

碳化硅 MOSFET 与硅 MOSFET 的应用对比分析

陈之勃, 陈永真

(辽宁工业大学电子与信息工程学院, 锦州 121001)

摘要: 碳化硅 MOSFET 具有导通电压低、开关速度极快、驱动能力要求相对低等特点, 是替代高压硅 MOSFET 的理想器件之一。将额定电压、电流相同的碳化硅 MOSFET 和高性能硅 MOSFET 应用于反激式变换器中进行对比测试, 实验结果表明, 在相同的驱动条件和负载条件下, 碳化硅 MOSFET 的开关速度明显快于硅 MOSFET; 在 12 V 驱动电平条件下, 直接采用碳化硅 MOSFET 替代硅 MOSFET 使得变换器的效率明显提升; 采用 20 V 栅极驱动电平, 效果更加明显。

关键词: 碳化硅 MOSFET; 导通电压; 开关速度; 器件损耗

Comparative Analysis of Applications for SiC MOSFET and Silicon MOSFET

CHEN Zhibo, CHEN Yongzhen

(School of Electronics & Information Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: Owing to the characteristics of lower on-voltage, fast switching speed, and relatively lower requirement of drive capability, SiC MOSFET is an ideal substitution for silicon MOSFET. In this paper, SiC MOSFET and silicon MOSFET with the same rated voltage and rated current were applied to a flyback converter, and performance tests were conducted. Experimental results showed that under the same drive and resistance conditions, SiC MOSFET was significantly faster than silicon MOSFET in switching; at a 12 V drive level, even a simple replacement of silicon MOSFET by SiC MOSFET improved the converter's efficiency substantially, and this effect would be much more obvious at a 20 V gate drive level.

Keywords: SiC MOSFET; on-voltage; switching speed; device loss

功率半导体器件的开关速度与导通电压的矛盾随着耐压的提高越来越明显。以第 3 代 MOSFET 为例, 在结温 150°C 和额定电流条件下, 额定电压 100 V 时其导通电压一般不高于 2 V; 而额定电压 1 000~1 200 V 时, MOSFET 导通电压将超过 30 V。虽然 MOSFET 在不断地改善, 但目前性能优秀的硅 MOSFET 的导通电压仍不低于 21 V。尽管 IGBT 可以有效地降低其导通电压, 但是拖尾电流带来的开关损耗在频率 50 kHz 以上的硬开关应用中将不可容忍。因此, 需要一种既有高额定电压又具有极快开关速度、同时导通电压明显低于硅 MOSFET 的理

想的电力半导体器件。碳化硅 MOSFET 具有高耐压、极快的开关速度、低的导通电压。

1 200 V/24 A 的碳化硅 MOSFET (CREE 公司的 CMF10120D) 的主要参数为: 导通电阻 249 mΩ (结温 135 °C)、栅极电荷 0.047 1 μC、米勒电荷 21.5 nC; 最先进的硅 MOSFET (IXYS 公司的 IXFL32N120 P) 的主要参数为: 导通电阻 820 mΩ (结温 135 °C)、栅极电荷 0.36 μC、米勒电荷 160 nC。应用常规技术的相同电压和电流的高压 MOSFET (Microsemi 公司的 APT24M120B2) 导通电阻为 1.5 Ω (结温 135 °C)、栅极电荷 0.26 μC、米勒电荷 120 nC。很显然, 碳化硅 MOSFET 的关键性能上性能远远优于硅

MOSFET。

目前,以 CERR 公司制造的碳化硅 MOSFET 水平最高,商品器件水平为单管:1 200 V/90 A/25 m Ω ;模块:1 200 V/300 A/5 m Ω ;2012 年高压碳化硅 MOSFET 半桥模块水平为 10 kV/120 A,每个单元由 12 个 MOSFET 管芯并联和 6 个 SiC 二极管并联而成;10 kV 的碳化硅 MOSFET 正由电科院测试,预计将应用于智能电网领域。1 200 V 耐压的碳化硅 MOSFET 主要应用于替代同领域的硅 MOSFET 和硅 IGBT,可以获得更便捷的驱动方式和更低的导通损耗与开关损耗,有利于减小无源元件体积,进而减小整机的体积。

