

# 第三代宽禁带功率半导体及应用发展现状

蔡蔚, 孙东阳, 周铭浩, 郭庆波, 高晗璿

哈尔滨理工大学电气与电子工程学院, 哈尔滨 150080

**摘要** 近年来,以碳化硅和氮化镓为代表的第三代宽禁带功率半导体迅猛发展,已成为中国功率电子行业的研发和产业化应用的重点。抓住第三代宽禁带功率半导体的战略机遇期,实现半导体材料、器件、封装模块和系统开发的自主可控,对保障工业创新体系的可持续发展至关重要。在分析第三代宽禁带功率半导体重要战略意义的基础上,综述了其材料、器件研发和产业的发展现状,阐述了碳化硅及氮化镓器件在当前环境下的应用成果,剖析了第三代半导体行业存在的关键问题。建议在国家政策的进一步领导之下,发挥行业协会和产业联盟的桥梁和纽带作用,对衬底材料、外延材料、芯片与器件设计和制造工艺等产业链各环节进行整体支撑,引导各环节间实现资源共享、强强联合,上下游互相拉动和促进,形成一个布局合理、结构完整的产业链。

**关键词** 第三代宽禁带功率半导体;碳化硅;氮化镓;芯片与封装技术;半导体应用与市场;碳化硅控制器和逆变器

随着节能减排、新能源发电、智能电网和无线通信等领域的快速发展,电源和控制器行业对功率半导体器件的性能指标和可靠性的要求日益提高,要求器件有更高的工作电压、更大的电流承载能力、更高的工作频率、更高的效率、更高的工作温度、更强的散热能力和更高的可靠性。经过半个多世纪的发展,基于硅材料的功率半导体器件的性能已经接近其物理极限。因此,以碳化硅(SiC)、氮化

镓(GaN)等为代表的第三代宽禁带功率半导体材料的发展开始受到重视。技术领先国家和国际大型企业纷纷投入到SiC和GaN的研发和产业化中,产业链覆盖材料、器件、模块和应用等各个环节。第三代宽禁带功率半导体对电动化交通、工业伺服和电力行业的装备和产品升级换代产生了重大且深远的影响。

收稿日期:2020-10-31;修回日期:2020-12-28

基金项目:黑龙江省新能源电机系统及关键材料研究头雁团队项目;国家重点研发计划项目(2017YFB0102400);黑龙江省博士面上基金项目(LBH-Z19166)

作者简介:蔡蔚,教授,研究方向为新能源电机和功率电子控制器及电驱动总成研究与产业化,电子信箱:william\_cai88@163.com

引用格式:蔡蔚,孙东阳,周铭浩,等. 第三代宽禁带功率半导体及应用发展现状[J]. 科技导报, 2021, 39(14): 42-55; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2021.14.004

## 1 第三代宽禁带功率半导体的战略意义

目前,中国已经把大力支持发展第三代宽禁带功率半导体产业写入国家“十四五”和中长期发展规划中,计划在教育、科研、开发、融资、应用等各方面,大力支持第三代宽禁带功率半导体产业的发展,以期实现产业与世界同步和自主可控<sup>[1]</sup>。

在现有的全部三代半导体材料中,第一代半导体材料以硅(Si)、锗(Ge)为代表,其中锗最先被研究且应用,但由于其造价较高(比白银稍贵),稳定性较差,主要应用于部分发光二极管、太阳能电池中。硅基材料是目前主流逻辑芯片和功率器件的基础,以硅基半导体材料开创了功率半导体元器件金属-氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)和绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等为代表的固态电子时代<sup>[2]</sup>。

第二代半导体材料,主要是指化合物半导体材料,以砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)为代表,其主要用于制作高速、高频、大功率以及发光电子器件,是制作高性能微波、毫米波器件及发光器件的优良材料,广泛应用于卫星通信、移动通信、光通信、GPS导航等领域。但是GaAs、InP材料资源稀缺,价格昂贵,并且还有毒性,污染环境,InP甚至被认为是可疑致癌物质,这些缺点使得第二代半导体材料的应用具有一定的局限性。目前主流第二代半导体材料GaAs占据了化合物半导体市场上79%的份额。但得益于最大功率范围、频率、亮度、耗电量以及高频噪声等方面的优势,各大厂商都认为第三代化合物半导体(GaN及SiC)在应用端将有更优异的表现<sup>[3]</sup>。

第三代半导体指的是SiC、GaN、ZnO、金刚石(C)、AlN等具有宽禁带( $E_g > 2.3$  eV)特性的新兴半导体材料。以第三代宽禁带功率半导体的典型代表SiC和GaN为例,其材料特性与Si材料的特性对比如图1所示<sup>[4]</sup>。

第三代宽禁带功率半导体器件的优势主要表现在:(1)比导通电阻是硅器件的近1/1000(在相同的电压/电流等级下),可以大大降低器件的导通

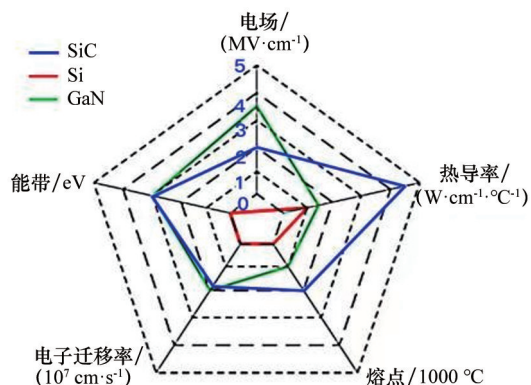


图1 Si材料与SiC、GaN材料的性能对比

损耗;(2)开关频率是硅器件的10余倍,可以大大减小电路中储能元件的体积,从而成倍地减小设备体积,减少贵金属等材料的消耗;(3)理论上可以在600℃以上的高温环境下工作,并有抗辐射的优势,可以大大提高系统的可靠性,在能源转换领域具有巨大的技术优势和应用价值<sup>[5]</sup>。

第三代宽禁带功率半导体材料具有高热导率、高击穿场强、高饱和电子漂移速率和高键合能等优点。例如,与Si基材料相比:(1)SiC具有3倍的禁带宽度,可减少漏电并提高工作温度;(2)SiC具有近10倍的击穿场强,可提高内电压、开关速度并降低损耗;(3)SiC具有4倍的导热率,支持高功率密度并可降低散热要求。其优点可以满足现代电子技术对高温、高功率、高压、高频以及抗辐射等恶劣条件的新要求,是当前半导体材料领域最有前景的材料,在国防、航空航天、能源、通信、电动化交通、工业等领域有着重要应用前景,在宽带通信、太阳能、新能源汽车、半导体照明、智能电网等众多战略行业可以降低50%以上的能量损失,最高可以使装备体积减小75%以上,对人类科技的发展具有里程碑的意义。

