综述·评论

SiC 功率器件应用现状及发展趋势

漆　宇，李彦涌，胡家喜，范　伟，唐　威
（中车株洲所电气技术与材料工程研究院，湖南 株洲　412001）

摘　要：典型的宽禁带半导体材料碳化硅（SiC）具备击穿场强高、饱和电子漂移速率快及热导率高等特性，能满足现代功率器件在大功率场合、高频高温工况下应用的发展需求。本文以开关电源、电动汽车、新能源发电、轨道交通和智能电网等应用领域为背景，对 SiC 功率器件的应用现状和发展趋势进行了分析。结果表明，SiC 功率器件的应用有利于变流器系统功率密度和整体效率的提升，具备替代硅材料半导体器件的潜质。

关键词：宽禁带材料；碳化硅；功率半导体器件；大功率变流器

中图分类号：TN304.2^{+}4　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**2095–3631(2016)05–0001–06

doi:10.13889/j.issn.2095–3631.2016.05.001

Application Status of SiC Power Device and Its Development Tendency

QI Yu，LI Yanyong，HU Jiaxi，FAN Wei，TANG Wei
(CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The representative wide bandgap semiconductor material-Silicon Carbide(SiC) has the characteristics of high breakdown voltage, high electron saturation velocity, high thermal conductivity,which can meet the requirements of power electronic device applied under high power, high temperature and high frequency conditions. The application status and development tendency on SiC power device was analyzed based on various application fields such as switch power supply, electric vehicle, new energy power generation, rail transit and intelligent grid,etc. The results show that SiC is benefit for the improvement of power density and efficiency of converter, and thus has the potential to replace Silicon semiconductor devices.

Keywords: wide bandgap material; SiC; power semiconductor device; high power converter

0　引言

电力电子器件及其应用装置为实现不同电能形式之间的转换提供了最有效途径，已广泛应用于工农业生产、交通运输、国防建设和医疗卫生等各个领域。每一代新型电力电子器件的诞生，都会推动能源更高效地转换和利用；而社会生产力水平的飞速发展，也促进着电力电子器件向更高层次前进[1–8]。本文从碳化硅（SiC）等宽禁带半导体材料特性出发，全面总结了多种 SiC 功率器件的开发及市场化现状，并对 SiC 器件在不同应用领域的应用现状和发展前景进行了分析。

收稿日期：2016–03–29
作者简介：漆宇（1987–），男，博士，工程师，主要从事变流器及半导体功率器件应用技术研究工作。
基金项目：国家科技重大专项 02 专项（2013ZX02305）

1　硅基与宽禁带材料功率器件

1.1　硅基功率器件的发展

经过近 60 年的持续发展，硅（Si）基功率器件已成为当今社会各种电能转换接口设备的主流选择。20 世纪 50 年代末，硅基晶闸管（Thyristor）的成功研制标志着功率半导体器件的开端；80 年代中期开始，可关断晶闸管（Gate Turn-off Thyristor，GTO）开始广泛应用于高压大功率变换器；而从 90 年代开始，绝缘栅双极型晶体管（Insulated Gate Bipolar Transistor，IGBT）突破了阻断电压偏低的限制，成功应用于 3.3 kV 及以上电压等级场合，并以其较好的动静态性能在中压应用场合逐渐取得了优势地位。进入 21 世纪后，大功率变流装置对功率器件提出了更高的需求：阻断电压更

高、导通压降更低、开关损耗更低和温度特性更好，然而硅基功率器件经过了60年的发展后，性能已经趋近于体二极管的材料极限（10^9~10^{10} W·Hz），通过器件原理的创新、结构的改良及工艺的进步已经难以明显提升其总体性能，已成为制约电力电子技术进一步发展的瓶颈之一。