1 碳化硅 MOSFET 与硅 MOSFET 开关特性对比测试

为了对比碳化硅 MOSFET 与硅 MOSFET 应用性能的差异,本文将碳化硅 MOSFET 与硅 MOSFET 分别应用于同一交流 380 V 电源供电的反激式开关电源上。测试仪器为:隔离通道示波器,型号 TPS2024;电流探头,型号 TCP305A。

1.1 栅漏电压,漏源电压波形的对比测试

图 1 为碳化硅 MOSFET 栅极电压波形,图 2 为硅 MOSFET 栅极电压波形。

图 1 和图 2 中,碳化硅 MOSFET 栅极电压上升时间为 340 ns,硅 MOSFET 栅极电压上升时间为 3 880 ns,很显然碳化硅 MOSFET 比硅 MOSFET 快一个数量级。不仅如此,由于米勒电荷造成的栅极电压波形的“平台”时间,碳化硅 MOSFET 不到 100 ns,而硅 MOSFET 至少要 1 μ s。

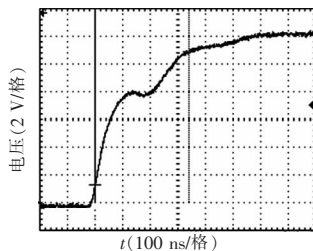


图 1 碳化硅 MOSFET 栅极电压上升波形

Fig.1 Waveform of the raising voltage at SiC MOSFET

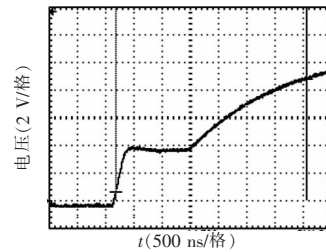


图 2 硅 MOSFET 栅极电压上升波形

Fig.2 Waveform of the raising voltage Si MOSFET gate

反激式变换器中开关管损耗主要是关断损耗,可以通过漏极—源极电压上升时间衡量。在相同的栅极驱动条件下,碳化硅 MOSFET 和硅 MOSFET 的漏极—源极电压波形分别如图 3 和图 4 所示。

图 3、图 4 中,碳化硅 MOSFET 的电压上升时间为 92 ns,而硅 MOSFET 的电压上升时间为 500 ns,很显然碳化硅 MOSFET 明显快于硅 MOSFET。

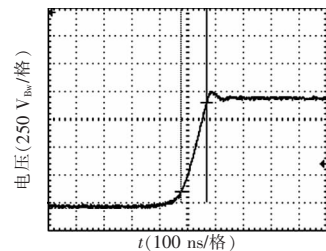


图 3 碳化硅 MOSFET 漏极-源极电压上升波形

Fig.3 Waveform of the raising voltage of SiC MOSFET drain-source

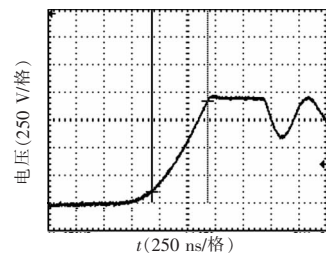


图 4 硅 MOSFET 漏极-源极电压上升波形

Fig.4 Waveform of the raising voltage of Si MOSFET drain-source

1.2 MOSFET 工作损耗的对比

两种 MOSFET 的工作损耗测试结果如图 5 和图 6 所示。由图 5、图 6 看到,在栅极驱动电压约 12 V 的状态下,碳化硅 MOSFET 的导通电阻约为栅极电压 20 V 状态下的 3 倍以上,因此碳化硅