目前,第三代宽禁带功率半导体器件已经在智能电网、电动汽车、轨道交通、新能源并网、开关电源、工业电机以及家用电器等领域得到应用,并展现出良好的发展前景。国际领先企业已经开始市场布局,全球新一轮的产业升级已经开始,正在逐渐进入第三代半导体时代。

SiC是目前发展最成熟的宽禁带功率半导体材料,GaN紧随其后,金刚石、AlN和Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等也成为国际前沿研究热点。下面以SiC和GaN器件为例,论述当前第三代宽禁带功率半导体的发展现状。

## 2 第三代宽禁带功率半导体的发展现状

由于制造设备、制造工艺以及成本的劣势,既往多年来第三代宽禁带功率半导体材料只是在小范围内应用,无法挑战Si基半导体的统治地位。最近几年,随着材料科学技术的快速发展,SiC和GaN等宽禁带半导体材料的关键技术问题得到了根本性质的突破。

在5G和新能源汽车等新市场需求的驱动下,第三代宽禁带功率半导体材料有望迎来加速发展。Si基半导体的性能已无法完全满足5G通信和高效新能源汽车等电动化交通以及航天、军工等的需求,SiC和GaN等第三代宽禁带功率半导体的优势被放大。

### 2.1 SiC单晶材料的发展现状

目前生长SiC单晶最成熟的方法是物理气相输运(PVT)法,其生长机理是:在超过2000℃高温下将C粉和Si粉升华分解成为Si原子、Si<sub>2</sub>C分子和SiC<sub>2</sub>分子等气相物质,在温度梯度的驱动下,这些气相物质将被输运到温度较低的SiC籽晶上形成4H型SiC晶体。通过控制PVT的温场、气流等工艺参数可以生长特定的4H-SiC晶型。

SiC单晶材料主要有导通型衬底和半绝缘衬底两种。高质量、大尺寸的SiC单晶材料是SiC技术发展首要解决的问题,持续增大晶圆尺寸、降低缺陷密度(微管、位错、层错等)是其重点发展方向。2010年,美国Cree公司发布6英寸(1英寸=25.4mm)SiC单晶衬底样品,并于2015年开始批量供货;2015年,美国Cree、II-VI公司推出了8英寸SiC单晶衬底材料样品<sup>[6]</sup>。

全球导通型SiC晶圆材料市场的发展趋势。导通型SiC单晶衬底材料是制造SiC功率半导体器件的基材。根据Yolo公司统计,2017年4英寸SiC

晶圆市场接近10万片;6英寸SiC晶圆供货约1.5万片;2020年,4英寸SiC晶圆的产能约为20万片左右,单价将降低25%;6英寸SiC晶圆的市场需求将超过20万片。预计2020—2025年,4英寸SiC晶圆的单价每年下降10%左右,市场规模将逐步减少到8万片;在2025—2030年,4英寸晶圆将逐渐退出市场,6英寸晶圆将增长至50万片<sup>[7]</sup>。

目前SiC衬底技术相对简单,国内主要SiC单晶衬底材料企业和研发机构已经具备了成熟的4英寸零微管SiC单晶产品能力,并已经研发出了6英寸单晶样品,例如,中国电子科技集团第五十五研究所(以下简称中电科55所)于2016和2018年分别开发出了4英寸SiC圆片样件和6英寸SiC产品技术。在2016—2019年中国SiC、GaN电力电子产业值持续提高。据中国第三代半导体产业技术创新战略联盟(CASA)初步统计,2019年中国SiC、GaN电力电子和微波射频产值(供给)超过60亿元;2019年SiC、GaN功率电子产值规模达26亿元,同比增长84%。但是在晶体材料质量和产业化能力方面距离国际先进水平存在一定差距。

### 2.2 SiC功率器件的发展现状

SiC功率半导体器件包括二极管和晶体管,其中二极管主要有结势垒肖特基(JBS)功率二极管、pin功率二极管和混合pin肖特基二极管(MPS);晶体管主要有金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)、双极型晶体管(BJT)、结型场效应晶体管(JFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)和门极可关断晶闸管(GTO)等。

2001年,德国英飞凌(Infineon)公司最先发布SiC JBS产品,同年美国Cree公司也实现了SiC JBS。由于SiC晶体管的技术难度大,产业化进度落后于二极管。2010年,日本Rohm公司首先量产SiC MOSFET产品,2011年美国Cree公司开始销售SiC MOSFET产品。SiC IGBT和GTO等器件由于技术难度更大,仍处于研发阶段,距离产业化有较大的差距。SiC JBS二极管和MOSFET晶体管由于其性能优越,成为目前应用最广泛、产业化成熟度最高的SiC功率器件。

随着国际上SiC功率器件技术的进步和制造

工艺从4英寸升级到6英寸,器件产业化水平不断提高,SiC功率器件的成本迅速下降。全球SiC功率器件市场的发展趋势。2017年全球SiC功率器件(主要是SiC JBS和MOSFET)的市场接近17亿美元。Yole公司曾预测(图2)<sup>[8]</sup>,2017—2020年,SiC器件的复合年均增长率超过28%,2020年市场规模达到35亿美元,并以超过40%的复合年均增长率继续快速增长;预计到2025年,全球SiC功率器件市场规模将超过150亿美元,SiC的年均增长率将达到30%,将占功率器件市场总额的13%,新能源汽车所使用的SiC将占SiC市场总份额的65%;到2030年,全球SiC功率器件市场规模将超过500亿美元,其中国内SiC器件的市场将占据国际市场的40%~50%。

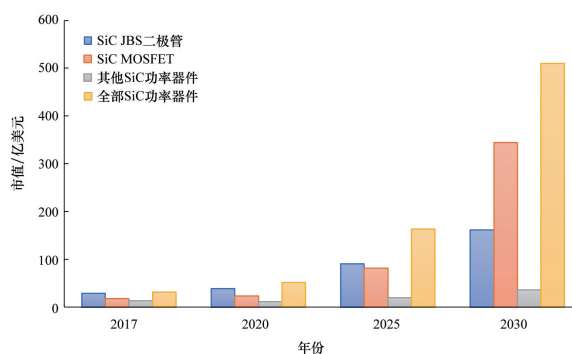


图2 全球SiC功率器件市场的预测分析

目前,国际上主要的SiC功率器件产业化公司有美国Wolfspeed(Cree旗下公司)、德国Infineon、日本Rohm、欧洲的意法半导体(ST Microelectronics)、日本三菱(Mitsubishi),这几家大公司约占国际市场的90%,另外,美国通用电气(GE)、日本丰田(Toyota)、日本富士(Fuji)、日本东芝(Toshiba)、MicroSemi、USCi、GeneSiC等公司也开发了SiC功率器件产品。在SiC二极管产品方面,美国Wolfspeed(包括Cree)、德国Infineon公司已经推出了五代SiC JBS产品;其中Wolfspeed的第四代及以前的产品为平面型,第五代为沟槽型,并且在第五代650 V器件中采用晶圆减薄工艺将SiC晶圆由370 μm减薄至180 μm,进一步提高了器件的性能。Rohm公司开发了三代SiC二极管,最新产品也采用了沟