1.2 宽禁带材料器件特性

单极型功率器件的材料物理局限性机理可表示为：

$$R_{drift_SP}=4U_B^2/(\varepsilon_0\varepsilon_r\mu E_c^3) \quad (1)$$

式中：R_{drift_SP}——导通电阻；U_B——阻断电压；ε_0，ε_r——介电常数；μ——载流子迁移率；E_c——材料的临界击穿电场。

由式（1）可知，采用E_c值更高的半导体材料制造的功率器件能够获得更低的导通电阻R_{drift_SP}，可实现更低的器件导通损耗。观察图1可知，以SiC、氮化镓（GaN）为代表的第三代半导体材料具有远优于Si材料的性能。SiC和GaN的禁带宽度分别为3.26 eV和3.5 eV，远高于Si的1.1 eV，具有更高的击穿电场和更低的本征载流子浓度；SiC材料的E_c值较Si材料高出一个数量级，因此可获得低一个数量级的R_{drift_SP}；较高的电子饱和速度有利于工作频率的提高；较高的导热率则可改善耐高温能力，有助于装置集成度的进一步提高。理论上，SiC材料的击穿场强可达2~4 MV/cm，其最高结温可达600 ℃，因此SiC器件可在高电压、高温的环境下工作[9-13]；而GaN器件由于只能在异质材料上做横向结构制造，阻断电压难以超过1 kV，因此GaN器件的应用领域将集中在低压场合。

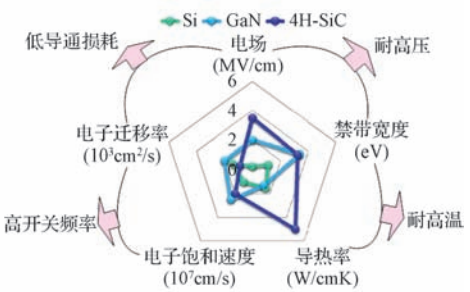


图1 GaN、SiC与Si材料特性的对比

Fig. 1 Characteristic comparison of Si, GaN and SiC

2 SiC功率器件的发展

SiC功率器件从出现至今已走过了二十多年的研发历程，目前开始逐步进入市场并为市场所认可。随着半导体材料工艺技术的逐步成熟，多种SiC功率器件被研发出来，其中高压SiC器件工程样品也已有相关报道，例如19.5 kV的SiC二极管，4.5 kV的SiC GTO，10 kV的SiC MOSFET和13~15 kV的SiC IGBT等；但受市场以及封装技术的限制，目前SiC功率器件的商业化进程仍基本停留在低压领域，产品的电压等级主要位于600~1 700 V。如图2所示，Infineon、Fuji Electric、IXYS等半导体厂商均有1 200 V电压等级的混合SiC功率模块产品在市场上供应，而HITACHI和MITSUBISHI则已分别推出了3 300 V和1 700 V混合SiC功率模块。

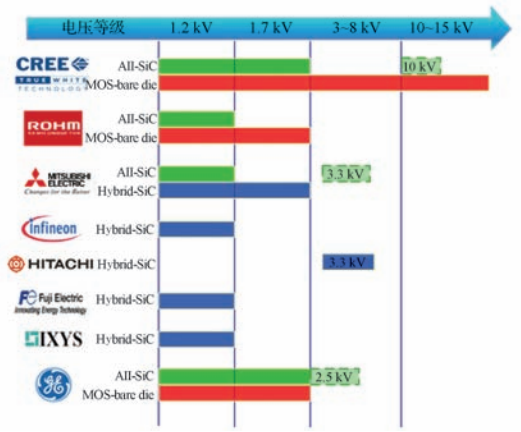


图2 SiC芯片、混合SiC功率模块、全SiC功率模块产品供应现状

Fig. 2 Present supply conditions of SiC chip, hybrid-SiC module and all-SiC power modules

2.1 SiC二极管

单极型SiC二极管的反向恢复电荷量基本为零，可显著降低由二极管反向恢复作用导致的自身损耗以及反并联可控功率器件的开通损耗，在开关频率较高的应用中具有明显优势。目前主要有3种SiC功率二极管：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）。