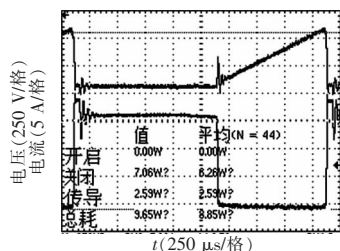


图 5 SiC MOSFET 的器件损耗
Fig.5 Power loss of SiC MOSFET

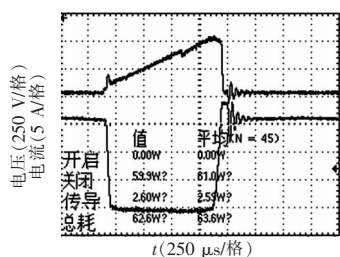


图 6 Si MOSFET 的器件损耗
Fig.6 Power loss of silicon MOSFET

MOSFET 并没有显现优势。由于碳化硅 MOSFET 的开关速度明显快于硅 MOSFET,因此在关断损耗产生明显的差别。碳化硅 MOSFET 的关断损耗为 6.26 W,而硅 MOSFET 的关断损耗则为 61.0 W。

当碳化硅 MOSFET 的栅极驱动电压为 20 V,则结温在室温状态下导通损耗会降低到图 5 的 1/4;在 135 °C 高结温状态下碳化硅 MOSFET 的导通电阻也仅仅上升 20%,而硅 MOSFET 则上升 240%。

2 整机效率的对比

相对于硅 MOSFET,碳化硅 MOSFET 的高开关速度在本实验实例中损耗明显的降低,图 7 为采用碳化硅 MOSFET 时整机的输入功率,图 8 为采用先进的硅 MOSFET 时整机的输入功率。

由图 7 可见,碳化硅 MOSFET 的输入功率为 1.28 kW,由图 8 可见,硅 MOSFET 的输入功率为 1.33 kW;两者相差 0.05 kW,为硅 MOSFET 的高于碳化硅 MOSFET 损耗部分,占总输入功率 3.8%。由此表明即使直接用碳化硅 MOSFET 替代硅 MOSFET,也会提高近 3% 的效率。

实验结果如表 1。

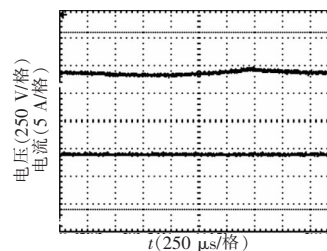


图 7 采用 SiC MOSFET 的输入功率
Fig.7 Input power using SiC MOSFET

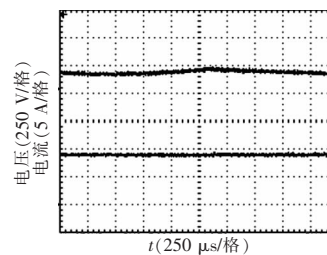


图 8 采用 Si MOSFET 的输入功率
Fig.8 Input power using silicon MOSFET

表 1 交流输入 386 V 状态下的效率对比

Tab.1 Comparison of efficiency at 386 V AC input

采用 SiC MOSFET			采用 Si MOSFET		
输入功率/W	输出功率/W	效率/%	输入功率/W	输出功率/W	效率/%
221.7	200	90.2	229.6	200	87.1
435.3	400	91.9	541.5	400	88.6
651.5	600	92.1	764.2	600	89.0
867.5	800	92.2	897.9	800	89.1
1 096.5	1 000	91.2	1 132	1 000	88.3
1 280.0	1 157	90.4	1 330	1 157	87.0

3 结论

碳化硅 MOSFET 是一个性能优异的高压开关器件,不仅具有良好的阻断能力、低导通电压,同时具备了极快的开关速度,是众多的高压可关断型电力半导体器件中的佼佼者。其极快的开关速度可以用于高压、高频的开关功率变换领域。

由于碳化硅 MOSFET 栅极电荷远低于硅 MOSFET,即使是大功率碳化硅 MOSFET 也可以用一般的开关电源芯片直接驱动,而即使是相应电压、电流参数的高性能硅 MOSFET 则需要至少 5 倍于驱动碳化硅 MOSFET 的驱动能力才能使硅 MOSFET

具有比较快的开关速度。这时的应用碳化硅 MOSFET 可以应用驱动能力一般的驱动技术。或者在相同的驱动条件下,碳化硅 MOSFET 具有比硅 MOSFET 快一个数量级的开关速度。