槽型结构。Infineon公司的前四代SiC二极管以600、650 V产品为主,从第五代开始推出1200 V产品,即将推出第六代低开启电压的SiC JBS产品<sup>[9]</sup>。在MOSFET器件方面,Wolfspeed公司推出600、1200和1700 V共3个电压等级、几十款平面栅MOSFET器件产品,电流从1~50 A不等;2017年3月,美国Wolfspeed公司发布了900 V/150 A的SiC MOSFET芯片,是目前单芯片电流容量最大的SiC MOSFET产品;Rohm公司的SiC MOSFET产品有平面栅和沟槽栅两类,电压等级有650和1200 V;意法半导体开发了650和1200 V这2个电压等级的SiC MOSFET产品,Infineon公司也推出了沟槽栅的1200 V SiC MOSFET产品。另外,GeneSiC公司开发了1200和1700 V的SiC BJT产品,Infineon和USCi公司开发了1200 V的SiC JFET产品<sup>[10]</sup>。在研发领域,国际上已经开发了10 kV以上的JBS、MOSFET、JFET、GTO等器件样品,以及20 kV以上的pin、GTO和IGBT器件样品,由于受到SiC材料缺陷水平、器件设计技术、芯片制造工艺、器件封装驱动技术以及市场需求的制约,以上高压器件短期内无法实现产业化。

为了进一步提升SiC功率器件的电流容量,通常采用模块封装的方法把多个芯片进行并联集成封装。SiC功率模块首先是从由硅IGBT芯片和SiC JBS二极管芯片组成的混合功率模块产品发展起来的<sup>[11]</sup>。随着SiC MOSFET器件的成熟,Wolfspeed、Infineon、三菱、Rohm等公司开发了由SiC JBS二极管和MOSFET组成的全SiC功率模块。目前,国际上SiC功率模块产品最高电压等级3300 V,最大电流700 A,最高工作温度175℃。在研发领域,全SiC功率模块最大电流容量达到1200 A,最高工作温度达到250℃,并采用芯片双面焊接、新型互联和紧凑型封装等技术来提高模块性能。

“十二五”初期,中国掀起了研发第三代功率半导体器件领域的热潮;“十三五”期间,中国掀起了第三代功率半导体材料和器件产业化的浪潮<sup>[12]</sup>。中国在“十三五”期间新能源汽车电驱动领域设置了3个重点研发专项,从下游应用端拉动SiC功率器件的研发和产业化。中国SiC产业链如图3所

示,与 Cree、Rohm 类似的全流程布局的有三安光电、世纪金光公司;主要负责 SiC 衬底生产的企业有天科合达、山东天岳;负责 SiC 外延片生产的有东莞天域、厦门瀚天天成;负责器件设计的有台湾瀚薪、深圳基本半导体;而以集成器件制造(integrated device manufacture, IDM)形式生产器件和模块的企业有泰科天润、瑞能半导体、汇川技术、宇顺电子、延辉众创电子、中国中车等多家国有企业,其产品已经广泛应用于智能电网、新能源汽车以及城市轨道交通等领域,提高了国内相关产业的工业化水平。

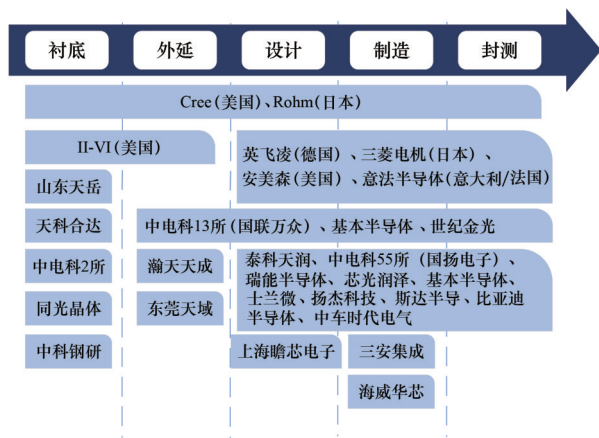


图3 国内外SiC产业竞争格局示意

### 2.3 GaN功率器件的发展现状

早在2001年美国国防部就推动高级研究计划局的宽带隙半导体技术计划,力求满足军方对小型高功率射频器件的需求。宽带隙半导体技术计划严重倾向于军事应用,不计成本地追求可预测性能特性和故障率的可复制GaN器件<sup>[13]</sup>。但是,随着化合物半导体供应商不断完善其生产工艺,计划最终可以使政府获得性能更高、成本更加低廉的射频(RF)元件。

在民用领域,有线电视运营商最先开始大规模地开发和使用GaN功率器件,以在增加带宽的同时,通过提高能源效率降低运营成本。尽管与GaAs相比,SiC基GaN(GaN-on-SiC)的价格更高,但是有线电视基础设施的成本压力要比无线手机小得多,而且节省的运营成本可以超过增加的购置

成本。

通过早期对GaN功率器件的研究和应用,目前SiC基GaN和硅基GaN之间的性能差距已经显著缩小,所产生的经济高效的硅基GaN功率晶体管如今已与SiC基GaN具有同样的电源效率和热特性。在无线基站市场,该性能使得GaN可以撼动横向扩散金属氧化物半导体(LDMOS)在基站功率放大器领域几十年来的主导地位,并对基站性能和运营成本产生了深远影响。上一代3G基站的功率放大器器件都是基于LDMOS的。LDMOS作为一种成熟且廉价的技术,在4G基站市场占据了先机。随着时间的推移,GaN功率放大器在4G领域取得了重大进展,GaN提供的显著技术优势(包括能源效率更高、带宽更宽、功率密度更大和外形因子更小)使之以LDMOS天然替代者的身份来服务于下一代基站,尤其是1.8 GHz以上的手机频段。

在5G领域中,基于GaN的功率放大器更是取得了蓬勃的发展,目前中国基站厂商在中国5G系统的初期部署中均采用了基于GaN的功率放大器器件,其他基站厂商也在跟进。到2025年,整个GaN RF市场将从7.4亿美元增长到超过20亿美元,复合年增长率为12%。电信基础设施和军用雷达是RF GaN的主要驱动力。中国在2019年建造了13万个5G基站,并在2020年预计建设至少50万个使用GaN功率放大器5G基站。到2024年,中国的目标是部署600万个系统。日本、韩国、美国和其他国家也正在大力推动5G<sup>[14]</sup>。

目前全球有超过30家企业从事GaN半导体的研发,其中,实现商业化量产的企业仅有10家左右。如图4所示,GaN器件产业链各环节依次为:GaN单晶衬底(或SiC、蓝宝石、Si)→GaN材料外延→器件设计→器件制造。目前产业以IDM企业为主,但是设计与制造环节已经开始出现分工,如传统晶圆代工台积电开始提供GaN制程代工服务,国内的三安集成公司也有成熟的GaN制程代工服务。

