

《2022 碳化硅 (SiC) 产业调研白皮书》 编委会

出品方:

行家说·三代半、行家说 Research

支持单位

工业和信息化部电子第五研究所 (中国赛宝实验室)

A 级参编单位

山西烁科晶体有限公司

飞镓半导体 (上海) 有限公司

佛山市国星光电股份有限公司

北京北方华创微电子装备有限公司

宁波恒普真空科技股份有限公司

苏州优晶光电科技有限公司

中国电子科技集团公司第四十八研究所

北京华卓精科科技股份有限公司

河南联合精密材料股份有限公司

B 级参编单位

宁波合盛新材料有限公司

济南安海半导体有限公司

西安晟光硅研半导体科技有限公司

深圳市智立方自动化设备股份有限公司

Tokyo Electron Limited

参与单位

中电化合物半导体有限公司

深圳市森国科科技股份有限公司

河北岚鲸光电科技有限公司

编委团队

总编: 蔡建东

主编: 张文灵

副主编: 许若冰

产业顾问: 周永昌、马康夫、成年斌、王娜、张洪义、刘春艳、巩小亮、李鑫、丁磊、赵新田、黄昕、杨森、毛建、钱立群、张昊翔、杨承晋、王新新

调研队长: 陈圆圆、姚倩雯

调研团队: 聂思鹭、罗梁燕、石海、陈维琦、张明涛、陈宙宣、彭星怡、贺佳佳、刘程

设计总监: 潘汉中

序言

在全球“双碳”战略的推动下,整个能源系统(发、输、变、配、用)都在向“清洁可再生”的新能源转型,而新能源汽车、“光储充”、数据中心等环节成为了实现“碳中和”的重要抓手。

碳化硅技术凭借高效率、高密度、小尺寸、低总成本等优势,成为了这场绿色能源革命的关键技术支撑,已经被各个应用领域广泛采用,整个产业开始驶入快车道。目前,碳化硅正处于爆发期,各种新技术、新产品层出不穷,与此同时,碳化硅半导体的规模化商业化之路,离不开对技术路线的深度思考和探索,更离不开上下游产业链的合作与交流,如何凝聚产业智慧解决面临的关键挑战,实现加速碳化硅核心技术突破,进一步拓展碳化硅半导体技术的应用边界,并最终实现长足发展,真正做到“技术推动社会进步”,是产业第三方和龙头企业责无旁贷之事。

基于此,行家说三代半联合烁科晶体、飞镭半导体、国星光电、北方华创、恒普科技、优晶光电、中国电科 48 所、华卓精科、联合精密、合盛新材料、安海半导体、晟光硅研、智立方、TEL、中电化合物、森国科、岚鲸光电等产业各环节领军企业,一同制作了本白皮书。希望通过这个载体来达成产业链核心玩家之间更为密切的互动交流和更为充分的联动合作,描绘出一幅更加美好的碳化硅半导体蓝图,将最有价值的产业信息传递给所有的从业者、关注者、投资者、需求者,为产业的发展贡献一份力量!

《2022 碳化硅 (SiC) 产业调研白皮书》编委会
2022 年 12 月

Contents

目录

一、全球半导体产业及碳化硅产业概况	6	5.3 SiC 功率半导体企业市占率分析	104
1.1 全球半导体产业概况	7	5.4 新能源汽车 (最大市场) 对 SiC 的应用与投资整合	106
1.2 碳化硅半导体产业概况	14	5.5 全球 SiC 整合并购简析	110
1.3 碳化硅产业发展趋势	16	5.6 中国 SiC 产业投融资简析	113
1.4 1999-2022 年中国碳化硅产业大事件	21	六、SiC 价格、产能及市场规模预测	114
1.5 2022 年碳化硅产业投融资表	22	6.1 SiC 价格趋势	115
1.6 2020-2022 年中国碳化硅产业并购表	24	6.2 SiC 衬底产能趋势	118
二、SiC 材料特性及关键技术	25	6.3 SiC 市场规模预估	119
2.1 SiC 关键特性及与硅材料的对比	26	七、SiC 半导体产业模式分析	120
2.2 SiC 分类、应用及关键工艺	29	7.1 SiC IDM 模式与成本分析	121
2.3 SiC 外延关键工艺	36	7.2 IDM 与 Fabless 模式优劣势对比	123
2.4 SiC 功率器件技术进展	37	八、SiC 产业标准及专利分析概况	125
2.5 SiC 分立器件封装技术发展	54	8.1 SiC 半导体相关标准分析	126
2.6 SiC 模块技术发展	55	8.2 SiC 半导体相关专利分析	131
2.7 SiC 关键设备和材料技术进展	57	九、SiC 半导体主要厂商及策略发展分析	136
三、SiC 器件 / 模块细分应用市场分析	70	9.1 SiC 产业链全景图及重要厂商布局分析	137
3.1 新能源汽车市场	71	9.2 SiC 产业重要玩家产业链分析: IDM 模式	138
3.2 汽车充电桩市场	75	9.3 SiC 产业重要玩家产业链分析: 衬底	144
3.3 太阳能光伏市场	75	9.4 SiC 产业重要玩家产业链分析: 外延	147
3.4 轨道交通市场	76	9.5 SiC 产业重要玩家产业链分析: 设计 / 封测 / 器件 / 模组	149
3.5 数据中心市场	78	9.6 碳化硅 (SiC) 产业重要玩家产业链分析: Foundry	156
3.6 消费级市场	78	9.7 碳化硅 (SiC) 产业重要玩家产业链分析: 应用	157
3.7 电网电力市场	79	9.8 SiC 产业重要玩家产业链分析: 设备材料	161
四、全球碳化硅产业扩产及中国碳化硅项目布局概况	81	十、SiC 半导体供应链信息库	171
4.1 碳化硅产业整体扩产概况	82	10.1 SiC 产业衬底制造商列表	172
4.2 2022 年国外碳化硅企业扩产概况	83	10.2 SiC 产业外延 / 芯片 / IDM 制造商列表	173
4.3 2022 年中国碳化硅企业扩产概况	85	10.3 SiC 产业功率器件设计 / 模块与制造商列表	176
4.4 中国碳化硅项目布局	86	10.4 SiC 产业下游应用厂商分类及列表	178
五、全球 SiC 半导体产业格局	97	10.5 SiC 产业设备与材料制造商列表	180
5.1 全球与中国 SiC 产业发展历程与所处阶段	98		
5.2 全球 SiC 区域产业格局	100		

第一章、全球半导体产业及碳化硅产业概况

以下联合出品方及参编单位对本章节的特别贡献

A 级参编单位



B 级参编单位



参与单位



1.1 全球半导体产业概况

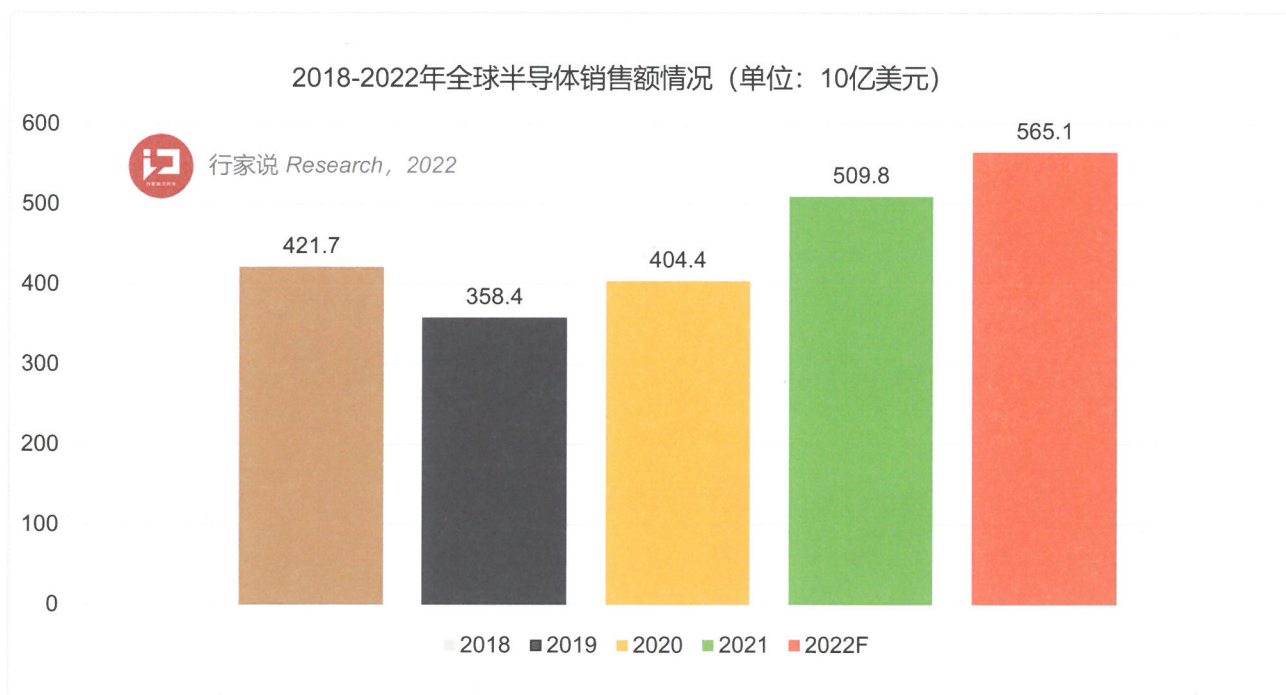
半导体无处不在,它们已成为电子设备的重要组成部分,推动了现代世界清洁能源、通信、计算、医疗保健、军事系统、交通和无数其他应用的进步。

半导体材料发展至今,在中国被分为三代(类)材料。第一代半导体材料以硅(Si)、锗(Ge)等材料为主;第二代半导体以砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)等为代表;第三代半导体材料则是以氮化镓(GaN)和碳化硅(SiC)等宽禁带化合物半导体材料为代表。

◎ 1.1.1 全球半导体产业概况

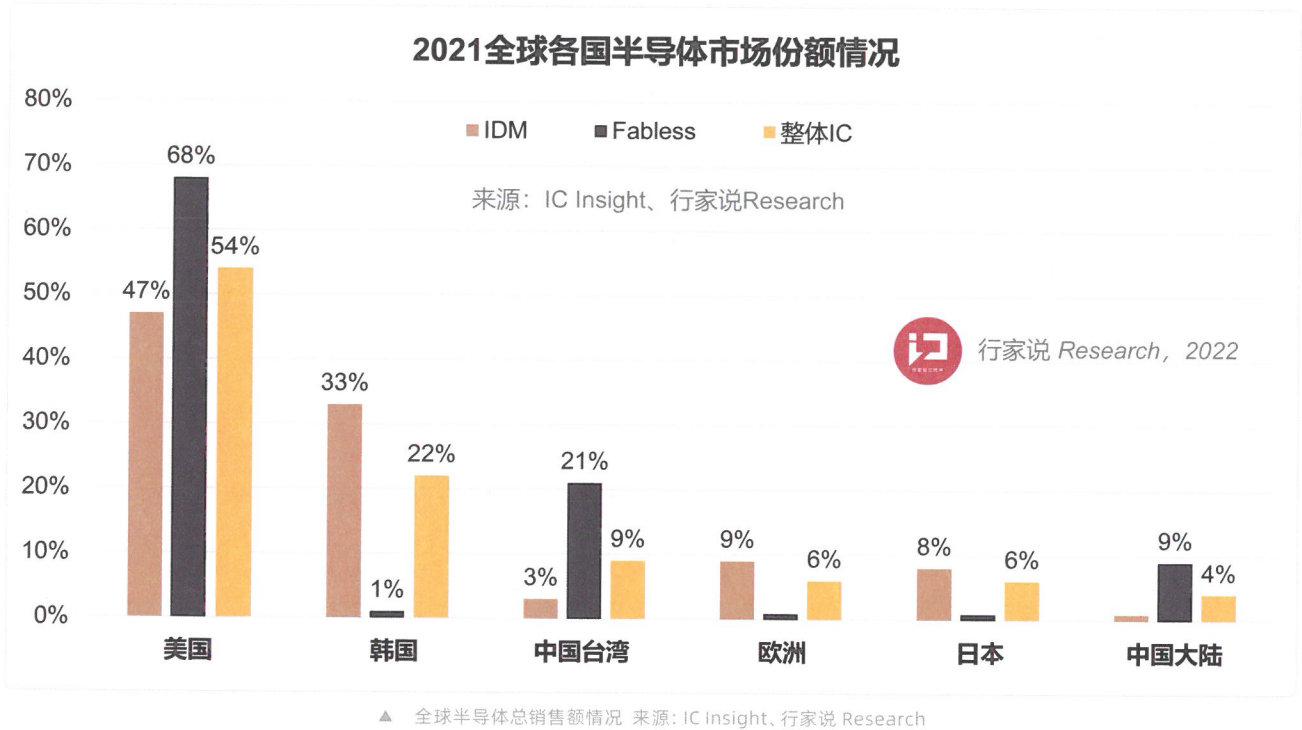
过去 10 年,全球半导体产业自 2018 年达到顶峰后,随后 2 年又有所回落。而在 2021 年,全球半导体产业势头强劲,打破了历史记录,其强劲增长动力主要源自汽车、智能手机、数据中心等领域发展带来的需求反弹,以及产品单价的上升。

IC Insights 报告显示,2021 年半导体产业从 2020 年新冠疫情危机后出现反弹,全球半导体营收增长了 25%,预计 2022 年半导体总销售额将增长 11%,并达到创纪录的 5651 亿美元。



▲ 2018-2022 年全球半导体总销售额情况 来源: IC Insight、行家说 Research

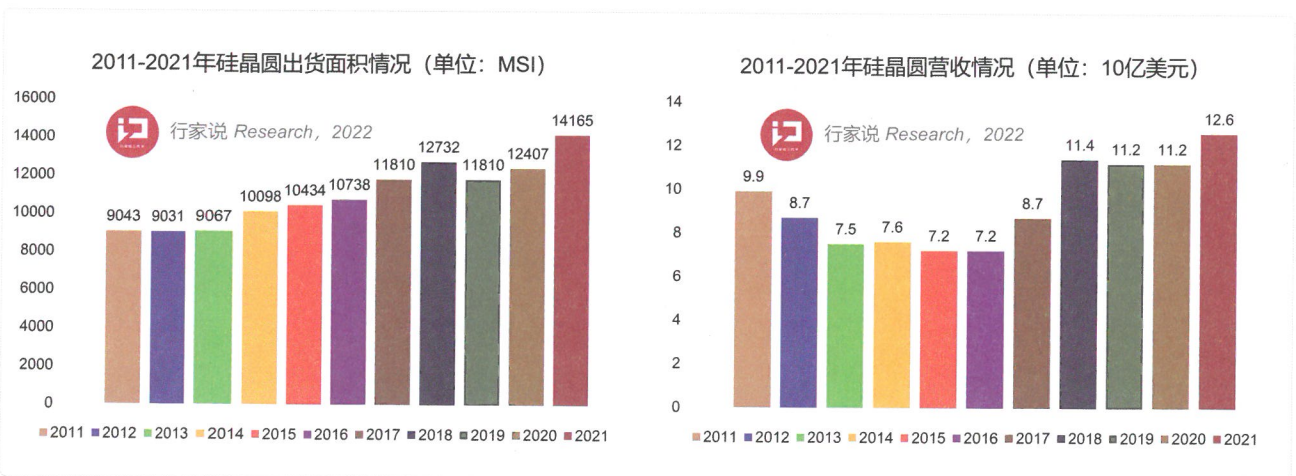
2021 年,全球 IC 五大国(区域)为美国、韩国、欧洲、日本和中国。其中,美国公司占据了全球 IC 市场的 54%,其次是韩国公司(22%),中国大陆企业仅占全球 IC 市场份额的 4%。



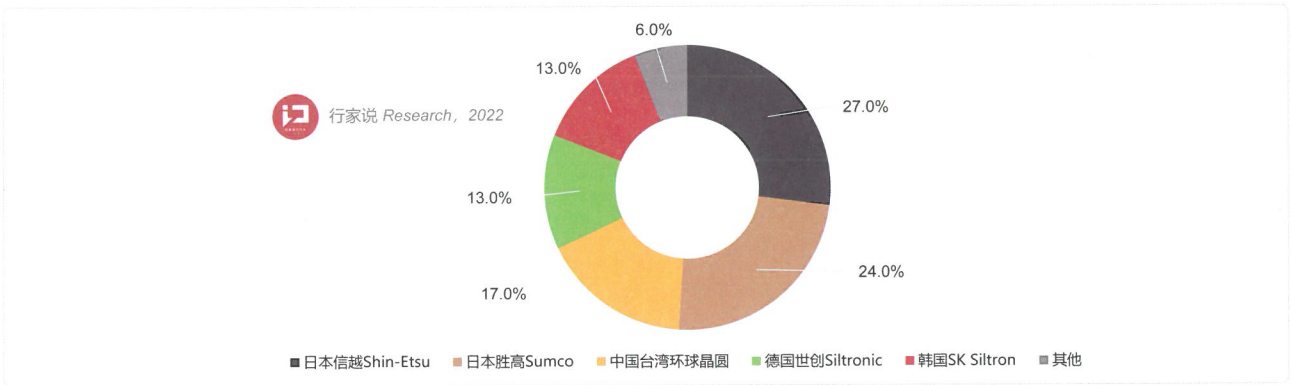
从芯片企业的运营模式来看,设计公司(无晶圆制造)收入占比逐渐扩大——2002年为13%,2020年为33%。截至2021年,美国在设计(无晶圆芯片制造)领域营收的全球占比为68%,中国台湾为21%,中国大陆为9%。

德勤数据显示,芯片制造高度集中在东亚。2020年,73%的芯片制造主要集中在四个东亚国家或地区(中国大陆、日本、韩国和中国台湾)完成。韩国和台湾占据了全球81%的第三方半导体晶圆代工,仅台湾就占全球代工产能的63%。

硅晶圆方面,2021年全球硅晶圆出货量增长14%,总计141.65亿平方英寸(MSI),而晶圆收入增长13%,超过120亿美元,创下历史新高。



全球硅片市场份额主要被日本信越化学、日本胜高、中国台湾环球晶圆、德国世创和韩国 SK 五大企业占据，国内大陆硅片市场份额不足 10%。

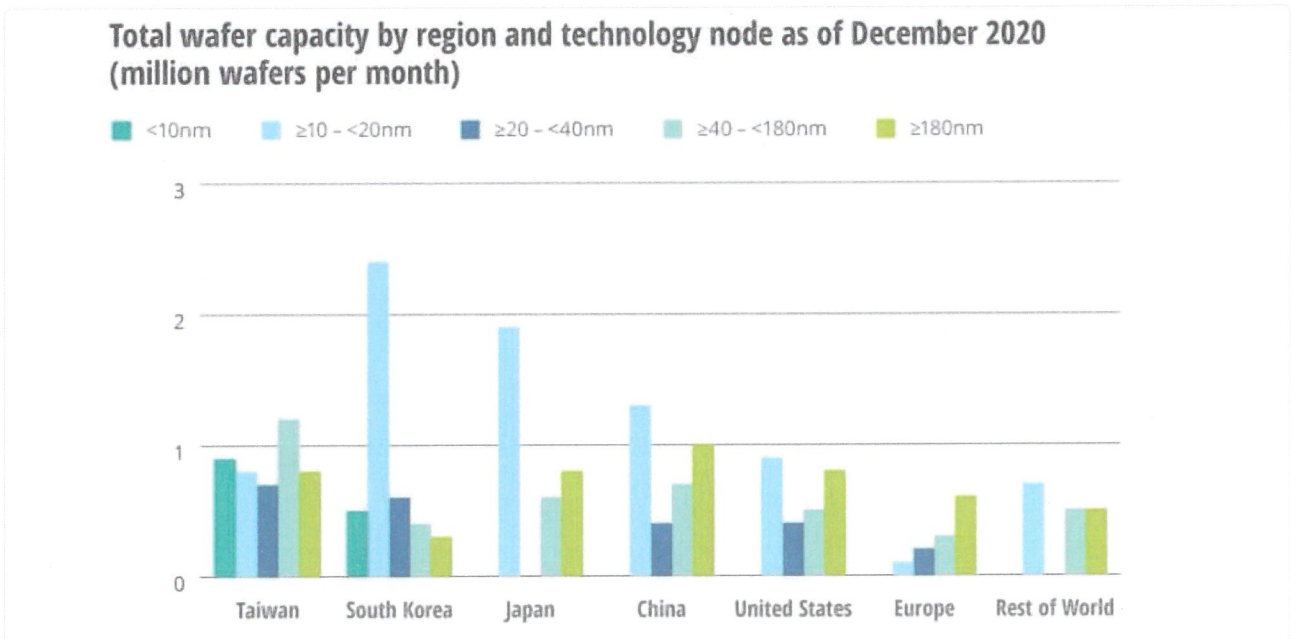


▲ 2021 年全球硅片主要厂商市占率 来源: 根据 Omdia、行家说 Research

截至 2022 年, 6 吋晶圆及以下晶圆的全球产能约为 5%, 8 吋晶圆为 42%, 12 吋晶圆占比为 53%。从 2022 年到 2025 年, 12 吋晶圆产能将以近 10% 的复合平均增长率扩大, 预计 2024 年 12 吋晶圆的全球产能将达到 59%, 预计 2025 年将达到每月 920 万片晶圆的历史新高水平。

