

第三代半导体发展现状及未来展望

高爽, 郑宇亭*, 张志国

中电科第三代半导体科技有限公司, 北京 100041

摘要 在分析第三代半导体重要战略意义的基础上, 讨论了中国在相关领域技术和产业化能力的发展状况, 阐述了“大尺寸、降成本”是当前碳化硅及氮化镓技术的发展重心, 并探讨了第三代半导体行业企业发展模式以及可能存在的问题及风险。尽管中国已具备良好基础, 但仍存在不足, 建议在国家政策的指导下, 以应用牵引实现发展, 加大产线的持续支持力度, 系统地丰富产品形态, 促进第三代半导体产业高质量发展, 把握未来应用新机遇。

关键词 第三代半导体; 碳化硅; 氮化镓; 5G 通讯; 企业模式

20 世纪 80 年代初, 第三代半导体初露峥嵘, 率先在化合物照明领域取得重大突破, 目前已经在全球形成万亿级的市场规模。近 3 年受新冠疫情影响, 第三代半导体发展有所缓滞, 但全球体量仍以每年约 10% 的复合增长率提高^[1]。随着深紫外发光二极管(LED)、Mini-LED、Micro-LED 等革新技术的出现, 第三代半导体在光电子领域又开辟出新型显示、智慧农业、医疗健康等新的应用场景, 将进一步扩大市场规模。

1993 年, 随着第 1 个具有微波特性的氮化镓(GaN)高电子迁移率晶体管(HEMT)器件被公开报道, 第三代半导体迅速进入微波射频的研发和应用领域^[2], 尤其是 GaN 射频器件, 以其特有的高功率、高效率、高线性、高工作电压、抗辐照等优异特性, 成为硅(Si)、砷化镓(GaAs)等器件的理想替代者,

在军事装备、航空航天、第五代移动通信(5G)技术等领域发挥了重要的作用, 并展现出了广阔的发展前景。

21 世纪初, 以 S 波段固态微波射频器件为代表, 美国首先将碳化硅(SiC)应用到装备中, 尽管随后逐渐被 GaN 取代, 但其具有的高耐压、高频率特性得到电力电子领域的青睐, 正逐步成为 Si 电力电子器件的替代者, 尤其是 2002 年后, SiC 单晶衬底技术迅速发展, 制造成本大幅降低, 未来将在新能源汽车、高铁、智能电网等领域发挥重大作用, 预计支撑 10 万亿元以上的市场规模^[3]。

第三代半导体在光电子、射频电子和电力电子 3 个领域经历 20 多年的发展, 支撑了万亿级的市场规模, 并且还在不断地涌现新的应用场景, 激发新的发展潜力。

收稿日期: 2023-11-14; 修回日期: 2023-12-08

作者简介: 高爽, 工程师, 研究方向为宽禁带半导体产业经济学, 电子信箱: wbg_s_gaoshuang@126.com; 郑宇亭(通信作者), 工程师, 研究方向为宽禁带半导体基础, 电子信箱: wbg_s_zhengyuting@126.com

引用格式: 高爽, 郑宇亭, 张志国. 第三代半导体发展现状及未来展望[J]. 科技导报, 2024, 42(8): 29-38;

doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.11.01709

1 市场巨大的应用场景

1.1 5G 展现“中国速度”，GaN 射频器件施展空间广阔

5G 是当前代表性、引领性的网络信息技术，具有高速度、泛在网、低功耗、低时延、高可靠的特点，将实现万物泛在互联、人机深度交互，渗透到经济社会的各行业各领域，成为支撑经济社会数字化、网络化、智能化转型的关键新型基础设施^[4]。

5G 基站对射频器件提出更高的要求，传统的横向扩散金属氧化物半导体(LDMOS)无法适应 5G 的高频率，而 GaN 适应的频率范围拓展了 40 GHz 甚至更高，可适应 5G 高频的需求；GaN 具有软压缩特性，更容易预失真和线性化，实现更高的效率；GaN 可以做到更高的功率密度，达到 LDMOS 器件功率密度的 4 倍左右；GaN 封装尺寸仅是 LDMOS 的 1/4~1/7，GaN 射频器件更适用于 5G 基站。2010 年，GaN 基高功率微波放大器件首先应用于小体积、高线性度等高端基站设备，开始向移动通信市场投放。随着第四代移动通信(4G)无线网络基础设施建设的全面铺开，2014 年 GaN 应用明显增多，而 2 GHz 以上 Si 基 LDMOS 器件的市场占有率从 92% 下降至 76%。而 5G 的推出，让 GaN 微波功率放大器接受度更高，在高频段下，只能依赖 GaN 基 HEMT 器件。目前，GaN 基 HEMT 的微波射频技术基本实现了第三代半导体相对于前代半导体(Si 基 LDMOS、GaAs/InP 基 pHEMT 等)的大跨越。

随着 5G 建设进程的布局和推进，中国 5G 频段从开始 4.9、3.5、2.6 GHz 逐步扩展到 2.1 GHz、700 MHz 及最新的 900 MHz。基站结构从开始的大规模密集型多输入多输出天线阵列(massive multiple-input multiple-output, Massive MIMO)回归到传统的 MIMO 结构，基站的收发通道也从原来的 64、32 通道减少到 8、4 通道。同时，对于 GaN 射频器件提出了新的需求，要求器件的输出功率从原来的 100 W 量级达到 500~700 W 甚至更高的功率量级。频率、通道数、功率的改变，需要从材料、设计、工艺、封装等环节进行创新研发，满足新的基站研发和生产需求。

