

新型宽带 SiC 功率器件在电力电子中的应用

王莉 朱萍

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016)

摘要:新型宽带 SiC 功率器件由于其突出的性能优势在电力电子领域得到了广泛应用。首先介绍了 SiC 功率器件的发展现状,其次阐述了其性能特点,最后给出了 SiC 功率器件目前在新能源、民用输配电、航空航天等场合的应用情况,指出了 SiC 器件在电力电子领域的应用前景。

关键词:电力电子与电力传动;SiC 功率器件;宽带半导体器件

中图分类号: TN325.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2014)04-0524-09

Overview of Application of SiC Power Devices in Power Electronics

Wang Li, Zhu Ping

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Thanks to outstanding performance advantages, the new broadband semiconductor power devices have been widely used. This paper presents the development status of SiC power devices and its main characteristics. The applications of SiC power devices in the new energy, the civil power transmission and distribution, and the aerospace are generalized. Besides, the application prospect for SiC power devices is also pointed out in the field of power electronics.

Key words: power electronics and power drives; SiC devices; broadband semiconductor power devices

目前随着电力电子技术的迅猛发展、能源问题的日益突出以及人们对降低环境负荷要求的不断提高,常规的功率器件已经无法满足上述要求。以 SiC 和 GaN 为典型代表的新型宽带功率半导体器件因其突出的性能优势而逐渐为人们重视,已然成为众多研究机构和公司的研究热点。其中, SiC 技术由于具有较高的成熟度及可靠性而逐渐被认可和接受,其制成的功率管也在众多场合得到应用,如光伏逆变器、风力发电、混合动力/全电汽车等。除了以上新能源应用领域,目前 SiC 功率器件在民用输配电和航空航天中也有重要的应用研究。而 GaN 功率管近几年也同样成为了研究热点。

本文首先通过新型宽带半导体材料与 Si 等常规材料特性的对比,说明了宽带半导体材料的突出

优势,其次介绍了 SiC 功率器件的发展现状,综述了其目前在新能源领域、民用输配电领域和航空航天领域的研究及应用情况,并指出了 SiC 功率器件在电力电子应用中的发展前景。

1 SiC 功率管的发展现状和发展趋势

1.1 新型宽带半导体材料的物理特性

纵观半导体材料的发展史,通常将 Si 和 Ge 称为第一代半导体材料;而发展于 20 世纪 60 年代的 GaAs, AlAs 及其他合金等为第二代半导体材料^[1]。但随着电子技术的迅猛发展,常规半导体材料(如 Si, GaAs 等)制成的功率半导体器件的特性受到材料自身的限制,如高压 (> 600 V) 下 Si MOSFETs 的导通电阻受到 Si 材料绝缘击穿场

基金项目:国家自然科学基金(51277093)资助项目。

收稿日期: 2014-02-10; **修订日期:** 2014-03-15

作者简介:王莉,女,1969 年 4 月生,教授,博士生导师;研究领域:电力电子与电力传动、新型功率电子器件及应用、航空航天电源系统;在国内外科技刊物发表论文 40 余篇,获省部级二等奖三项,三等奖两项,已授权国家发明专利 8 项。

通信作者:王莉, E-mail: liwang@nuaa.edu.cn.

强的制约而达到极限,已经无法适应功率电子器件在高温、高频、大功率、强辐射等极端环境下的工作。因而继第一代和第二代半导体材料以后,人们

把目光投向了 SiC, GaN 等第三代宽带隙高温半导体材料。表 1 和图 1 是 Si, GaAs, SiC, GaN 及金刚石材料物理特性参数的比较说明^[2]。

表 1 常用半导体材料物理特性参数对比

Tab. 1 Parameter comparison of commonly used semiconductor materials

材料物理特性参数	带隙/ eV	相对介电常数	绝缘击穿场强/ (MV · cm ⁻¹)	电子饱和漂移速度/ 10 ⁷ (cm · s ⁻¹)	电子迁移率/ (cm ² · Vs ⁻¹)	热导率/ (W · cm ⁻¹ · K ⁻¹)
Si	1.12	11.9	0.30	1.00	1 500	1.50
GaAs	1.43	13.1	0.40	1.00	8 500	0.46
6H-SiC	3.03	9.66	2.50	2.00	500	4.90
4H-SiC	3.26	10.10	2.20	2.00	1 000	4.90
GaN	3.39	9.00	2.00	2.20	1 250	1.30
金刚石	5.45	5.50	1.00	2.70	2 200	22.00

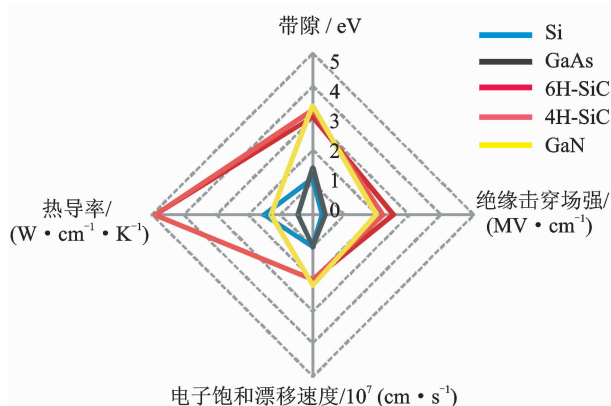


图 1 常用半导体材料主要物理特性对比

Fig. 1 Physical property comparison of commonly used semiconductor materials

由表 1 和图 1 可以看出 SiC 和 GaN 半导体材料的物理特性主要有以下优点^[1]:

