

新一代 WBG 弧焊逆变电源

王振民, 汪倩, 王鹏飞, 张 苓

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘 要: 硅功率器件的开关性能已随其结构设计和制造工艺的完善而接近由其材料特性决定的理论极限, 难以满足新一代高性能弧焊逆变电源对紧凑体积、高温、高功率密度、高压、高频以及抗辐射等恶劣工况条件的新要求。宽禁带(WBG)半导体是一种革命性的电力电子材料, 已成为下一代电力电子器件的主攻方向。主要介绍 WBG 功率器件的基本特点、类型以及发展情况, 重点介绍 WBG 功率器件应用于弧焊逆变电源时需要重点解决的关键科学和技术问题, 为促进和推动下一代 WBG 弧焊逆变电源的发展和应用奠定基础。

关键词: 宽禁带半导体; 碳化硅功率器件; 电弧焊

中图分类号: TG 434 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)07-0049-04

0 序 言

焊接电源为焊接电弧提供能量, 它的性能直接影响到焊接工艺效果。据统计, 弧焊逆变电源已成为国内电焊机市场的主流产品, 并朝着大容量、轻量化、高效率、模块化、智能化等方向发展。目前, 弧焊逆变电源广泛采用的功率器件均为硅半导体器件^[1,2]。这些器件的开关性能已随其结构设计和制造工艺的完善而接近其材料特性决定的理论极限, 依靠硅功率器件提高弧焊逆变电源性能的潜力十分有限, 迫切需要依靠新材料来满足新一代焊接电源对器件性能的更高要求^[3-5]。

宽禁带(wide band gap-WBG)半导体主要是指禁带宽度大于 2.2 eV 的半导体材料, 它的带隙远大于硅半导体, 能够显著减少电子跨越的鸿沟, 更容易控制电流和减少能耗。WBG 功率器件已在光伏发电系统、高压驱动器等领域得到应用, 但还未能引起国内外焊接学术界和产业界的高度关注, 缺乏相关的深度研究和应用报道。

1 WBG 功率器件的特点及其类型

以 GaN, SiC 为代表的宽禁带半导体材料具有高击穿电场强度、高截止频率、高热传导率、耐高温和

良好的热稳定性、强抗辐射能力等特点。半导体材料的这些特点使得 WBG 功率器件能够在传统器件所不能胜任的高温、强辐射环境中得到应用。由于 GaN 功率器件还主要处于试验室研究和小批量应用阶段, 文中将以 SiC 功率器件为重点介绍。

1.1 SiC 功率器件的特点

SiC 是典型的宽禁带半导体材料。如表 1 所示, 4H-SiC 的禁带宽度为 3.26 eV, 远大于硅的 1.12 eV; 它的击穿电场是硅材料的 7 倍以上。SiC 器件的工作温度甚至可以达到 600 ℃, 远超过硅器件的工作温度^[3-5]。SiC 具有较高的击穿电场和较低的本征载流子浓度, 使 SiC 器件能够在高电压、高温下工作; 同时, SiC 功率器件的导通电阻具有正的温度系数, 饱和导通时易于并联使用。

表 1 几种半导体材料参数的对比

Table 1 Several parameters of semiconductor materials

材料 参数	禁带 宽度 V/eV	击穿电场 E_b / (MV·cm ⁻¹)	热导率 λ / (W·cm ⁻¹ ·K ⁻¹)	电子迁移 率 μ_n / (cm ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹)	空穴迁 移率 μ_p / (cm ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹)
Si	1.12	0.30	1.50	1 500	420
4H-SiC	3.26	2.20	4.90	1 000	120
GaN	3.39	2.00	1.30	1 250	850
金刚石	5.45	1.00	22.00	2 200	1 800

图 1 为硅基 IGBT 与 SiC MOSFET 开关过程比较示意图。从图 1 可知, SiC MOSFET 在开通后的电压迅速下降, 损耗较低。而在导通阶段, 其导通压降也低, 说明它的导通损耗也比硅基 IGBT 的要低。关断阶段, SiC MOSFET 具有更陡的 du/dt , 关断的交流

收稿日期: 2015-11-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375173); 广东省科技计划资助项目(2013B011302006、2013B010402007、2014B010104002、2014B090901030); 中央高校基本科研业务费培育项目(2015ZP039)

损耗也更低. 并且 SiC MOSFET 不存在电流拖尾效应, 进一步降低了关断损耗.