根据中华人民共和国工业和信息化部(简称：工信部)发布的报告，截至 2023 年 5 月末，中国 5G 基站的数量已达到 284.4 万个，移动物联网终端用户超 20.5 亿^[5]。中国是全球首个建成 5G SA(独立组网)网络的国家，让端到端网络切片、海量连接、超高可靠 5G 特性发挥到极致。作为新基建之首，2019—2022 年，投资逐年攀升至 4016 亿元。2025 年，中国 5G 网络建设投资累计将达 1.2 万亿元，带动相关投资超过 3.5 万亿元^[6]。根据移动通信“十年一代”的发展特点，5G 发展由浅入深，5G 技术还在持续向前演进，5.5G 预计将于 2024 年进入商用阶段。新的标准将通过构建频谱利用、原生人工智能、上行增强、聚焦行业、智能管理及绿色低碳等 6 大核心支柱，达到能力增强、边界延伸和效率提升的最终目标，推动 5G 行业应用的全面渗透。伴随低频段的饱和应用和更宽带宽、更大通信容量的需求，5G 通信必将向毫米波频段演进，6G 移动通信甚至将频率提高到太赫兹。传统射频器件的产品形态已不能满足新的要求，需要研发毫米波单片集成功率放大器芯片，集成放大、开关、低噪放的收发一体多功能芯片。GaN 太赫兹器件具有更大的电子有效质量、更高的纵向声子能量、更快的子带间电子散射、更大的负阻区电流峰谷比和更高的二维电子气密度等，在太赫兹领域中具有优势。当然，当频率进入太赫兹频段，利用厚膜工艺的传统收发模块将无法满足基站小型化、高效率、高集成的要求，需创新研发利用微电子工艺的三维封装工艺，实现从传统的二维集成向三维集成跨越，功能向集成天线、收发、控制、数模转换等功能的三维集成多功能封装器件发展，实现器件的体积、质量减少 1 个数量级以上，功能提升 1 个数量级以上。

1.2 “双碳”战略加快 SiC 电力电子器件新应用

2020 年 9 月，中国明确提出 2030 年“碳达峰”与 2060 年“碳中和”目标。第三代半导体被称为绿色半导体，SiC 电力电子器件具有高击穿电压、高效率、高频率等特性，其器件节能性是硅器件的 4 倍，是支撑“双碳”战略的核心器件。由其制成的芯片在新能源汽车、光伏逆变、轨道交通、智能电网等场景具有广阔的应用前景。

在新能源汽车领域,低压直流/直流转换,需要650 V及以下的肖特基势垒二极管(SBD)器件;车载充电机(OBC)需要1700 V以下的SiC金氧半场效晶体管(MOSFET),其导通电阻涉及25、40、80、160 mΩ等级;在主驱中需要电压1200 V,导通电阻小于15 mΩ,电流100 A以上芯片研发功率等级为400、600、800 A等级的功率模块,满足不同续航里程的需求。同时,高压架构是实现大功率快充的必经之路,随着800 V快充系统的普及,需要研发新的SiC电力电子器件产品,以满足电压、电流、导通电阻变化的需求,在新能源汽车领域的应用向更高电压、更大电流、更小导通电阻演进。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。例如,在配备了1200 V SiC MOSFET的系统中,逆变器能耗可降低60%以上,同时降低整车能耗,实现更少的电池容量需求。此外,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。如采用全SiC MOSFET的双向OBC,可较Si方案实现开关频率提高1倍以上,且功率器件和栅极驱动数量都减少30%以上,使系统轻量化和整体运行效率提升。综合来看,采用SiC功率器件驱动的新能源汽车可以大幅降低能量损耗,在同样的电池容量下续航里程增加5%~10%^[7]。在工信部等三部委印发的《工业领域碳达峰实施方案》中指出,2030年新增新能源、清洁能源动力交通工具比例达到40%左右,为SiC电力电子器件的应用发展提供了广阔的市场^[8]。

在轨道交通领域,国内外已经关注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^[9]。近期,SiC在轨道交通领域又取得新进展,成都地铁、西安地铁相继应用了基于SiC变流器和永磁同步电机牵引系统。目前,中国城市轨道交通运

营线路突破1万km大关,“十四五”末对应的里程预计达到1.5万km,全国铁路营业里程达到16.5万km,其中高速铁路5万km^[10]。这一场景是中压SiC电力电子器件的优势,将逐步替代Si基电力电子器件,是中期的市场需求。

在绿色能源领域,光伏发电产生的直流电若要并入电网需要逆变成交流电,电能转换过程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^[11-12]。据国际能源署(IEA)估计,到2024年,假如仅2%的分布式太阳能光伏系统部署了SiC,其额外可产生的发电量将多达10 GW。中国是电能消耗大国,2022年全社会用电量约8.6万亿千瓦时^[13],智能电网需求万伏千安级第三代半导体电力电子器件,规划2035年实现商用,其市场需求比新能源汽车更加广阔。这一场景需求的SiC电力电子器件击穿电压和电流是新能源汽车器件的10倍以上,其研发和生产均有本质差别。同样需要从材料、设计、工艺、封装等环节进行创新研发,是SiC电力电子器件的远期市场需求。