(1) 3 倍于 Si 的禁带宽度大大降低了 SiC, GaN 器件的泄漏电流,并使 SiC, GaN 器件均具有抗辐照的特性,尤其适合应用在航天领域。此外由于 SiC 材料本身的耐高温特性, SiC 功率器件在高温应用场合具有独特的优势。理论上, SiC 功率器件的工作温度可以达到 600 °C, 比 Si 器件的工作温度范围大很多。

(2) 10 倍于 Si 的绝缘击穿电场大大提高了 SiC 和 GaN 功率器件的耐压容量、工作频率及电流密度,同时也大大降低了器件的导通损耗。

(3) 2 倍于 Si 的电子饱和和漂移速度使得 SiC 和 GaN 功率器件可以工作在更高频率下。

(4) SiC 3 倍于 Si 的热导率使它具有优良的散热性,有助于提高 SiC 功率器件的功率密度和集成度。值得注意的是, GaN 材料的热导率与 Si 材料的热导率相比并不具有任何优势。

可见, SiC 材料具有 Si 材料所无可比拟的性能

优势,其制成的 SiC 功率管更适用于高温、高压、大功率等恶劣环境中,能够满足电力电子技术迅猛发展的需要。

1.2 新型宽带功率半导体器件的发展

从 20 世纪 50 年代初开始使用的功率二极管到目前大量普及的 Si MOSFET, IGBT, BJT 等,功率半导体器件在电力电子应用领域已得到了广泛应用。从功率管的电压等级和导通电阻参数来看,目前市场上已有高达 1 200 V 的 Si MOSFETs, 以及电压等级更高的 Si IGBT。但高压 (>600 V) 条件下常规的 Si 功率管普遍存在导通电阻较大的问题,从而导致使用过程中损耗增加、对散热条件的要求增加。而目前典型的 SiC, GaN 功率管相比 Si 功率管在导通电阻、工作频率等方面性能突出,并且随着电压等级的增加, SiC 功率半导体器件在导通电阻这一性能上具有 Si 功率管无可比拟的巨大优势。从目前发展情况来看, SiC 及 GaN 功率管分别在高压和低压领域具有较大发展潜力,电压等级分界在 600~900 V^[3]。

由于其突出的性能优势,新型宽带半导体材料及其制成的功率管受到了越来越多的关注。例如国内外已经有大量研究机构和公司(如 CREE, Infineon, ROHM 等)致力于 SiC 功率管的研发和生产,现有的 SiC 功率半导体器件的主要生产公司如图 2 所示,发展较为成熟的 SiC 器件主要有 SiC Diode, SiC JFET, SiC MOSFET, SiC BJT。从图 2 可以看出目前 SiC 功率器件的商用产品主要仍然集中在 600~1 200 V 的电压等级。当然也有对超高压 SiC 功率管的研究,如北卡州立大学, CREE 公司, Powerex, GE, 瑞士苏黎世理工学院等目前正在研究 10 kV 左右的高压大功率 SiC 功率管^[4]。

此外,根据法国市场调研公司 Yole Development 公司 2013 年发布的 SiC 电力电子器件市场

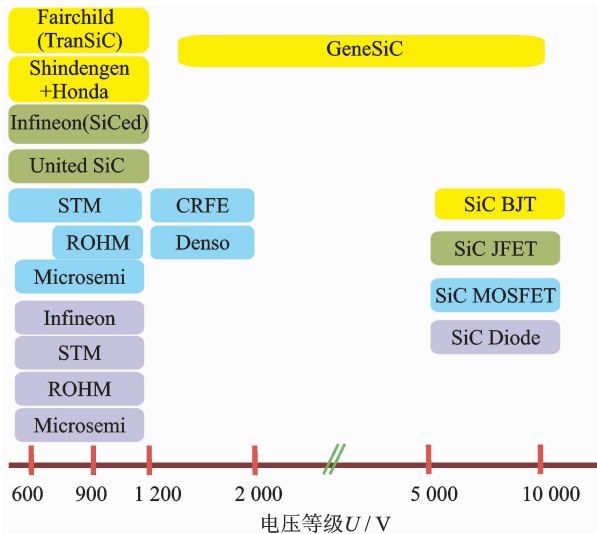


图2 SiC电力电子器件现有商用产品及主要生产公司

Fig.2 Commercial SiC power devices and their main production company

的预测, SiC功率器件将遍布低压、中压及高压范围(300~6 600 kV+) [3], 并广泛应用于光伏、风力发电、节能建筑、智能电网、高压输配电和电能变换、电机控制、混合动力汽车、轨道交通、以及航空航天等诸多方面。在这些应用领域中, SiC器件替代Si器件可带来巨大的性能提升和经济效益。

当然, 未来SiC功率器件能否得到普及除了需要考虑其突出的性能优势, 还需要顾及其生产成本。而SiC功率器件生产时必须使用SiC衬底, 现状无疑增加了成本。SiC功率器件发展早期因为衬底由CREE公司垄断而成本较高, 且SiC衬底结晶缺陷较多使得成品率低, 导致发展初期SiC功率器件生产成本尤其高; 但随着国内外对SiC器件的愈发重视, 衬底的供应商增多且质量得到很大提升, 使得SiC生产成本一定程度上得到降低, 但是SiC器件生产成本比常规Si器件仍然高出很多。在降低SiC功率器件生产成本的研究方面, ROHM公开表示现有平面型SiC MOSFET的价格在2013年度为Si IGBT的7~10倍, 预计2016年度降到3~4倍; 而沟道型SiC MOSFET预计2016年度降到1.5~2倍 [5], 并且CREE也已经发布了低成本的SiC MOSFET。2013年10月举办的SiC国际学会“ICSCRM 2013”上, CREE公司已经生产出了6英寸晶圆制作的10 mm²的功率元件, 并且合格高达98.7% [6]; 此外, 日本Sicoxs公司也提出开发了降低生产SiC单晶基片的新方法, 该方法可将SiC器件制造成本降至原来的1/2以下 [7]。可见目前降低SiC功率器件的生产成本已经成为了国内外多家研究机构及器件生产商的共