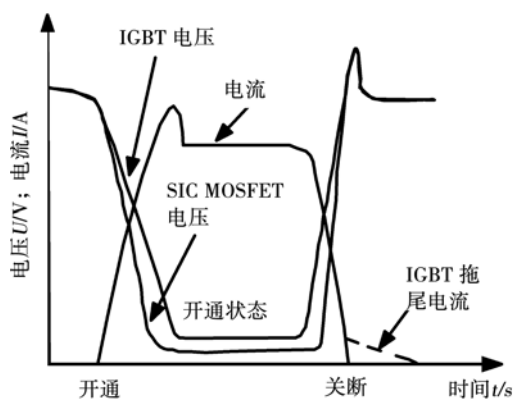


图 1 Si IGBT 与 SiC MOSFET 开关过程比较示意图

Fig. 1 Comparison schematic of Si IGBT and SiC MOSFET switching process

图 2 为 SiC 功率器件与硅功率器件在不同结温条件下的关断过程响应曲线. 从图 2 可知, SiC 功率器件在关断过程几乎没有反向恢复阶段, 而硅功率器件则存在非常明显的反向恢复过程, 其关断损耗随着结温的增加而快速增加^[3].

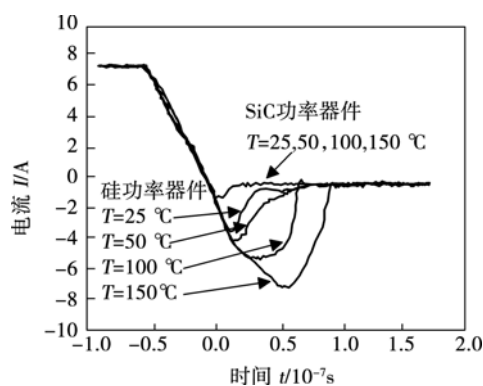


图 2 SiC 功率器件与硅功率器件关断过程响应曲线

Fig. 2 Off curves of SiC and Si power device

图 3 为不同半导体材料击穿电压与通态电阻曲线. 从图 3 可知, GaN 和 SiC 材料的击穿电压要远高于硅半导体材料; 而在同等电压等级下, GaN 和 SiC 材料的导通电阻又远小于硅半导体材料; 这使得 GaN 和 SiC 功率器件不仅具有更好的耐高压性能, 而且具有更低的导通损耗, 提高能量转换效率.

SiC 功率器件有多种封装结构, 例如 TO-220, TO-247, Full-PAK, DPAK (TO-252) 等. 如图 4 所示, SiC 功率器件的封装可以与现有 MOSFET 和 IGBT 一致, 这为其推广应用创造了良好条件^[3].

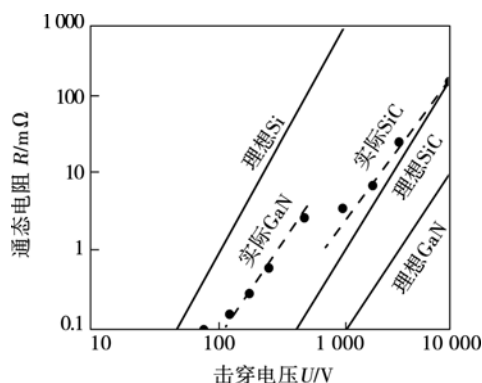


图 3 不同半导体材料击穿电压与通态电阻曲线

Fig. 3 Breakdown voltage and on-state resistance curves of different semiconductor materials