SBD采用4H-SiC的衬底及高阻保护环终端技术，并用势垒更高的Ni和Pt金属改善电流密度，适用于阻断电压在0.6~1.5 kV范围内的应用。

JBS二极管兼备SBD二极管导通压降低和PiN二极管阻断电压高、反向电流小的优点，阻断电压范围为1.5~3 kV。

由于电导调制作用，PiN二极管导通电阻较低，适用于阻断电压在3 kV以上的场合，此外还兼具开关速度快和高温稳定性好等特点，在高压直流输电等领域具备潜在应用价值。

目前，中高电压等级SiC金属-氧化物半导体场效应晶体管（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor，MOSFET）功率器件商业化应用未完全成熟，4H-SiC功率二极管和Si IGBT所组成的电力电子功率混合模块是应用市场的一种重要选择，其功耗、开关频

率和可靠性等性能相比全 Si 功率模块均有大幅提升。

2.2　SiC MOSFET

相比 Si 基 MOS 管，SiC MOSFET 的导通电阻更低、耐高温能力更强，且阻断电压明显提高。有研究报告称，SiC DMOSFET 在 10 kV 以下电压等级范围内可成为 Si IGBT 的最佳替换品。目前在 1.2 kV 关断电压等级，有工作电流为 6 A，10 A，20 A，40 A，60 A，71 A 的 SiC DMOSFET 芯片产品；在 1.7 kV 关断电压等级，有工作电流为 3.7 A，48 A 的产品；在 10 kV 关断电压等级，有工作电流为 10 A，15 A，17 A，20 A 的产品。

SiC MOSFET 芯片可与 SiC 二极管集成为全 SiC 电力电子功率模块。如图 2 所示，目前 Cree 公司已在中国市场推出成熟的 1 700 V 全 SiC 功率模块，并且在美国高校实验室中完成了对采用 10 kV/120 A 功率模块的变换器装置样机的研制及测试；而三菱电机公司近年来对外宣称已研制了 3 300 V 全 SiC 功率模块，并已在轨道交通领域完成了测试；GE 公司则表示其已基本完成对 2 500 V 全 SiC 功率模块的全面评估。

图 3 展示了相同功率等级下全 Si 器件、混合 SiC 器件与全 SiC 器件的损耗对比。由图可知，SiC 二极管反向恢复效应的减弱将明显减小开通电流应力、缩短开通时间，显著降低功率器件的开关损耗；混合 SiC 器件相比全 Si 器件，将带来 27% 的总损耗降低。而在此基础上，当用 SiC MOSFET 替代 Si IGBT，开关管关断拖尾电流的明显减小将大幅缩短关断时间，进一步压缩开关损耗；另一方面，SiC MOSFET 低导通压降也将带来导通损耗的降低。全 SiC 器件总损耗仅为全 Si 器件的 30%，这有助于变换器装置效率的进一步提高。

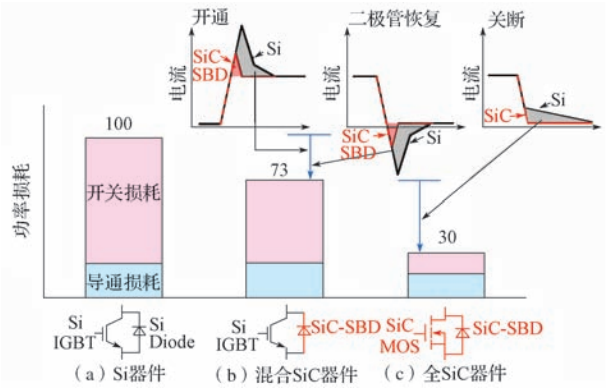


图 3　全 Si、混合 SiC 和全 SiC 器件损耗对比

Fig. 3　Loss comparison among all-Si, hybrid-SiC and all-SiC modules

图 4 将 Cree 和 GE 公司的 1 700 V/300 A 全 SiC MOSFET 器件与 Infineon 公司同等规格的 Si IGBT 器件损耗进行了计算对比。通常情况下，1 700 V/300 A 等级 IGBT 模块的工作频率不高于 5 kHz。由图 4 可知，5 kHz 频率下全 SiC 器件损耗约为 300 W，仅为 Si 器件损耗（1 000 W）的 1/3 左右，与图 3 所示数据相吻合。值得注意的是，当大幅提高 SiC MOSFET 的工作频率，如达到 30 kHz 时，其总损耗仍然低于 600 W，对比 5 kHz 下的 IGBT 依旧优势明显；而且开关频率的大幅提高显然有利于无源滤波装置体积和重量的减小。因此，采用 SiC 功率器件的变流器在效率和功率密度等方面优势巨大。