识, SiC功率管生产成本的有效降低必将有利于SiC功率器件的普及与应用。

除了SiC功率器件, 近几年刚刚发展的GaN器件与SiC一样具有比常规功率半导体器件更突出的性能。并且, 由于GaN功率器件可以用Si作为衬底, 相比SiC功率管可以更大程度地降低成本, 从而实现更高的性价比优势。目前松下和夏普等公司均已经生产出电压等级高达600 V的GaN功率管, 美国Transphorm公司已经生产出6英寸Si基板耐压600 V的GaN功率管, 并已经开始研发和生产8英寸口径的GaN功率管。但由于发展较晚, GaN功率管短期内很难达到SiC功率管的电压等级, 但目前它的发展和性能已经足以对低压Si功率器件造成一定的冲击。

2 宽带SiC功率器件的特性

针对上文介绍的目前发展较为成熟的4类SiC功率半导体器件, 本节简要对比和说明它们的主要特性。

2.1 SiC主要功率器件分类及特点

(1) SiC Diode

- ① 反向恢复损耗低;
- ② 反向恢复损耗随温升的变化较小;
- ③ 较低的EMI。

(2) SiC JFET

① 常通型

(a) 压控常通型器件, 正常情况下功率管处于导通状态, 不易于使用;

(b) 需要施加负向偏置电压保证器件的可靠关断, 增加了系统供电的复杂程度;

(c) 相比SiC MOSFET, SiC JFET具有更高的高温可靠性。

② 常断型

(a) 压控常断型, 正常情况下功率管处于关断状态, 方便使用;

(b) 相比SiC MOSFET, SiC JFET的开通需要较高的栅极驱动电流 I_{GS} ;

(c) 相比SiC MOSFET, SiC JFET具有更高的高温可靠性。

(3) SiC MOSFET

① 压控常断型, 正常情况下功率管处于关断状态, 方便使用;

② 存在寄生的体二极管;

③ SiC MOSFET开通的条件类似正常的Si MOSFET, 但需要高达约20 V的栅极驱动电压

以实现其最优的性能;

④ 目前栅极氧化层高温可靠性较低。

(4)SiC BJT

① 电流控制常断型器件,与目前大量使用的压控型驱动电路不兼容;

② 不存在常规 Si BJT 所具有的二次击穿问题;

③ 导通电阻 R_{on} 的正温度系数和电流增益的负温度系数使得 SiC BJT 易于并联使用。

表 2 1 200 V SiC 和 Si 功率管的主要参数

Tab. 2 Main parameters of 1 200 V SiC and Si power semiconductors

类别	型号	封装	公司	额定电压	额定电流	导通电阻	工作温度
				V_{ds}/V	$I_{ds}/A(25/100\text{ }^{\circ}C)$	$R_{ds(on)}/m\Omega$	$T_j/(^{\circ})$
Si MOSFET	APT12040L2FLL	TO264	Microsemi	1 200	30 (25 $^{\circ}C$)	400	-55~150
Si IGBT	APT25GR120B	TO247	Microsemi	1 200	75/25	100	-55~150
SiC MOSFET	CMF2010D	TO247	CREE	1 200	42/24	80	-55~135
SiC JFET(off)	SJEP120R063	TO247	SemiSouth	1 200	30/20	63	-55~150
SiC JFET(on)	IJW120R070T1	TO247	Infineon	1 200	36/26	70	-55~175

2.2.1 导通电阻特性

SiC 和 Si 功率管的导通电阻特性如图 3,4 所示。

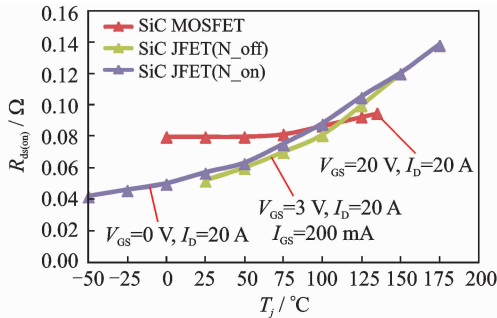


图 3 SiC MOSFET 和 SiC JFET 导通电阻

Fig. 3 Drain-source on-resistance of SiC MOSFET and SiC JFET

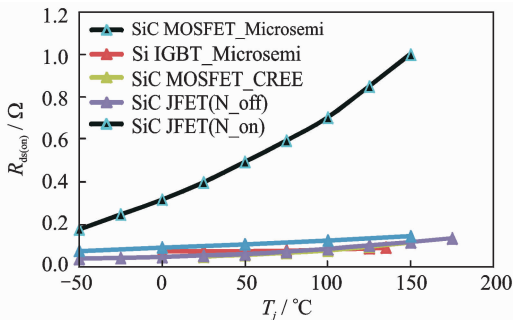


图 4 SiC 和 Si 功率管导通电阻

Fig. 4 Drain-source on-resistance of SiC and Si power semiconductors

SiC MOSFET 的 $R_{DS(on)}$ 较 SiC JFET 的 $R_{DS(on)}$ 具有更低的温度系数,温度敏感程度更低。

2.2 1.2 kV 电压等级 SiC 功率管的特性比较

为了深入研究 SiC JFET 和 SiC MOSFET 的具体特性,下文将利用现有产品的具体参数对器件的导通电阻特性、开启电压特性、转移特性、抗雪崩击穿能力、开关速度和开关损耗特性进行说明。选择电压等级为 1 200 V,电流等级约为 25 A (100 $^{\circ}C$) 的 SiC 功率器件,同时选择了相同电压电流等级的常用 Si 功率器件作为参考说明,其参数如表 2 所示。