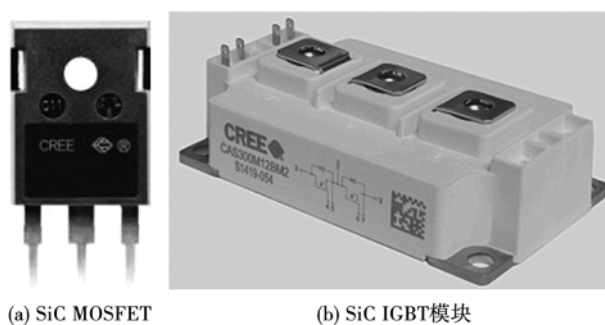


图 4 部分 SiC 功率器件封装图

Fig. 4 Package schematic of several WBG power devices

1.2 SiC 功率器件类型

1.2.1 SiC 功率二极管

SiC 功率二极管主要有三种类型: 肖特基二极管 (schottky barrier diode, SBD)、PiN 二极管和结势垒控制肖特基二极管 (junction barrier schottky, JBS)^[3-5]. SiC JBS 二极管在采用 SiC 材料的基础上, 结合了肖基特二极管和 PiN 二极管的优良特性, 有效地解决了肖基特二极管的反向耐压问题, 具有高耐压、大电流密度、正向压降小、高温漏电小、开关速度快等特点, 能够在开关速度和软快恢复特性之间取得很好的平衡, 是目前较理想的高频整流器件. SiC 功率二极管的耐压可以达到 1 700 V, 额定电流可以达到 50 A^[3].

1.2.2 SiC MOSFET

SiC MOSFET 作为新型的半导体功率元器件, 其最明显的优点是, 驱动电路简单及与现有的功率器件驱动电路的兼容性. 目前比较先进的 SiC MOSFET 结构有: 双外延 (DEMOSFET) 结构、注入外延 (IEMOSFET) 结构、积累沟道 (ACCUFET) 结构. SiC 功率 MOSFET 面临的两个主要挑战是栅氧层的长期可靠性问题和沟道电阻问题. 目前应用较多的 SiC

MOSFET,其额定电压可达到 600 ~ 1 700 V,额定电流可以达到 60 A^[3-5]。

1.2.3 SiC IGBT

由于受到制造工艺技术的制约,SiC IGBT 的起步比较晚。高压 SiC IGBT 面临两个挑战:沟道缺陷导致的可靠性以及电子迁移率问题^[3-5]。经过科技人员的多年努力,已研制出超过 13 kV 的 N 沟道 SiC IGBT 器件,比导电阻达到 $22 \text{ m}\Omega \times \text{cm}^2$ 。SiC IGBT 综合了功耗低和开关速度快的特点,相对于 SiC 的 MOSFET 以及硅基的 IGBT、晶闸管等器件具有显著的技术优势,尤其是在 10 kV 以上的高压领域。目前,应用较多的 SiC IGBT 的额定电压一般为 1 200 V 和 1 700 V,其半桥模块的额定电流一般为 100 ~ 300 A^[3-5]。

2 WBG 功率器件的发展和应用

2.1 WBG 功率器件的发展状况

1992 年,美国北卡州立大学功率半导体研究中心首次研制成功阻断电压 400 V 的 6H-SiC SBD;2001 年,SiC SBD 开始进入商业化阶段。21 世纪初,美国国防先进研究计划局启动了宽禁带半导体技术计划,极大地推动了宽禁带半导体技术的发展,同时在全球范围内引发了激烈的竞争。欧洲 ESCAPEE 和日本 NEDO 也迅速开展了宽禁带半导体技术的研究^[3-5]。2014 年,奥巴马政府宣布正式成立“下一代电力电子制造创新学院”,美国能源部将在 5 年内投资 7 000 万美元,推动 NGPEMII 致力于发明和制造具有成本竞争力及比现有硅技术强大 10 倍的 WBG 半导体功率器件。

国内一直在跟踪国外宽禁带半导体材料和器件的发展,相关研究持续得到了国家 973 计划和 863 计划的大力支持,也启动了宽禁带半导体的基础研究工作。在 SiC 器件新结构、击穿机理、结终端技术等方面作了大量工作,已具备自主生长 SiC 外延的能力,形成了集 SiC 晶体生长、器件结构设计以及制造等方面的研发力量。

2.2 WBG 功率器件的应用情况

与硅半导体相比,WBG 半导体可以在更高的电压、工作频率和功率密度条件下运行。WBG 半导体比硅半导体有更大的热耐受性,减少了功率器件所需的笨重的绝缘和附加冷却设备。现有的研究表明,采用 WBG 功率器件的逆变器,体积可以减小 1/3 ~ 2/3,综合性能大幅度提高。