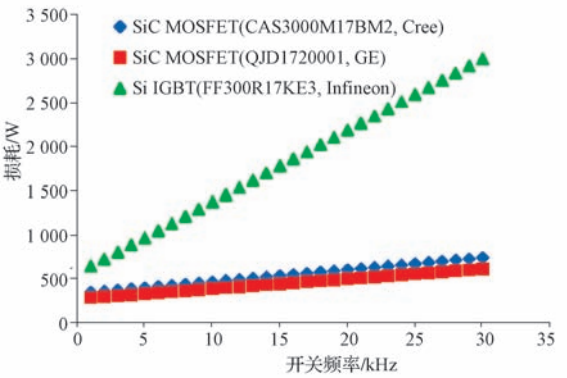


图 4　1 700 V/300 A 等级 Si IGBT 与全 SiC 器件损耗对比

Fig. 4　Loss comparison between Si IGBT and SiC MOSFET modules in 1 700 V/300 A level

2.3　SiC IGBT

IGBT 由于其简单的栅驱动方式和较大的电流开关能力等优点，在 Si 功率器件中压应用领域成为了主流选择。采用 SiC 材料的 IGBT 器件耐高压能力得到明显提高，近年来，实验室中 SiC IGBT 耐压已超过 10 kV，有望成为未来电网高速发展的重要推动力。

2014 年，Cree 公司与美国陆军研究所联合试制了耐压 27 kV、额定电流为 20 A 的 n 沟道 SiC IGBT（其 27 kV 的耐压能力是迄今为止发布的 IGBT 中最高的），并实验验证了该器件的静态特性以及在 14 kV/3 kHz 工况下的开关性能。日本产业技术综合研究所试制了耐压 16 kV 的 n 沟道 SiC IGBT，并验证了该器件可在 250 ℃ 环境温度下驱动 6.5 kV/60 A 的变流装置。

2.4　SiC 晶闸管

当前，Si 晶闸管在大功率工频开关应用场合，如高压直流输电、动态无功功率补偿等，仍具有较大优势，因此，SiC 晶闸管（尤其是 SiC GTO）也是研究热点之一。与采用 4~6 kV Si GTO 的变流器相比，应用 SiC GTO 时大功率变换器的串联连接部件可减少 $\frac{2}{3}$ ~ $\frac{3}{4}$，开关频率可提高 9 倍，体积和重量可减小约 60%~70 %。

2011 年已有 12 kV 电压等级的 SiC GTO 和光触发 GTO 在实验室中研制成功。但器件性能的进一步提升仍需满足以下几个关键需求：（1）提高漂移层载流子寿命；（2）实现双向关断能力；（3）大幅提高 d*i*/d*t* 能力；

（4）改善器件稳定性；（5）实现可靠的无噪声导通。

2.5 SiC JFET

SiC JFET具有高输入阻抗、低噪声和线性度好等特点，利用p-n结耗尽区控制沟道电流，可全面开发SiC的高温性能，适合高温大功率开关装置，是当前商业化发展较成熟的SiC功率器件之一。与MOSFET、IGBT等器件相比，单极性JFET具备良好的高频特性、高温稳定性及栅极可靠性[4–5]。Infineon和SiCED等公司推出的SiC JFET产品已经覆盖1 200 V和1 700 V电压等级，单管电流可达35 A，模块电流等级可达100 A以上。

但是，常通型的JFET无法兼容通用的门极驱动器，这限制了其进一步推广应用。

3 SiC功率器件的应用前景

半导体功率器件的每一次更新换代，都会推动电能变换技术的相应革新。总体而言，SiC功率器件将给电力电子装置带来以下几点重要突破：

（1）SiC功率器件所具有的耐高温能力有利于散热器的体积和重量减小；

（2）由于器件电流密度高，相同规格下SiC功率器件相比Si器件具有更小的外形尺寸，而且由于开关频率的提高，变流器无源滤波装置的体积和重量也将明显减小；

（3）由于损耗的降低，采用SiC器件的变流器系统效率将得到提高，而且，器件电流裕量可适当减小，因此可将电流等级较高的器件替代为电流等级较低的器件。

这些优势有利于显著提高电能变换装置的功率密度、降低制造成本。针对开关电源、电动汽车、新能源发电、轨道交通和智能电网等不同应用领域，SiC功率器件的应用优势亦各有特点。