SiC 功率管的导通电阻具有正温度系数,饱和导通时均易于并联使用。

高压 1 200 V 电压等级下, SiC 功率管的导通电阻远小于 Si 功率管的导通电阻。可见, SiC 功率管应用在高压领域时具有较低的导通损耗,可以提高能量的转换效率。

2.2.2 开启电压特性

SiC 和 Si 功率管的开启电压特性如图 5 所示。相同类型的功率管, SiC 功率管的开启电压小于 Si 功率管的开启电压;常断型 SiC JFET 的开启电压低于 SiC MOSFET 的开启电压,仅为 1.0 V 左右,驱动电路设计时需要防止其他信号干扰造成

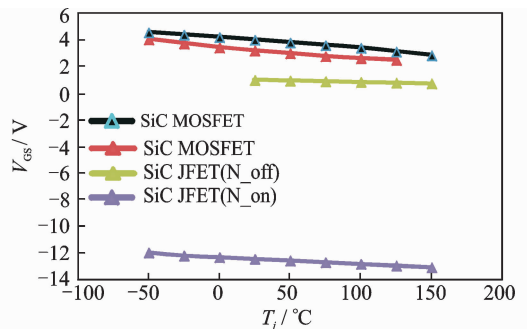


图 5 SiC 和 Si 功率管的开启电压

Fig. 5 Gate threshold voltage of SiC and Si power semiconductors

功率管误开通,尤其是高频开关应用中,较快的关断速度容易导致较大的振铃现象,从而造成功率管的误开通。

此外, SiC JFET 和 SiC MOSFET 的开启电压均具有负温度系数,高温场合使用时需采取相应的

措施以确保功率管可靠关断。

2.2.3 转移特性

SiC 和 Si 功率管的转移特性如图 6 所示。

SiC JFET 的饱和漏极电流在整个工作范围内 ($1.5 \text{ V} \leq V_{GS} \leq 3 \text{ V}$) 几乎均具有负温度系数, 因此具有较好的内在的抗瞬态电流冲击能力。

SiC MOSFET 在 $V_{GS} > 15 \text{ V}$ 左右时, 饱和漏极电流具有负温度系数; $V_{GS} < 15 \text{ V}$ 左右时, 漏极饱和电流具有正温度系数。

Si MOSFET 在 $V_{GS} > 6 \sim 7 \text{ V}$ 时, 饱和漏极电

流具有负温度系数; $V_{GS} < 6 \sim 7 \text{ V}$ 时, 漏极饱和电流具有正温度系数。

SiC MOSFET 和 Si MOSFET 在驱动电压较低并工作在线性工作区时, 由于饱和漏极电流具有正温度系数, 此时如果出现短路冲击, 将更容易导致器件的热失效, 不利于功率管的并联和安全使用。相比之下, SiC JFET 更适合应用于需要经常处理电流冲击情况的应用场合。

2.2.4 功率管的抗雪崩击穿能力

SiC 和 Si 功率管的抗雪崩击穿能力如表 3 所示。

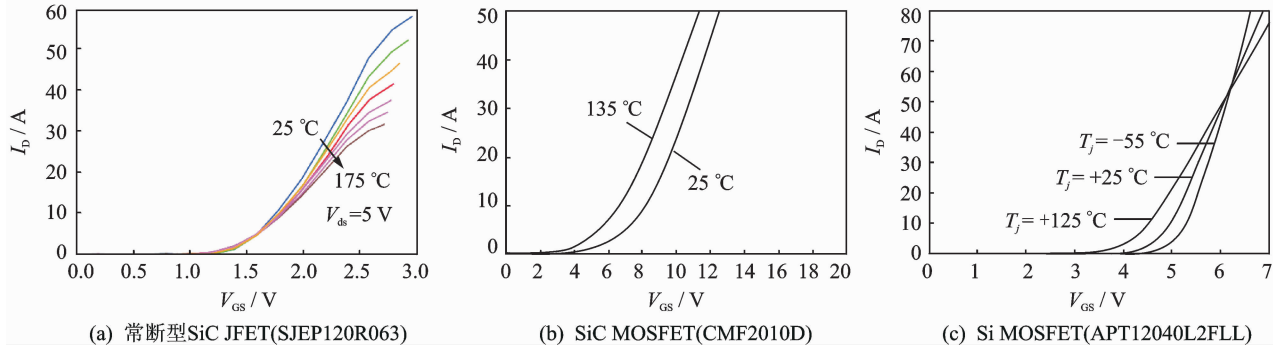


图 6 SiC 和 Si 功率管的转移特性

Fig. 6 Transfer characteristics of SiC and Si power semiconductors

表 3 SiC 和 Si 功率管的抗雪崩击穿能力

Tab. 3 Anti-breakdown capability of SiC and Si power semiconductors

类别	型号	公司	EAS/J	EAR/mJ	测试条件
Si MOSFET	APT12040L2FLL (1 200 V/30 A)	Microsemi	3.2	50	
	IPW90R120C3 (900 V/36 A)	Infineon	1.94	2.9	$I_D = 8.8 \text{ A}, V_{DD} = 50 \text{ V}$
	R6076ENZ1 (600 V/76 A)	Rohm	1.95	2.96	$I_D = 13.4 \text{ A}, V_{DD} = 50 \text{ V}$
SiC MOSFET	CMF2010D (1 200 V/42 A)	CREE	2.2	1.5	$I_D = 20 \text{ A}, V_{DD} = 50 \text{ V}$
	SCT30N120 (1200 V/30 A)	STM	1.0		$I_D = 20 \text{ A}, V_{DD} = 150 \text{ V}$