GaN衬底主要由日本公司主导,日本住友电工的市场份额达到90%以上。国内已经小批量生产2英寸衬底,具备4英寸衬底生产能力,并开发出6



图4 GaN器件产业链各环节主要企业示意

英寸衬底样品,国内的纳维科技、中镓半导体公司也有能力生产提供相关的产品。

GaN外延片相关企业主要有比利时的Epi-GaN、英国的IQE、日本的NTT-AT。中国厂商有苏州晶湛、苏州能华和世纪金光,苏州晶湛2014年就已研发出8英寸硅基外延片,现阶段已能批量生产,2018年12月聚能晶源成功研制了8英寸硅基GaN(GaN-on-Si)外延晶圆。

GaN器件设计厂商方面,有美国的EPC、MACOM、Transphorm、Navitas,德国的Dialog,国内有被中资收购的安谱隆(Ampleon)等。

全球GaN射频器件独立设计生产供应商(IDM)中,住友电工和Cree是行业的龙头企业,市场占有率均超过30%,其次为Qorvo和MACOM。住友电工在无线通信领域市场份额较大,其已成为华为核心供应商,为华为GaN射频器件最大供应商。此外,还有法国Exagan、荷兰NXP、德国英飞凌、日本三菱电机、美国II-VI等。

中国的GaN发展虽然起步晚,但在政策不断支持下GaN相关产业也在迅速地发展。2013年的国家高技术研究发展计划(863计划)明确将第三代半导体材料及其应用列为重要内容。2015和2016年国家科技重大专项02专项也对第三代半导体功率器件的研制和应用进行立项。2017年,北京、江苏、山东和广东等地陆续出台促进化合物半导体发展的62项相关政策<sup>[15]</sup>。国内已经形成了第三代半导体产业发展的聚集区,包括京津冀、长三角、珠三

角和闽三角。地方政府出台“十三五规划”“重点研发计划”“科技创新规划”中涉及第三代半导体条款的政策有30条。在政策的支持下中国企业目前可以小批量生产2英寸衬底,具备4英寸衬底生产的能力,开发出了6英寸样品,并在建多个与第三代半导体相关的研发中试平台。

### 3 第三代半导体应用成果

#### 3.1 SiC器件应用成果

由于SiC功率器件在应用中有高转化效率、功率密度大、高频对外围组件体积的减少、耐高温、使用寿命长等优势,因此其在电力转换需求频繁、对电力转换组件有体积或质量要求、相对高温的使用环境上有得天独厚的优势。

当前SiC功率器件主要应用领域有各类电源及服务器,光伏逆变器,风电逆变器,新能源汽车的车载充电机、电机驱动系统、直流充电桩,变频空调,轨道交通,军工等。

在新能源汽车领域,采用SiC功率器件因其对电能较高的转化效率可以提升电池的能量利用率;同时,因其功率密度大、高频率可减少电力转化模块的体积和质量,也因其对高温的耐受能力更强使其节省了散热组件,实现了整车轻量化。综合来看,采用SiC功率器件可使新能源汽车在同样的电池容量下实现更高的续航里程。2015年,特斯拉Model 3开始采用分立SiC MOSFET的电机控制器,

(图5(a))。在2016年,日本丰田和电装联合研发的SiC电机控制器,能量损耗较先前的产品降低了10%;日本罗姆公司为Formula E方程式赛车提供了全SiC控制器,相比IGBT控制器,体积减小了43%,质量减小6 kg<sup>[16]</sup>。与此同时国内研究机构也在积极研究SiC控制器的应用。2017年,中国科学院电工研究所开发出600 V<sub>DC</sub>、峰值功率85 kW的SiC电机控制器样件。2018年,特斯拉Model 3采用了意法半导体生产的SiC逆变器,是第一家在主逆变器中集成全SiC功率模块的车企<sup>[17]</sup>。同年精进

电动研发出600 V<sub>DC</sub>、峰值120 kW水冷SiC电机控制器,而2020年7月新上市的比亚迪-汉EV也搭载了高性能SiC-MOSFET控制模块(图5(b)),功率密度超过30 kW/L。2020年11月精进电动宣布其300~600 kW系列SiC MOSFET控制器(图5(c)),获得了德国大众商用车公司TRATON集团客车和重卡等电动化商用车驱动电机控制器的量产合同,功率密度大于40 kW/L,在不同工况下比硅基控制器节能3%~6%。



图5 电动化车辆的SiC(SiC MOSFET)控制器

另外,因高功率直流充电桩在快速充电方面的优势,SiC功率器件以其高转化效率、功率密度大、耐高温、使用寿命长的特点,更适合用在高频次使用的直流充电桩上,以降低电能损耗、节省充电桩体积、提高充电速率、延长设备使用寿命。并且当前SiC功率器件做成的充电桩功率模组虽然在器件成本上相较于Si基器件贵3~5倍,但由于减少了外围电容、电感等其他组件,使得总体器件数量为Si基的1/2左右,系统成本仅比充电桩硅基模组高10%~20%。相较于折旧增加带来的成本,电力节约而节省的成本更为突出,使得在专用充电桩领域SiC替代Si基功率器件有经济优势。

在绿色能源领域,光伏发电是产生直流电,若要并入电网则需要逆变成交流电,这个电能转换过程便需要功率器件的参与。SiC功率模块与采用Si基IGBT的功率模块相比,可将开关损失降低85%,采用SiC功率器件可直接提升电能的转化效率,增加其并网发电收入。风力发电是先产生频率、电压、电流不稳定的交流电,经过整流成为直流电后

再统一逆变成可并网的交流电,整个电能转换过程需要经过整流、逆变两步,因此采用转化效率更高的SiC功率器件能更好地提升风能的利用效率。同时,SiC功率器件因其材料特性使用寿命比硅基器件更久,也更耐受极端环境,更适合光伏、风力发电领域。

在轨道交通领域中,国内外已经有多家公司和科研院所都关注SiC器件在牵引变流器系统中的应用研究,其中一些机构已经将产品市场化并在轨道列车上安装运行。三菱电机公司开发了一款适用于轨道列车牵引系统的3.3 kV全SiC功率模块,通过将该高耐压全SiC功率模块应用于轨道车逆变器系统中的主电路系统,主电路系统可以比现有系统节约大约30%的功率。2013年,三菱电机公司宣布推出一款用于1500 V直流悬链线的轨道车牵引逆变器系统(图6<sup>[18]</sup>),该系统采用全SiC功率模块,开关损耗比三菱电机采用IGBT功率模块的传统逆变器系统约低55%。该系统还通过在广泛的速度范围内使用再生制动器提高再生能量。得益