3.1 开关电源

随着低电压等级器件成本的不断降低，SiC SBD已在开关电源领域得到了深入推广应用。在阻断电压低于500 V的应用场合，SiC SBD与SJMOSFET（超结MOSFET）组成的混合SiC器件将与GaN-on-Si（硅基氮化镓）器件展开激烈竞争；而在阻断电压处于500 V至1 kV的应用场合，SiC SBD的应用有望快速增长并有取代Si PiN二极管之势。

SiC晶体管在开关电源领域应用优势目前并不十分明显，由其搭建的开关电源仍需在成本、效率、性能及体积等多个维度与Si MOSFET或Si IGBT组成的开关电源进行综合比较。

3.2 电动汽车

SiC功率器件性能优异，可以显著降低电动汽车驱动系统的体积、重量及成本，且其高温特性有利于实现引擎冷却系统和电力电子变换器冷却系统的合而为一[14]。自2007年起，日本丰田、日产等汽车企业就已经开始将混合SiC IGBT模块（由SiC JBS和Si IGBT器件构成）应用于电动汽车驱动装置的逆变器中，带来了逆变器损耗30 %～40 %的降低。2012年底，三菱电机公司研发出采用混合SiC IGBT模块的70 kW级电动汽车动力系统，其损耗降低可达50%。在此基础上，三菱公司称将在2018年前后把采用全SiC模块功率器件的电动汽车用马达实用化。

此外，SiC功率器件的应用有利于解决新型电路拓扑，如九开关变换器及Z源拓扑网络所存在的效率较低的问题，进而推动新型拓扑在在电动汽车领域的应用，进一步提高动力系统的功率密度。

3.3 新能源发电

目前，SiC肖特基二极管已经在光伏逆变器中得到了广泛应用，欧洲市场尤为多见。采用SiC器件，光伏变换器的平均工作效率能从Si器件变换器的接近96%提升至97.5%，逆变器损耗降低25% [15–18]。日本电装公司2012年研制了功率密度高达60 kW/L的SiC光伏逆变器，用SiC器件替换了Si器件后发热量降低了68%；2014年，富士电机公司开始将采用全SiC器件的1 MW光伏电站投入量产，新款产品转换效率可达98.8%，且体积较传统产品减小了20%；2015年1月，三菱电机公司推出了基于SiC-IPM（Intelligent Power Module）的光伏逆变器产品，输出功率为4.4 kW，转换效率为98.0%。

作为新能源发电中增长最快的风力发电，也逐渐开始采用SiC功率器件实现能量转换。我国浙江大学设计了基于1 700 V电压等级SiC MOSFET器件的2 MW双馈风力发电系统，针对几种典型变流器拓扑进行了效率分析，并与Si IGBT两电平、三电平二极管NPC变流器效率进行了对比。结果显示，额定风速下，SiC MOSFET两电平变流器较Si IGBT两电平变流器效率高3.33%，而SiC MOSFET三电平变流器（开关频率3 kHz）较Si IGBT三电平变流器效率高1.2% [19]。

当前，随着1 700 V电压等级全SiC MOSFET器件市场化的不断深入，相关产品价格逐渐降低，SiC器件在光伏和风电等新能源发电场合的大规模应用已经不再遥远，SiC功率器件在该领域对Si器件的替代正在进行。

3.4 轨道交通

对于器件电压等级位于3.3~6.5 kV的轨道交通牵引应用领域，SiC功率器件也是近年来的一个研究热点[2]，并已在日本市场得到初步验证。日立公司2015年推出

3 300 V/1 200 A 混合 SiC 功率器件，图 5 示出该产品与传统 Si 器件的封装尺寸对比图，其器件表面积减小了约 1/3，这有利于牵引模块散热器体积和重量的等比例减小。