1.3 军事需求加速新技术研发和应用

纵观全球半导体领域,军事装备对新材料、新器件、新工艺的需求是促进半导体领域发展的重要诱因。第三代半导体是支撑国防建设的关键核心,是掌握未来战争主动权的关键要素。第三代半导体具备的优异性能可使雷达、通信装备、导引头体积大幅减小。同时能够大幅提升作战效能,对于提高装备无人化、智能化、信息化水平都具有十分重要的支撑作用,已成为各国在国防科技领域博弈的焦点。例如,采用第三代半导体器件后,雷达在不增加体积和质量的前提下,探测距离和精度实现大幅提升,可发现并锁定隐身目标;通过巨大组合功率可直接烧毁敌方电子器件,实现电子对抗硬杀伤;特种战斗队伍在无线电静默条件下,可实现保密通信。美国在下一代电子干扰机、远程识别雷达、制导导弹、全电化舰船综合电力系统也广泛使用了第三代半导体。

事实上,全球主要国家初期的产业奠基发展规

划都具备了明显的国防军事倾向与应用需求。目前, GaN 基 HEMT 的微波射频技术基本实现了相对于前代半导体的大跨越。全球布局 GaN 基半导体射频器件的重要厂商有美国的 Cree (现 Wolfspeed)、Qorvo、MACOM 和 Raytheon 等, 还有德国的 Infineon, 加拿大的 GaN Systems, 日本的三菱电机, 以及荷兰的 NXP 等。从制造成熟度方面看, 美国 Raytheon 公司和 Qorvo 公司的 GaN 产品已达到其国防部制造成熟度评估最高级, GaN 射频器件的制造工艺已满足最佳性能、成本和容量的目标要求, 并已具备支持全速率生产的能力。2014 年, Raytheon 公司宣布在“爱国者”防空系统部署使用 GaN 模块的先进雷达; 2021 年, 将其 GaN-on-Si 技术授权给了 GlobalFoundries 公司, 以共同开发出能处理 5G 和 6G 毫米波信号的 IC 制程, 将 GaN 基射频器件 (RF) 规模化量产水平升到一个新台阶, 进一步压缩了 RF 的成本。

伴随新的工作场景, 可重构多功能功放、集成不同功能的微波毫米波多功能电路、收发一体组件、数字收发组件、太赫兹芯片、三维集成多功能器件、超大功率器件、异质异构集成器件等新形态的产品需求不断被提出, 促进第三代半导体新技术、

新产品的探索与创新性研发与产业化。第三代半导体领域不断涌现新的应用场景、不断出现新的标准, 对第三代半导体器件提出了新的需求, 传统的单功能器件将会被高频段、高功率、多功能、高集成、小型化的集成器件替代, 至少在未来 10~15 年内, 还将继续支撑数字经济等新兴产业和数十万亿级的市场发展。

2 技术成果不断涌现、产业化水平持续提高

通过国家政策及相关部委持续重点支持, 中国第三代半导体技术在“十二五”“十三五”期间成果不断涌现, 在基础科学问题上获得了突破性进展, 取得了一系列核心知识产权, 为中国第三代半导体产业的发展奠定了基础, 也培养了一批科研人才和创新团队。“十四五”国家重点研发计划 (2021—2023 年) 指南已公布, 继续将第三代半导体列入“新型显示与战略性电子材料”重点专项进行重点支持 (表 1)^[14-16], 持续解决能用好用及可持续创新能力的问题, 推动产业化水平持续提高。

表 1 “十四五”“新型显示与战略性电子材料”重点专项 2021—2023 年第三代半导体方向征求意见指南

序号	项目名称	发布时间/年份	类型
1	面向大数据中心应用的 GaN 基高效功率电子材料与器件	2021	共性关键技术
2	InGaN 基长波段 LED 关键材料与器件技术	2021	共性关键技术
3	新结构、新功能微小尺寸 LED 材料与器件及其在通信/传感领域的应用	2021	共性关键技术
4	Micro-LED 显示外延与芯片关键技术研究	2021	共性关键技术
5	高亮度高对比度全彩 Micro-LED 显示关键技术研究	2021	共性关键技术
6	镓系宽禁带半导体新型异质结构高灵敏信息感知材料和器件	2021	基础前沿技术
7	大尺寸 SiC 单晶衬底制备产业化技术	2021	共性关键技术
8	基于氮化物半导体的纳米像元发光器件	2021	青年科学家项目
9	中高压 SiC 超级结电荷平衡理论研究及器件研制	2021	青年科学家项目
10	GaN 基宽禁带半导体与 Si 半导体的单片异质集成方法与技术	2021	青年科学家项目
11	GaN 单晶新生长技术研究	2021	青年科学家项目
12	面向大功率激光应用的金刚石材料	2021	青年科学家项目
13	基于氮化铝半导体材料的单细胞分析器件	2021	青年科学家项目
14	面向 AR 应用的高像素密度 Micro-LED 微显示关键技术	2022	共性关键技术
15	高亮度 Micro-LED 投影显示关键技术研究	2022	共性关键技术

表1 “十四五”“新型显示与战略性电子材料”重点专项 2021—2023 年第三代半导体方向征求意见指南(续)