于这些解决方案,与传统系统相比,铁路车辆系统(包括其电机)的总能耗降低了约30%。与具有IGBT功率模块的传统逆变器系统相比,尺寸和质量

减小约65%,与具有SiC二极管的现有混合逆变器系统相比减小约30%<sup>[19]</sup>。

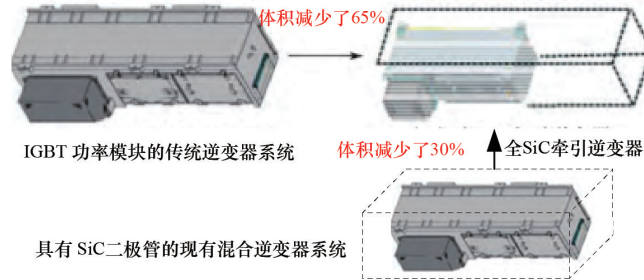


图6 三菱电机公司1500 V直流悬链线牵引逆变器系统全SiC变流器与传统变流器对比

在大型服务器、数据中心或比特币矿场中,电费是主要的运营成本,在其运行过程中根据负载设备的需要会进行频繁的电转换,功率器件是这类设备电源的主要组成部分。因为SiC功率器件在电转换上的高效率、耐高温、使用寿命长的特性,使其在这类IT应用中能为使用者节省大量能耗、替换维护成本。

业控制、智能电网等诸多领域SiC功率器件因其自身高性能的优势也有初步使用或研发跟进。综合来看,新能源汽车、绿色能源、大型服务器、数据中心等领域对SiC功率器件的需求较为迫切,且有一定成熟应用,其他领域也在逐步推进(表1),总体上市场对高性能的SiC功率器件保持持续的需求增长状态。

除上述领域之外,在家电、军工、航空航天、工

表1 SiC器件在各行业中的应用及优势

行业	用途及优势
电源/大型服务器	用于电源及功率因数校正器内部,减积减重、提高效率、降低损耗
光伏	用于光伏逆变器中,光伏发电产生的电流为直流电,需要通过逆变器转换为交流电以实现并网。采用SiC功率器件可以减积减重;提高逆变转化效率2%左右,综合转换效率达到98%;降低损耗,提高光伏电站经济效益;SiC材料特性,降低故障率
风电	用于风电整流器、逆变器、变压器,风力发电产生的交流电易受风力影响使得电压、电流不稳定,先要经过整流为直流电后再逆变成交流电实现并网,提高效率、降低损耗,同时成本和质量分别减少50%和25%
新能源汽车车载充电机(OBC)	减积减重、提高效率、降低损耗
新能源汽车电机驱动系统	(1) 利用SiC功率模块体积比硅基模块缩小1/3~2/3,减积减重;(2) 电力损耗减少47%,开关损耗85%,提升电力使用效率;(3) 开关频率可达硅基IGBT 10倍以上,提高开关频率将显著减小电感器、电容器等周边部件的体积和成本。减积减重;(4) 发热量也只有硅器件的1/2,有非常优异的高温稳定性,散热处理更容易,散热体积减小,可使得车辆冷却系统的体积减少60%,甚至消除了二次液体的冷却系统,减积减重;(5) 可实现逆变器与马达一体化,减积减重。可综合提高新能源汽车5%~10%左右的续航里程
新能源汽车直流充电桩	减积减重;提高充电效率至少1%,达到96%以上的转化效率;由于SiC功率器件对温度依赖性较低,提高夏季高温时段电能转化效率;降低电能损耗,提升大型充电站的经济效益;充电桩系统成本与硅基基本持平,性价比较高
空调	用于变频空调前端的功率因数校正(PFC)电源内部,体积和质量大幅减少1/2以上,功耗降低15%,综合成本降低10%
轨道交通	采用SiC逆变器,可使车辆系统电力损耗降低30%以上,零部件体积及质量减少40%,效率及速度提升
电磁感应加热	减积减重、提高效率、降低损耗
军工领域	各种车载、机载、船载、弹载等电源装置,减积减重、提高效率、降低损耗

### 3.2 GaN器件的应用成果

GaN功率器件具有禁带宽度大、热导率高、耐高温、抗辐射、耐酸碱、高强度和高硬度等特性,并且器件制造技术的突破使得GaN器件的成本得到控制,使得GaN功率器件目前已经在新能源汽车、半导体照明、新一代移动通信和消费电子领域中得到广泛应用。

GaN具备导通电阻小、损耗低以及能源转换效率高优点,由GaN制成的充电器可以做到更高的功率密度。安卓端率先将GaN技术导入到快充领域,随着GaN生产成本迅速下降,GaN快充有望成为消费电子领域下一个杀手级应用。预计全球GaN功率半导体市场规模从2018年的873万美元增长到2024年的3.5亿美元,复合增长率达到85%。2019年9月,OPPO发布国内首款GaN充电器SuperVOOC 2.0,充电功率为65 W;2020年2月,小米推出65 W GaN充电器,体积比小米笔记本充电器缩小48%,并且售价创下业内新低。

在射频微波领域,GaN熔点在1700℃,频率目前可达到25 GHz,功率达到1800 W,在航空航天、微波雷达、卫星通信,5G通信有非常大的优势。通过采用GaN功率器件能够有效地改善发射天线的设计,减少发射组件的数目和放大器的级数等,有效降低雷达发射系统的成本。目前,GaN已经开始取代GaAs作为新型雷达和干扰机的T/R(收/发)模块电子器件材料。美国下一代的固态有源相控阵雷达(AMDR)便采用了GaN半导体功率器件。并且在5G领域,GaN功率器件已经成为5G基站中的功率放大器和其他射频器件的重要支撑点,在中国2019年建设的13万个5G基站中,已经全面使用GaN功率放大器,并在2020年预计建设至少50万个使用GaN功率放大器的5G基站。到2024年,中国的目标是部署600万个系统。日本、韩国、美国和其他国家也正在大力推动5G。

GaN具有较宽的禁带宽度(3.4 eV)及利用蓝宝石等材料作衬底,散热性能好,有利于器件在大功率条件下工作。随着对Ⅲ族氮化物材料和器件研究与开发工作的不断深入,GaInN超高度蓝光、

绿光LED技术已经实现商品化,现在世界各大公司和研究机构都纷纷投入巨资加入到开发蓝光LED的竞争行列。

在探测器方面,已研制出GaN紫外探测器,波长为369 nm,其响应速度与Si探测器不相上下。但这方面的研究还处于起步阶段。GaN探测器将在导弹预警、卫星秘密通信、各种环境监测、化学生物探测等领域有重要应用。在激光器方面,GaN基激光器可以覆盖到很宽的频谱范围,实现蓝、绿和紫外激光器的制造。紫色激光器可用于制造大容量光盘,其数据存储盘空间比蓝光光盘高出20倍。除此之外,紫色激光器还可用于医疗消毒、荧光激励光源等应用,总计市场容量为12亿美元;蓝色激光器可以和现有的红色激光器、倍频全固化绿色激光器一起,实现全真彩显示,使激光电视实现广泛应用。