相同的漏极电流条件下,碳化硅 MOSFET 的导通电压是高性能硅 MOSFET 导通电压的一半,在高结温条件下碳化硅 MOSFET 导通电压则可能为高性能硅 MOSFET 的 1/4。如果将栅极驱动电压提升至 20 V,则效率的提高会更明显。

本文实验结果表明,直接将碳化硅 MOSFET 替代硅 MOSFET,可以在 20%~100%负载范围内提高整机效率 3%左右。

参考文献:

- [1] Callanan R J, Agarwal A, Burk A, et al. Recent progress in SiC DMOSFETs and JBS diodes at cree[C]. IEEE Industrial Electronics 34th Annual Conference. IECON 2008, 2008, 10-13:2885-2890.
- [2] 徐静平,李春霞,吴海平. 4H-SiC n-MOSFET 的高温特性分析[J]. 物理学报, 2005, 54(6):2918-2923.
Xu Jingping, Li Chunxia, Wu Haiping. Analyses on high-temperature electrical properties of 4H-SiC n-MOSFET[J].
- (上接第 94 页)
- 37-41.
BI Chao, Xiao Fei, Xie Zhen. Analysis and application of interleaving technique in paralleling DC-DC converter with ripple suppression[J]. Electrical Automation, 2013, 35(4): 37-41(in Chinese).
- [3] 方瑜,秦海鸿,朱梓悦,等. 硅与碳化硅二极管在 Buck 变换器中的对比研究[J]. 电力电子技术, 2014, 48(2):37-39.
Fang Yu, Qin Haihong, Zhu Ziyue, et al. Comparison of Si diode and SiC diode in Buck converter[J]. Power Electronics, 2014, 48(2):37-39(in Chinese).
- [4] 潘三博,黄军成,刘建民. 碳化硅功率器件在电力电子中的应用[J]. 上海电机学院学报, 2013, 16(3):107-112.
Pan Sanbo, Huang Juncheng, Liu Jianmin. The silicon power devices research on power electronics applications [J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2013, 16(3): 107-112(in Chinese).

Acta Physica Sinica, 2005, 54(6):2918-2923(in Chinese).

- [3] 张波,邓小川,张有润,等. 宽禁带半导体 SiC 功率器件发展现状及展望[J]. 中国电子科学研究院学报. 2009, 4(2):111-118.
Zhang Bo, Deng Xiaochuan, Zhang Yourun, et al. Recent development and future perspective of silicon carbide power devices-opportunity and challenge[J]. Journal of China Academy of Electronics & Information Technology, 2009, 4(2):111-118(in Chinese).
- [4] 黄维,常少辉,陈之战,等. 11 kV 大功率 SiC 光电导开关导通特性[J]. 强激光与粒子束. 2010, 22(3):511-514.
Huang Wei, Chang Shaohui, Chen Zhizhan et al. On-state characteristics of an 11 kV high-power SiC photoconductive semiconductor switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(3):511-514(in Chinese).



陈之勃

作者简介:

陈之勃(1985-),男,硕士,实验师,研究方向:高效率功率变换,E-mail:changebird@163.com。

陈永真(1956-),男,中国电源学会高级会员,教授,研究生导师,研究方向:高效率功率变换、电力电子元件应用,E-mail:0416chenyongzhen@163.com。

- [5] Ma Chengbin, Yoshida K, Honda K. Si-IGBT versus SiC-MOSFET-An isolated bidirectional resonant LLC DC-DC converter for distributed power systems[C]. 2015 54th Annual conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan, 2015:894-899.



栾晓腾

作者简介:

栾晓腾(1991-),男,通信作者,硕士研究生,研究方向:电力电子,E-mail:277870252@qq.com。

段福兴(1991-),男,硕士研究生,研究方向:电力电子,E-mail:343042329@qq.com。

夏东伟(1963-),男,中国电源学会高级会员,博士,教授,博士生导师,研究方向:电力电子技术在电源工程中的应用,E-mail:xiadw@163.com。