价格方面, 不同芯片的价格差异很大, 高性能计算机芯片达到1000美元以上, 而功能有限的芯片仅几美分。总体而言, 2021年, 平均芯片价格约为0.48美元 (芯片销量1.15万亿颗)。制程方面, 截至2022年, 以晶圆当量计算, 全球约64%的芯片产能集中在65nm以上 (产值占10%), 25%产能为14-25nm, 10%产能用于生产10nm以下的先进芯片。

未来几年, 先进芯片制程 (10nm 以下) 产能预计将以每年 20% 以上的速度增长, 中间制程 (14-25nm) 增长率为 10%, 而 65nm 以上制程产能的增速将低于 10%。



▲ 全球各国 / 地区的芯片制程占比情况 来源: 德勤 (2021.04)

根据细分产品领域来看, 2021 年全球半导体营收前十大企业包括三星、英特尔、SK 海力士、美光、高通、博通等。

2021年半导体厂商营收榜单						
排名		企业	2021年营收 (亿美元)	2020年营收 (亿美元)	2020-2021年增长率	2021年市占比
2021年	2020年					
1	2	三星	759.50	577.29	31.60%	13.00%
2	1	英特尔	731.00	727.59	0.50%	12.50%
3	3	SK海力士	363.26	258.54	40.50%	6.20%
4	4	美光	284.49	220.37	29.10%	4.90%
5	5	高通	268.56	176.32	52.30%	4.60%
6	6	博通	187.49	157.54	19.00%	3.20%
7	8	联发科	174.52	109.88	58.00%	3.00%
8	7	德州仪器	169.02	136.19	24.10%	2.90%
9	10	英伟达	162.56	106.43	52.71%	2.80%
10	14	超威	158.93	96.65	64.40%	2.70%
其他			2575.44	2095.57	22.90%	44.10%
总市场			5834.77	4662.37	25.10%	100%

数据来源自Gartner, 维科网 电子工程制表

▲ 2021 年全球 TOP10 半导体厂商排名 来源: Gartner

从半导体类别来看, 逻辑 IC 销售额最大, 总计 1548 亿美元; 内存以 1538 亿美元位居第二, 内存市场的三大供应商为三星、SK 海力士和美光科技, 合计占占据了 94% 的市场份额。模拟芯片增幅最大, 销售额达 740 亿美元, 增长 33.1%。2021 年, 前 10 大模拟供应商占模拟销售额的 68%。

2021 年全球模拟 IC 供应商排名 (单位: 百万美元)				
排名	企业	营收	同比增长	市占率
1	德州仪器	14050	29%	19%
2	ADI	9355	21%	12.7%
3	Skywords	5910	49%	8%
4	英飞凌	4800	26%	6.5%
5	意法半导体	3906	20%	5.3%
6	Qorvo	3875	22%	5.2%
7	恩智浦	3457	40%	4.7%
8	安森美	2115	32%	2.9%
9	Microchip	1839	21%	2.5%
10	瑞萨	1110	25%	1.5%
	其他	23497	33%	31.8%
	合计	73914	30%	100%

▲ 2021 年全球 TOP 10 模拟 IC 厂商排名 来源: IC Insight

MCU 市场在 2020 年下跌 2% 后, 于 2021 年攀升 23%, 营收达到的 196 亿美元, 其中汽车 MCU 的增长将超过大多数半导体器件。2021 年排名前五的 MCU 供应商合计占全球销售额的 82.1%。

排名	企业	营收	同比增长	市占率
1	恩智浦	3795	27%	18.8%
2	Microchip	3584	25%	17.8%
3	瑞萨	3420	24%	17%
4	意法半导体	3374	35%	16.7%
5	英飞凌	2378	22%	11.8%

▲ 2021 年全球 TOP 5 MCU 厂商排名 来源: IC Insight

功率器件在 2021 年增长 8% 之后, 预计 2022 年将增长 11%, 或将达到 245 亿美元, 连续六年创下历史新高。预计 2024 年开始另一个增长周期, 2026 年销售额将稳步增长, 达到 289 亿美元。

2021 全球十大功率器件企业以欧美和日本企业为主, 包括: 英飞凌、安森美、意法半导体、三菱电机、富士电机、东芝、威世、安世、瑞萨、罗姆, 其中, 日本 5 家企业的营收在过去三年内大体保持占榜单总营收的 32%-33% 左右。

企业	市占率	2021	2020	2019
英飞凌	20.9%	48.69	40.02	37.38
安森美	8.8% ↑	20.51	16.12	17.11
意法半导体	7.4%	17.14	11.26	11.92
三菱电机	6.3%	14.76	12.51	12.33
富士电机	5.0% ↑	11.73	9.48	7.75
东芝	4.3%	9.96	8.78	8.61
Vishay	4.3% ↑	9.96	7.74	8.24
安世半导体	2.9%	6.72	4.69	4.96
瑞萨电子	2.8%	6.45	5.05	5.50
罗姆	2.7%	6.34	4.93	4.93

▲ 2021 年全球 TOP 10 功率器件厂商排名 来源: Omda、行家说 Research

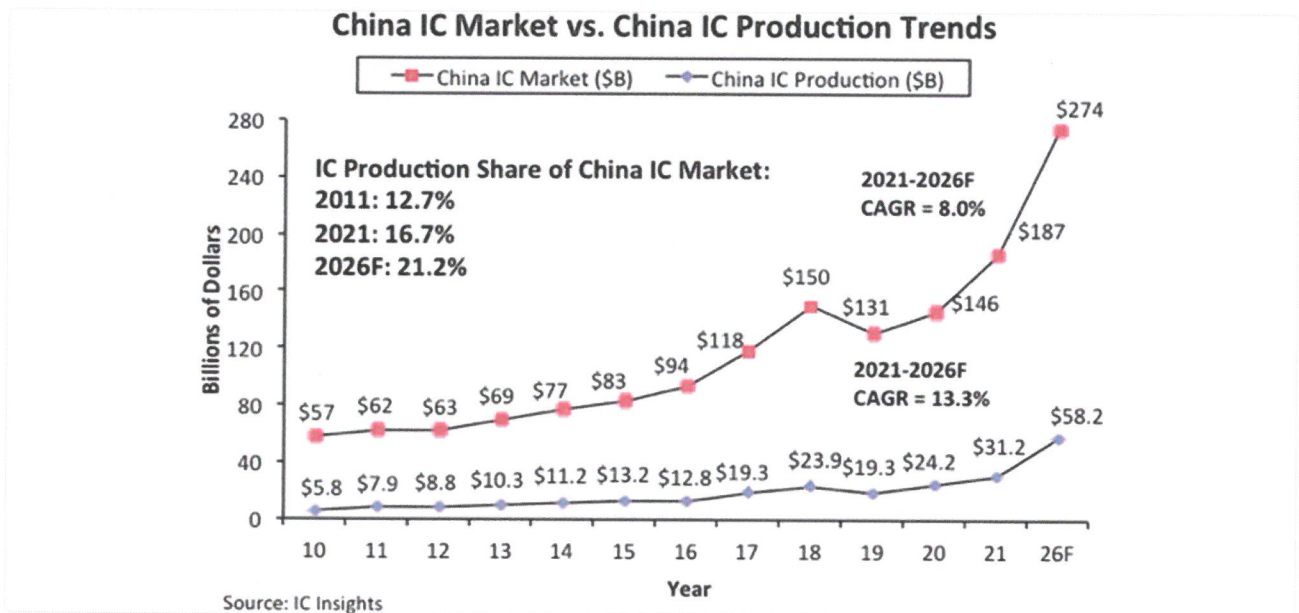
2021 年, 中国功率分立器件行业迎来营收和净利润的双丰收。前 10 大公司中, 功率分立器件营收增幅都在 20% 以上, 增幅超过 50% 的公司多达 6 家, 而且营收已超过 10 亿元。

2021年排名	中国功率分立器件公司	2021年功率分立器件营收(百万元)	同比增长
1	安世半导体(中国)有限公司	7,772	53%
2	华润微电子有限公司	4,390	28%
3	扬州扬杰电子科技股份有限公司	4,042	64%
4	杭州士兰微电子有限公司	3,686	67%
5	乐山无线电股份有限公司	2,078	35%
6	吉林华微电子股份有限公司	2,076	29%
7	江苏长晶科技股份有限公司	1,801	38%
8	江苏捷捷微电子股份有限公司	1,798	81%
9	嘉兴斯达半导体股份有限公司	1,675	74%
10	无锡新洁能股份有限公司	1,522	59%

▲ 2021年中国功率器件前10公司 来源: 芯谋

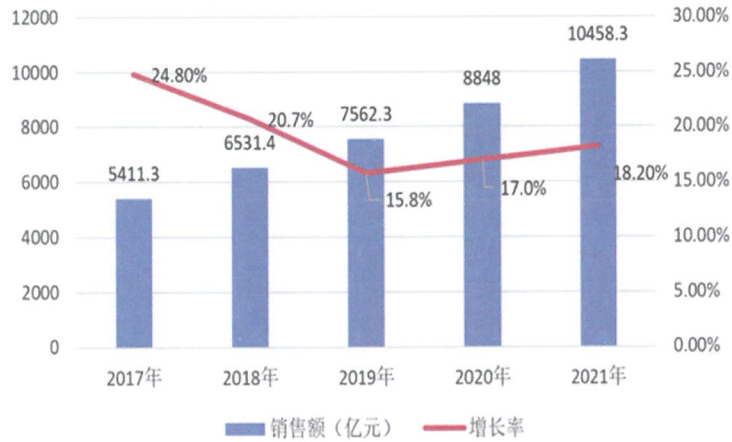
◎ 1.1.2 中国半导体产业概况

自2005年以来,中国就成为了全球最大的单个半导体需求市场,2021年需求额为1925亿美元,比去2020年增长27.1%。



▲ 2010-2026年中国IC需求与生产金额对比 来源: IC Insight

据中国国家统计局发布的数据,2021年中国半导体集成电路产量达到3594亿颗,增长33%,增长率是上一年16.2%的两倍多。中国半导体行业协会数据显示,2021年中国集成电路产业销售额为10458.3亿元,同比增长18.2%。其中,设计业销售额为4519亿元,同比增长19.6%;制造业销售额为3176.3亿元,同比增长24.1%;封装测试业销售额2763亿元,同比增长10.1%。



▲ 2017-2021 年中国 IC 产业营收及增长情况 来源: 中国半导体行业协会

中国前 20 大设计公司 (Fabless+IDM) 的营收之和达到 248 亿美元, 同比增长 49%。2021 年中国前 10 大 Fabless 公司的营收总额为 148 亿美元, 同比增长 33%, 营收均超过了 8 亿美元。

排名	公司	2021 年营收 (百万美元)	2020 年营收 (百万美元)
1	韦尔股份	3215	2521
2	华大半导体	2164	1416
3	紫光展锐	1835	1445
4	中兴微	1526	1339
5	兆易创新	1335	656
6	格科微	1098	942
7	智芯微	1092	997
8	君正集成	835	317
9	汇顶科技	829	976
10	紫光国芯微	825	477

▲ 2021 年中国前十大 Fabless 公司 来源: 芯谋、行家说 Research

◎ 1.1.3 全球半导体供需情况

由于 COVID-19 以及其他因素导致的供应链问题,2020 年至 2021 年,各种半导体芯片一直处于供不应求的状态,缺芯问题对许多领域造成了严重影响,尤其是交通领域影响最为严重。2021 年仅汽车行业的全球芯片销售缺口估计为 2100 亿美元。

在 2022 年第一季度,芯片交货时间平均为 26.6 周,较长甚至超过了 50 周。当时英特尔预测,芯片短缺将持续到 2024 年,这将成为历史上最长的芯片短缺周期之一。不过,经过 2021 下半年的市场加速消费和库存的积累,2022 年行业供需趋势已经从全面紧缺转向结构性紧缺转移。目前,消费电子、手机等存量市场进入了去库存阶段,加上俄乌冲突、美国加息,全球经济面临较大的下行压力,消费电子需求开始硬着陆,对半导体行业造成了周期性的冲击;而高端物联网、电动汽车、工业等增量市场的部分核心品类仍然尚未建立足够的库存。

展望 2023 年,全球半导体产业进入更有序成长,产业链紧绷程度可能有所降低,但高端芯片产品将依然短缺。美国商务部发布了全球半导体供需报告,指出传统逻辑芯片、模拟芯片以及光电芯片的供需失衡最大。不过,2022 年“黑天鹅”事件频发,通货膨胀猖獗、能源成本飙升、供应链持续出现故障、Covid-19 病毒封锁、俄罗斯与乌克兰的战争,以及美国加大对中国半导体产业的封锁,将会对产业发展造成一定程度的影响,但总体来说,仍预计 2022 年将进一步增长 10% 以上,突破 6700 亿美元,预计 2030 年,整个产业营收将达到 1 万亿美元。

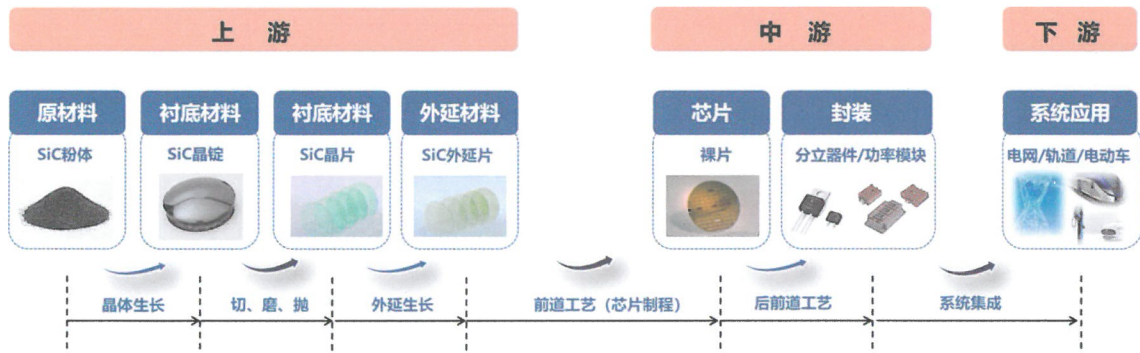
1.2 碳化硅半导体产业概况

上世纪五十年代以来,以硅(Si)材料为代表的第一代半导体材料取代了笨重的电子管,随后开启了持续 50 多年的全盛时代。然而,在能源枯竭挑战和二氧化碳等环境问题的呼声中,电动车、光伏、风能绿色能源、智能电网等领域大幅提升了对功率器件的要求,这迫切需要功率电子器件在性能上更新换代。

因此,许多电源系统设计人员一直在寻找替代解决方案,以开发更高功率密度的功率电路和模块硬件,而碳化硅(SiC)等宽禁带材料是代替硅的首选材料。

碳化硅被誉为功率器件皇冠上的明珠,因其优异的材料特性,可以满足功率电子技术对高温、高功率、高压、高频及抗辐射等恶劣工作条件的新要求,是半导体材料领域最有前景的材料之一。在全球“双碳”政策的催生之下,充电桩、光伏、风电等众多领域也在大力引入 SiC 功率半导体技术,以进一步降低系统能耗。在这种情况下, SiC 功率半导体备受瞩目,并且开始进入发展的黄金期,尤其是在电动汽车领域。

类似硅, SiC 功率半导体产业链可分为上、中、下游。上游产业分为 SiC 材料;中游产业分为 SiC 器件设计、制造与封装测试;下游为应用行业。

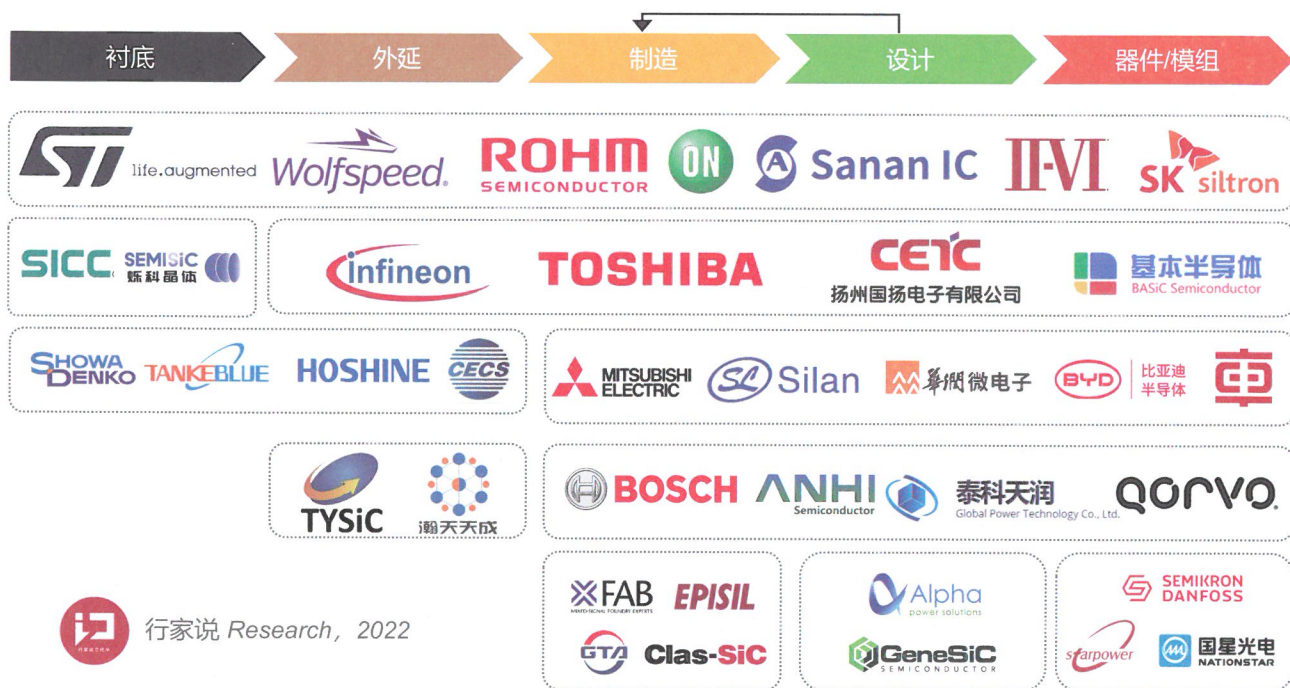


▲ 碳化硅半导体产业链环节 来源：浙江大学

SiC 功率半导体生产过程分为 SiC 单晶生长、SiC 外延层生长、SiC 芯片制造以及封装测试四大步骤,对应的是衬底、外延、芯片和器件,分别占总成本的 50%、25%、20%、5%。当前,各个环节涉及的主要厂商整理如下:

整合环节	厂商
衬底到系统	丰田
衬底到模块 实现全产业链	Wolfspeed、罗姆、意法半导体、安森美、SK 集团、II-VI、三安、世纪金光等
不含衬底垂直整合	博世、英飞凌、三菱电机、东芝、中车、富士电机、中电 55 所 /13 所等
衬底企业	中国大陆: 天岳先进、烁科晶体、同光股份、天达晶阳、微芯长江、露笑科技、东尼电子、科友半导体和超芯星等。 中国台湾: 汉民集团、盛新材料和环球晶。 国外: 日本 OXIDE 和住友、美国 Pallidus、韩国 Senic 等。
衬底 + 外延企业	昭和电工、天科合达、中电化合物、合盛新材料和南砂晶圆等
外延企业	瀚天天成、东莞天域、百识电子、普兴电子、国盛电子 GlobiTech（环球晶美国子公司）、嘉晶电子等
IDM 器件企业	泰科天润、华润微、士兰微、瑞能、基本半导体、瞻芯电子、安海半导体等。
设计公司	飞矽半导体、森国科、派恩杰、爱仕特、瀚薪、Genesis 等。
模块企业	赛米控 - 丹佛斯、斯达、致瞻、芯聚能、利普思等。
芯片代工厂	X-Fab、汉磊、SiCamore、Clas-SiC、Fraunhofer IISB、中科汉韵、积塔、绍兴中芯、长飞先进半导体（启迪）、芯粤能等。