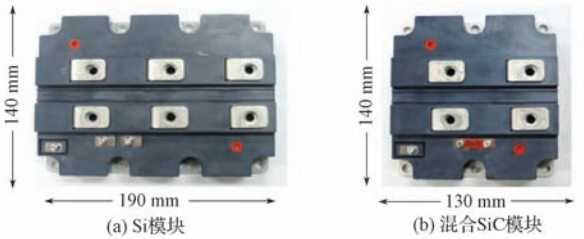
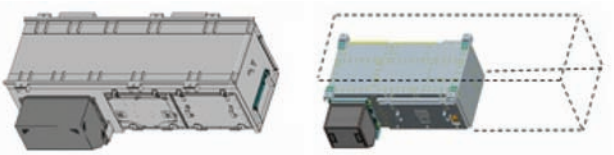


图 5　日立公司 3 300 V/1 200 A 混合 SiC 器件与同等规格 Si 器件的尺寸对比

Fig. 5　Size comparison between Hitachi hybrid-SiC and Si modules in 3 300 V/1 200 A level

2012 年，东京地铁银座线的新“01 系列车”采用了 SiC 逆变器，不仅降低了逆变器的电能损耗，还提高了列车电能再生性能（其通过回收制动能量得到的电力所占比例，即电力再生率由原来的 22.7% 提高到了 51.0%），降低了耗电量，节能效果明显。2013 年，三菱电机公司把采用 3 300 V/1 500 A 全 SiC 器件的牵引逆变器（图 6）配备于 Odakyu Electric Railway 公司的 1 000 辆城市轨道列车，经过 4 个月的测试发现：该新型牵引逆变器与传统 GTO 牵引逆变器相比电力再生率由 34.1% 提升至 52.1%，总体损耗降低了 40%；与 IGBT 牵引逆变器相比器件开关损耗降低约 55%，包含电机在内的总损耗降低了 30%；逆变器系统体积、重量减小了约 65%。



（a）采用 IGBT 功率模块的牵引变流器　　（b）全 SiC 器件牵引变流器

图 6　三菱公司采用 3 300 V/1 500 A 全 SiC 器件的变流器与传统变流器的对比

Fig. 6　Comparison between traditional converter and Mitsubishi converter with 3 300 V/1 500 A all-SiC module

针对采用 3 300 ~6 500 V 电压等级功率器件的轨道交通领域，以三菱、日立为代表的日本公司已开始推出 3 300 V 电压等级混合 SiC IGBT 功率器件产品，并对全 SiC MOSFET 进行了多年的装车运行测试。未来几年内，随着英飞凌、GE 等公司投入的逐步增大，混合 SiC IGBT 器件产品的市场化有望得到进一步的发展，全 SiC MOSFET 产品的推广应用也将不再遥远。

3.5　电力系统

随着智能电网工程的推广及不断完善，电力电子技术应用逐渐涉及电力系统的各个方面，SiC 功率器件在高压直流输电、柔性交流输电和电力电子变换器等应用场合具有巨大的应用潜力。据评估，SiC 器件可使电力损耗降低 60%，供电效率提高 40% 以上 [20–23]。

作为一种备受关注的新型关键技术，电力电子变压器（Power Electronic Transformer， PET）用电力电子变换器和高频变压器取代了传统工频变压器，以实现高低压变换及电能控制（图 7），在功率密度显著提高的同时，还具备无功补偿、频率变换、输出相数变换和自动限流等优点。然而，由于输电网高压侧电压等级往往高达数千至数万伏特，目前 PET 主要通过 Si 功率器件串联或者 H 桥电路拓扑串联等方式满足耐压需求，结构复杂且控制难度较高。若能用高压 SiC 功率器件替换现有的 Si 器件，PET 拓扑有望大大简化，由此可带来可靠性的提升以及控制实施难度的降低，PET 的应用和发展将获得极大的推力 [21, 23]。以美国 FREEDM（未来可再生能源利用和分配管理中心）为例，其推出的第一代 PET 样机中采用了 6.5 kV 电压等级的 Si IGBT，每个桥臂通过 3 个 H 桥串联以承受 7.2 kV 高压；而目前基于 15 kV 电压等级 SiC 器件研发的第二代样机不再需要依靠器件或 H 桥的串联，开关频率有望从第一代样机的 1 kHz 提高至 20 kHz。