注: EAS——能承受的最大单脉冲雪崩能量; EAR——能承受的最大重复脉冲雪崩能量。

从表 3 可知, SiC 能承受的最大单脉冲雪崩能量 $EAS(\text{SiC}) \approx EAS(\text{Si})$; 最大重复脉冲雪崩能量 $EAR(\text{SiC}) \gg EAR(\text{Si})$, 因而从整体性能来看, SiC 功率管相比 Si 功率管具有更突出的抗雪崩击穿能力。

2.2.5 开关时间和开关损耗特性

SiC 和 Si 功率管的开关时间和开关损耗具体

参数分别如表 4, 5 所示。

从表 4 和表 5 的相关数据可以看出, 1 200 V 电压等级下的 SiC 功率管较 Si 功率管在总开关损耗及开关时间上均有较大的降低。可见, SiC 功率管更适合高压高频应用领域, 有利于增加开关频率、降低系统损耗、减小变换器中无源元件的体积

表 4 1 200 V 电压等级 SiC 和 Si 功率管的开关损耗

Tab. 4 Switching loss of 1 200 V SiC and Si power semiconductors

类别	型号	公司	开关损耗/			测试条件
			开通损耗/ μJ	关断损耗/ μJ	总开关损 耗/ μJ	
Si MOSFET	APT12040L2FLL	Microsemi	1 265	1 147	1 412	$V_{DD} = 600 \text{ V}, I_D = 30 \text{ A}$
Si IGBT	APT25GR120B	Microsemi	742	427	1 169	$V_{DD} = 600 \text{ V}, I_C = 25 \text{ A}$
SiC MOSFET	CMF2010D	CREE	110	150	260	$V_{DD} = 800 \text{ V}, R_G = 7.5 \Omega, I_D = 10 \text{ A}$
SiC JFET(off)	SJEP120R063	SemiSouth	131	222	353	$V_{DD} = 600 \text{ V}, I_D = 24 \text{ A}$
SiC JFET(on)	IJW120R070T1	Infineon	340	210	550	$V_{DD} = 800 \text{ V}, R_G = 7.5 \Omega, I_D = 10 \text{ A}$

表 5 1 200 V 电压等级 SiC 和 Si 功率管的开关时间
Tab. 5 Switching time of 1 200 V SiC and Si power semiconductors

类别	型号	公司	开通时间/ns	关断时间/ns	测试条件
Si MOSFET	APT12040L2FLL	Microsemi	35	91	$V_{DD}=600\text{ V}$, $I_D=30\text{ A}$
Si IGBT	APT25GR120B	Microsemi	26	142	$V_{DD}=600\text{ V}$, $I_C=25\text{ A}$
SiC MOSFET	CMF2010D	CREE	64	78	$V_{DD}=800\text{ V}$, $I_D=20\text{ A}$
SiC JFET(off)	SJEP120R063	SemiSouth	27	65	$V_{DD}=600\text{ V}$, $I_D=24\text{ A}$

与成本。

从上文对 SiC 及 Si 功率管主要特性的比较说明可以看出,高压等级下的 SiC 功率管相比 Si 功率管具有非常突出的性能优势;常断型 SiC JFET 相比 SiC MOSFET 及常用的 Si MOSFET 和 Si IGBT 等性能突出,可靠性更高(如饱和漏极电流的负温度系数、更高的高温可靠性等)。

3 宽带 SiC 功率器件的应用

目前,能耗系统中很大部分电能均消耗在电力变换和电力驱动中,面对能源日益紧张的现状,降低系统能耗及开发新能源已经成为了实现可持续发展的迫切需求。SiC 功率管由于具有耐高温、耐高压、低损耗的特点而能够满足降低能耗的目标。例如,在开关电源应用领域中, SiC SBD 由于其优异的反向恢复特性已得到广泛应用。SiC 晶体管在 UPS 和 PFC 领域也有大量的应用研究,美国的 CREE 公司基于 SiC 功率器件研制了 500 W 的 PFC,相比使用 Si 功率管该 PFC 的效率增加了 2%,等效为损耗降低了 24%^[8]。可见, SiC 功率器件应用在开关电源中可以显著提高工作效率,降低系统中无源元件的重量和成本,有助于实现开关电源的小型化和系统能耗的降低。

此外, SiC 功率管应用于新能源、民用电网变电和输电、航空航天车辆等领域时也有不俗的表现,实现了提高效率、减小体积重量、提升系统性能及降低能耗等目的。

3.1 SiC 功率器件应用在新能源领域

3.1.1 光伏逆变器

从目前 SiC 功率器件在整个电力电子领域的应用情况看,可再生能源领域是 SiC 功率管器件未来应用和发展的重要市场。在光伏逆变器应用中,德国 Fraunhofer 研究所已经利用 SiC MOSFETs 替代 1 200 V 的 Si IGBTs 研制出了 7 kW 750 V 的三相光伏逆变器,该光伏逆变器转换效率提升至 99.05%,损耗减小 30%~50%^[8],从而达到缩小电感电容体积、降低生产成本、增加功率密度、实现小型化的目标。日本富士电机将 SiC MOSFET 与

SiC SBD 结合制成全 SiC 功率模块,并将其应用于光伏逆变器,可以实现在高温(200 °C)下的突出性能,且循环寿命高达基于 Si 功率器件的光伏逆变器的 50 倍,开关损耗降低了 80%,效率可达 99.0%^[9]。此外,卡塞尔大学分布式电力技术(KDEE)资质中心与 Fairchild 等共同合作也将 SiC BJT 应用于了光伏逆变器中,同样实现了系统体积的减小和转换效率的提高^[10]。