序号	项目名称	发布时间/年份	类型
16	抗辐射 SiC 基功率电子器件及其在航天电源中的应用	2022	共性关键技术
17	面向轨道交通和智能电网应用的高压 SiC 基功率电子材料和器件	2022	应用示范类
18	面向工业电机应用的 GaN 基功率电子材料与器件	2022	共性关键技术
19	GaN 基纵向功率电子材料与器件研究	2022	基础前沿技术
20	GaN 基互补型逻辑集成电路技术的基础研究	2022	基础前沿技术
21	高频宽带移动通信用滤波器关键技术研究	2022	应用示范类
22	InGaN 基长波段 LED 关键技术	2022	共性关键技术,定向委托
23	面向现代农业高效种养需求的 LED 技术及其示范应用	2022	应用示范,部省联动
24	面向生殖健康医疗需求的 LED 技术及专用系统研制	2022	应用示范类
25	大功率深紫外 AlGaIn 基 LED 发光材料与器件产业化关键技术	2022	应用示范类
26	高灵敏度宽禁带半导体紫外探测器及多元成像技术	2022	应用示范类
27	面向公共卫生等领域的深紫外 LED 模组和装备开发及应用示范	2022	应用示范类
28	波长短于 250 纳米的 AlGaIn 基深紫外 LED、紫外激光材料与器件关键技术	2022	共性关键技术
29	GaN 单晶衬底材料制备产业化技术	2022	共性关键技术
30	AlN 单晶衬底制备和同质外延关键技术	2022	共性关键技术
31	镓系宽禁带半导体异质结构材料基因工程和信息感知器件	2022	基础前沿技术
32	大尺寸氧化镓半导体材料与高性能器件研究	2022	共性关键技术
33	面向器件研制的大尺寸金刚石半导体材料制备和高效掺杂	2022	基础前沿技术
34	氮化物宽禁带半导体强耦合量子结构材料和器件	2022	基础前沿技术
35	大功率低插损 GaN 基开关关键技术	2022	青年科学家项目
36	面向智能电网的万伏千安级超大功率碳化硅电力电子器件及模块研究	2023	共性关键技术
37	面向宇航应用的抗辐照氮化镓基功率电子材料与器件研究	2023	共性关键技术、揭榜挂帅
38	面向新一代移动通信的氮化镓基射频电子材料与器件研究	2023	共性关键技术
39	铝镓氮基深紫外发光二极管电光转换效率提升关键技术研究	2023	基础研究
40	面向短距离高速通信用氮化镓基激光器材料与芯片研究	2023	共性关键技术
41	氮化物半导体的范德华外延生长及其光电器件应用研究	2023	基础研究
42	第三代半导体用高端金属有机源与耐高能量密度封装材料产业化技术	2023	共性关键技术
43	新能源汽车用碳化硅功率器件和充电装备产业化关键技术及其示范应用	2023	应用示范
44	5G 移动通讯基站有源阵列用声波滤波器材料、器件及其产业化技术	2023	应用示范
45	超宽禁带氧化物超构薄膜及光电探测应用研究	2023	青年科学家项目
46	基于氮化镓基强量子限制结构的量子光源与光信息感知器件研究	2023	青年科学家项目
47	新型铈基氮化物铁电半导体材料研究	2023	青年科学家项目
48	基于超表面调控的氮化镓基发光器件研究	2023	青年科学家项目

中国 GaN 产业形成中游企业向上游和下游延伸的趋势,已经基本实现在射频、LED 和电力电子器件等领域的全覆盖。近年来,各厂商在 GaN 领域的项目接连涌现。尤其在衬底领域表现突出。实现 GaN 单晶材料生长的 *n* 型掺杂、补偿掺杂,研制出高电导率和半绝缘的 GaN 单晶。4 英寸(1 英寸=2.54 cm)GaN 衬底产品厚度达(650±50) μm,缺陷

密度<3×10⁶ cm⁻²;4 英寸掺铁 GaN 衬底产品厚度可达(420±50) μm,缺陷密度<5×10⁶ cm⁻²;同时,实现全球范围内首次厚度突破 1 cm 的 GaN 晶体。GaN 射频器件方面,中国已形成系列化 GaN 微波功率器件和单片微波集成电路(MMIC)产品,工作频率达到 W 波段,最高输出功率超 500 W,收发一体多功能集成芯片是研发的热点,已达到国际先进水平。

GaN 电力电子器件方面,国内企业已经推出低压超低导通电阻及耐压 650~700 V 的 Si 基高压 GaN 功率器件产品。在应用端,目前国内 GaN 功率元件市场的发展主要由消费电子驱动,关键应用主要包括快速充电器,以及音频、无线充电、电源和其他消费级产品等应用场景。随着 GaN 电力电子器件技术日趋成熟,也开始向新能源汽车及工业应用渗透。

在 SiC 领域,目前国内已形成从装备、材料、器件到应用的完整产业链。国产化装备方面已具备晶体生长、材料加工、外延生长、高温注入、封装组装、检测测试等全工艺段,涉及链条各环节核心设备研发及产业化能力。目前,衬底材料已实现由 4 英寸向 6 英寸 SiC 衬底的转变,并已经开发出 8 英寸 SiC 衬底,实现小批量供货;山东天岳先进科技股份有限公司(天岳先进)在液相法制备高质量低缺陷 8 英寸晶体也已取得突破;6 英寸 SiC 外延片涵盖 600~1700 V SiC 电力电子器件用材料,8 英寸外延产品陆续下线。在器件环节,国内厂商正在加强 SiC 器件的技术研发和产线投资以加速国产替代。在 SiC MOSFET 方面,中国电子科技集团有限公司(中国电科)、三安光电股份有限公司(三安光电)、扬州扬杰电子科技股份有限公司(扬杰科技)等厂商已经开发出 1200 V 系列产品,其比导通电阻等特性表现出色,部分实现装车。在 SiC 二极管方面,三安光电、华润微电子有限公司(华润微)、闻泰科技股份有限公司(闻泰科技)等厂商研制出的 SiC 二极管性能数据表现优异,主要应用于超高性能、低损耗和高效率电源等领域。终端应用层上,新能源汽车占比最大,多品牌、多类型新能源汽车不断采用 SiC 方案,800 V 将成为电动汽车主流平台。