▲ 全球 SiC 产业各个环节代表厂商 来源：行家说 Research



行家说 Research, 2022

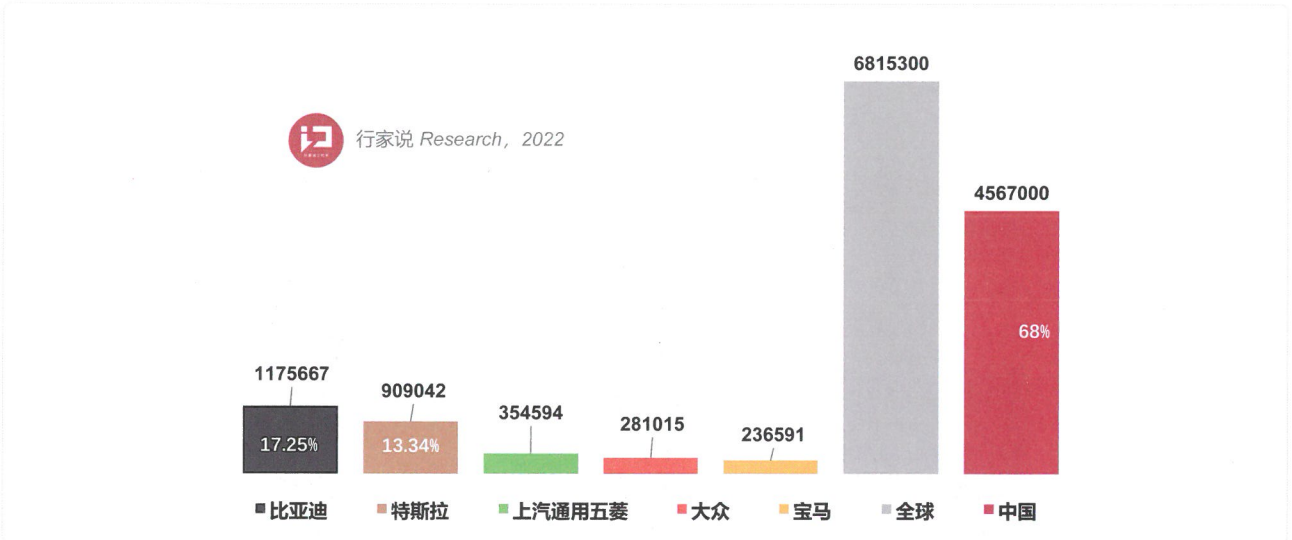
▲ 全球 SiC 产业各个环节代表厂商 来源: 行家说 Research

1.3 碳化硅产业发展趋势

飞轮效应是指为了使静止的飞轮转动起来，一开始必须使很大的力气，每转一圈都很费力，但是每一圈的努力都不会白费，飞轮会转动得越来越快。早在 1955 年，产业界就首次合成碳化硅单晶，尽管全世界都知道碳化硅的魅力，但是由于碳化硅衬底制备成本、良率、产能等因素，整个产业在长达半个世纪里都处于缓缓发展的阶段。目前，全球碳化硅材料及器件应用仍处于早期，但在全球“双碳”政策的驱动下，整个产业已即将步入高速发展阶段，碳化硅产业的飞轮开始转动。

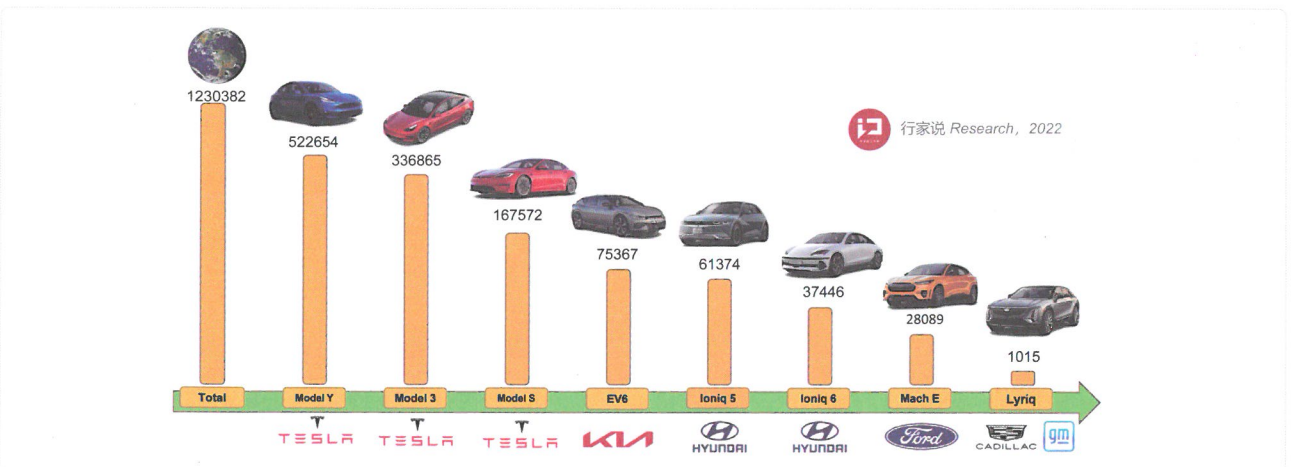
全球能源转型是碳化硅产业的绝佳历史机遇。“碳中和”目标是到 2060 年将让能源结构中非化石能源的比重从现在的 17% 提高到 80%。有权威机构测算过，仅以我国为例，实现碳中和总共需要约 140 万亿元的投资，这是个万亿级的超级赛道。

电力的生产方式正在从化石燃料转向可再生的“绿色”能源，如太阳能、风能和波浪能。从发电、输电、变电、配电到用电，每个功率级都必须减少能耗，目前几乎所有领域都表现出对碳化硅技术的强烈需求。尤其是在新能源汽车领域，动力总成的功能电子化趋势已成必然趋势。

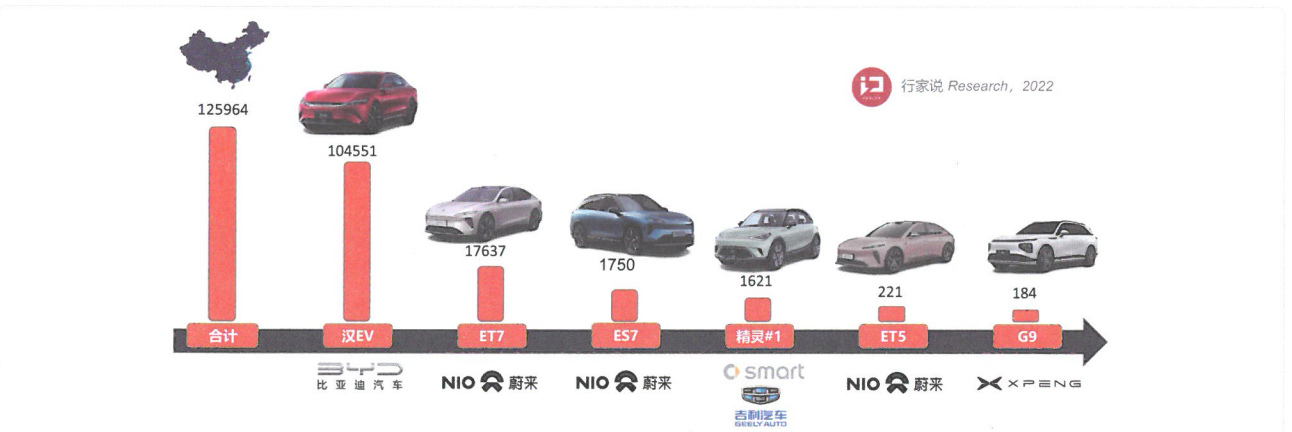


▲ 2022 年 1-9 月全球新能源汽车销量 来源: 行家说 Research、Cleantechnica、乘联会

2022 年 1 至 9 月, 全球新能源汽车累计销量超过 681 万辆, 市场渗透率达 13%; 而中国新能源汽车销量高达 456.7 万辆, 占比高达 68%, 整体渗透率达到 23.5%。在新能源汽车中, 今年前三个季度, 搭载碳化硅主驱的车型销量合计超过了 130 万台, 占新能源汽车比重的 20%。

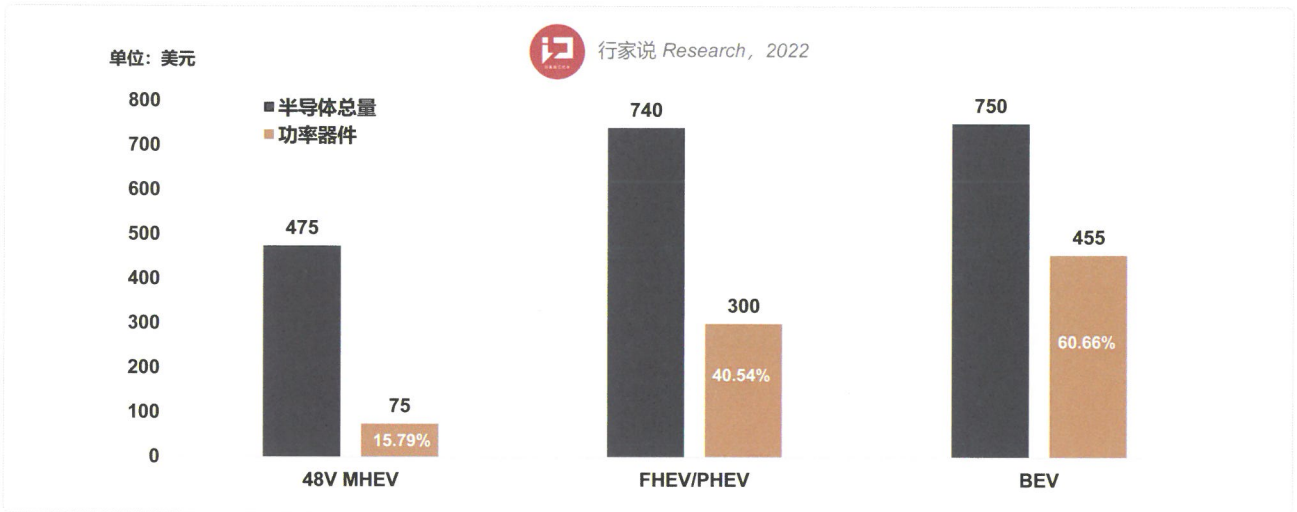


▲ 国外部分碳化硅车型销量统计 (2022 年 1-9 月) 来源: 行家说 Research



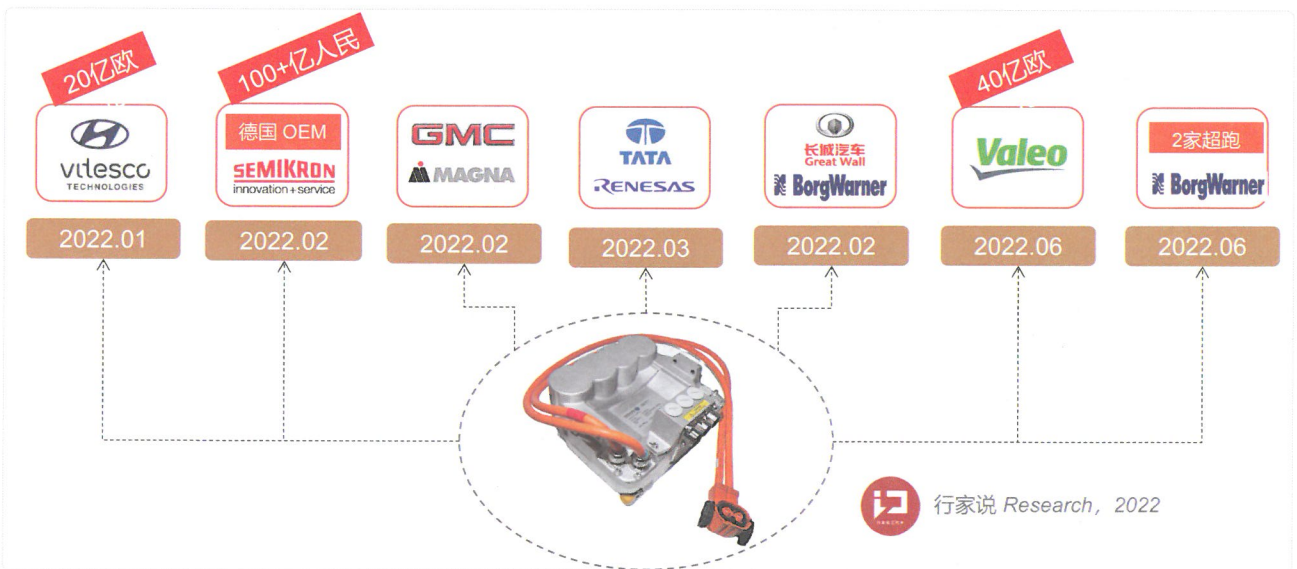
▲ 国内部分碳化硅车型销量统计 (2022 年 1-9 月) 来源: 行家说 Research

汽车的电动化转型最为受益的是功率器件, 在 L1/L2 的纯电动车型中, 其价值占到了整体车用半导体器件总价的 55% 以上, 2022 年仅中国新能源汽车功率器件市场规模将超过 160 亿元。



▲ 不同新能源汽车中功率器件的价值占比 来源: 英飞凌、行家说 Research

而随着主流厂商完成了碳化硅产能的扩张, 汽车行业将采用碳化硅逆变器的进程提前了 2 年左右, 无论是碳化硅衬底、器件、模组亦或是系统集成商, 今年都实现了订单爆发。

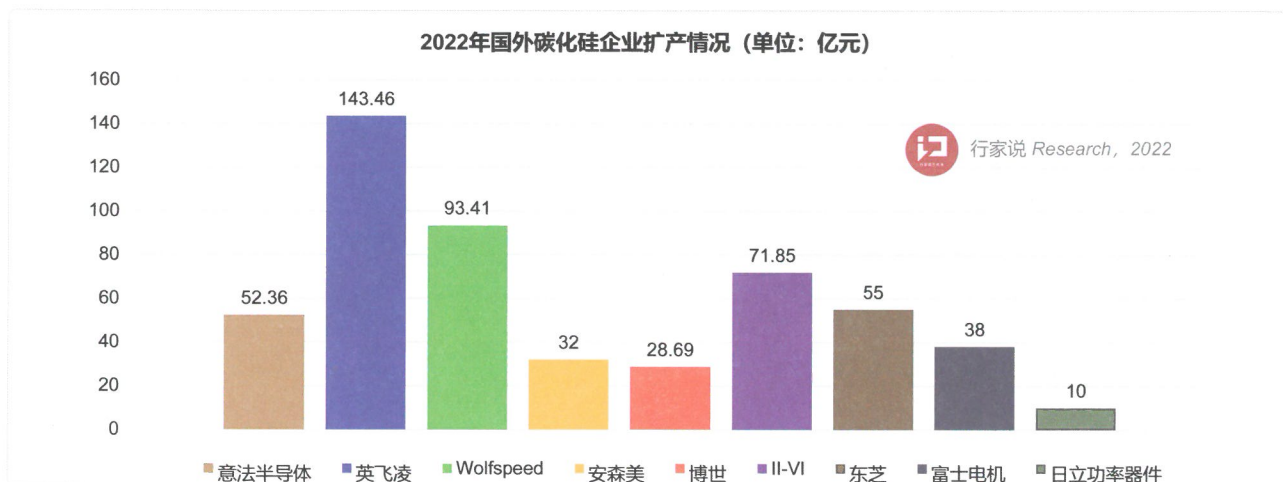


▲ 碳化硅模块 / 系统订单情况 来源: 行家说 Research

企业	预计营收	项目定点情况
意法半导体	2023 年 10 亿美元	2022 年 Q2 新增 102 个项目汽车和工业定点项目。
安森美	2023 年 10 亿美元	未来 3 年的 SiC 在手订单超过 270 亿元。
Wolfspeed	2023 年 10 亿美元	2022Q4 定点项目约 177 亿元, 过去 3 年获得 749 亿元定点项目。

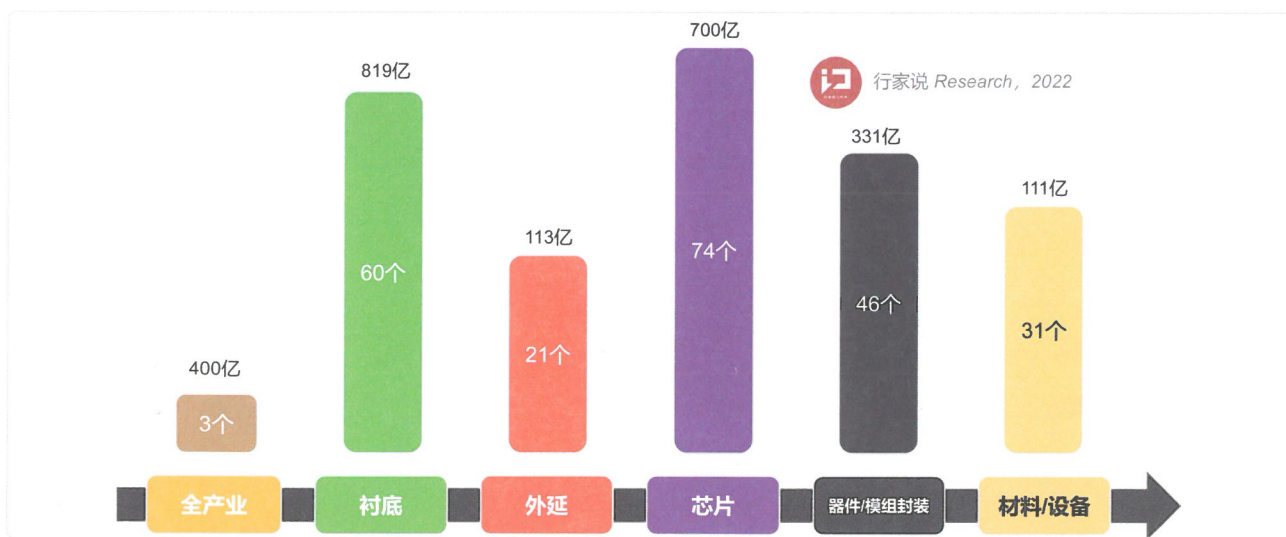
▲ 主流碳化硅企业订单暴增 来源: 行家说 Research

由于碳化硅产能严重不足,产能绑定现象已成常态。例如伟湃科技已经锁定了2家SiC器件头部企业50%的产能,而意法半导体已经锁定了1家头部企业超过60%的SiC衬底产能。然而现有的产能缺口依旧很大,很难满足新能源汽车领域的需求,更别说其他光伏、储能、充电桩等应用领域的碳化硅需求也在暴涨。为此,2022年,全球碳化硅产业迎来了新一轮的扩产潮。仅意法半导体、英飞凌、Wolfspeed、安森美和博世等大企业的扩产资金就超过了525亿元。



▲ 2022年国外碳化硅企业扩产情况 来源: 行家说 Research

由于中国企业主导了大部分的新能源汽车、光伏等应用市场,而且中国也是全球最大的新能源技术消费市场,中国国内“国产替代”需求非常明确,为此中国可能是全球碳化硅项目建设和投入最大的国家,截至目前新增投资超过了2000亿元。



▲ 中国碳化硅半导体产业各环节资金投入情况 来源: 行家说 Research

而由于碳化硅技术的重要性,全球各国都在完善自己的产业链,以实现自主可控。半绝缘碳化硅衬底方面,早在2008年,《瓦森纳协定》就对半绝缘型碳化硅衬底材料进行明确的限制,实施严格禁运。2022年,欧洲、美国正在大力补贴导电型碳化硅衬底项目,比如欧盟委员会为意法半导体的碳化硅衬底项目提供2.925亿欧元补贴;Wolfspeed获得美国纽约5亿美元补助。

2022年，碳化硅还出现了应用热潮，除了新能源汽车、储能、充电桩、光伏、轨道交通等经常提到的应用领域外，甚至电动飞机、摩托车、手机快充等领域也都将碳化硅器件作为“必备”技术，未来我们将会看到越来越多的应用案例，碳化硅半导体的赛道也会越来越多。



企业	玛莎拉蒂	广汽埃安	科尼赛克 Koenigsegg	Ariel	Apollo	Kincsem
车型	GranTurismo Folgore	Hyper SSR	Gemera	Hipercar	G2J	Hyper-GT
性能	3个电机, 300kW, 1350Nm	1225马力	2个六相逆变器, 2011马力	4电机, 1180 马力		氢燃料、4个电机, 500kW
进展	2023年交付	2023年10月量产交付	2024年量产	2024年生产	2024年上市	2025年交付
供应商		基本、芯聚能、博世		Equipmake	行家说 Research, 2022	

▲ 电动跑车采用碳化硅技术案例 来源: 行家说 Research



企业	以色列Eviation	劳斯莱斯	Archer Aviation	美国H3X Technologies	Evolito
机型	Alice	创新精神 (Spirit of Innovation)	eVTOL	HPDM-3000电机	D1500/2x3
性能	航程250海里、速度260 KTAS、 载荷2500磅	623公里/小时	最高时速150英里/小时。	功率密度12.5 kW/kg	280 kW 峰值功率, 4000rpm
进展	全球电讯航空公司购买 50 架, 将在2026年交付	计划2026年投入运营	2024年获得生产飞机认证, 美 联储购买200架	获得1.05亿美元意向合同, 2024年Q1铁鸟测试	
供应商	maginX	迈凯伦800V碳化硅逆变器	霍尼韦尔/日本电装	行家说 Research, 2022	

▲ 电动飞机采用碳化硅技术案例 来源: 行家说 Research



企业	南方电网	FreeWire Technologies	巨湾技研	ABB
机型	第四代充电桩	Boost Charger	A480超级充电桩	Terra 360
性能	峰值效率达96%，充电站能耗 下降11%	电池、储能、充电一体化，安装 成本降20%，运营成本降70%	最高880V，最大480kW，5分 钟充至200公里。	最大输出功率为360kW，15分 钟充满电
进展	累计建桩7.9万个，计划投100 亿新建14万个	2022年夏天投入运营，2025年 部署超过5000个	总部及生产基地项目总投资达 40亿元，产能为8Gwh/年	壳牌选用Terra 360，2025年在 全球运营超过50万个充电点， 2030年运营250万个充电点