虽然目前 SiC 功率器件的生产成本相对较高,但从目前的发展情况看, SiC 功率器件应用于可再生能源中节能创造的经济效益完全能够弥补 SiC 器件增加的成本。

3.1.2 混合动力/电动汽车

由于目前能源及环境问题的日益突出,发展混合动力/电动汽车已经成为了汽车行业发展的共识,且早在 2005 年日本丰田就已经推出了世界首款批量生产的混合动力汽车丰田普锐斯。由于 SiC 具有更好的耐高温性能,可应用于高温环境;并且 SiC 功率器件的能量损耗较 Si 低(尤其是在高压条件下),发热量相对更低,从而可以简化散热装置和散热条件,因此在混合动力/电动汽车的应用领域中, SiC 在驱动电动/混合动力汽车电机的逆变器及电池接口中大有用武之地^[11-12]。密西西比州立大学的先进车载系统研究中心将 SiC JFET 和 SiC 肖特基二极管作为开关应用于丰田普锐斯,建立了等效模型并验证了其提高开关速度和效率,降低散热条件的可能性^[11]。美国橡树岭国家实验室也针对 SiC 器件应用于普锐斯中的性能进行了分析,研究结果表明混合动力汽车应用 SiC 器件可以带来电池组体积降低 29.5%、逆变器功耗降低 80.3%、系统效率可以提升 21.3%等一系列优点^[12]。而 2013 年 ROHM 也公开表示其 SiC 二极管已被用于纯电动汽车用充电器,并且纯电动汽车和插电式混合动力车的车载充电器也开始采用 SiC 二极管。可见,使用 SiC 功率器件可以提升系统效率,增大混合动力/电动汽车的电流密度、降低 IPM 的体积,增加开关速度降低无源元件的体积。

此外,在车辆轨道交通方面, SiC 功率器件也

将具有较好的应用前景。ROHM 公司 2013 年发表声明表示欧洲铁路车辆厂商正在讨论采用 SiC 功率元件。并且,由于 SiC 功率器件突出的耐高温性能优势,北约的 MW 级全电战车计划中提出使用 SiC 功率管来解决战车中的高温需求^[13]。图 7 是北约 TR-AVT-047 全电战车计划中给出的车用 30 kW 200 °C 高温整流桥,其中使用了 SiC 功率管。

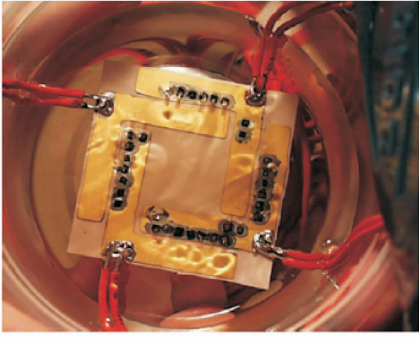


图 7 车用 30 kW 200 °C 高温整流桥^[13]

Fig. 7 High temperature automotive rectifier bridge (@30 kW, 200 °C)

3.1.3 风力发电

除了光伏逆变和混合动力汽车/电动汽车,风力发电系统作为可再生能源领域之一,SiC 功率器件也将具有广阔的应用前景。瑞士苏黎世理工学院已经针对海上风力发电和高压传输的需求研制了基于 SiC JFET 的 12 kV /1 MW 双向直流变换器,效率相比采用 Si IGBT 提高了 2%^[14]。此外,波兰哥但斯克工业大学研制了基于 SiC JFET 和 SiC SBD 的 DC-AC-DC 变换器,相比采用 Si 器件该变换器功耗降低为原先的 1/3,并大大提升了效率^[15]。美国橡树岭国家实验室也开展了 SiC 功率管在风力发电系统中的应用,并将 SiC MOSFET 代替 Si IGBT 应用在风力系统变换器中,平均效率达到 97.8% (提升了 4.3%),损耗降低了 58.4%^[16]。因此,SiC 功率管应用在风力发电系统中同样可以取得较好的应用效果。

3.2 SiC 功率器件应用在民用电网变电和输电领域

SiC 器件替代 Si 器件应用于民用电网输配电时,由于其较低的导通电阻性能可减少高压输电的损耗,减小体积重量。

Northrop Grumman, GeneSiC, Powerex 公司及弗吉尼亚理工大学共同合作,已于 2007 年研制出了 10 kV 的 SiC MOSFET 和 JBS 二极管组成的半桥功率模块,其应用在 13.8 kV/2.7 MVA 的固态变压器 (SSPS) 中可以达到降低损耗、提升

SSPS 效率的目的^[17]。目前,北卡州立大学和一些公司也正在研究基于 10 kV SiC 功率器件的固态变压器。其中美国 CREE 和 Powerex 以及 GE 公司已经联合研制了 10 kV/10 A SiC MOSFET 和 10 kV/120 A SiC 半桥 MOSFET 功率模块,并基于 10 kV/120 A 功率模块研制了 13.8 kV/1 MVA 固态变电站^[18],如图 8 所示。使用 SiC 功率器件后,SSPS 重量下降 75%,体积减小 40%。

此外,直流固态断路器是柔性直流输电的关键部件之一,将 SiC 功率器件应用于固态断路器 (SiC-SSCB) 中可以提供更快速、可靠的故障保护能力,并且减小体积重量,是目前很具有研究价值的关键问题之一。



图 8 基于 SiC 的 13.8 kV/1 MVA SSPS^[18]