## 4 第三代半导体的发展趋势及关键问题

在5G和新能源汽车等新市场需求的驱动下,第三代半导体材料有望迎来加速发展。硅基半导体的性能已无法完全满足5G和新能源汽车的需求,SiC和GaN等第三代半导体的优势被放大。另外,制备技术的进步使得SiC和GaN器件成本不断下降,SiC和GaN的性价比优势将充分显现。初步判断,第三代半导体未来的核心增长点将集中在SiC和GaN各自占优势的领域。

在美国能源部部署的新能源车开发项目中,60%的项目与SiC器件应用相关。欧洲也制定了SiC技术应用的ES-CAPEE计划和E3Car计划,希望突破SiC单晶材料生长技术、器件设计、器件制作以及应用技术<sup>[20]</sup>。日本以三菱、电装、富士为首的各大汽车部件供货商均已开发出各自的SiC芯片及高效SiC控制器。CASA发布的《第三代半导体电力电子技术路线图(2019)》显示,受益于技术进步和行业规模化的影响,SiC功率器件最主要的原材料成本——SiC衬底、外延片的价格近年来持

续下降,主要表现为在近期5年内,衬底、外延片单位面积价格会伴随直径200 mm衬底的快速推广,小幅度下调,在大部分衬底提供商完成低缺陷密度单晶生长工艺及厚单晶生长工艺研发后,外延片提供商优化外延生长工艺及采用快速外延生长技术后,衬底、外延片单位面积价格会迎来相对快速的降低。未来随着SiC衬底、外延片尺寸的增大,单位面积价格将进一步降低。

SiC和GaN等宽禁带电力电子器件代表着电力电子器件领域发展方向,随着时间的发展,宽禁带半导体器件制备中材料和工艺上的问题必将得到逐步解决。但是即使这些问题都得到解决,宽禁带电力电子器件的价格肯定还是比硅基器件要贵。由于它们的优异特性可能主要用于中高端应用,与Si全控器件不可能全部取代Si半控器件一样,SiC和GaN宽禁带电力电子器件在将来也不太可能全面取代Si功率MOSFET、IGBT和GTO(包括集成门极换流晶闸管(IGCT))。SiC电力电子器件将主要用于600 V以上的高压工业应用领域;GaN电力电子器件将主要用于600 V以下的消费电子、计算机/服务器电源应用领域。

宽禁带功率半导体产业链主要包含单晶材料、外延材料、器件、模块和应用这几个环节。其中,单晶材料是宽禁带功率半导体技术和产业的基础,主要技术指标有单晶直径、微管密度、单晶电阻率、表面粗糙度、翘曲度等;外延材料是实现器件制造的关键,主要技术指标有外延片直径、外延层厚度、外延层掺杂浓度和表面缺陷密度等;器件是整个产业链的核心,主要技术指标有阻断电压、单芯片导通电流/电阻、阻断状态的漏电流、工作温度等;模块是实现器件应用的桥梁,主要技术指标有模块容量、热阻、寄生参数和驱动保护等;应用是宽禁带功率半导体器件和产业发源的源动力,主要技术指标是开关频率、转换效率和功率密度等。以SiC为例,在宽禁带半导体产业上还存在着以下问题。

1) 大尺寸SiC单晶衬底制备技术仍不成熟。目前国际上SiC芯片的制造已经从4英寸换代到6英寸,并已经开发出了8英寸SiC单晶样品,与先进的硅功率半导体器件相比,单晶衬底尺寸仍然偏

小、缺陷水平仍然偏高。并且缺乏更高效的SiC单晶衬底加工技术。SiC单晶衬底材料线切割工艺存在材料损耗大、效率低等缺点,必须进一步开发大尺寸SiC晶体的切割工艺,提高加工效率。衬底表面加工质量的好坏直接决定了外延材料的表面缺陷密度,而大尺寸SiC衬底的研磨和抛光工艺仍不能满足要求,需要进一步开发研磨、抛光工艺参数,降低晶圆表面粗糙度。

p型衬底技术的研发较为滞后。目前商业化的SiC产品是单极型器件。未来高压双极型器件需要p型衬底。目前SiC p型单晶衬底缺陷较高、电阻率较高,其基础科学问题尚未得到突破,技术开发滞后。

近年来,中国SiC单晶材料领域取得了长足进步,但与国际水平相比仍存在一定的差距。除了以上共性问题以外,中国SiC单晶材料领域在以下2个方面存在巨大的风险:一是SiC单晶企业无法为国内已经/即将投产的6英寸芯片工艺线提供高质量的6英寸单晶衬底材料;二是SiC材料的检测设备完全被国外公司所垄断。

2) n型SiC外延生长技术有待进一步提高。目前外延材料生长过程中气流和温度控制等技术仍不完美,在6英寸SiC单晶衬底上生长高均匀性的外延材料技术仍有一定挑战,一定程度影响了中低压SiC芯片良率的提高。p型SiC外延技术仍不成熟。高压SiC功率器件是双极型器件,对p型重掺杂外延材料提出了要求,目前尚无满足需求的低缺陷、重掺杂的p型SiC外延材料。

近年来中国SiC外延材料技术获得了长足进展,申请了一系列的专利,正在缩小与其他国家的差距,已经开始批量采用本土4英寸单晶衬底材料,产品已经打入国际市场。但是,目前国内SiC外延材料产品以4英寸为主,由于受单晶衬底材料的局限,尚无法批量供货6英寸产品。并且SiC外延材料加工设备全部进口,将制约中国独立自主产业的发展壮大。

3) 虽然国际上SiC器件技术和产业化水平发展迅速,开始了小范围替代硅基二极管和IGBT的市场化进程,但是SiC功率器件的市场优势尚未完

全形成,尚不能撼动目前硅功率半导体器件市场上的主体地位。国际SiC器件领域存在的问题主要有:SiC单晶及外延技术还不够完美,高质量的厚外延技术不成熟,这使得制造高压SiC器件非常困难,而外延层的缺陷密度又制约了SiC功率器件向大容量方向发展;SiC器件工艺技术水平还比较低,这是制约SiC功率器件发展和推广实现的技术瓶颈,特别是高温大剂量高能离子注入工艺、超高温退火工艺、深槽刻蚀工艺和高质量氧化层生长工艺尚不理想,使得SiC功率器件中存在不同程度的高温和长期工作条件下可靠性低的缺陷;在SiC功率器件的可靠性验证方面,其试验标准和评价方法基本沿用Si器件,尚未有专门针对SiC功率器件特点的可靠性试验标准和评价方法,导致试验情况与实际使用的可靠性有差距;在SiC功率器件测试方面,SiC器件测试设备、测试方法和测试标准基本沿用Si器件的测试方法,导致SiC器件动态特性、安全工作区等测试结果不够准确,缺乏统一的测试评价标准。