▲ 充电桩采用碳化硅技术案例 来源: 行家说 Research

行家说 Research, 2022

SiC 摩托车



企业	杜卡迪	Stark Future	Triumph Motorcycles
机型	电动摩托车V21L	越野摩托车MXer Varg	Triumph TE-1
性能	110 kW、140 Nm、275公里/小时	80匹、59.68KW、高功率续航40分钟，轻载续航6小时	续航100英里、130 kW、109 Nm、0-100公里加速3.6秒
进展	作为2023年MotoE世界杯独家赛车。	2023年3月开始交付	2022年7月完成测试

▲ 电动摩托车采用碳化硅技术案例 来源: 行家说 Research

1.4 1999-2022 年中国碳化硅产业大事件

时间	国内事件
1999 年	中科院物理所生长出 2 英寸 4H 和 6H SiC 单晶。
2006 年 9 月	中科院物理所用专利出资成立天科合达，开始 SiC 晶体产业化
2007 年 4 月	山东大学成功研制 3 英寸 SiC 单晶
2007 年 7 月	中科院物理研究所与天科合达建立国内首条完整 SiC 中试线
2012 年	天域建成超 2 万片 3 英寸、4 英寸外延产能
2012 年 3 月	瀚天天成提供 3 英寸和 4 英寸碳化硅外延片
2012 年	天科合达开始量产 4 英寸 SiC 晶体
2012 年	泰科天润 SiC 工艺线开始试流片，12 月成功研发 1200V 20A 肖特基二极管
2013 年 2 月	中科院上海硅酸盐所成功研发 4 英寸 SiC 单晶
2013 年 10 月	山东大学生长出 6 英寸 SiC 单晶
2014 年 12 月	中科院物理所与天科合达研制出了 6 英寸 SiC 单晶
2014 年	中科院 46 所推出 4 吋 SiC 单晶
2014 年 4 月	瀚天天成提供商业化 6 英寸碳化硅外延片
2015 年 3 月	国家电网建成年产 2 万片 4 英寸 SiC 芯片线
2015 年 6 月	山东大学生长半绝缘 6 英寸 SiC 单晶
2015 年	中科院上海硅酸盐所 4 英寸 SiC 晶体批量生产
2016 年	世纪金光碳化硅 MOSFET 器件研发成功

时间	国内事件
2017年	中电科 13 所 4 英寸碳化硅工艺线批产供货
2017年	硅酸盐所建成年产 2 万片 3 ~ 4 英寸 SiC 中试线
2018年	中电科 55 所完成 6 英寸 SiC 量产型芯片线建设
2018年	天科合达开始量产 6 英寸 SiC 晶体
2018年 12 月	中电科 2 所完成 6 英寸半绝缘 SiC 单晶研发
2020年	三安光电计划投资 160 亿在长沙建设 SiC 全产业链项目
2019年	中电科 13 所完成碳化硅 6 英寸工艺线
2020年	比亚迪·汉电驱逆变器采用 SiC MOSFET
2022年	烁科晶体、中科院物理所、天岳先进、晶盛机电等成功研发 8 吋单晶

▲ 1999-2022 中国碳化硅产业大事件 来源: 行家说 Research

1.5 2022 年碳化硅产业投融资表

2022 年碳化硅产业融资概况				
公布时间	被投企业	轮次	投资金额	投资方
2022 年 11 月	谱析光晶	战略融资	/	富毓投资
2022 年 10 月	飞程半导体	D 轮	数亿元	小米产投, 晨道资本, 华胥基金, 汇川产投, 哇牛资本, 投控东海, 长三角智能基金等
2022 年 10 月	瑶芯微	C 轮	数亿元	盛石资本, 同创伟业, 基石资本, 美的投资, 中科创星, 朗玛峰创投, 张江集团旗下基金
2022 年 10 月	威兆半导体	C 轮	数亿元	北汽, 英特尔资本, ATL 联合领投, 深重投, 昆桥资本, 中金浦成, 南山战新投等
2022 年 10 月	中科意创	A 轮	累计超亿元	英飞尼迪领投, 中南创投, 视盈基金等
2022 年 10 月	致瞻科技	A+ 轮	亿元级	千乘资, 启高资本, 毅达资本等
2022 年 10 月	德智新材料	战略融资	/	毅达资本, 无锡城建发展集团
2022 年 10 月	青禾晶元	战略融资	/	云启资本
2022 年 9 月	世纪金光	战略融资	2.57 亿	天鹰资本, 河南大河景泰资产, 上海豫鸿资产, 合肥产投, 河南文投
2022 年 9 月	青禾晶元	A++ 轮	近 2 亿元	赋资本, 建信信托, 阳光电源, 智科产投等
2022 年 9 月	翠展微	A 轮	约亿元	辰峰资本, 天龙股份, 元禾重元
2022 年 9 月	泰科天润	战略融资	1 亿元	昱能科技子公司创智新能源
2022 年 9 月	美浦森	战略融资	/	筠诚投资
2022 年 9 月	东尼半导体	增资扩股	2.8 亿元	湖州织鼎信息技术服务有限公司
2022 年 9 月	基本半导体	C4 轮	数亿元	德载厚资本, 国华投资, 新高地基金, 亦庄国投, 中美绿色基金投资
2022 年 9 月	臻驱科技	C 轮	/	君桐资本, 平湖经开区产投, 君联资本

公布时间	被投企业	轮次	投资金额	投资方
2022年8月	蓉矽半导体	Pre-A 轮	/	维度资本领投, 陕西三元航科投资基金, 南京泰华股权投资管理中心(有限合伙)等
2022年8月	天域半导体	战略融资	/	中比基金, 春阳资本, 立湾创投, 踊跃资本, 中广投资, 粤科鑫泰股权基金, 复朴投资
2022年8月	海科电力	战略融资	/	上海柘中集团
2022年8月	派恩杰	战略融资	/	湖州泓创, 中新基金, 华业天成
2022年8月	德智新材料	战略融资	/	壹同创投
2022年8月	博雅新材料	D 轮融资	逾 4 亿元	福建创投, 长江证券, 川发展, 深投控等
2022年8月	志橙半导体	战略融资	/	国投创合, 厚德信达, 广发证券, 瀚晖投资, 西藏高德投资, 赛富投资基金, 广发信德等
2022年7月	志橙半导体	战略融资	/	粤财信托, 盛万投资, 粤财创投, 国投创合, 广州开发区产业基金, 兴橙资本等
2022年7月	基本半导体	C++ 轮	/	初芯控股集团, 粤科金融
2022年7月	清芯半导体	战略融资	3000 万元	大米创投, 广东鸿德创业投资有限公司, 势能资本, 凯盈资本, 东莞科创集团
2022年6月	谱析光晶	pre-A 轮	数千万	策源创投
2022年6月	天域半导体	战略融资	/	比亚迪, 上汽尚欣等
2022年6月	晶越半导体	战略融资	/	和利资本, 红杉中国, 瑞华控股, 亚昌富投资, 达瑞夏鼎投资, 易科汇投资等
2022年6月	天域半导体	战略融资	/	东莞市大中实业有限公司, 申能诚毅, 超兴创投, 海尔资本, 晨道资本
2022年6月	重投天科	战略融资	/	深圳投控, 宁德时代等
2022年6月	中恒微	Pre-A 轮	/	固德威
2022年6月	青禾晶元	A+ 轮	/	韦豪创芯, 云启资本, 云晖资本, 芯动能投资, 磐衡投资
2022年6月	宽能半导体	天使轮	超 2 亿元	和利资本, 漠策资本, 云启资本, 国中资本, 毅达资本, 金浦投资, 亚昌投资等
2022年6月	至信微	天使轮	数千万元	时代伯乐, 金鼎资本, 太和基金等
2022年6月	基本半导体	C+ 轮	/	蓝海华腾, 招银国际, 广汽资本
2022年6月	芯干线科技	战略融资	/	商络电子投资(海南)有限公司
2022年5月	泰科天润	战略融资	/	深圳华强, 云起资本
2022年5月	瀚天天成	战略融资	/	海通新能源, 清大海峡, 上海柘中集团等
2022年5月	昕感科技	战略融资	/	安元天云, 清合投资
2022年4月	利普思	A+ 轮	数千万元	软银中国资本, 联新资本
2022年3月	昕感科技	A 轮	超亿元	蓝驰创投领投, 博裕资本, 水木清华校友基金, 海南赢玺投资, 北京翎澜投资等
2022年3月	锐骏半导体	C 轮	数亿元	中信证券, 超越摩尔基金, 同创伟业等
2022年3月	安建半导体	战略融资	/	四川欣晟佳, Cabin Rock Limited
2022年3月	安建半导体	B 轮	1.8 亿元	超越摩尔基金, 君盛投资, 联和资本, 龙鼎投资, 固高科技, 弘鼎创业投资等
2022年3月	芯塔电子	天使轮	数千万元	元禾控股, 芜湖新弋高科风投, 方德信等

公布时间	被投资企业	轮次	投资金额	投资方
2022年3月	美浦森	A轮	近亿元	创东方投资, 和而泰智能
2022年3月	忱芯电子	Pre-A轮	约亿元	东方嘉富, 原子创投
2022年3月	天狼芯	A+轮	/	国华投资, 深创投
2022年3月	威兆半导体	战略融资	/	英特尔投资
2022年3月	百识电子	A轮	超过3亿元	杭实资管, 亚昌富投资, 华映资本, 毅达资本, 湖州泓创, 金浦投资, 富华资本等
2022年2月	瞻芯电子	战略融资	/	小鹏汽车
2022年1月	派恩杰	战略融资	/	创东风投资
2022年1月	青禾晶元	A轮	/	韦豪创投
2022年1月	泰科天润	战略融资	/	上海邀问崑科一创科技

▲ 受限于时间和公开信息, 部分信息未能做到及时、精准、完整, 仅供参考
2022 中国碳化硅企业投融资情况 来源: 行家说 Research

1.6 2020-2022 年中国碳化硅产业并购表

时间	收购案	金额
2020年8月	三安收购北电新材	3.82 亿 RMB
2021年1月	英唐智控收购上海芯石 40% 股权	1.68 亿 RMB
2021年5月	深圳投控并购方正微电子	/
2021年9月	比亚迪收购济南富能半导体	50 亿元 RMB
2021年9月	凤凰光学宣布拟 100% 购买南京国盛电子和河北普兴电子	(已终止)
2021年11月	鸿海集团收购旺宏新竹 6 吋晶圆厂	/
2021年12月	空港股份宣布购买瑞能半导体	(已终止)
2022年3月	鸿海集团收购即思创意 40% 股权	/
2022年3月	长飞光纤参与芜湖太赫兹工程中心与启迪半导体合并重组案	7.8 亿 RMB
2022年4月	罗姆收购上海海姆希科半导体 20% 股权	/
2022年6月	扬杰科技收购楚微半导体 40% 股权	2.95 亿 RMB
2022年7月	鸿海集团收购盛新材料 10% 股权	/
2022年8月	中国台湾柏腾科技收购 SiC 供应商晶成半导体部分股权	2800 万新台币
2022年8月	国星光电拟收购风华芯电科技 99.88% 股权	2.69 亿 RMB
2022年8月	上海柘中集团收购海科电力科技 20% 股权	/
2022年10月	高金富恒集团重组国宏中能碳化硅衬底项目	/
2022年10月	中瓷电子计划购买博威电子 73.00% 股权、国联万众 94.6029% 股等	38.31 亿 RMB

▲ 受限于时间和公开信息, 部分信息未能做到及时、精准、完整, 仅供参考
2020-2022 中国碳化硅企业并购情况 来源: 行家说 Research

第二章、SiC 材料特性及关键技术

以下联合出品方及参编单位对本章节的特别贡献

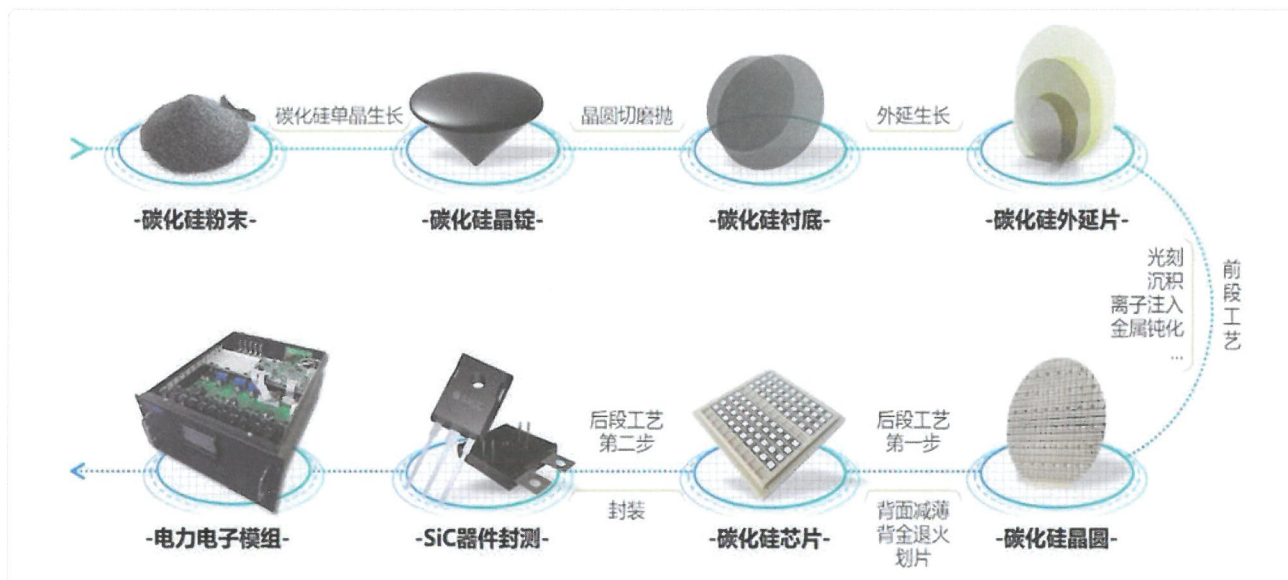
A 级参编单位



B 级参编单位



SiC 现已是一种公认的在中高压领域能够可靠替代硅的技术，许多电源模块和电源逆变器制造商已在产品路线图中导入了 SiC 技术，SiC MOSFET 器件更是被誉为新能源汽车电机控制器等领域的“硬通货”。但是，毕竟 SiC 器件还处于发展初期，从粉末、晶锭、衬底、外延、芯片、封装测试和模组制造，乃至终端应用都存在许多问题需要完善，尤其是车规级 SiC MOSFET，仍需要继续优化衬底缺陷、栅氧可靠性等关键点。本章节将逐一分析各个环节的技术挑战、发展趋势以及相关的代表厂商。



▲ SiC 器件产业链工艺流程图 来源：基本半导体

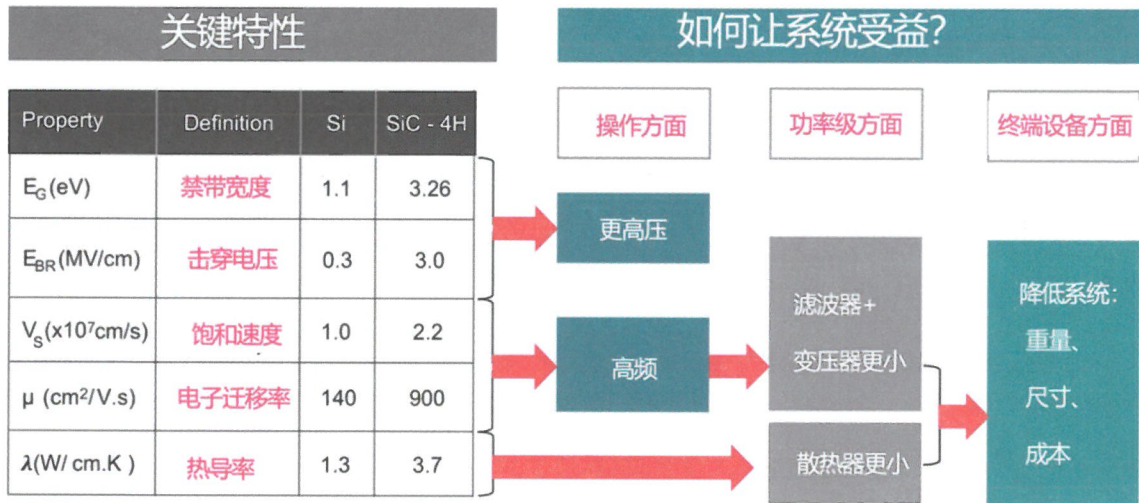
2.1 SiC 关键特性及与硅材料的对比

SiC 材料作为宽禁带半导体的“佼佼者”，相比硅材料，它拥有更高的临界雪崩击穿场强、更好的导热性能和更宽的禁带。禁带越宽，漏电流也就越小，效率也越高。导热性能越好，则电流密度可以越高。临界雪崩击穿场越强，则可以提升器件的耐压性能。但与此同时，它作为一种化合物，由于发展时间、技术和设备等因素，SiC 材料产业化的缺点也比较突出。

硅与 SiC 材料特性对比					
材料类型	禁带宽度 E_g (eV)	击穿场强 E_c (MV/cm)	本征载流子浓度 n_i (cm^{-3})	电子饱和速度 V_{sa} ($10^7 cm/s$)	热传导 λ (W/cm·k)
硅	1.12	0.3	$1.5 \cdot 10^{10}$	1	1.5
SiC	3.23	3	$8.2 \cdot 10^{-9}$	2	4.9
意义	更高的应用电压		更高的工作温度	更大的电流	更好的散热
	更低的导通电阻			更高的功率密度	

▲ 硅与 SiC 材料特性对比 来源：汇川技术、行家说 Research

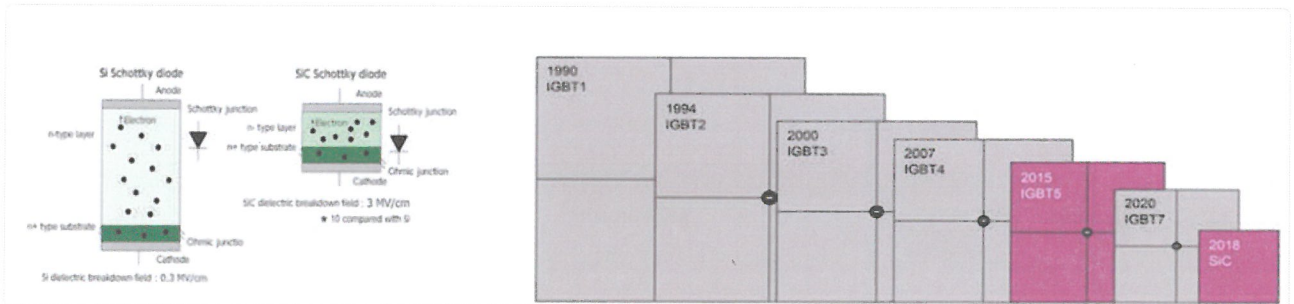
◎ 2.1.1 SiC 优点



▲ SiC 器件可以让设备受益 来源: 网络

相比硅材料, SiC 具备以下几个主要优点:

- 击穿电场是硅的 10 倍, 为此相比硅器件, SiC 器件的漂移区更薄、漂移层掺杂浓度更高, 显著降低导通电阻, 降低传导功率损耗, 提高功率效率。



▲ SiC 器件耐压更高、尺寸更小 来源: 罗姆、英飞凌

- 禁带宽度是硅的 3 倍, 本征载流子浓度低, 有更高的工作节温, 所以 SiC 器件能够在更高的温度下工作, 系统冷却需求减少, 可以明显降低设备体积和重量。



▲ SiC 器件可以缩小装备尺寸和重量 来源: 三菱电机

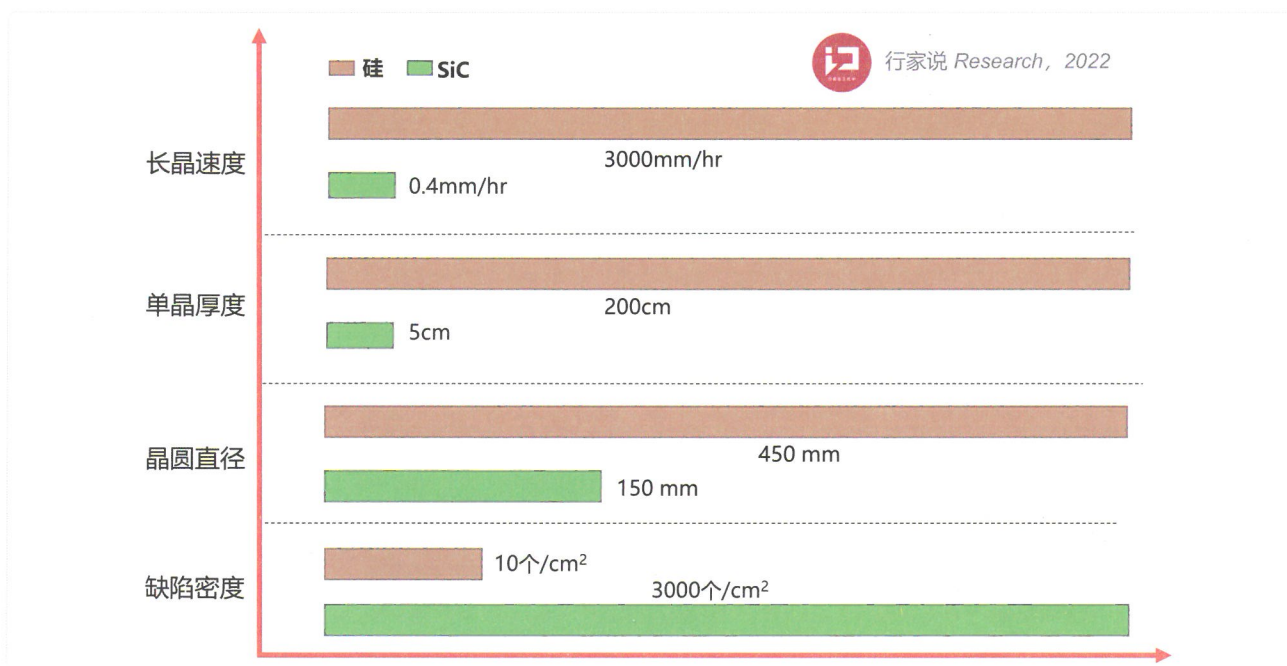
- 电子饱和速度是硅的 2 倍, SiC 器件可以比硅器件具有更高的切换频率。
- 导热系数是硅的 3 倍, SiC 具有更强的热稳定性, 产生的热量更容易传输到散热器和环境中。