目前，以 PET 为代表的电力系统应用领域对 SiC 功率器件的需求主要集中在 10 kV 以上电压等级产品中，而该等级的相关产品已经在实验室中进行了器件测试和样机评估。目前，限制其进一步发展的主要因素有价格

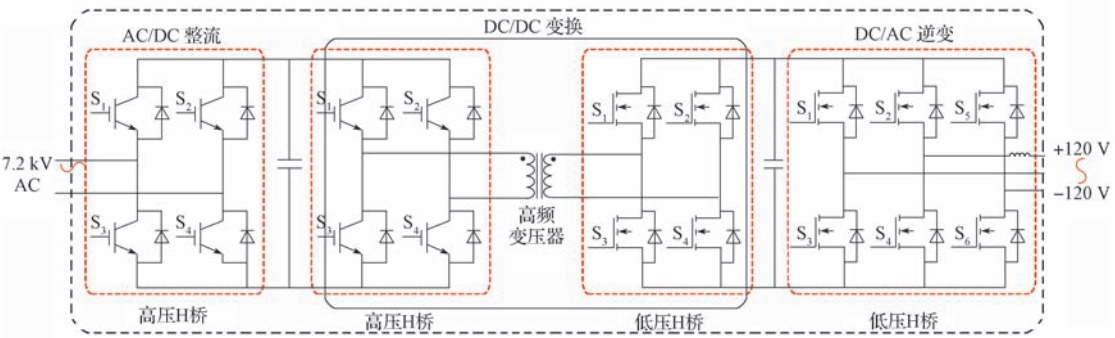


图 7　10 kVA 单相电力电子变压器拓扑图

Fig. 7　Topology of 10 kVA single-phase PET

过高和技术保密等因素，对此，学术界提出一些用低电压等级 SiC JFET 串联的过渡方案。可以说，高电压等级 SiC 功率器件在电力系统中的大规模应用还需要进一步的技术发展和研究积累。

4 结语

在当前节能减排、低碳环保的发展要求下，军事国防、电力、交通等大功率应用领域对功率器件耐高压、耐高温、高频工作以及功率等级等需求不断提升，持续优化改进以及全面推广 SiC 器件是电力电子行业亟待开展并不断深化的工作。未来数年内，随着晶体生长技术和器件封装技术的发展，SiC 器件的可靠性和成本等方面有望取得较大的改善。

参考文献：

[1] 钱照明，张军明，盛况 . 电力电子器件及其应用的现状和发展 [J]. 中国电机工程学报，2014，(29)：5149–5161.

[2] SHAMSI P, MCDONOUGH M, FAHIMI B. Wide-Bandgap Semiconductor Technology: Its impact on the electrification of the transportation industry[J]. IEEE Electrification Magazine, 2013，1(2)：59–63.

[3] WANG F, ZHANG Z, ERICSEN T, et al. Advances in Power Conversion and Drives for Shipboard Systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2015，103(12)：2285–2311.

[4] XU F, HAN T J, JIANG D, et al. Development of a SiC JFET-Based Six-Pack Power Module for a Fully Integrated Inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013，28(3)：1464–1478.

[5] GUEDON F, SINGH S, MCMAHON R, et al. Boost Converter With SiC JFETs: Comparison With CoolMOS and Tests at Elevated Case Temperature [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013，28(4)：1938–1945.

[6] SALEM T E，WOOD R A. 1000-H Evaluation of a 1200-V, 880-A All-SiC Dual Module [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014，29(5)：2192–2198.

[7] FABRE J, LADOUX P. Parallel Connection of 1200-V/100-A SiC-MOSFET Half-Bridge Modules [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016，52(2)：1669–1676.