除了以上共性问题外,中国SiC功率器件领域发展还存在研发时间短,技术储备不足,进行SiC功率器件研发的科研单位较少,研发团队的技术水平跟国外还有一定的差距等问题,特别是在以下3个方面差距巨大:(1)在SiC MOSFET器件方面的研发进展缓慢,只有少数单位具备独立的研发能力,存在一定程度上依赖国际代工企业制造芯片的弊病,容易受制于人,产业化水平不容乐观。(2)SiC芯片主要的工艺设备基本上被国外公司所垄断,特别是高温离子注入设备、超高温退火设备和高质量氧化层生长设备等,国内大规模建立SiC工艺线所采用的关键设备基本需要进口。(3)SiC器件高端检测设备被国外所垄断。

4)当前SiC功率模块主要有引线键合型和平面封装型2种。为了充分发挥SiC功率器件的高温、高频优势,必须不断降低功率模块的寄生电感、降低互连层热阻,并提高芯片在高温下的稳定运行能力。目前SiC功率模块存在的主要问题:(1)采用多芯片并联的SiC功率模块,由于结电容小、开关速度快,因此在开关过程中会出现极高的电路上

升率( $di/dt$ )和电压上升率( $du/dt$ ),在这种情况下会产生较严重的电磁干扰和额外损耗,无法发挥SiC器件的优良性能;SiC功率模块的封装工艺和封装材料基本沿用了硅功率模块的成熟技术,在焊接、引线、基板、散热等方面的创新不足,功率模块杂散参数较大,可靠性不高。(2)SiC功率高温封装技术发展滞后。目前SiC器件高温、高功率密度封装的工艺及材料尚不完全成熟。为了发挥SiC功率器件的高温优势,必须进一步研发先进烧结材料和工艺,在高温、高可靠封装材料及互连技术等方面实现整体突破。

5)SiC功率器件的驱动技术尚不成熟。为了充分发挥SiC功率器件的高频、高温特性,要求其驱动芯片具有工作温度高、驱动电流大和可靠性高的特点,目前SiC功率器件的驱动芯片及驱动电路仍然沿用硅器件的驱动技术,尚不能发挥SiC功率器件高温、高频的工作特性,使得SiC功率器件在实际使用过程中难以达到设计的极限性能。

6)SiC器件的应用模型尚不能全面反映SiC器件的物理特性。目前SiC器件物理特性的数学模型主要有基于模拟等效电路的数学模型和基于物理模型的数学模型。基于模拟等效电路的模型结构简单,但是精度难以保证,一般只适合于对精度要求较低的常规工业场合。基于物理模型的数学模型能够描述SiC器件内部物理特性的变化规律,但是其形式非常复杂,计算量巨大,难以实现对SiC器件特性的在线快速仿真和计算。目前在工业应用中所使用的SiC器件模型是将两种模型结合在一起,采用半经验短沟道模型对功率元件的物理特性进行分析,既简化了物理模型的复杂程度,又提高了等效模型的计算精度。并在研究过程中通过不断改进半物理模型来提高SiC功率器件模型的准确性,但上述半物理模型仍是局限于对传统硅功率器件物理模型的部分缺陷进行的改进,并没有针对SiC功率器件的物理模型进行分析,缺少对SiC功率器件内部特性和输出特性的全面性的研究,目前SiC功率器件数学模型的精度尚不能对SiC器件的电路拓扑仿真设计提供准确的指导。

这些内容将是未来中国第三代半导体产业亟

待解决的问题和研究方向。预计新能源汽车电机控制器、DC/DC电源、充电机等将是第三代宽禁带功率半导体下游应用端的主要市场拉动力。为此在中国工业和信息化部指导下,中国汽车工程学会牵头的《节能与新能源技术路线图 2.0》的电驱动技

术路线图中给出了 SiC MOSFET 的技术路线图(图 7)<sup>[21]</sup>。在总体目标、主要指标和关键技术 3 个维度给出了 2025、2030、2035 年这 3 个时间节点的参数,为产业链提供方向和路线上的参考。

	~2025年	~2030年	~2035年
总体目标	SiC MOSFET 关键性能与国家先进水平的差距缩小到一代以内;突破芯片新型结构设计以及先进工艺技术;实现耐高温、低损耗 SiC MOSFET 芯片产业化	SiC MOSFET 关键性能达到国际先进水平;提升芯片结构设计以进工艺技术水平;进一步提升耐高温、低损耗 SiC MOSFET 芯片产业规模	SiC MOSFET 关键性能与国际最高水平相当;芯片结构设计以及工艺技术水平进一步提升;实现耐高温、低损耗 SiC MOSFET 芯片大规模产业化
关键指标	击穿电压等级达到650~1200 V	击穿电压等级达到650~1500 V	击穿电压等级达到650~1700 V
	单芯片导通电流达到150 A	单芯片导通电流达到250 A	单芯片导通电流达到400 A
	芯片电流密度达到450 A/cm <sup>2</sup>	芯片电流密度达到600 A/cm <sup>2</sup>	芯片电流密度达到800 A/cm <sup>2</sup>
	芯片最高工作结温达到225 °C	芯片最高工作结温达到250 °C	芯片最高工作结温达到275 °C
关键技术	耐高温、低损耗SiC MOSFET芯片设计	耐高温、低损耗SiC MOSFET芯片设计	耐高温、低损耗SiC MOSFET芯片设计
	高电子迁移率、高可靠SiC MOS栅氧介质形成工艺	高电子迁移率、高可靠SiC MOS沟槽栅氧工艺和栅氧拐角电场平缓技术	高电子迁移率、高可靠SiC MOS沟槽栅氧工艺和栅氧拐角电场平缓技术
	SiC MOS沟槽栅形成工艺	高深宽比、高平整度SiC沟槽机构形成, 8英寸晶圆制造工艺, 厚度≤100 μm	高深宽比、高平整度SiC沟槽机构形成, 8英寸晶圆制造工艺, 减薄厚度≤50 μm
	高温封装材料与封装工艺技术	高温封装材料与封装工艺技术	高温封装材料与封装工艺技术

图7 新能源汽车电驱动关键器件(SiC MOSFET)技术路线图

## 5 结论

在目前的三代半导体领域中,中国在以 Si 为代表的第一代半导体材料和国际一线水平差距最大,在生产设备方面几乎所有的晶圆代工厂都会用到美国公司的设备,2019 年全球前 5 名芯片设备生产商 3 家来自美国;而中国的北方华创、中微半导体、上海微电子等中国优秀的芯片公司只是在刻蚀设备、清洗设备、光刻机等部分细分领域实现突破,设备领域的国产化率还不到 20%。在应用材料方面,美国已连续多年位列第一,中国的高端光刻胶几乎依赖进口,全球五大硅晶圆的供应商占据了高达 92.8% 的产能,美国、日本、韩国的公司具有垄断地位。在生产代工方面,2019 年台积电市场占有率高达 52%,韩国三星占了 18% 左右,中国最优秀的芯片制造公司中芯国际只占 5%,且在制程上与前面 2 个头部公司有 8~10 年的差距。