迄今为止, 在宽禁带半导体中, 从衬底质量到器件加工, SiC 是最适用于功率器件的材料。

◎ 2.1.2 SiC 不足之处

尽管材料特性突出, 但 SiC 是由碳 C 和硅 Si 元素按 1:1 比例形成的 IV - IV 族化合物半导体材料, 硬度仅次于金刚石, 也属高硬脆性材料。因此相比于硅材料, SiC 单晶衬底的生产技术并不成熟, 同时制备工艺复杂, 加工难度大。

- 长晶速度慢, 单一元素的硅可以通过提拉法长晶, 速度可以达到 3000mm/hr, 而 SiC 长晶速度较慢, 速度约在 0.2-0.5mm/hr, 通常长一炉单晶需要 7 天时间。
- 硅单晶最大长度可以达到 2 米, 相比之下, SiC 单晶目前最大厚度在 50mm 左右。
- 目前, 12 英寸直径的硅晶圆正在加速上量, 而相比之下, 大部分 SiC 单晶晶圆只有 6 英寸, 目前量产的最大尺寸为 8 英寸。
- 此外, SiC 的缺陷密度也比较突出, 是硅的 300 倍左右。



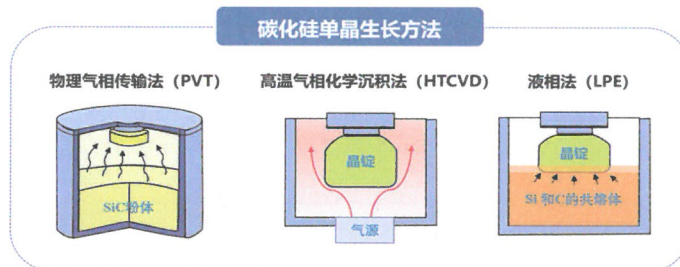
▲ 硅与 SiC 的对比 来源: 行家说 Research

2.2 SiC 分类、应用及关键工艺

碳化硅 (SiC) 有 250 种结晶形态, 其中 4H-SiC 的禁带宽度较大、载流子迁移率较高、掺杂剂离化能力较低, 是最适合制作功率器件的晶型。根据电阻率不同, SiC 衬底可分为导电型和半绝缘型。SiC 单晶生长完成后, 通过切割、研磨、抛光、清洗等工序加工可形成 SiC 衬底片。其中, 半绝缘型 SiC 衬底主要应用于微波射频器件等领域; 而导电型 SiC 衬底主要应用于制造功率器件。



4H-SiC 单晶的生长方法有物理气相传输法 (PVT 法)、高温化学气相沉积法 (HTCVD 法) 和液相法 (LPE 法) 等, 以 PVT 为主流。



时间	PVT	HT-CVD	LPE
晶型	4H & 6H	4H & 6H	4H & 6H
生长温度 (°C)	2200-2500	2200	1460-1800
生长 (mm/h)	0.2-0.4	0.3-1.0	0.5-2
优点	最成熟、最常用	可持续的原料 可调整参数 一体化设备	类似提拉法
缺点	半绝缘制造困难 生长厚度受限 缺少一体化设备	速率和缺陷控制	金属杂质, 硅溶液碳的溶解度有限
主要厂家	Wolfspeed、贰陆、道康宁、Sicrystal、天岳、天科、烁科晶体	Norstel、日本电装	住友、晶格领域

▲ SiC 单晶生长方式及其特点 来源: 行家说 Research

◎ 2.2.1 SiC 衬底技术进展

近两年,大尺寸 SiC 单晶生长的技术创新主要朝着提高单晶尺寸、长晶速度和厚度,以及降低缺陷密度和降低应力等方向发展。

产品性能	山东天岳	Wolfspeed	贰陆公司	天科合达
直径	100.0 mm ±0.0/-0.5mm	100.0 mm ±0.0/-0.5mm	未披露	100.0 mm ±0.0/-0.5mm
微管密度	≤ 1cm ⁻²	未披露	< 0.1cm ⁻²	≤ 5cm ⁻²
多型面积	不允许	≤ 5%(面积)	未披露	不允许
电阻率范围	≥ 1×10 ⁶ Ω·cm	≥ 1×10 ⁶ Ω·cm	≥ 1×10 ¹¹ Ω·cm	≥ 1×10 ⁹ Ω·cm
总厚度变化	≤ 10μm	≤ 15μm	未披露	≤ 5μm
弯曲度(绝对值)	≤ 25μm	未披露	未披露	≤ 15μm
翘曲度	≤ 35μm	≤ 45μm	未披露	≤ 30μm

▲ 主流企业 4 英寸导电型 SiC 衬底性能对比 来源:天岳先进招股书

单晶生长速率方面,目前日本电装公司通过气相沉积法可以做到 3000 μm/hr,住友通过液相法也可以达到 2000 μm/hr, Wolfspeed 等采用 PVT 法的企业通常为 500 μm/hr;相比之下,国内企业通常为 200-300 μm/hr。

晶圆厚度方面,浙江大学和 Pallidus 的 6 英寸单晶号称可以做到 50mm, Wolfspeed 的 8 英寸单晶为 35mm;而国内企业通常为 20-30mm,甚至有些企业只有 10-20mm。单晶锭出片数方面(多线切割),国外通常水平可以大约 60 片,而国内只有 25 片左右。

烁科晶体是国内 SiC 晶体厂商中的佼佼者,2021 年完成了 6 英寸高纯半绝缘和 6 英寸导电型衬底的工程化,且实现了批量销售,其长晶速率达到 300-350μm/hr,晶体厚度达到 30-35mm,单锭的出片数为 30-35 片。

SiC 衬底	国际较高水准	国内较高水准	烁科晶体
长晶速率(μm/hr)	500-3000	200-300	300-350
有效晶圆厚度(mm)	约 50-60	10-30	30-35
单锭出片数(片)	约 80	25-35	30-35

▲ 国内外 SiC 衬底(量产+研究)技术对比 来源:行家说 Research

晶体缺陷方面,在过去的几十年中, SiC 衬底缺陷不断减少,现在约为 4000 个/cm²,包括微管密度、基平面位错密度(BPD)和贯穿螺型位错密度(TSD)等。其中衬底供应商已经将微管密度降低到 0.1/cm²以下。而相关企业也在致力于减少 BPD 和 TSD 等“致命缺陷”,目前国际主流企业的水平如下:

SiC 衬底缺陷	BPD (cm ⁻²)	TSD (cm ⁻²)
Wolfspeed	约 100	约 200
II-VI	约 300	约 600
SK Siltron	约 800	约 100
安森美	约 500	约 400
国内	约 1000	约 500

▲ 国内外 SiC 衬底缺陷对比 来源:烁科晶体、行家说 Research

不过, 电装、住友、UJ-Crystal 和 Kisab Semi 等在降低 SiC 单晶缺陷方面取得更进一步的成绩:

企业	缺陷情况	长晶方法
电装	TSD 为 1.3cm^{-2} 、BPD 为 20cm^{-2}	重复 A 面生长法
住友	TSD 低于 100cm^{-2} 、BPD 为 0	液相法
UJ-Crystal	TSD 低于 204cm^{-2} 、BPD 为 64cm^{-2}	液相法
Kisab Semi	BPD 小于 1cm^{-2}	快速升华生长工艺 (FSGP-M)

▲ SiC 衬底缺陷最新进展 来源: 行家说 Research

衬底制造占到 SiC 晶圆加工总成本的 50%，降低晶体缺陷，提升良率有助于大幅降低 SiC 衬底成本。传统的长晶设备及工艺，因径向温度梯度大，温场均匀性较难控制，导致产生晶体生长良率低等诸多问题。优晶光电推出第 4 代机型 UKING SIC RV4.0 碳化硅长晶设备，可实现径向和轴向温度梯度的精确控制，SiC 晶体内部缺陷少，晶体利用率高达 85%。优晶光电的设备已经被众多 SiC 衬底企业所采用，2022 年优晶光电的营收超过 3 亿元，确定意向订单已超 20 亿元 (详见 2.7.1 章节)。

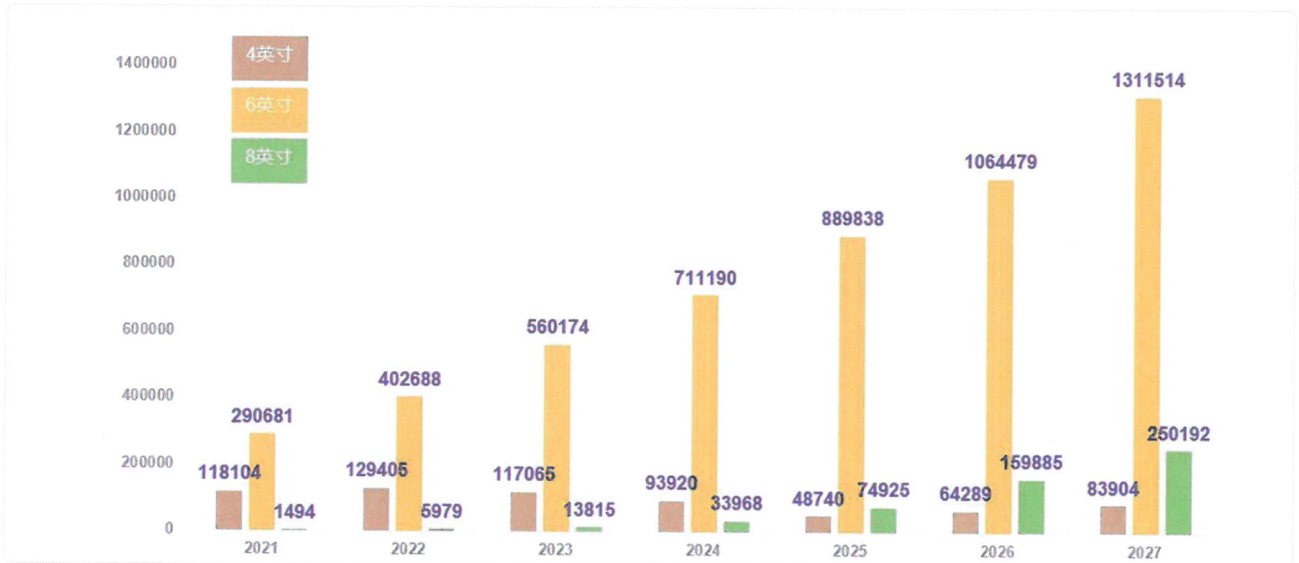
目前，国际主流 SiC 导电型衬底以 6 英寸为主，8 英寸衬底于 2022 年进入量产阶段；国内衬底基本完成 4 英寸到 6 英寸的迭代，6 英寸衬底即将进入大规模量产阶段。SiC 衬底尺寸越大、技术参数水平要求越高，国外技术优势越明显。因此，目前整个国产 SiC 衬底及外延行业只能供应低端的器件制造市场，比如肖特基二极管，而无法占领诸如 SiC MOSFET 等高端应用市场。尤其是在车规应用方面。由于 SiC 衬底质量对外延片生长和质量影响巨大，国产衬底材料与国际先进水平存在事实差距，后端 SiC MOSFET 器件厂和车企仍对国产衬底、外延材料的规模化采用存在顾虑。

在 8 英寸衬底方面，目前全球已有超过 14 家企业宣布成功实现了突破，其中包括 Wolfspeed、罗姆、安森美、意法半导体、II-VI 等国外企业，而烁科晶体、天岳先进等 6 家企业在 2022 年相继突破 8 吋。量产时间方面，Wolfspeed 在 2022 年逐步规模生产，意法半导体、罗姆和同光股份预计将在 2023 年实现小规模量产。



▲ 全球 8 英寸 SiC 衬底进展 来源: 行家说 Research

目前, 硅晶圆线已经发展到 12 英寸, 许多 8 英寸生产线将被逐步“闲置”下来, 而硅线转产 SiC 功率器件只需增加几台专用设备, 为此未来的 8 英寸 SiC 衬底需求也非常明确, 但受制于 8 英寸 SiC 衬底产能以及晶圆良率等问题, 6 英寸导电型 SiC 衬底目前是主流, 8 英寸导电衬底在三年内将实现批量应用, 预计 2025 年 8 英寸 SiC 衬底的将超越 4 英寸产品, 市场需求逐渐增大。



▲ 4-8 英寸 SiC 衬底需求量分析 (单位: 片) 来源: Yole、行家说 Research

烁科晶体是国内最早公布 8 英寸 SiC 晶体制备的企业, 通过长期重视前沿性产品研发, 烁科晶体于 2021 年 8 月研制出 8 英寸 SiC 晶体, 突破大尺寸单晶制备的重要技术难题; 2022 年年初, 再次突破 8 英寸衬底加工工艺技术, 制备出 8 英寸 N 型 SiC 单晶衬底, 并且衬底质量优异。

类型	参数
导电型	MPD < 0.5/cm ² ; 电阻率为 0.02-0.025Ω·cm; FWHM 约为 30arcsec; TTV 为 3.882μm; Bow 为 8.950μm; Warp 为 14.227μm
半绝缘型	MPD < 0.5/cm ² ; 电阻率大于 1E10Ω·cm; TTV 为 2.501μm; Bow 为 0.51μm; Warp 为 3.783μm

▲ 烁科晶体 8 英寸衬底参数 来源: 烁科晶体

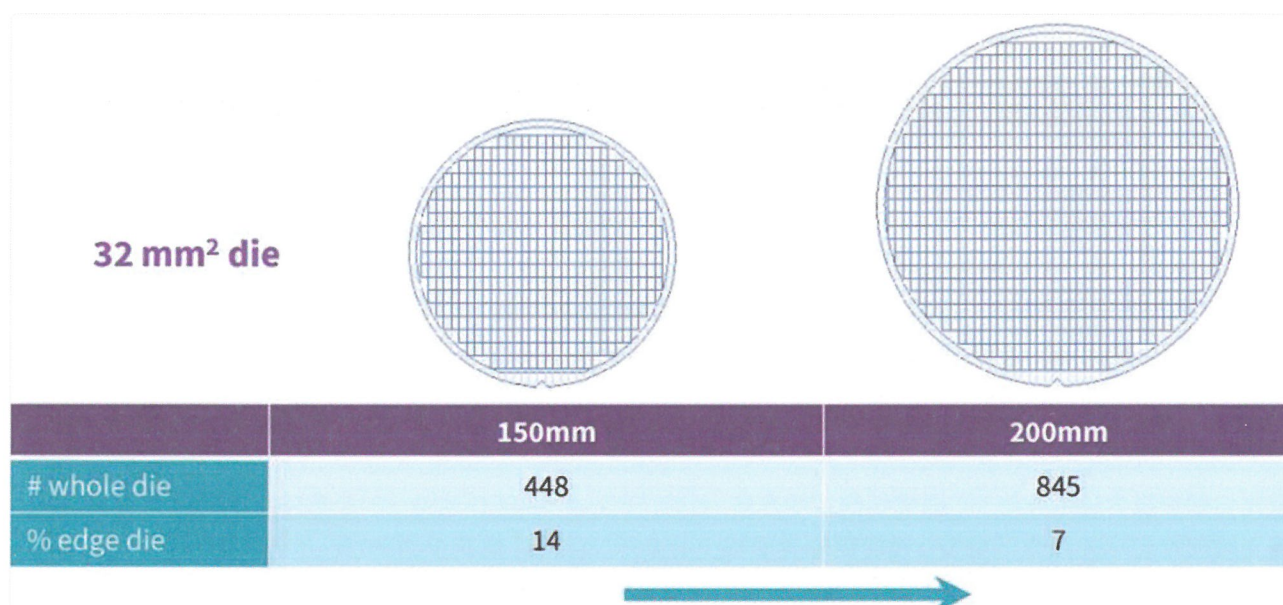
目前, 烁科晶体已实现 8 英寸导电型 SiC 衬底小批量出货, 向产业化迈出了关键一步, 预计 2023 年年中将实现批量生产。

◎ 2.2.2 SiC 衬底技术进展

目前, SiC 衬底的成本较高, 业界正在从多个方向进行降低成本。

● 增加衬底尺寸 (至 8 英寸)

大尺寸衬底有助于进一步降低器件价格。以 $2 \times 2 \text{mm}^2$ 芯片为例, 4 英寸的 SiC 衬底只能生产 1625 个晶粒 (die), 而 6 英寸的 SiC 衬底可以生产 3917 个 die, 数量是 4 英寸的 2.4 倍。而从 6 英寸转向 8 英寸衬底, 可以生产 6317 颗 $2 \times 2 \text{mm}^2$ SiC 芯片。以 32mm^2 SiC MOSFET 为例, 采用 8 英寸衬底, 其数量有望从 448 颗增加到 845 颗, 增加了 89%, 而且边缘 Die 的比例从 14% 降低至 7%, 进一步提高衬底的利用率。



▲ 6 英寸与 8 英寸 SiC 芯片数量对比 来源: Wolfspeed

然而 8 英寸等大尺寸 SiC 晶体生长的热场对细节要求较高, 8 英寸 SiC 晶体生长要求较小的晶体横向温度梯度、较大的纵向温度梯度。比如 8 英寸的坩埚直径大幅增长, 传统感应式长晶设备的线圈只能加热坩埚的表面, 导致不同位置的径向温度梯度都会随之增大, 而这样的参数变化不适合大直径的晶体生长。因此, SiC 衬底要进入 8 英寸时代, 还需要长晶工艺和设备的创新。

针对市场需求, 2022 年恒普科技推出了双线圈感应晶体生长炉, 克服感应晶体生长炉生长 8 英寸 SiC 晶体的问题点, 做到了双线圈对石墨坩埚的温度上下“准轴径分离”, 更好地对应行业客户的使用惯性及 Know-How 的延续。此外, 2022 年恒普科技还推出了新一代 2.0 版 SiC 电阻晶体生长炉, 更好地满足 SiC 晶体长大、长快、长厚的需求, 恒普科技的核心技术包括“轴径分离”、“新工艺”等, 其设备已经被广泛采用, 2022 年 SiC 长晶炉订单大幅增长, 订单需求量超过 1000 多台 (详见 2.7.1 章节)。

● 采用新的长晶方式

例如日本电装通过采用 HTCVD, 相比传统的 PVT 升华法, 其 SiC 长晶速度提升了 15 倍, 衬底成本可以降低 30%。

● 采用异质衬底

近 2 年, 3C-SiC 衬底技术也取得了快速发展, 住友金属子公司 Sicoxs 计划将异质 SiC 衬底进行商业化, 目标产能是 12 万片 / 年, 据称可将 SiC 衬底成本降低 50%。

● 优化衬底加工技术

除了长晶外, SiC 衬底制备环节的另一大难题是切磨抛。

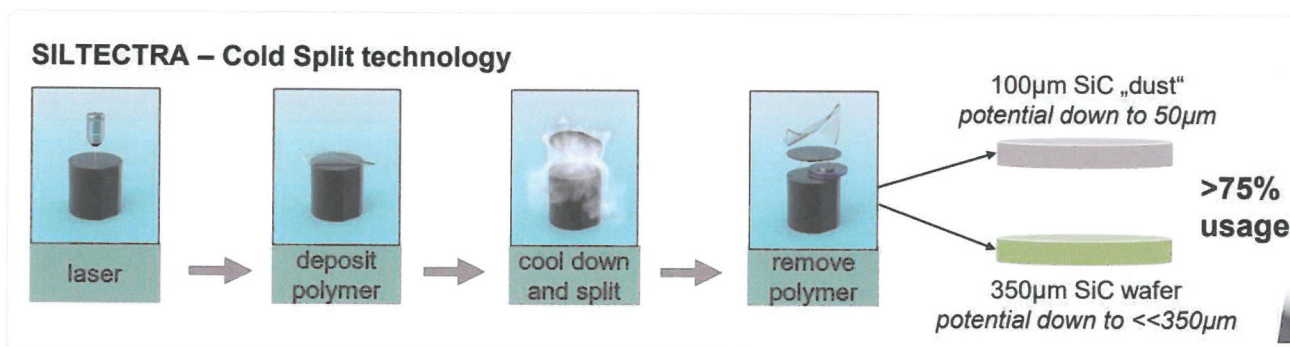
由于碳化硅材料的莫氏硬度为 9.5, 仅次于金刚石, 同时由于碳化硅本身的晶体特性导致了晶片的 (0001) Si 面和 (000-1) C 面具有不同的耐磨性和耐腐蚀性, 给后期的切磨抛加工带来了很大的难题。