Fig. 8 13.8 kV/1 MVA SSPS based on SiC devices

3.3 SiC 功率器件应用在航空航天领域

在航空航天领域,美国第三代多电飞机计划中提出的功率变换和分配单元主要使用 SiC 功率器件^[19]。而考虑到航天应用环境中多重能离子的特殊性,对设备及器件具有抗辐照要求,SiC, GaN 等宽带半导体材料功率器件因其具有优良的抗辐照特性具有非常好的应用前景。从多电飞机的需求出发,法国航空发动机制造公司 Safran 将 Si IGBT 与 SiC SBD 结合研制了 2 kW 的航空逆变器,开关损耗减小了 45%,增加了效率^[20]。诺丁汉大学将 SiC SBD 应用于航空矩阵逆变器,同样达到了降低开关损耗,增大开关频率,提升系统效率^[21]的目的。

此外,由于航空、航天和车辆运载工具中电源系统呈现大功率、高电压的发展趋势,常规的机械式直流断路器开关过程中(尤其是高压条件下)易产生电弧,可靠性和寿命低,噪声干扰大,通常为了

避免拉弧而采取真空消弧装置。对于航空、航天等飞行器、装甲车、舰艇等空间有限、工作环境复杂恶劣场合,要求直流断路器体积小、重量轻、高可靠、长寿命和低噪声。而具有无弧无触点、寿命及可靠性高的固态保护开关比较适合航空航天领域的应用需求。由于高压条件下 SiC 器件比 Si 具有更低的导通电阻、更好的耐高温能力等优势而更适用于高温高压大功率和高可靠性要求的场合。因而,基于 SiC 功率器件的固态保护开关也非常具有研究价值。

从目前的应用状况看来,无论是民用领域,还是对器件性能和可靠程度要求更高的航空航天军事应用领域,SiC 及 GaN 功率管都已逐渐开始涉足并带来了较大的性能提升,新型宽带功率半导体器件在未来必将得到广泛应用。

3.4 SiC 功率器件应用中存在的问题及研究热点

目前,新型宽带 SiC 功率器件的发展仍存在以下问题:

(1)生产工艺的限制:由于生产过程中受到外延、掺杂、挖槽、封装等工艺的限制(SiC MOSFETs 还存在栅极氧化层长期工作稳定性的问题),SiC 功率器件在高温、高可靠性要求的电力电子装置中的应用受到严重影响,因此 SiC 功率器件生产工艺的限制是制约器件性能提升的主要原因之一。在目前现有商用 SiC 功率器件性能的前提下,应用研究者应权衡系统各项性能要求选用合适的器件。

(2)较高的生产成本:目前 SiC 功率器件必须使用 SiC 材料作为衬底,使 SiC 功率器件的成本较 Si 功率器件高出很多,这也是目前制约着 SiC 功率器件在民用电力电子领域大量普及的主要原因之一,而如何通过提高晶元尺寸及合格率等方式降低生产成本也是未来需要进一步研究和解决的问题。

SiC 功率器件在电力电子中的应用主要有以下研究热点:

(1)SiC 功率器件特性的分析与建模研究:SiC 材料与 Si 材料性质的较大差异导致了 SiC 功率器件的特性与 Si 功率器件存在一定区别, SiC 功率器件应用于电力电子装置中时必须对其特性进行分析,以降低器件使用的失效率,提高设备的性能与可靠性;而对功率器件的建模研究有助于研究者对器件特性进行深入分析,简化设计流程、优化 SiC 器件的应用。

(2)SiC 功率器件驱动电路的设计:SiC 功率器件取代 Si 功率器件应用于成熟的电力电子装置时必须考虑其驱动的兼容性。在满足设备性能需求

的前提下现有的商用 SiC MOSFETs 可以较好地兼容 Si MOSFETs/ IGBTs 应用场合。某些常断型 SiC JFET 使用时需要提供足够的驱动电流,并且驱动电压可控范围较窄,在需要精确控制驱动电压数值的电力电子装置中有必要进一步设计驱动电路。而常通型 SiC JFET 正常处于导通状态,不适合直接应用在需要可靠关断的场合,使用时驱动电路必须额外增加负向偏置电源以保证可靠关断。目前,IXYS 公司已经生产出较为成熟适合 SiC JFET 使用的驱动芯片。

(3)高频磁元件技术的研究:研究表明现有的商用 SiC 功率器件适用于高频场合,并能够大大提升系统性能。由于功率管使系统开关频率的增加成为了可能,系统对磁性元器件如高频变压器和功率电感元件等的性能也提出了更高的要求:高频化、高可靠性。但从目前的发展情况看,无论是磁芯材料的选择、磁芯生产制造工艺,还是变压器和电感的结构设计、性能优化等,都有待深入的研究。

(4)拓扑的优化与创新:SiC 功率器件的使用旨在提升系统性能、满足恶劣环境的要求,而如何通过电力电子装置拓扑的优化来实现 SiC 功率器件突出的性能优势也是应用研究者需要特别关注的一大问题。

(5)SiC 功率器件的装配研究:SiC 功率器件可以应用于高温、高压、大功率场合,满足了航空航天器电源系统等功率容量不断增加的需求。但系统功率容量的增加也带来了大功率器件热设计的问题。如何通过热设计优化系统散热结构,提高散热能力,减小散热重量和体积是需要关注的,也是确保器件和设备安全可靠运行的必要条件。

(6)其他元器件的耐高温性能研究:虽然受限于封装工艺商用 SiC 功率器件的最高结温无法达到理论高温水平,但研究表明 SiC 功率器件的裸片已经可以应用于高温场合。若要保证整个系统都能在高温条件下正常运行,设备中的其他元器件也需要能够适应相应的恶劣环境,因此提高系统中其他元器件的耐高温水平也是值得研究者关注的问题。