但是,在以 GaAs 为代表的第二代半导体领域中国已有突破迹象。在 GaAs 三大产业链环节(晶

圆、晶圆制造代工、核心元器件),目前都以欧美、日本和中国台湾厂商为主导。中国大陆企业起步晚,在产业链中话语权不强。不过从 3 个环节来看,已经有突破迹象。华为已经实现将手机射频关键部件——功率放大器(PA)通过自己研发然后转单给三安光电代工。

在以 GaN 和 SiC 为代表第三代半导体方面,中国有追赶和超车的机会。由于第三代半导体材料研究于 21 世纪初开始产业化应用,各国的研究和水平相差不远,国内产业界和专家认为第三代半导体材料成了中国摆脱集成电路(芯片)被动局面、实现芯片技术追赶和超车的良机。例如在汽车产业,中国目前已经利用发展新能源汽车的模式拉近和美、欧、日等国家和地区的距离,并在某些领域实现了换道超车的局面。第三代半导体材料性能优异、未来应用广泛,中国目前已有 70 多家企事业在进行第三代半导体的相关研发与生产,涉及宽禁带半导体的单晶衬底材料、外延材料、器件设计和制造

工艺,但离形成完整产业链尚有较大差距。衬底和外延材料、器件设计和制造工艺以及材料质量评价和性能验证是环环相扣、互相推动的统一整体。因此需要在国家政策进一步指导之下,发挥行业协会和产业联盟的桥梁和纽带作用,对衬底材料、外延材料、器件设计和制造工艺等产业链各环节进行整体支撑,引导各环节间实现资源共享、强强联合,上下游互相拉动和促进,形成一个布局合理、结构完整的产业链,实现中国第三代半导体产业的健康、快速和可持续发展。

**致谢** 哈尔滨理工大学硕士研究生苏鸿宇完成本文部分图表。

#### 参考文献(References)

- [1] 李亮,沈羽,柴晓宇,等. 半导体材料在电子科学技术中的发展前景[J]. 中国新通信, 2019, 21(18): 60-61.
- [2] 闫美存. 碳化硅功率器件的关键技术及标准化研究[J]. 信息技术与标准化, 2018(4): 40-43.
- [3] 曹峻. 碳化硅半导体技术和市场应用综述[J]. 集成电路应用, 2018, 35(8): 5-9.
- [4] 赵炫,蒋栋,刘自程,等. SiC功率器件在轨道交通行业中的应用[J]. 机车电传动, 2020(1): 38-44.
- [5] 盛况,任娜,徐弘毅. 碳化硅功率器件技术综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 1741-1753.
- [6] 李许军,坚葆林. 高压SiC功率半导体器件的发展现状与挑战[J]. 集成电路应用, 2020, 37(2): 30-33.
- [7] 基本半导体: 将SiC功率器件提携至高光之下[J]. 变频器世界, 2019(7): 14-15.
- [8] 第三代半导体产业发展报告(2017)[R]. 北京: 第三代半导体产业技术创新联盟, 2017: 16-39.
- [9] 英飞凌碳化硅SiC占比充电桩市场份额超过五成[J]. 半导体信息, 2019(4): 36-37.
- [10] 盛况,董泽政,吴新科. 碳化硅功率器件封装关键技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5576-5584.
- [11] Iwamuro N. Recent Progress of power semiconductor devices and their futures[C]. 2017 IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ), 2017: 191-194.
- [12] 宋维东. 碳化硅半导体材料的研究现状及发展前景[J]. 中国粉体工业, 2020(2): 8-11.
- [13] 牛双蛟,李倩. 氮化镓材料的研究进展[J]. 广东化工, 2017, 44(2): 84-86.
- [14] 第三代半导体产业观察第三代半导体材料之氮化镓(GaN)[EB/OL]. (2020-06-30) [2020-10-20]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1670910224276391004&wfr=spider&for=pc>.
- [15] 高雅丽. 氮化镓衬底晶片实现“中国造”[N]. 中国科学报, 2018-01-29(6).
- [16] Tetsu N, Ryo T, Kenji O, et al. 3.3 kV all-SiC power module for traction system use[C]//PCIM Europe 2017-International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Nurnberg: Power, Conversion, Intelligent, Motion(PCIM), 2017: 51-56.
- [17] 第三代半导体产业技术创新战略联盟. 2018全球第三代半导体产业发展回顾及展望[J]. 新材料产业, 2019, 5: 26-35.
- [18] Mitsubishi Electric Corporation. Mitsubishi electric to launch railcar traction inverter with all-SiC power module [EB/OL]. (2013-10-25) [2018-10-12]. <https://www.mitsubishielectric.com/news/2013/pdf/1225.pdf>.
- [19] Shang F, Arribas A P, Krishnamurthy M. A comprehensive evaluation of SiC devices in traction applications [C]//2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo. Piscataway, NJ: IEEE, 2014: 1-5.
- [20] 陈治明,李守智. 宽禁带半导体电力电子及其应用[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [21] 蔡蔚,贡俊,张舟云,等. 新能源汽车电驱动总成系统技术路线图[M]//节能与新能源技术路线图2.0. 北京: 机械工业出版社, 2020.

## Third generation wide bandgap power semiconductors and their applications

CAI Wei, SUN Dongyang, ZHOU Minghao, GUO Qingbo, GAO Hanying

School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China

**Abstract** In recent years, the third generation wide bandgap(WBG) power semiconductors, represented by the silicon carbide and the gallium nitride, have developed rapidly, and have become the focus of the R & D and the industrial applications in the power electronics industry. It is very important for the sustainable development of the industrial innovation system to seize the strategic opportunity period of the third generation WBG power semiconductor, and to realize the independent and controllable development of the semiconductor materials, devices, packaging modules and systems. Based on the analysis of the important strategic significance of the third generation WBG power semiconductor, this paper reviews the development of its materials, device R & D and industry, as well as the application achievements of the silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN) devices, and the key issues in the third generation WBG semiconductor industry. Based on the analysis of the current situation and the forward-looking prediction, the future development trend and the technology route of the third generation WBG semiconductor in China are analyzed. It is suggested that under the national policy, the industry association and the industry alliance should play roles as a bridge and a link to support all links of the industry chain, such as the substrate materials, the epitaxial materials, the device design and the manufacturing technology, so as to guide all links to realize the resource sharing, the strong alliance, and the mutual pull and promotion between the upstream and the downstream, so as to form an industry chain with a reasonable layout and a complete structure.

**Keywords** 3rd generation wide bandgap power semiconductors; silicon carbide; gallium nitride; chips and package technology; power semiconductor application and market; SiC converter and inverter ●



(责任编辑 王志敏)