衬底材料	硅衬底	蓝宝石衬底	SiC 衬底
莫氏硬度	7	9	9.5

▲ 不同衬底材料的莫氏对比 来源: 行家说 Research

以金刚石多线切割为例, 生产一片 450 μ m 厚度的 SiC 衬底, 大约 400 μ m 的晶锭成为了粉尘废料, 直接导致 SiC 衬底产量不理想。同时, 金刚线方式切割一块 6 吋 SiC 晶锭通常需要 150 个小时 (6 天以上) 左右, 不利于 SiC 衬底的交付。另外, 金刚线切割后的衬底 Ra 值大约为 100 μ m。为此还需要进行粗磨、精磨和 CMP 三道处理工艺, 合计耗时超过 5 天。

激光切割被视为最可行的 SiC 晶锭切割技术方向, 目前, 英飞凌、DISCO 就从 2016 年开始研发激光切割技术, 英飞凌的冷剥离光技术可将 SiC 衬底切割时间减少约 85%, 材料耗损减少约 70%。不过, 截至目前, 英飞凌和 DISCO 的激光剥离技术还在推进当中, 尚未正式实现批量化生产。



▲ 多线切割与冷切割技术的 SiC 衬底利用率 来源: 英飞凌

在激光切割技术方面, 国内实现了同步发展甚至超越。以晟光硅研为例, 他们在 2020 年就相继完成了 4-6 英寸 SiC 晶体的激光切片, 其客户验证后认为他们的微射流激光是能够改变行业现状的关键技术。

目前,晟光硅研的设备已经为中国大陆 80% 的 SiC 衬底厂商进行了样品测试,并与多家国内头部衬底企业签订了批量设备订单合同(详见 2.7.1 章节)。

优势	对比金刚线切割	益处
速度快, 6 小时 / 锭	减少 96% 切割时间	节省时间、设备损耗
损耗少 (约 100 μ m)	材料损耗减少 75%, 衬底多 1-1.5 片	增加营收
Ra 值低至 0.7 μ m	跳过粗磨和精磨, 直接 CMP	提升良率; 节约时间、设备、耗材等成本
衬底厚度低至 150 μ m	衬底厚度减薄 75%	大幅节省器件减薄工作

▲ 晟光硅研微射流激光 5 大优势技术 来源: 行家说 Research

另外,采用传统金刚线,8 英寸 SiC 晶锭的切割时间将高达 300 多个小时,会出现设备疲劳强度大、连续工作稳定性差等问题,难以满足 8 英寸 SiC 晶锭的切片需求。所以大力发展激光切割技术的另一层战略意义在于服务 8 英寸发展潮流,目前,晟光硅研已经帮助部分国内客户完成 8 英寸晶体滚圆、异型加工,正着手进行 8 英寸晶锭切片实验。

此外, SiC 衬底的研磨和抛光等技术也亟需提高,目前 SiC 衬底的研磨时间大约是硅衬底的 5000 倍,是蓝宝石衬底的 40 倍。

衬底材料	硅衬底	蓝宝石衬底	SiC 衬底
研磨速度对比	5000	40	1

▲ 不同衬底材料的研磨速度对比 来源: 行家说 Research

目前,研磨占 SiC 衬底加工整体成本的 30% 左右(包含双面粗磨 DSL 及双面精磨 DMP),切割约占 20%,抛光约占 50%。

研磨加工过程中,研磨液、研磨盘 / 研磨垫及研磨工艺共同决定了加工效率和加工品质。在传统半导体衬底晶片研磨工艺中,主要使用粗粒度的普通磨料研磨液来实现快速研磨加工,加工过程中破片率高,加工后晶片表面存在较深的残留应力层和机械划痕损伤层,导致整体加工良率低。为此,根据 SiC 衬底材料的高硬度特性及对硬脆材料加工的深层次理解,联合精密设计了独特的双面粗磨和双面精磨加工方案,采用独特配方的金刚石研磨液,搭配特殊结构的研磨盘和研磨垫,同时优化加工工艺,大幅度提高了 SiC 衬底的粗磨和精磨的加工效率,降低晶片翘曲度,提高了整体加工良率。

为此,2010 年河南联合精密材料股份有限公司就开始配合国内头部 SiC 衬底企业天科合达进行了切磨抛加工方式、加工耗材及加工工艺的研发。并成功开发了超精细研磨液技术,实现了对 SiC 研磨液的进口替代,可确保亚纳米平均表面粗糙度和亚微米总厚度变化值。目前,联合精密已经服务了中国大陆超过 90% 的 SiC 衬底企业(详见 2.7.1 章节)。

2.3 SiC 外延关键工艺

由于 SiC 功率器件与传统硅功率器件制作工艺不同,不能直接在 SiC 单晶材料上制作,必须在导电型 SiC 单晶衬底上额外生长高质量的外延材料,并在外延层上制造各类芯片结构,对外延层的厚度、掺杂浓度以及缺陷提出了更高要求,所以外延的质量对器件的性能影响非常大。SiC 外延生产成本约占 SiC 器件总体成本的 20-25%。

常见的 SiC 同质外延生长技术有化学气相沉积技术 (CVD)、液相外延技术 (LPE) 和分子束外延 (MBE) 等。相比之下, CVD 具有可以在较高生长速率下获得高质量外延层,可以对 SiC 外延层的厚度实现精确控制,并且能够可控实现 SiC 原位掺杂等多种优点,已成为 SiC 外延生长的主流技术,并得到了广泛应用。

根据不同的掺杂类型,可分为 n 型和 p 型外延片。由于掺杂离子在 SiC 材料内极难扩散,因此难以通过传统的高温扩散掺杂技术实现 PN 区的离子掺杂,需要采用 1650°C 的高温外延技术实现 SiC 材料漂移层的生长。目前主要有 50.8mm、76.2mm、100mm、150mm 和 200mm 五种直径的 SiC 外延片,以 100mm 和 150mm 为主;外延有两种厚度: $0.5\mu\text{m} < T \leq 50\mu\text{m}$ 和 $T > 50\mu\text{m}$ 。

外延技术是 SiC 功率器件制备的核心技术之一,其外延质量和缺陷率将直接影响 SiC 器件的性能和成品率。在 SiC 同质外延的研发和生产中,关注重点集中在高质量厚膜外延、掺杂浓度控制、缺陷调控三个方面。SiC 同质外延是制备功率器件的基础,高质量大尺寸厚膜外延是提高器件耐压特性的关键,目前主要通过提高生长速度获得 SiC 厚膜,如何在提高外延生长速度的同时确保外延层的高质量是 SiC 同质外延面临的重要挑战。

额定电压	600V	1200V	1700V	3300V	6500V	10000V	15000V
击穿电压	750V	1500V	2125V	4125V	8125V	12500V	18750V
漂移层掺杂 cm^{-3}	2.5E16	1E16	7E16	3E15	1.2E15	7E14	4E14
漂移层厚 μm	6	11	16	30	60	100	150

▲ SiC 外延关键参数 来源:行家说 Research

SiC 外延生长技术的不断发展,以 Wolfspeed、II-VI、昭和电工等公司为首的国外外延片企业不断发展,都已实现 4 ~ 6 英寸 SiC 外延晶片的产业化,而 2022 年 9 月昭和电工已经开始对外供应 8 英寸外延片样品。而国内主要制造商在逐步转向 6 英寸产品,部分企业也已在规划 8 英寸生产线。

技术方面,SK Siltron 生长的 6 英寸 4H-SiC 同质外延材料在厚度均匀性和掺杂浓度均匀性等技术指标上具有明显的优势,厚度均匀性小于 2%,掺杂浓度均匀性小于 4%,并且可以同时生长 6 片 6 英寸的高质量 4H-SiC 同质外延材料。

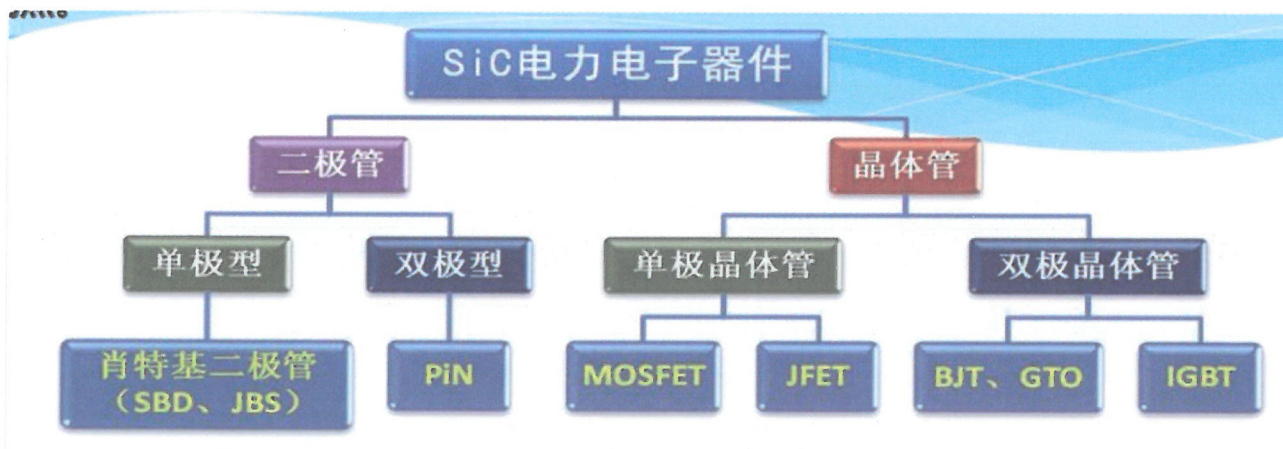
相对于 SiC 半导体的其他环节,中国外延企业与国外领先企业之间的差距并不大,甚至在研发方面还实现了部分领先。中科院半导体研究所于 2013 年研制的 4H-SiC 外延晶片,厚度均匀性小于 0.5%,掺杂浓度均匀性小于 3.5%,表面粗糙度为 0.2nm,表面缺陷密度小于 1cm^{-2} 。国内专注做 SiC 外延片的公司主要有瀚天天成和天域半导体,2015 年,瀚天天成公司首次在 4 英寸 SiC 外延晶片产品上实现零基面位错。合盛新材料的 SiC 外延片在各项性能上也比较突出。

参数	P 级
缓冲层厚度	0.5-2 μm
缓冲层浓度	1E18 cm^{-3}
耐压层厚度范围	5-30 μm
耐压层厚度偏差	$\pm 5\%$
耐压层厚度均匀性	$\leq 3\%$
耐压层掺杂浓度范围	1E15-1E19 cm^{-3}
耐压层掺杂浓度偏差	$\pm 10\%$
耐压层掺杂浓度均匀性	$\leq 5\%$
粗糙度	$\leq 0.3\text{nm}$
致命缺陷	$\leq 0.5\text{cm}^{-2}$
可用面积	$\geq 95\%$

▲ 合盛新材料 6 英寸 SiC 外延片技术参数

2.4 SiC 功率器件技术进展

功率半导体是电子设备中电能转换与电路控制的核心，是电子产品的基础元器件之一。根据器件集成度不同，通常功率半导体可以分为功率 IC 和功率分立器件两大类。



▲ SiC 电力电子器件的分类

分立功率器件包括二极管、晶体管等类别。常见的 SiC 功率分立器件主要有 SiC 二极管、SiC MOSFET, 而且已经实现了大规模的产业化。其中, 中压级 SiC SBD (600-1700V, 1-50A) 已经商业化。SiC 功率器件方面, 经过近 20 年发展, 国际上已经研发了 10-15kV、大于 10A 的 SiC MOSFET、22kV 的 SiC ETO、27kV 的 N-IGBT 和超过 20kV 的 SiC PiN 二极管等。

器件类型	分类	阻断电压
SiC 二极管	SiC SBD	10kV
	SiC JBS	10kV
	SiC PiN	26.9kV; 27.5kV
SiC 晶体管	SiC MPS	10kV, 11.3kV
	SiC MOSFET	平面型 10-15kV; 沟槽型 3.3kV
	SiC JFET	9.4kV; 11kV

▲ 主要 SiC 功率器件分类 来源: 行家说 Research

国外 SiC 功率器件主要玩家包括: 意法半导体、Wolfspeed、英飞凌、罗姆、电装、安森美、富士电机等。国内企业包括湖南中车、泰科天润、比亚迪半导体、三安集成、华润微、瞻芯、中电 55 所、中电 13 所、飞程半导体、安海半导体、森国科等, 随着需求和产能的提升, 目前国内企业营收逐渐扩大, 正在缩小与国外企业的差距。新能源汽车领域主要还是采用国外的 SiC MOSFET 产品, 尤其 EV 电驱逆变器。2021 年开始, 国产 SiC MOSFET 器件开始被车企的 OBC 所采用。

◎ 2.4.1 SiC 二极管技术发展分析

SiC 二极管耐压等级远高于硅基二极管 (150V), 因此在 600-3000V 的电压范围内, 过去几年, SiC 二极管市场快速增长, 被用于各种电力系统, 包括电源、光伏转换器、空调以及电梯和轨道车的电机控制。SiC 二极管可分为肖特基二极管 (SBD)、PiN 功率二极管、结势垒 SBD (JBS) 和混合 PN 结 SBD (MPS)。

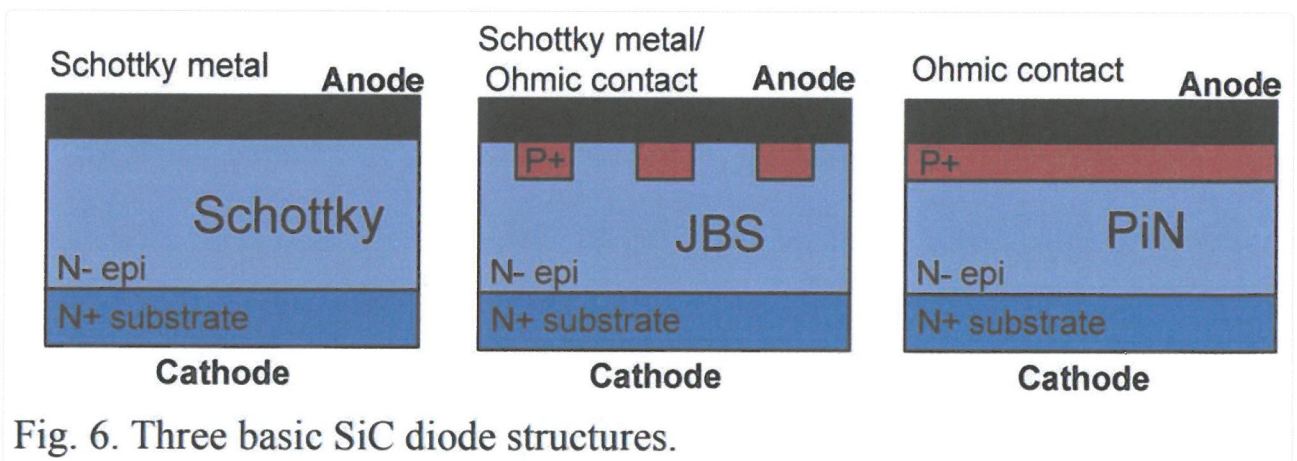
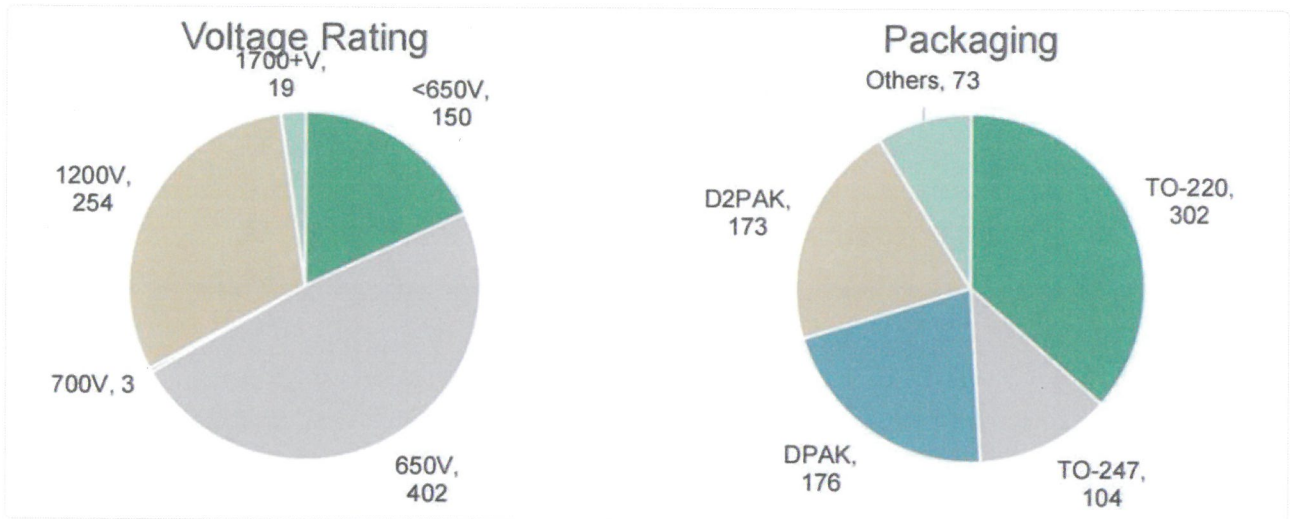


Fig. 6. Three basic SiC diode structures.

▲ 三种 SiC 二极管结构 来源: GE 全球研发中心

中压级 SiC 二极管 (600V-1700V, 1A-30A) 已经商业化。目前 650V 和 1700V SiC 二极管已经成为主流产品, 封装形式以 TO 封装为主。



▲ 市售 SiC 二极管的电压、封装类型情况 来源: Littlefuse、DigiKey (2021)

● SiC SBD

SiC SBD 是最早被采用的 SiC 器件之一, 结构与硅基 SBD 基本相同, 是利用金属与半导体接触形成的金属 - 半导体结原理制作的一种热载流子二极管, 也被称为金属 - 半导体 (接触) 二极管或表面势垒二极管。

SiC SBD 的反向恢复损耗为零, 同时额定电压可以达到 10kV。SiC SBD 可与硅基 IGBT 配合使用, 以提供具有成本效益的解决方案。通过用 SiC SBD 代替硅基 PN 二极管, 总开关损耗可降低 25%, 消除了由于硅基二极管和 IGBT 中的反向恢复引起的功率损耗, 从而可以降低系统冷却要求、提高效率或提高开关频率。不过, 由于肖特基势垒降低效应, 较高温度下的漏电流迅速增加, SiC SBD 的阻断电压被限制在 600V。

● SiC PiN

在 4500V-10kV 以上, 单极型 SiC 器件漂移区的电阻会大幅增加, 所以业界开发了 SiC PiN 双极器件。SiC PiN 的结构有三层, 即在 P 结和 N 结中间夹着高阻值的本征 I 层。与硅基 PiN 相比, SiC PiN 二极管具有高于硅的 2-3 个数量级的开关速度、高结温承受能力、高电流密度以及更高的功率密度。相比于 SiC SBD, SiC PiN 在高压场合更具优势, 在 10kV-20kV 等超高压范围内很有前景。SiC PiN 的另一个优点是漏电流极低, 使其成为高温操作的理想选择。

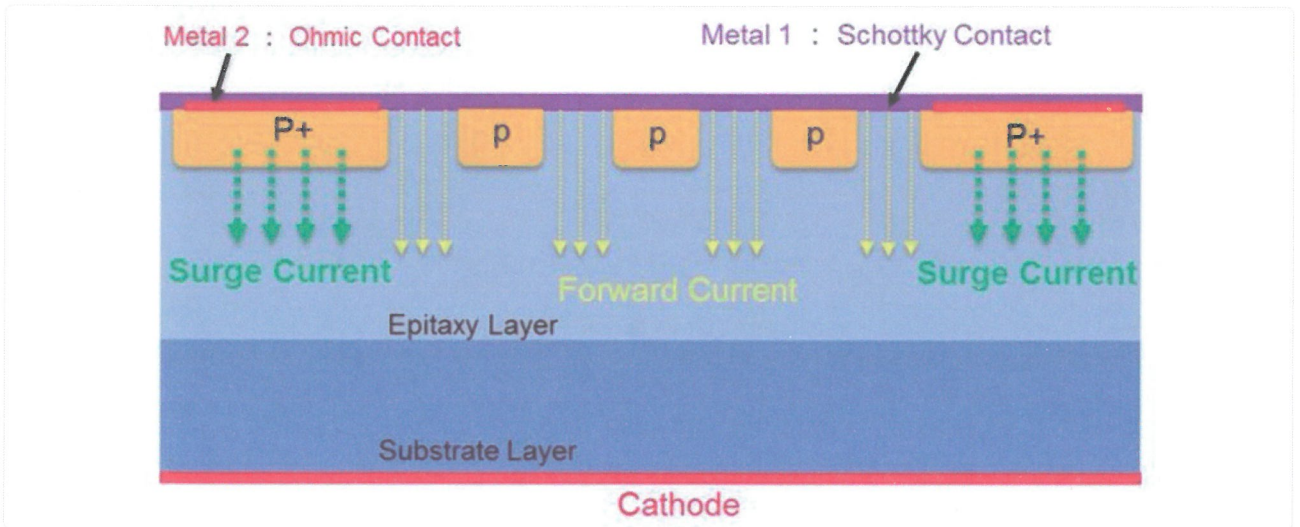
不过, 由于大电流能力需要大面积的器件, 但是 SiC 厚外延生长工艺会引入额外的缺陷密度, 而这会导致 SiC PiN 二极管的良率较低, 从而阻碍了大面积芯片的商业化。2005 年某国外企业研制了 10kV/50A 的 SiC PiN 二极管, 良率仅有 23%。此外, SiC 材料中少子寿命较短, 双极型电导调制效应不显著, 使得 SiC PiN 二极管的器件导通电阻较大, 导致反向恢复损耗很大, 因而未来的技术关键是要开发成熟的、能提高少数载流子寿命的工艺。