3 “大尺寸、低成本”成发展重心,产能布局加速

物美价廉的产品是一个产业发展的永恒主旨,扩大晶圆尺寸是最有效的途径之一^[17]。第三代半导体产业链具有明显的上游牵引效应,衬底、外延、器件制造是其区别于传统半导体生产的关键环节,其中衬底及外延生产占成本 60% 以上。目前,中国 GaN 射频器件产品研发和生产以 4 英寸晶圆体

系为主,SiC 电力电子器件产品处于产品导入和小批量应用阶段,国内主流的 SiC 衬底、外延和产线为 6 英寸体系。据 BAE 系统公司估计,若 GaN 射频器件从 4 英寸晶圆生产转到 6 英寸晶圆生产,每平方毫米成本将会从 3 美元降到 1.5 美元。而成熟的 8 英寸 SiC 技术将有效解决 6 英寸 SiC 晶圆芯片产量有限和边缘浪费过大的问题,使单位芯片成本降低 30%~50%。

在 GaN 衬底方面,产业链上游原材料包括 GaN 衬底及 GaN 外延片,原材料成本较高。以 GaN-on-Si 晶圆为例,8 英寸晶圆器件数量比 6 英寸晶圆多 80%~90%,这对器件成本有直接的影响。中国相关企业发展较好,如英诺赛科已成为全球最大的 8 英寸 Si 基 GaN 量产企业。而 GaN-on-SiC 则主要受制于半绝缘 SiC 晶圆衬底尺寸限制。在衬底领域,GaN 衬底依然存在一定技术困难,1 片 2 英寸的 GaN 晶片,在国际市场上的售价高达 3000~5000 美元,而且数量非常有限。因此,大多数厂商用 SiC 或蓝宝石作为 GaN 的衬底材料。这样做虽然衬底环节工艺更简单,成本低一些,但容易出现裂纹、曲翘等缺陷。当前,GaN 外延片的品质和良率几乎决定了器件产品的性能和良率,并且外延片成本也几乎占到整个 GaN 价值链的 50%。2015 年前后,国外多家公司和研究单位已制出毫米级厚度的 2 英寸自支撑 GaN 衬底,并实现批量生产,4~6 英寸的 GaN 衬底技术也已经有报道。住友化学等公司已实现低位错密度的 $<10^5 \text{ cm}^{-2}$ GaN 单晶衬底的同质外延生长。Sciocs 公司已经成功制作 6 英寸 GaN 衬底原型,并抓紧建立量产技术,计划 10 年内将 GaN 单晶衬底的销售额提高 3 倍以上。国内相关企业也不断加大 GaN 衬底研产能力,自 2021 年至今,逐步研发成功 1、2、4、6 英寸 GaN 单晶材料。

在 SiC 晶圆衬底方面,正不断向大尺寸方向演进,衬底尺寸越大,单位衬底可制造的芯片数量越多,单位芯片成本就越低。2015 年,Wolfspeed 公司展示了 8 英寸 SiC 样品;2019 年完成了首批 8 英寸 SiC 晶圆样品的制样;2022 年 4 月,成为世界上第一个正式启用 8 英寸 SiC 晶圆厂,并在 2023 年第 1 季度已实现出货;同时,Wolfspeed 还斥资数十亿美元扩建已有的美国工厂,并在德国新建 8 英寸 SiC 产

线。其他国际主流厂商中,Coherent 公司同样在 2015 年展示了 8 英寸导电型 SiC 衬底,2019 年又推出了半绝缘 8 英寸 SiC 衬底,计划 2024 年实现量产,并计划 2025 年前提高包括 8 英寸衬底在内的生产能力 5~10 倍。Infineon 在 2020 年 9 月宣布其 8 英寸 SiC 晶圆生产线已经建成,2023 年实现量产,2025 年实现 8 英寸 SiC 衬底器件量产,并将大幅扩建其马来西亚工厂以建成世界上最大的 8 英寸 SiC 晶圆厂。ST、ROHM 等多家企业也将 8 英寸 SiC 量产计划提到了 2023 年,相继重金投资新建大规模厂房。目前,Wolfspeed 是当前世界上唯一一家可以量产 8 英寸 SiC 晶圆的公司,其他大多数国际企业则将其量产节点定在 2023 年左右。在未来 2~3 年内,Wolfspeed 的 8 英寸 SiC 产能主导地位将持续,直到更多公司的产能提升。

国内多家厂商也相继进军 8 英寸 SiC 梯队。2020 年,山西烁科晶体有限公司 8 英寸衬底片研发成功;2022 年,实现 8 英寸 N 型 SiC 抛光片小批量生产^[18]。2022 年,北京天科合达半导体股份有限公司(天科合达)表示计划在 2023 年实现 8 英寸导电型 SiC 衬底的小规模量产^[19]。同时,天科合达和天岳先进与 Infineon 的协议也将加速国产 8 英寸衬底的量产进程。2023 年 2 月,浙江晶盛机电股份有限公司(晶盛机电)表示已完成了 6 英寸到 8 英寸的扩径和质量迭代,实现 8 英寸抛光片的开发并实现小批量生产^[20]。5 月,瀚天天成电子科技(厦门)股份有限公司(瀚天天成)宣布已成功开发具有自主知识产权的 8 英寸外延工艺,并具备了量产能力^[21]。6 月,三安光电与 ST 达成新的合作协议,拟投资 32 亿美元建设一家 8 英寸 SiC 外延和芯片代工合资工厂^[22]。同月,中电化合物半导体有限公司(中电化合物)与韩国 Power Master 签订了包括 8 英寸 SiC 材料在内的长期供应 SiC 材料的协议。10 月,哈尔滨科友半导体产业装备与技术研究院有限公司(科友半导体)首批 8 英寸 SiC 衬底宣布下线,其他在 2023 年内取得突破的企业还包括浙江东尼电子股份有限公司(东尼电子)、山西天成半导体材料有限公司(天成半导体)、杭州乾晶半导体有限公司(乾晶半导体)等。在衬底环节,各企业纷纷公布扩产计划,进一步实现国产化替代;在外延环节,中电国基南