4 结束语

由于电力电子应用领域环境要求的不断提高,相比常规 Si 功率器件新型宽带 SiC、GaN 功率器件的优势越发明显。本文结合 SiC 和 GaN 材料的物理特性,简要分析了典型的 SiC 和 Si 功率器件特性,主要介绍了 SiC 功率管的发展现状,及其在新能源、民用输配电、航空航天车辆领域的应用情

况。目前 SiC 功率管应用在上述场合具有大大提升设备性能、降低损耗、减小体积和重量,简化散热条件、抗辐照等诸多优点。但同时也带来了诸多新的问题及挑战,如适用于高压直流电网的具有灭弧功能的高可靠性配电开关、耐高温的制造及封装工艺、驱动电路及拓扑的优化、系统其他元器件的性能要求的提高等。而今后 SiC 能否在各领域中得到广泛应用还将受其较高生产成本的制约,一旦其生产成本得到有效降低, SiC 功率器件必将会迅速在电力电子各相关领域迅速普及。

参考文献:

- [1] 王辉, 琚伟伟, 刘香茹, 等. 半导体 SiC 材料研究进展及其应用 [J]. 科技创新导报, 2008(1): 8-9.
Wang Hui, Ju Weiwei, Liu Xiangru, et al. Research progress and applications of SiC semiconductor material [J]. Technology Innovation Herald, 2008(1): 8-9.
- [2] 王守国, 张岩. SiC 材料及器件的应用发展前景 [J]. 自然杂志, 2011, 33(1): 42-45.
Wang Shouguo, Zhang Yan. Application development prospect of SiC material and devices [J]. Chinese Journal of Nature, 2011, 33(1): 42-45.
- [3] YOLE Development. Overview of wide band gap semiconductors in power electronics [EB/OL]. http://www.advbe.com/docs/DeciElec2013-Alexandre_AVRON_Yole.pdf, 2013.
- [4] Madhusoodhanan S, Leslie S. Comparison study of 12 kV n-type SiC IGBT with 10kV SiC MOSFET and 6.5 kV Si IGBT based on 3L-NPC VSC applications [C] // Energy Conversion Congress and Exposition (IEEE-ECCE). Raleigh, NC; IEEE, 2012: 310-317.
- [5] 日经技术在线. “还被用于车载充电器”, 罗姆介绍 SiC 功率元件开发计划和采用事例等 [EB/OL]. <http://China.nikkeibp.com.cn/news/elec/67432-20130830.html>, 2013.
- [6] 日经技术在线. SiC 基片的结晶质量逐年提高, 6 英寸产品微管密度下降至 0.01 个/平方厘米 [EB/OL]. <http://China.nikkeibp.com.cn/news/semi/68478-20131115.html>, 2013.
- [7] 日经技术在线. “可将 SiC 基片的制造成本基本减半”, 日企提出新制造方法 [EB/OL]. <http://China.nikkeibp.com.cn/news/semi/68447-20131114.html>, 2013.
- [8] CREE Inc. New SiC power devices bring power density and efficiency to the next level [EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/c020e06e25c52cc58bd6be61.html>, 2011.
- [9] Hinata Y, Horio M. SiC power devices—Present status, applications and future perspective [C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). San Diego, CA; IEEE, 2013: 604-607.
- [10] Araujo S, Menezes L, Hjort T, et al. Resurrecting the BJT: New silicon carbide BJTs enable lower system cost in a photovoltaic inverters [EB/OL]. <http://www.fairchildsemi.com/>, 2013.
- [11] Kelley R, Mazzola M S, Bondarenko V. A scalable SiC device for DC/DC converters in future hybrid electric vehicles [C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition. USA; IEEE, 2006: 4.
- [12] Zhang H, Tolbert L M, Ozpineci B. Impact of SiC devices on hybrid electric and plug-in hybrid electric vehicles [J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 2011, 47(2): 912-921.
- [13] All electric combat vehicles (AECV) for future applications [S]. RTO Applied Vehicle Technology Panel (TR-AVT-047), 2004.
- [14] Ortiz G, Biela J, Bortis D, et al. 1 Megawatt, 20 kHz, isolated, bidirectional 12 kV to 1.2 kV DC-DC converter for renewable energy applications [C] // Power Electronics Conference (IPEC). Sapporo: IEEE, 2010: 3212-3219.
- [15] Adamowicz M, Giziewski S, Pietryka J, et al. Evaluation of SiC JFETs and SiC schottky diodes for wind generation systems [C] // Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on. USA; IEEE, 2011: 269-276.
- [16] Clotea L, Forcos A, Marinescu C, et al. Power losses analysis of two-level and three-level neutral clamped inverters for a wind pump storage system [C] // Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2010 12th International Conference on. USA; IEEE, 2010: 1174-1179.
- [17] McNutt T Y, Sherwin M, Van Campen S, et al. Advanced SiC power modules for 13.8 kV power distribution [J]. Naval Engineers Journal, 2007, 119(4): 65-72.
- [18] Grider D, Agarwal A, Ryu Sei-Hyung, et al. Advanced SiC power technology for high megawatt power conditioning [EB/OL]. <http://www.cree.com>, CREE Inc, 2012.
- [19] Cloyd J S. Status of the united states air force's more electric aircraft initiative [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 1998, 13(4): 17-22.
- [20] Empringham L, de Lillo L, Khwan-On S, et al. Enabling technologies for matrix converters in aerospace applications [C] // Compatibility and Power Electronics (CPE), 2011 7th International Conference-Workshop. USA; IEEE, 2011: 451-456.
- [21] Vieillard S, Meuret R. High efficiency, high reliability 2 kW inverter for aeronautical application [C] // Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on. USA; IEEE, 2007: 1-8.