● SiC JBS

由于 SiC SBD 击穿电压低、反向漏电大, 而 SiC PiN 大电流芯片良率低, 传统 SiC 二极管已无法满足高频、大功率、低功耗的市场需求, 为此业界开发了 SiC JBS 二极管。SiC JBS 巧妙地结合了 SBD 和 PiN 两种结构, 既有 SBD 正向导通单极型导电的优点, 也有 PiN 反向漏电流较低的优点, 当阻断电压低于 3.3kV 时, 首选 SiC JBS。目前国外厂商 Wolfspeed、意法半导体和英飞凌都已推出了 600V-1700V 的 SiC JBS 产品, 最大电流为 50A。

● SiC MPS

由于高压大容量装置在启动过程中，SiC 二极管会存在大电流冲击过程，对 SiC 二极管的抗浪涌冲击能力提出了挑战。为此，业界经过结构优化开发了 SiC MPS 产品。SiC MPS 是在 SiC JBS 的基础上，通过加入大面积 P 区和 P 型欧姆接触，可以将浪涌电流能力提高 2-4 倍。通过设计以及工艺上的改进，各厂家 SiC MPS 的浪涌能力普遍达到额定电流的 10 倍以上。而英飞凌通过元胞优化，其浪涌电流密度达到了 5600A/cm² 的水平，为额定电流的 18 倍。



▲ MPS 结构示意图

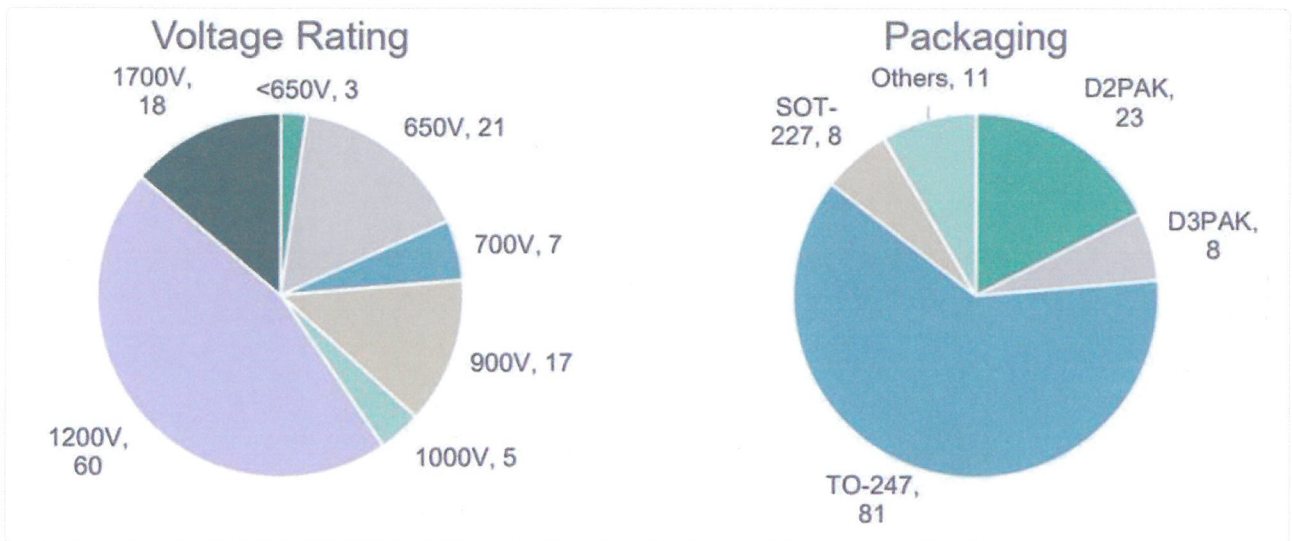
相关学者对上述 SiC 的 SBD、PiN、JBS 和 MPS 在科研和量产产品的阻断电压、正向压降和最大电流做了如下对比：

器件类型	阻断电压/kV	正向压降/V	最大电流/A	
SBD	科研	1.2	1.35	5
	产品	0.6	1.35	40
		1.2	1.35	40
PiN	科研	4.3	3.25	0.1
		10	3.44	20
		10	<5	50
	产品	27	4.72	—
		8	6.1	2
		10	<5	20
JBS/MPS	科研	15	6.4	1
		1.2	1.2	2
		5	3.5	3
	产品	10	3.37	20
		0.65	1.5	50
		1200	1.5	50
		1700	1.5	50

▲ SiC 二极管器件阻断电压及正向压降总结 来源：浙江大学电气工程学院（2021）

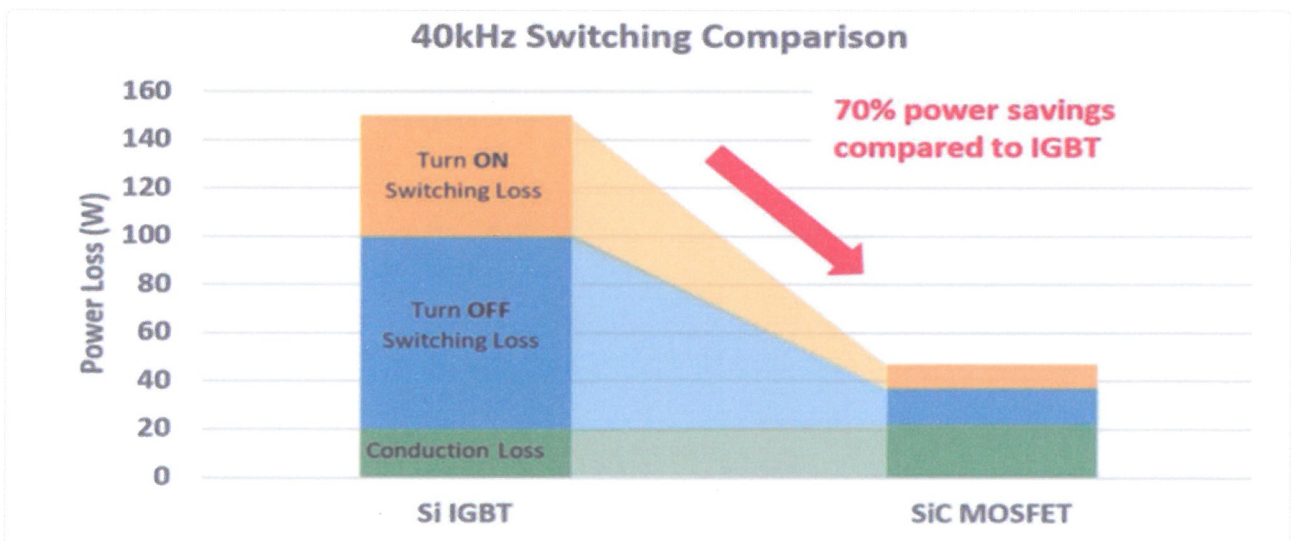
◎ 2.4.2 SiC MOSFET 技术发展分析

除了二极管外,常用 SiC 分立器件还包括开关用的晶体管。SiC 晶体管包括:金属-氧化物场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、结型场效应晶体管(JFET)和双极型晶体管(BJT)等,部分产品研发当中。其中, SiC MOSFET 因为具备更高的击穿电压、更高的工作温度和更低的导通电阻等优势,被认为是下一代高压电力电子器件的理想器件,也是目前较为成熟、应用最广的 SiC 功率开关器件。



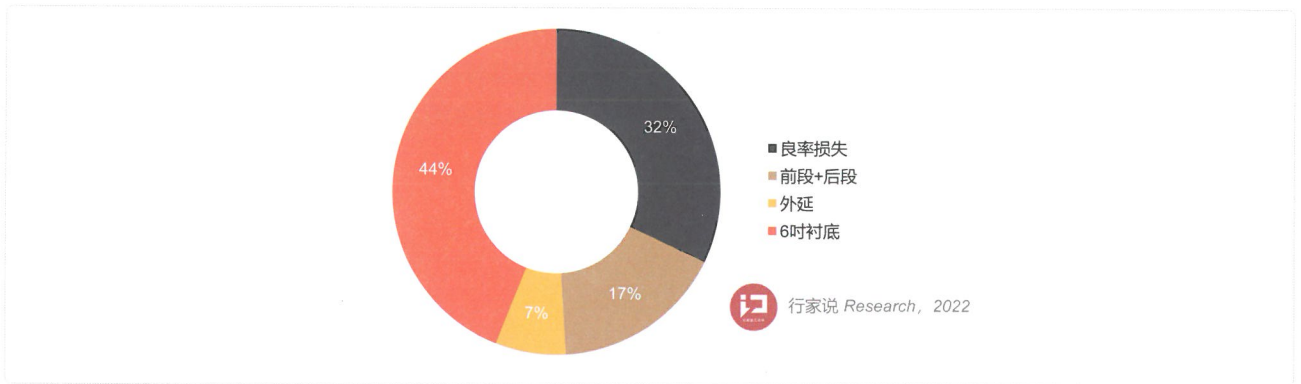
▲ 市售 SiC MOSFET 的电压、封装类型情况 来源: Littlefuse、DigiKey (2021)

SiC MOSFET 的结构类似于硅基 MOSFET。SiC MOSFET 器件的击穿电压是硅基 IGBT 的 3 倍,相应的导通电阻更小,器件可做得更薄,可采用更简单的电路拓扑结构,将设备体积减小 50%,能量损耗降低 70%,工作频率和功率密度均可提升 10 倍。而且由于 SiC MOSFET 的反向恢复损耗几乎为零,因此采用时无需反并联 JBS 二极管,其体 PiN 二极管也仅在死区时间期间导通。



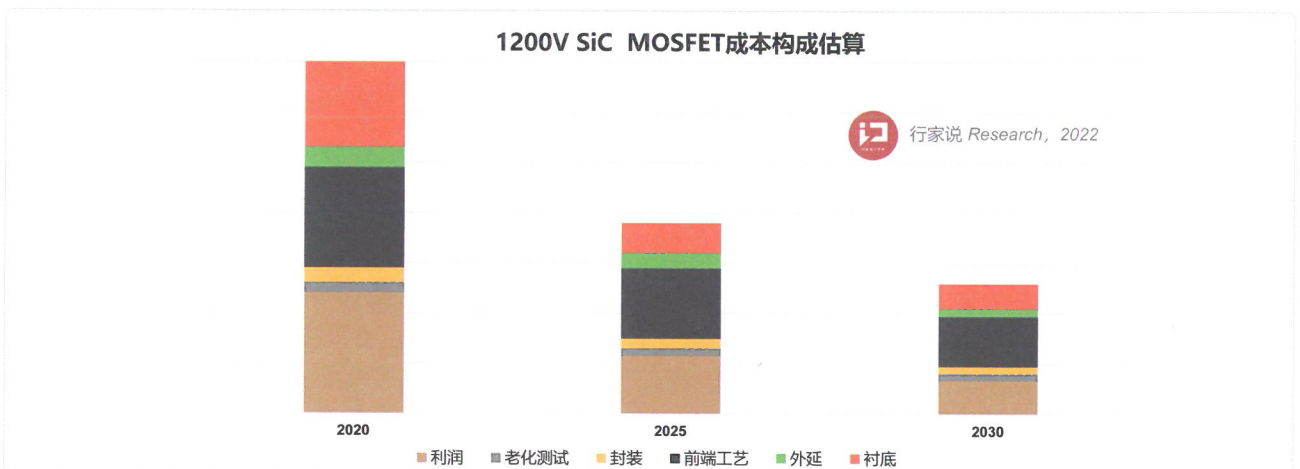
▲ 硅基 IGBT 和 SiC MOSFET 开关损耗对比 来源: 应用材料公司

生产成本方面,以 6 英寸 1200V 器件为例, SiC MOSFET 的平均 BOM 成本构成大致为: 衬底占 44%, 外延占 7%, 芯片制造占 17%, 良率损耗占 32%。



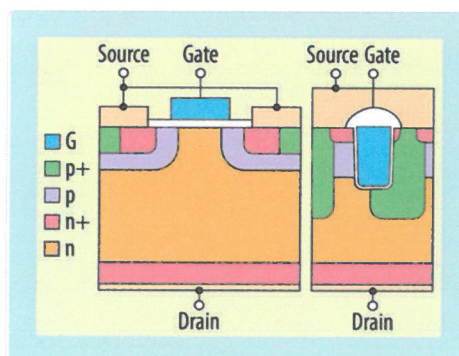
▲ 6 英寸 1200V SiC MOSFET 成本构成 来源: 行家说 Research

随着 SiC 衬底和制造工艺的日益成熟, SiC 器件价格将会逐渐下降, 从而将进一步推动更多市场应用领域采用 SiC 器件。



▲ 未来几年 SiC MOSFET 成本变化 来源: Exawatt、行家说 Research

SiC MOSFET 市场主要技术路线有平面型 (DMOSFET) 和沟槽型 (TMOSFET), 目前仍只有罗姆、英飞凌、博世、三菱电机和安海半导体等少数公司推出沟槽型产品, Wolfspeed、意法半导体等是平面型技术路线的代表。



▲ 平面型与沟槽型 SiC MOSFET 示意图 来源: 东芝半导体

自 2011 年商业化产品推出以来, SiC MOSFET 目前已完成三次技术迭代, 基于工艺的进步和设计的优化, SiC MOSFET 性能逐代提升, 单位导通电阻值需要的芯片面积越来越小。

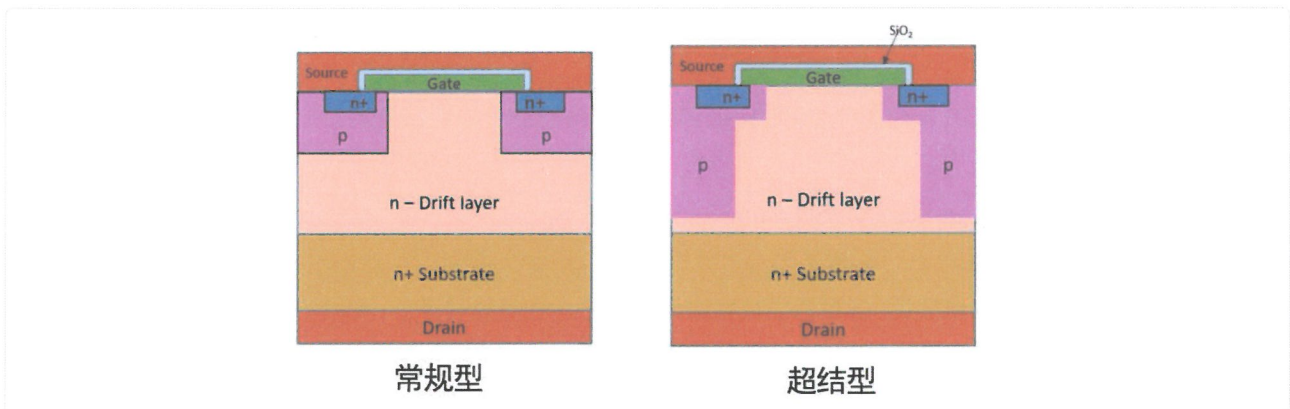
Generation	Features	Cell Pitch	$R_{on,sp}$ (25°C)
Gen.1	Long Channel	> 10 μm	> 8.0 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$
Gen.2	Short Channel(Self-Aligned)	~ 9 μm	~ 5.0 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$
Gen.3	Small Cell Pitch / Trench Structure	~ 6 μm	~ 3.0 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$

▲ 三代 SiC MOSFET 产品主要技术特点 来源: 瑞能半导体

目前 SiC MOSFET 在器件的一些结构工艺方面还面临着很多的挑战, 包括电压的长期稳定性, 材料的缺陷和退化, 以及模块的封装方面高温、高频应用对封装技术的要求。

● 平面 SiC MOSFET

平面 SiC MOSFET 工艺相对简单, 是最早也是应用最广泛的 SiC MOSFET 结构, 目前主流的产品均使用该结构。平面型 SiC MOSFET 进一步分为常规和超结 MOSFET(SJ MOSFET)。



▲ 常规和超结平面栅 SiC MOSFET

平面 SiC MOSFET 自 2010 年起开始商用, 现已被市场广泛接受, 并取得了良好的反馈。例如使用 SiC MOSFET, 电源或逆变器的体积和重量可以缩小至三分之一左右, 除了尺寸和重量的减小之外, 由于系统效率得到提升, 系统功耗也显著降低。在研发中, SiC MOSFET 已经实现了低于 $1\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ 的极低导通电阻和 10kV 的阻断电压。

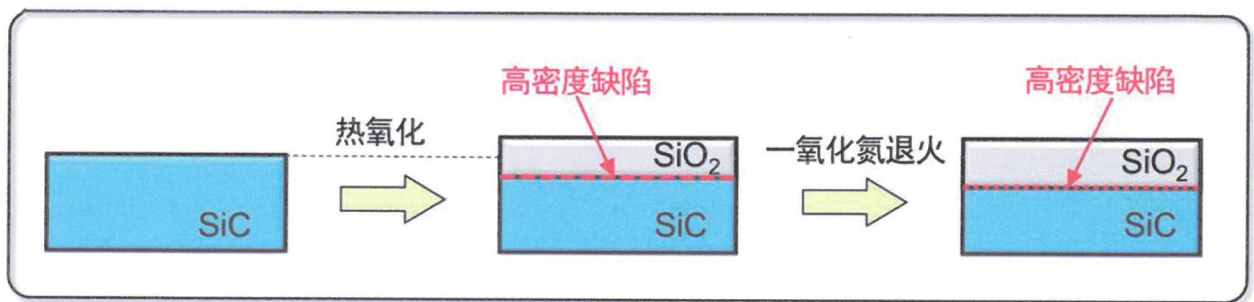
器件类型	阻断电压/kV	$R_{sp, on}/(\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2)$	最大电流/A
DMOSFET	0.95	8.4	2
	1.2	2.7	26
	1.2	3.7	180
	6.5	40	—
	15	250	—
	—	—	—
产品	0.9	—	196
	1.2	—	149
	1.7	—	72

▲ 平面 SiC MOSFET 阻断电压及比导通电阻总结 来源: 浙江大学 (2021)

随着技术的发展,元胞宽度持续减小,比导电阻持续降低,平面 SiC MOSFET 器件性能超越硅器件,但浪涌电流、短路能力、栅氧可靠性等可靠性问题仍需关注。

相比沟槽栅技术,平面 SiC MOSFET 的优点是工艺比较简单,因为工艺造成的可靠度问题比较单纯,但是最关键的栅极氧化工艺依旧是许多企业的“梦魇”。

目前, SiC MOSFET 核心技术瓶颈集中在 SiO_2/SiC 栅氧层界面质量差,主要是因为 SiO_2/SiC 界面态密度高,这些缺陷密度是 SiO_2/Si 栅氧层界面的 100 倍,从而导致沟道迁移率(通常低于 $10\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$),远低于 SiO_2/Si 界面,使得 SiC MOSFET 能源转换效率严重受限,优势还远未得到发挥,并且引发阈值电压不稳定性问题,限制了 SiC MOSFET 的采用。



▲ 高温栅氧工艺导致 SiO_2/SiC 层界面出现大量缺陷 来源: 京都大学官网

业界正在通过各种方式实现更好的 SiO_2/SiC 界面钝化,以提高载流子迁移率,降低沟道电阻对特征导通电阻影响。

SiC 氧化炉是制备 SiC MOSFET 氧化层的关键设备。栅氧生长是 SiC MOSFET 的核心问题,存在高界面态密度问题,难度很大。需要获得较好的栅氧层,设备需要具备三方面特点,一是相比硅基半导体氧化设备,需要更高的氧化温度;二是需要高温下更洁净的生长环境,三是需要具备对氧化缺陷进行后处理工艺。中国电科 48 所的 SiC 高温氧化设备已经通过了器件客户的应用验证,制备的栅氧层表现性能优异,满足器件应用要求,目前该设备已经开始在国内头部 SiC 器件企业的产线中应用(详细设备信息请翻看 2.7 章节)。同时,中国电科 48 所还针对沟槽型工艺开展栅氧工艺设备的研制与开发。