方集团有限公司(中电国基南方)、广东天域半导体股份有限公司(东莞天域)、河北普兴电子科技股份有限公司(普兴电子)、芜湖启迪半导体有限公司(启迪半导体)等亦有布局。

基于国外第三代半导体技术和产业发展以及国内第三代半导体现状的综合情况来看,到“十四五”末,GaN 射频领域主流晶圆尺寸为 6 英寸,SiC 电力电子主流晶圆尺寸将出现 6~8 英寸共存。通过产品晶圆尺寸的提升,将进一步降低中国在 GaN 射频器件和 SiC 电力电子器件领域的研发和生产成本,提高中国产品的国际竞争力。

4 头部企业选择 IDM 模式,未来更多 Fabless + Foundry 模式并存

国内外第三代半导体发展的历史和现状呈现出以垂直整合制造(IDM)为主的发展模式。众所周知,当前 SiC 及 GaN 的终端应用需求量很大,而衬底晶圆产能则相对不足,且市场主要掌握在几家供应商手里。各器件厂商不可能永远依赖外部提供衬底,因此,纷纷将衬底整合到器件和技术的整个制造战略当中。目前,国外主要的第三代半导体企业如 Wolfspeed、ST、ROHM、Infineon、Qorvo、Sumitomo 等均采用这一模式发展和壮大,部分企业同时也通过并购不断完善 IDM 模式,比如 ST 收购 Norstel、ROHM 收购 SiCrystal、Infineon 收购 GaN System、onsemi 收购 GTAT。近些年,欧美等国家对于第三代半导体领域的政府支持,也主要以拥有产线的 IDM 企业为主。例如 2020 年,美国国防部支持 Qorvo 公司建造先进异质集成封装(SHIP)射频制造和原型设计中心。2021 年,美国国防部高级研究计划局支持 Transphorm 研究蓝宝石衬底的 GaN 外延片。2023 年,美国空军支持 MACOM 开发现有 GaN-on-SiC 技术。欧盟也通过资金投入支持 BOSCH、ST 等围绕 SiC 功率半导体,建立弹性的欧洲供应链。国内主要第三代半导体企业同样采用 IDM 模式,同时仍不断涌现出向 IDM 模式转型的企业,如 2021 年斯达半导体宣布募资 20 亿元投资高压特色工艺功率芯片和 SiC 芯片研发及产业化项目,并计划提升 SiC 芯片及车规级全 SiC 功率模组

生产能力。这标志着其开始从 Fabless 向 IDM 模式的转变。

目前,研发和产业化能力较好的企业有中国电科、三安集成、杭州士兰微电子股份有限公司(士兰微)、华润微、深圳基本半导体有限公司(基本半导体)等。这些 IDM 企业最大的特点是早期就建立第三代半导体研发线,通过政府和自身资金持续的投入提升研发能力和效率以及工艺线加工能力,这对技术快速提升和成本控制非常有利。反之,利用产线的加工能力,不断挖掘基础材料和设计潜力,通过材料、设计和工艺不断融合,实现最优的器件结果。加之产品的可靠性、良率的提高,对产品差异化、成本及长期供货的保证,通过 IDM 模式实现由创新链到价值链的转变。SiC 和 GaN 器件的性能和市场竞争力的关键在于制造环节,新进入市场的国产厂商必须掌握这一关键环节才能确保未来的市场地位。国际器件厂商也在向上游材料领域扩展,以把握主动。国内主要厂商采用 IDM 模式是正确的选择。近年来,随着平均良率的提升、器件制造周期缩短、产能升级及自研+国产设备支撑, IDM 产业集群生态模式的优化实现了产业链效率革命,大幅降低器件成本。

当前尽管 IDM 模式具有技术的内部整合优势,有利于积累工艺经验,但是,由于半导体行业的周期性, IDM 公司容易受制于原有固定产能,陷入被动局面,且企业需要从设计到制造再到封测,覆盖整个生产链需要强大的技术支持和雄厚的资金实力,这一门槛对于大多数小型或初创企业来说是无法逾越的。与之同时,随着芯片终端产品和应用的日益繁杂,芯片设计难度快速提升,研发所需的资源和成本持续增加,促使产业分工不断细化,无晶圆厂 Fabless 模式则成为芯片设计企业的主流经营模式之一。此类企业专注于芯片的研发设计与销售,将晶圆制造、封装、测试等生产环节外包给专注代工生产的 Foundry 模式企业完成。比如,2023 年 Foundry 模式代表企业如 GlobalFoundries、DB Hi-Tek 等不断通过企业合作协同开发 SiC 及 GaN 技术并提高生产能力。随着未来应用市场的快速增长及新兴应用市场的不断浮现,依靠 IDM 企业也会存在一定的供应链短缺现象,如 SiC 车规级芯片短缺