由于 WBG 功率器件优异的综合性能,首先应用于微波等军事领域,目前已经在众多领域得到应用,

如输电系统、电力机车、混合动力汽车、光伏逆变器、白色家电、服务器等。WBG 功率器件正逐步展现出其在性能和降低系统成本方面的综合优势,已成为下一代电力电子器件的主要发展方向。

2.3 WBG 功率器件在弧焊逆变电源中的应用

WBG 功率器件可以满足新一代高性能弧焊逆变电源对紧凑体积、高温、高功率密度、高压、高频以及抗辐射等恶劣条件的新要求。采用 WBG 功率器件能够进一步推动弧焊电源的节能、省材、环保效果。

目前,WBG 功率器件的价格要比硅功率器件昂贵不少,这也导致对成本极其敏感的焊接产业界对其关注度较低。但随着其制造工艺的飞速发展,WBG 功率器件的价格也在快速下降,会在较短的时间内逐步接近硅功率器件的价格水平,同时综合考虑到它在降低系统体积、减少原材料耗费以及功耗等方面的优势,WBG 功率器件在弧焊逆变电源的广泛应用将是大势所趋。

3 新一代 WBG 弧焊逆变电源关键问题

近几年来,华南理工大学焊接电源课题组在深圳鹏源电子有限公司以及国家自然科学基金和省市科技计划的大力支持下,开展了基于 WBG 功率器件的新一代焊接电源的研究工作。课题组从器件的安全性、回路工作的稳定性、焊接过程稳定性以及工艺适应性等几大方面入手,在功率器件建模、拓扑结构优化以及原型机研制等方面已取得初步成果,开发 8 kW 级的弧焊逆变电源原型机,积累了一定的研发经验^[2,6]。从现有的研究来看,要实现 WBG 弧焊逆变电源的可靠运行和成功应用,还需要重点解决如图 5 所示的几大关键科学和技术难题。

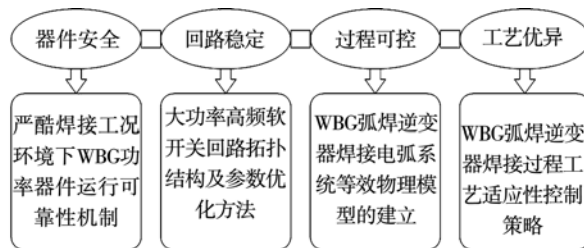


图5 WBG 弧焊逆变器的几大关键问题

Fig. 5 Several key issues of WBG arc welding inverter

3.1 严酷焊接工况下 WBG 功率器件运行可靠性

弧焊逆变电源需要在高压、大电流、强功率甚至频繁高空载-短路燃弧的严酷工艺环境下长时间工

作, WBG 功率器件要经受高电压、大电流、高温、高频率、以及很高的 di/dt , du/dt 等多参数复杂应力的共同作用, 它们的运行可靠性已成为 WBG 器件可否成功应用于弧焊逆变电源所需解决的首要关键问题。

相比硅功率器件, WBG 功率器件的正向导通曲线与反向恢复曲线存在明显差异。为此, 需要深入地研究 WBG 功率器件的动态行为特征, 主要包括通态特性、阻态特性和开关过程^[6,7]。在此基础上, 深入探索 WBG 功率器件在高频电磁脉冲能量作用下的损耗分布。进一步建立 WBG 功率器件的电气模型, 进行动态电热耦合的仿真研究, 从而为拓扑结构和驱动电路的优化设计奠定基础。

3.2 WBG 弧焊逆变电源功率回路优化设计

由于 WBG 功率器件基本不存在电导调制效应, 在软开关换流过程主要受到寄生电感效应和寄生电容效应的影响, 其开关频率更高, 软开关换流回路的变换频率可远远超过目前 MOSFET 或者 IGBT 全桥逆变器。因此, 为充分利用 WBG 的优势, 需要研究合理的软开关换流拓扑结构^[2,6,7]。WBG 换流过程涉及电、热、磁等复杂应力等不同时间尺度多变量之间的强耦合, 开关变换频率越高, 电磁能量作用的相互影响就越复杂, 对换流器件类别、参数设计、功率回路结构、线路布局等提出了严苛的要求, 实现其优化设计成为要解决的第二个关键问题。

