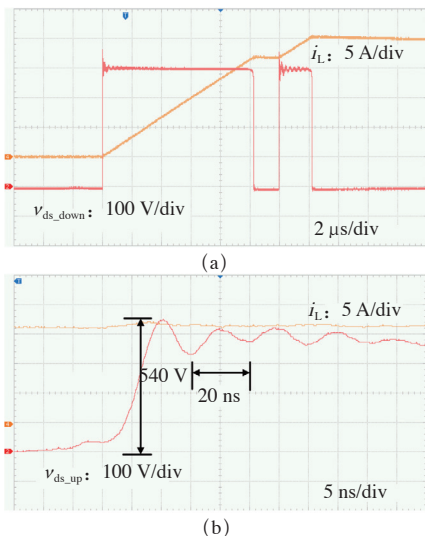


图7 裸芯片搭建MOSFET模块双脉冲测试波形图

从图7b可以看出，在下MOSFET模块开通时，上MOSFET模块过冲只有50 V，结电容与寄生电感谐振周期为10 ns，计算寄生电感为13 nH，与仿真结果相近。通过试验可以看出，裸芯片搭建

的MOSFET模块相比于分立元件搭建的MOSFET模块寄生电感减小了70%，提高了MOSFET模块的使用裕量，同时提高了MOSFET模块的可靠性。

3. 逆变器试验

为进一步验证组合管功能，本文搭建了以TEXAS公司F28069型DSP为核心的逆变器试验电路，并对逆变器效率进行了测试。图8为试验所搭建的半桥逆变器原理图。其中输入电压为400 V，电感 $L = 500 \mu\text{H}$ ，滤波电容 $C_3 = 50 \text{ nF}$ 。控制策略采用双极性SPWM调制方式，幅度调制比 $m_a = 0.65$ ，开关频率为50 kHz。

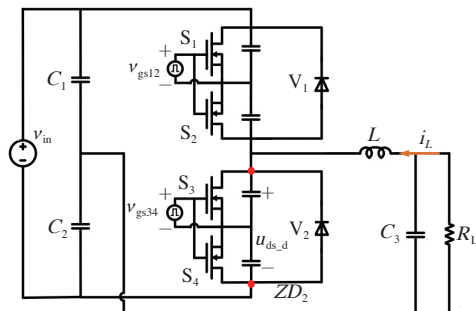


图8 半桥逆变电路图

结束语

本文提出了一种基于低成本Si基MOSFET和SiC二极管的组合器件结构，通过高压Si基MOSFET串联低压Si基MOSFET再并联SiC二极管的方式，解决了传统高压Si基MOSFET寄生体二极管在工作过程中反向恢复的问题。通过裸芯片搭建MOSFET模块降低了寄生电感解决了使用分立器件搭建MOSFET模开关过程中产生较高过冲的问题，降低了器件的电压应力，提高了可靠性。通过逆变器试验验证了组合器件功能、并测量了逆变器效率。EA

(收稿日期：2018.07.13)

(编辑：白文亭)

(上接第51页)

330.6~345.42 V。而在本例计算中，变频器的输出电压为380 V，电动机端电压 U_m 为

$$U_m = 380 \text{ V} \times (100\% - 9.92\%) \text{ V} = 344.698 \text{ V}$$

故即使在此时达到了9.29%，只要变频器输出电压保持额定电压，仍能满足电动机额定运行的电压要求。故而采用变频器调速时，亦即一般电动机供电电缆的选择原则不适用于变频调速电动机供电电缆的选择，只要采用2根ZA-YJV22 0.6/1 kV 3×240 mm²即可满足要求。

结束语

通过对乙烯裂解炉引风机电动机设计的研究，得到的结论如下：在0~50 Hz范围内电压降不必作为闭环控制的变频电动机电缆截面选择的限制条件。在本结论的指导下，可以极大地减少变频电动机供电电缆的截面和根数，缩减项目在电缆方面的投资。EA

(收稿日期：2018.07.18)

(编辑：白文亭)