就尤为明显。专注 SiC 芯片制造、封测等环节的 Foundry 模式企业就显得尤为重要,以 Foundry+Fabless 相结合的模式将不断出现。相比而言, GaN 市场和应用场景及产能较小,未来一段时间内还将以 IDM 为主。

目前,国内从衬底外延材料制备,到芯片加工,再到模组生产等各个领域都不断有企业崭露头角, Fabless 企业需要和晶圆代工厂的 Foundry 模式深入配合,相互促进,这将有助于促进整个产业链协同健康发展。总体而言,行业整体将逐渐呈现 IDM 模式与 Fabless+Foundry 模式共存的局面,以各自满足终端市场不同的应用场景,同时也是第三代半导体企业商业模式未来的发展方向,既能随市场波动及时扩大或减少产能,也可以就近满足区域性市场需求。

5 中国已具备良好基础,但仍存在不足,需以应用牵引实现发展

经过 20 余年的发展,中国第三代半导体已经具备技术突破和产业协同发展的基础,产业已到爆发前期,中国企业正在为之准备,自主可控能力不断增强,竞争实力不断提升。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国、欧洲、日本等国家和地区的距离,并在某些领域实现了引领;与半导体相关的精密制造水平和配套能力快速提升,为相关装备国产化打下坚实基础,支撑了中国数千亿的照明市场和 5G 基站部署建设,未来 SiC 电力电子器件将会进一步支撑万亿级的电能转换应用市场。

第三代半导体历来也是政府支持的重要领域之一,经过十几年的发展,在基础理论、材料等方面取得了较好的研究成果。从设备供应到晶圆和器件制造,再到系统集成,国内企业的崛起将推动向本地采购的转变。然而,在目前生态系统中,尚未出现明确的供应领导者。相关领域的研发正处于一个瓶颈期。在传统的单功能器件领域,研发和技术水平上已经达到一定的高度,较难再有明显的提升。产业化技术能力与国外存在一定的差距,产线加工能力与新形态的产品研发水平不能完全匹配,

造成研发产品滞后于应用场景需求。

面对中国第三代半导体巨大的应用市场,应该根据市场和应用牵引定义产品及发展模式,不可一味跟随国际巨头做国产化替代。近年来投资和建厂热度高涨,太多厂商在短时间内进入这一新兴市场,已有大量企业正在进行第三代半导体的相关研发与生产,涉及单晶衬底材料、外延材料、器件设计和制造工艺,但需意识到目前材料投资比重过大、离形成完整健全的产业生态尚有一定的差距;仍存在产业布局分散、同质化竞争严重、产业投资平均力度不足、低水平重复、有投资无技术、产品综合竞争力不强等问题及风险。未来几年是否会引起过于激烈的市场竞争和产能过剩而导致国产厂商发展受阻需要思考。

针对存在的问题,需瞄准国家重大需求,推动探索新型举国体制,聚合科技创新资源,聚焦第三代半导体关键核心技术和重大应用方向,对全技术体系进行整体布局,梳理出“成熟技术”“需要突破”“前沿技术”的技术点,着力支持与产线相关的共性技术和前沿技术的攻关,充分发挥中国巨大市场优势和需求应用端的产业带动作用,链接全行业优势资源,不断优化创新资源配置,坚持研发与应用双轮协同驱动,实现技术突破和科技成果快速转化,形成未来优势长板,促进相关领域产业高质量发展,把握未来第三代半导体应用端新机遇,为国防安全、数字经济及“双碳”战略提供有力支撑。

6 结论

作为全球半导体技术和产业的前沿领域,第三代半导体对国防安全以及国民经济发展具有重要战略意义。在当前技术快速迭代、产品不断拓展的关键窗口期,各国对半导体国际话语权的争夺日趋激烈。中国在该领域具有较好的基础,已建立从衬底、外延、设计、制造、封测到应用较为完整的产业链,技术及产业化能力不断发展,自主可控能力不断增强,已实现成果在移动通信、新能源汽车等数字经济重要领域的批量应用。作为全球最大第三代半导体应用市场,中国已展现出以应用牵引技术创新的强大驱动力,正在向“更大尺寸、更低成本、

更高性能”的方向不断发展。当然,中国第三代半导体产业化发展也面临诸多挑战,离形成完整健全的产业生态仍有一定差距。经过“十二五”“十三五”的不断发展,总体上已经解决中国第三代半导体“有无”的问题,“十四五”期间则重点解决“能用、好用”以及可持续创新能力的问题。“十四五”已经过半,第三代半导体产业实现高质量发展的需要更加迫切。未来,仍然需要国家层面对产业发展的战略指导,通过发挥新型举国体制优势,坚持应用与研发双轮驱动,规避解决存在的问题,发挥国家级创新平台等对产业发展的引领及核心技术攻关作用,通过政府、企业、高校共同发力,支撑中国第三代半导体产业健康发展,把握未来应用新机遇。

参考文献 (References)