[8] 姜文海 . 试析碳化硅电力电子器件发展及其应用 [J]. 中国高新技术企业，2015 (36)：37–38.

[9] TOLSTOY G, PEFTITSIS D, RABKOWSKI J, et al., A Discretized Proportional Base Driver for Silicon Carbide Bipolar Junction Transistors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014，29(5)：2408–2417.

[10] 赵正平 . SiC 新一代电力电子器件的进展 [J]. 半导体技术，2013 (2)：81–88.

[11] 郭熙凤 . 碳化硅技术引领新兴产业革命 [J]. 中国战略新兴产业，2015 (13)：37–39.

[12] ZHANG X, YAO C, LI C, et al. A Wide Bandgap Device-Based Isolated Quasi-Switched-Capacitor DC/DC Converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014，29(5)：2500–2510.

[13] 季建平 . 2014 年碳化硅电力电子器件的发展现状分析 [J]. 半导体信息，2014(6)：35–37.

[14] 王学梅 . 宽禁带碳化硅功率器件在电动汽车中的研究与应用 [J]. 中国电机工程学报，2014(3)：371–379.

[15] BREAZEALE L C，AYYANAR R. A Photovoltaic Array Transformer-Less Inverter With Film Capacitors and Silicon Carbide Transistors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015，30(3)：1297–1305.

[16] SINTAMAREAN N C, BLAABJERG F, WANG H, et al. Real Field Mission Profile Oriented Design of a SiC-Based PV-Inverter Application[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014，50(6)：4082–4089.

[17] 孙凯，陈彤，张瑜洁 . 碳化硅光伏逆变器发展现状 [J]. 新材料产业，2014(9)：34–38.

[18] HAN J, CHOI C S, PARK W K, et al. PLC-based photovoltaic system management for smart home energy management system[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2014，60(2)：184–189.

[19] 黄晓波，陈敏，朱楠，等 . 基于碳化硅器件的双馈风电变流器效率分析 [J]. 电力电子技术，2014(11)：45–47.

[20] 于晶荣，曹一家，王一军，等 . SiC 电力电子器件对电力系统的影响 [J]. 微纳电子技术，2012(8)：503–509，547.

[21] MAINALI K, TRIPATHI A, MADHUSOODHANAN S, et al. A Transformerless Intelligent Power Substation: A three-phase SST enabled by a 15-kV SiC IGBT [J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2015, 2(3)：31–43.

[22] 郭淑贞 . 试论碳化硅电力电子器件在电力系统的应用 [J]. 数字技术与应用，2013(4)：88，90.

[23] 盛况，郭清，张军明，等 . 碳化硅电力电子器件在电力系统的应用展望 [J]. 中国电机工程学报，2012(30)：1–7.

国内首列永磁地铁列车投入载客运营

2016 年 8 月，长沙市轨道交通 1 号线永磁牵引系统顺利通过载客前评审，成为国内首套具备载客运营资质的自主永磁牵引系统，开启了中国城市轨道交通的“永磁时代”。

长沙市轨道交通 1 号线永磁牵引系统列车是国内首列全车装载永磁牵引系统并投入载客运营的轨道交通列车，由长沙市轨道交通集团联合中车株洲电力机车有限公司和株洲中车时代电气股份有限公司（以下简称“中车时代电气”）共同合作开发。2016 年 3 月，列车正式投入正线试运行。截至 2016 年 7 月 7 日，列车已累计完成了 12 500 km 无故障试运行考核。

该车的永磁牵引系统由中车时代电气自主研发。作为代表列车核心系统的先进技术，永磁牵引系统具有更加高效节能、更加轻量化和更低的全寿命周期成本等特点，被认为是下一代轨道交通列车牵引系统。中国是世界上少数几个掌握永磁牵引系统技术并在城轨和高铁等领域实现应用的国家之一。

早在 2011 年，中车时代电气就已在沈阳地铁 2 号线上完成了单台永磁牵引电动机的装车及试验。在历时 20 个月的试验考核中，安全运行了 67 000 多公里。为此，本刊曾在 2012 年 03 期推出《永磁技术在轨道交通领域的应用》专刊，欢迎感兴趣的读者查阅。