3.3 WBG 弧焊逆变电源-电弧系统等效物理模型

现有的通用型“弧焊电源-电弧系统”物理模型是建立在传统弧焊电源输出特性和控制特点的基础上^[1], 相比目前的 MOSFET 或者 IGBT 弧焊逆变电源, WBG 弧焊逆变电源具有更高的逆变频率、更小的回路时间常数以及更快的动态响应性能。在高速精密数字化控制条件下, 它的输出特性可以任意调节和切换, 实现多种波形的柔性输出。这些特点对 WBG 弧焊电源-电弧系统的等效物理模型的建立带来了新的挑战, 这也是 WBG 弧焊逆变电源推广应用必须要解决的关键科学问题之一。

3.4 WBG 弧焊逆变电源焊接工艺适应性控制策略

焊接工艺过程的适应性控制, 其本质在于如何确保焊接电源-电弧系统的过程稳定性。焊接电弧是一个将电能转换成热能、光能、机械能的过程, 开展基于焊接电弧设计的工艺优化至关重要。例如静特性曲线可以实现下降特性、水平特性和上升特性, 因此在改变焊接工艺方法或某一工艺过程的不同阶段时, 其特性曲线应匹配变化。为确保焊接过程稳定, 弧焊电源的输出特性也要相应的动态调节, 才有可能获得稳定的焊接过程。由于数字化控制的 WBG

弧焊逆变电源的输出特性可以任意柔性调节, 因此采用何种控制策略来确保弧焊逆变电源能够适应焊接电弧的特点, 实时调节其输出特性和工艺参数也是 WBG 弧焊逆变电源研制以及推广应用过程中需要解决的关键科学和技术问题。

4 结 论

(1) WBG 功率器件具有高击穿电场强度、耐高温、强抗辐射能力等特点, 是下一代高性能弧焊逆变电源的理想功率器件。

(2) 研制成功稳定可靠、性能优异的 WBG 弧焊逆变电源, 还需要对 WBG 功率器件的可靠性运行机制、功率回路结构优化、能量变换过程的稳定性以及焊接工艺的适应性等关键科学和技术问题进行深入研究。

(3) WBG 功率器件制备技术的不断成熟及其迅速降低的成本将极大地推动 WBG 弧焊电源的高速发展和广泛应用, 实现焊接电源的更新换代。

参考文献:

- [1] 黄石生. 弧焊电源及其数字化控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [2] 王振民, 冯允樑, 冯锐杰, 等. 基于 ARM 的全数字多功能方波逆变焊机[J]. 焊接学报, 2014, 35(4): 33-37.
Wang Zhenmin, Feng Yunliang, Feng Ruijie, *et al.* Full digital multi-function square wave welding inverter based on ARM[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(4): 33-37.
- [3] CREE 公司[DB/OL]. <http://www.cree.com/>, 2016-03-16.
- [4] Hefener A, Ryu S, Hull B, *et al.* Recent advances in high-voltage high-frequency silicon-carbide power devices[C]//IEEE Industry Applications Conference, 2006: 330-337.
- [5] Bhatnagar M, McLarrty P K, Baliga B J. Silicon-carbide high-voltage schottky barrier diodes[J]. IEEE Electron Device Letters, 1992, 13(10): 501-503.
- [6] 陈延明, 王会雄, 王振民, 等. 一种全桥 LLC 软开关焊接电源[J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 9-13.
Chen Yanming, Wang Huixiong, Wang Zhenmin, *et al.* An full-bridge LLC soft switch welding power source[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(5): 9-13.
- [7] 王瑞超, 薛家祥. 软开关弧焊逆变电源动特性分析[J]. 焊接学报, 2012, 33(10): 17-21.
Wang Ruichao, Xue Jiaxiang. Dynamic performance analysis of soft-switching arc welding inverter[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(10): 17-21.

作者简介: 王振民, 男, 1974 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要从事现代焊接电源及其过程控制方面的科研和教学工作。发表论文 50 余篇。Email: wangzhm@scut.edu.cn

通讯作者: 张 琴, 女, 博士, 讲师。Email: cszhanqq@suct.edu.cn