- [1] 李晋闽, 刘志强, 魏同波, 等. 中国半导体照明发展综述[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 285-297.
- [2] 郑小龙. 第三代化合物半导体微波射频“芯”专家[J]. 电子产品世界, 2021, 28(12): 11-13.
- [3] 吴玲, 赵璐冰. 第三代半导体产业发展与趋势展望[J]. 科技导报, 2021, 39(14): 20-29.
- [4] 王雪梅, 汪卫国. 全球 5G 市场最新进展及未来展望[J]. 通信世界, 2023(8): 24-26.
- [5] 中华人民共和国中央人民政府. 我国已建成 5G 基站 284.4 万个 移动物联网终端用户超 20.5 亿[EB/OL]. (2023-07-10)[2023-07-26]. https://www.gov.cn/yaowen/li-ebiao/202307/content_6890845.htm.
- [6] 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)[2023-08-05]. <https://baijia-hao.baidu.com/s? id=1670910224276391004&wfr=spider&for=pc>.
- [7] 但昭学, 郑泰山. 第三代半导体器件在新能源汽车(EV/HEV)上的应用[J]. 机电工程技术, 2016, 45(2): 41-45.
- [8] 中国科技网. 工信部等三部部门联合印发《工业领域碳达峰实施方案》[EB/OL]. (2022-08-12)[2023-05-16]. <http://www.stdaily.com/cehua/Aug12the/202208/ca7626555c6b40b4be4c95cb026d37d2.shtml>.
- [9] Mitsubishi Electric Corporation. Mitsubishi electric to launch railcar traction inverter with all-SiC power module [EB/OL]. (2013-10-25) [2023-07-19]. <https://www.mitsubishielectric.com/news/2013/pdf/1225>.
- [10] 中华人民共和国中央人民政府. 《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》印发——加快向交通强国迈进[EB/OL]. (2022-01-24) [2023-07-16]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-01/24/content_5670112.htm.

- [11] 徐文凯, 朱俊杰, 聂子玲, 等. 全碳化硅功率模块开关瞬态特性及损耗研究[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(5): 100-107.
- [12] 张家鑫, 彭燕, 陈秀芳, 等. 碳化硅单晶位错研究进展[J]. 人工晶体学报, 2022, 51(11): 1973-1982.
- [13] 中国电力报. 《中国能源发展报告 2023》《中国电力发展报告 2023》发布[EB/OL]. (2023-09-01)[2023-10-12]. http://k.sina.com.cn/article_2343698037_8bb1fe75019016e3t.html.
- [14] 中华人民共和国科学技术部. “新型显示与战略性电子材料”重点专项 2021 年度项目申报指南[EB/OL]. (2021-05-13)[2023-11-28]. https://service.most.gov.cn/kjjh_tztg_all/20210513/4292.html.
- [15] 中华人民共和国科学技术部. 关于“新型显示与战略性电子材料”重点专项 2022 年度项目正式申报书填报的通知[EB/OL]. (2022-07-19)[2023-11-28]. https://service.most.gov.cn/kjjh_tztg_all/20220719/5002.html.
- [16] 中华人民共和国科学技术部. 科技部关于发布国家重点研发计划“先进结构与复合材料”等 4 个重点专项 2023 年度项目申报指南的通知[EB/OL]. (2023-03-29)[2023-11-28]. https://service.most.gov.cn/kjjh_tztg_all/20230329/5184.html.
- [17] 许子皓. “大规模上车”在即, 碳化硅产能仍待“狂飙”[EB/OL]. (2023-09-27)[2023-10-16]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1778156041742796906&wfr=spider&for=pc>.
- [18] 烁科晶体成功研制出 8 英寸碳化硅晶体、晶片[EB/OL]. (2022-03-03)[2023-07-22]. <http://www.semisic.cn/news/1351.cshhtml>.
- [19] 天科合达举办 8 英寸碳化硅衬底新产品发布会[EB/OL]. (2022-11-17)[2023-08-23]. <http://www.tankeblue.com/post/143.html>.
- [20] 重大突破! 晶盛机电成功研发出 8 英寸 N 型 SiC 晶体[EB/OL]. (2023-02-16)[2023-08-26]. https://www.jsjd.cc/news_detail_57.html.
- [21] 瀚天天成正式宣布开始量产 8 英寸碳化硅外延晶片并签订 2.19 亿美元长约[EB/OL]. (2023-07-06)[2023-07-26]. https://ijiwei.com/html/share/news/868094?source=h5&news_id=868094.
- [22] 三安光电拟与意法半导体在重庆合资设厂生产碳化硅晶圆[EB/OL]. (2023-06-07)[2023-08-09]. <https://www.sanan-e.com/news-28>.

Development status and future prospect of the wide band-gap semiconductors

GAO Shuang, ZHENG Yuting*, ZHANG Zhiguo

China Electronics Technology Wide BandGap Semiconductors Co., Ltd., Beijing 100041, China

Abstract In recent years, the wide band-gap semiconductors endowed with superior performance, particularly the SiC and GaN, have developed rapidly. As the research focuses in the fields of 5G communications, new energy vehicles, rail transit, military equipment, etc, these semiconductors have supported the development of a trillion-level market, and the new application scenarios are constantly emerging to stimulate new development potential. China has established a relatively complete industrial chain, i.e., from the substrate, epitaxy, design, manufacturing, module, testing to the final application. At the same time, the technology and industrialization ability as well as the independent controllable ability continues to be enhanced. Some of the achievements have been applied, and now the "large size and cost reduction" turns to be the main direction of future development. At present, China as the largest application market has launched the strong driving force of application traction for technology innovation. However, the wide band-gap semiconductor industry also faces many challenges, e.g., the industrial ecological development issues. It is an urgent need to take fully advantages of the "two-wheel drive" of application and research and development to realize the rapid transformation of scientific and technological achievements. It is suggested that the continuous support should be enhanced, under the guidance of policies and the traction of new application scenarios, to systematically enrich the product form and to promote the high-quality development of the whole industrial chain for seizing new opportunities of future applications.

Keywords wide band-gap semiconductors; SiC; GaN; 5G communication; enterprise model ●



(责任编辑 赵庆圆)