由于硅的氧化起始温度为 700°C ,而 SiC 的氧化起始温度为 900°C , SiO_2/SiC 的氧化温度通常都超过 900°C ,因此 SiO_2/SiC 会出现炭残留。通过原子层沉积 (ALD) 工艺沉积 SiO_2 被认为是替代栅极高温氧化的关键方法之一。

在形成 SiC 功率器件的栅极绝缘膜时,通常通过氢蚀刻去除 SiC 表面附近的高密度缺陷后形成 SiO_2 膜。形成 SiO_2 薄膜的方法有两种:热氧化法和 SiO_2 薄膜沉积法。针对 SiC 衬底的热氧化再次产生高密度缺陷问题,可以通过在 SiC 表面沉积 SiO_2 膜来抑制缺陷并形成良好的氧化膜。TEL 公司的 150/200mm 垂直热处理设备 ALPHA-8SE™ i 通过 ALD 实现了这种 SiO_2 薄膜沉积工艺。该设备配有独创的硬件和前体,提供高度均匀且覆盖形状良好的薄膜。此外,还通过批处理方法实现了高生产率。(详细设备信息请翻看 2.7 章节)。

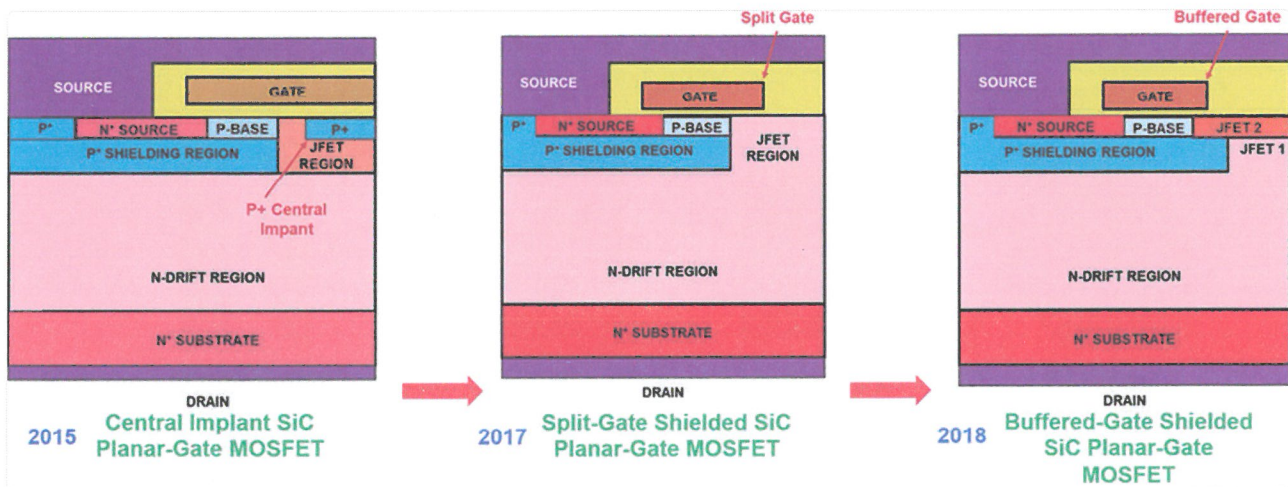
	100C	200C	300C	400C	500C	600C	700C
LPCVD TEOS					~580 C		
MT ALD-SiO ₂ (3DMAS @O ₃)			Oxidant: O ₃	450~550 C			
MT ALD-SiO ₂ (Special Precursor @O ₃)			300~450 C				

▲ ALPHA-8SE™ i 氧化温度范围 来源: TEL 公司

相关研究显示, ALD 沉积, 可将界面缺陷降低 90%, SiO₂ 膜介电击穿强度可达 10MV/cm, 而 SiC MOSFET 的导通电阻可降低 25% -35%, 成本可降低约 30%。

平面 SiC MOSFET 主要历经了 3 种工艺设计迭代升级, 包括 JFET 区中央植入 P+ 区、分裂栅极设计以及缓冲栅极设计。

从历史来看, 平面 SiC MOSFET 主要历经了 3 种工艺设计迭代升级, 包括 JFET 区中央植入 P+ 区、分裂栅极设计以及缓冲栅极设计。

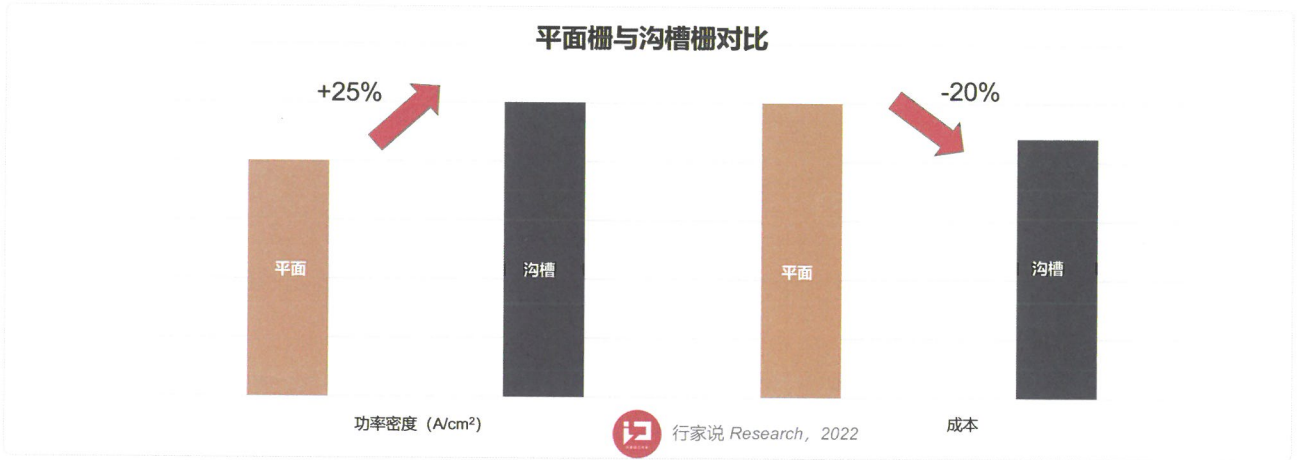


▲ 平面 SiC MOSFET 的 3 种设计升级 来源: 北卡罗纳州立大学 (2022)

● 沟槽栅 SiC MOSFET

由于平面栅 SiC MOSFET 结构的沟道形成于 (0001) 晶面上, 沟道迁移率较低, 同时结构还存在 JFET 区域, 导致器件的导通电阻很难得到进一步降低。为此, 业界开发了沟槽型 SiC MOSFET 结构 (TMOSFET)。

沟槽 MOSFET 是通过在沟槽侧壁形成沟道, 这样不仅可以提高沟道迁移率, 还能消除 JFET 区域, 实现降低器件导通电阻的目的。而且在相同的工艺水平下, 沟槽 MOSFET 的元胞间距大约是平面 MOSFET 的 60%。



▲ 平面与沟槽 SiC MOSFET 对比 来源: 行家说

据行家说 Research 统计, 目前国内的安海半导体, 以及英飞凌、罗姆、博世、日立、住友、电装、富士电机和三菱等多家企业已经量产沟槽型 SiC MOSFET。



▲ 沟槽 SiC MOSFET 量产企业 来源: 行家说 Research

2022年沟槽 SiC MOSFET 实现了“主驱逆变器”的突破, 丰田、现代、吉利、广汽、本田以及蔚来等众多车型都已采用。



▲ 主驱采用沟槽 SiC MOSFET 例子 来源: 行家说 Research

值得注意的是,国内企业安海半导体在 2022 年初成功研发出第一代沟槽栅 SiC MOSFET,单芯片内阻达到新能源主驱应用级别 (1200V、15mΩ),目前已实现量产,并且在一家欧洲跑车企业中完成了上车验证。

早期,通过从 4 英寸工艺向 6 英寸工艺转换,平面 SiC MOSFET 的功率密度可提升 40% 左右,通过新的光刻技术也有助于进一步降低成本。然而沟槽栅 SiC MOSFET 在降低成本方面效果更为显著。以安海半导体为例,他们在 2019 年就开始研发第一代沟槽 SiC MOSFET,功率密度比平面 SiC MOSFET 提升 30%-40%。

同时,安海半导体沟槽 SiC MOSFET 的芯片面积相较目前国外知名品牌同规格产品要小 (单芯片面积小于 20mm²),功率密度可提升 20%。

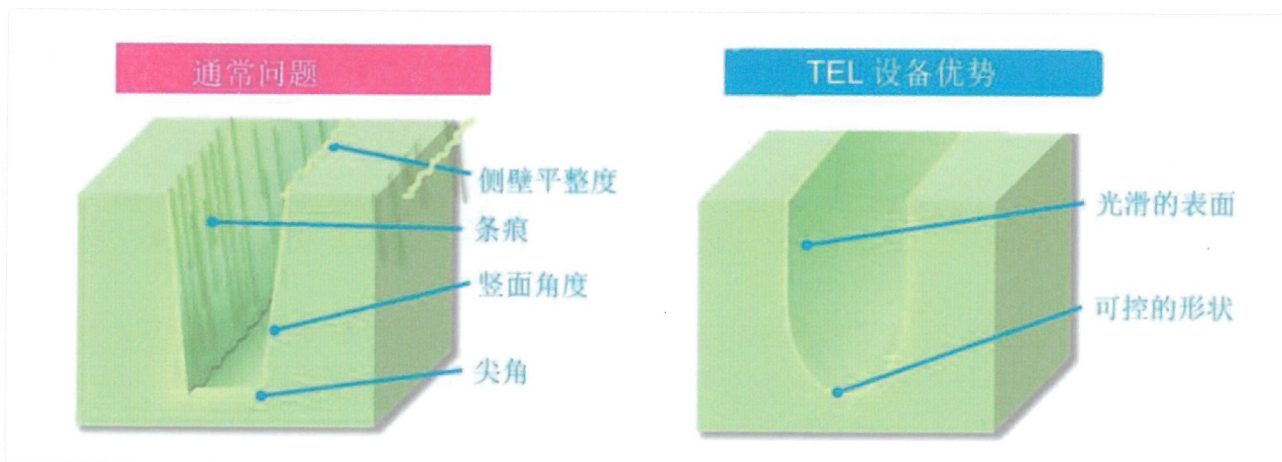
品牌	芯片尺寸	面积 mm ²	R _{dson}
安海	5400*3490	18.846	15mΩ
B 品牌	5320*3820	20.3324	15mΩ
S 品牌	5375*4460	23.9725	15mΩ
R 公司	5000*5000	25	15mΩ

▲ 不同品牌 1200V SiC MOSFET 芯片尺寸对比 来源:安海半导体

然而,沟槽栅工艺不仅对工艺实现要求非常高,在可靠性方面也存在一定的风险。首先,由于沟槽刻蚀后表面粗糙度和角度的限制使得沟槽栅的栅氧质量存在风险;其次,由于 SiC 的各向异性,沟槽侧壁的氧化层厚度和沟槽底部的氧化层厚度不同,因此必须采用特殊的结构和工艺来避免沟槽底部特别是拐角部分的击穿,这也增加了沟槽栅栅氧可靠性的不确定性;最后,沟槽 MOSFET 的结构使得沟槽栅氧的电场强度要高于平面型。

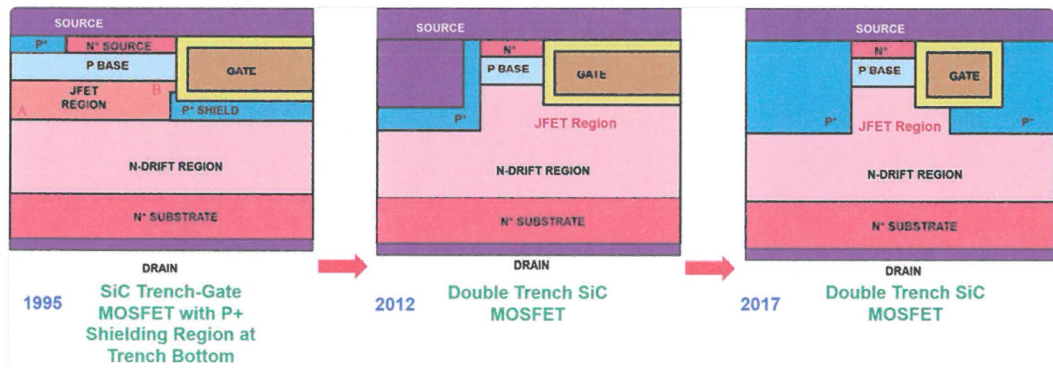
目前,业界正在努力解决沟槽型 SiC MOSFET 刻蚀之后侧壁沟道的表面问题,需要通过更好的设备和优化深沟槽刻蚀工艺,以有效降低表面粗糙度,消除刻蚀形貌中的微沟槽效应。以 UNITY™ Me+ 刻蚀设备为例,该设备在 SiC MOSFET 刻蚀方面具有较为突出的性能表现,能够满足企业开发高可靠性器件的需求。

由于 SiC 衬底通常非常坚硬,想要获得均匀、光滑的蚀刻表面,对工艺难度和控制的要求非常高。TEL 公司的刻蚀设备 UNITY™ Me+ 以其独特的硬件实现了沟槽型 SiC 功率器件的高刻蚀速率、出色的均匀性和光滑的形状。(详细设备信息请翻看 2.7 章节)。



▲ 不同设备的刻蚀效果 来源:TEL 公司

过去 20 年，业界主要采用了 3 种方式来解决沟槽 SiC MOSFET 槽底电场集中的难题，第一种是在沟槽底部创建 P+ 屏蔽区，第二种是罗姆的双沟道设计，第三种在英飞凌的半包沟槽结构，它是在双沟道基础上，先用浅沟道形成栅极结构，然后用两个更深的沟道屏蔽栅氧。



▲ 沟槽栅 SiC MOSFET 的 3 种设计升级 来源：北卡罗纳州立大学 (2022)

器件类型	阻断电压/kV	$R_{sp_on}/(m\Omega\cdot cm^2)$	最大电流/A
TMOSFET	1.2	2	60
	1.26	1.41	8
	3.3	7	—
	3.8	9.4	—
	0.65	—	118
	1.2	—	95

▲ 沟槽 SiC MOSFET 阻断电压及比导通电阻总结 来源：浙江大学 (2021)

据悉，安海半导体的沟槽 SiC MOSFET 实现了 3 大优化，具有更安全、更稳定等优势。首先是采用双沟槽工艺，SiC MOSFET 短能能力达到 $10\mu S$ ，是其他国际企业同等规格产品的 3.5 倍，可以大幅提高车载应用稳定性。目前，目前安海第二代沟槽栅 SiC MOS 也正在抓紧研发中，有望于 2023 年初在国内自有晶圆厂完成流片，将实现比第一代沟槽栅更小的芯片面积，更高的电流密度。安海同期联合国内衬底材料公司以实现材料、设计、工艺、生产制造全产业链的国产自主可控。

品牌	短路时间
W 品牌	$3\mu S$
R 品牌	$3.5\mu S$
安海半导体	$10\mu S$

▲ 不同品牌短路能力 来源：安海半导体

其次是设计余量大，拓大安全工作区间。安海沟槽 SiC MOSFET 的耐压留有充足余量，可以做到 1750V 上下。因此，安海的 $80m\Omega$ 产品可以替代其他厂商 $40-60m\Omega$ 的 SiC MOSFET，用户的使用成本有望进一步降低一半。

第三，解决阈值漂移问题。安海半导体从实际应用出发，通过调整门极驱动负压，并配合筛选手段，来达到限制 SiC MOSFET 阈值漂移的目的，提高系统稳定性，降低失效率。

◎ 2.4.3 SiC 器件技术与最新进展

SiC 器件在降低总损耗和简化拓扑方面的优势是显而易见的,然而与成本 / 安培比、端接设计、稳定阻断性能、可靠性和过流能力相关的挑战仍然存在。无论是 SiC 二极管,还是 SiC MOSFET,都存在一些共性的技术迭代方向,包括:更小芯片面积;高可靠性;提高额定电压、电流。

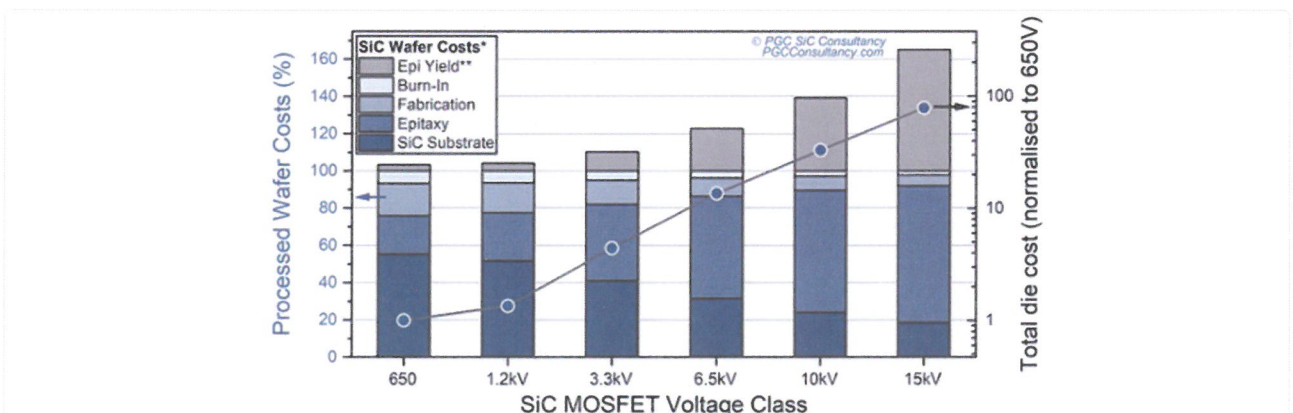
● 制造工艺

相对于硅器件, SiC 芯片制造在工艺上有着更加严苛的要求。首先需要通过高能注入并采用高温退火工艺来解决晶格扩散的难题;其次是要通过高温氧化工艺提高氧化速率,抑制碳生物量;而 SiC 透明、硬、脆的特质,也大大增加了设备传送、取片、干刻、挖槽、甩干、减薄等环节的工艺难度,从而导致 SiC 芯片长期处于生产效率低、碎片率高、难以量产的局面。

此外,衬底减薄工艺十分关键,由于衬底部分贡献了超过 50% 的二极管电阻,衬底厚度从 350 μm 减少到 150 μm 将使芯片尺寸减小约 30%,对于 900V、150A 的二极管,芯片尺寸可以从 0.45 cm^2 减小到 0.32 cm^2 ,对于 650V 二极管,衬底电阻对总二极管电阻的贡献比 900V 二极管略高,管芯尺寸的减小让每个芯片的管芯数量增加和良率的提高。目前 Fraunhofer IISB 的 SiC MPS 可以做到总厚度从 370 μm 减少到 90 μm (衬底厚度 65 μm),可将肖特基导通电阻降低 30%,电导调制状态导通电阻降低 60%。减少衬底厚度对于在未来几年内实现更低的芯片制造成本至关重要。

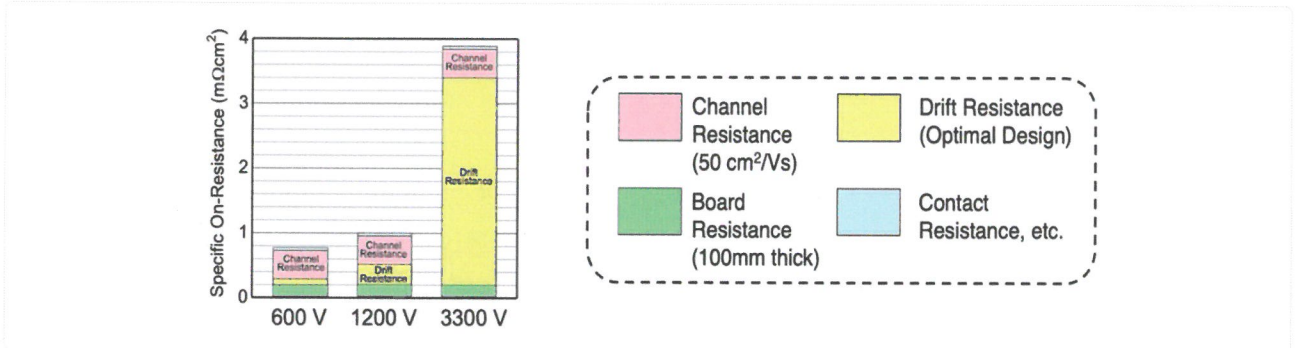
● 提高电压

与 SiC JBS 二极管一样,额定电流高达约 120A 的 600V-1700V SiC MOSFET 已上市,工业应用中已采用 3300V SiC DMOSFET。截止到 2022 年,对于大部分厂商来说, SiC 产品主要在 600V-1200V 的范围内, GeneSiC 为特定应用提供 8kV 和 15kV 的 PIN 二极管。但 SiC 电压越高,支持它的漂移区必须越宽,因此,外延成本就越高。在 6.5kV 以上的器件中,外延成本超过了衬底。



▲ 不同电压的 100A SiC MOSFET 器件的成本占比分析 来源: PGC Consultancy

此外, 随着电压加倍, 电阻将增加约 5.5 倍, 为了抵消这一点, 并保持给定的电流 / 电阻额定值, 裸片尺寸必须按比例增加。然而, 扩大管芯对良率会产生复合影响, 每个晶圆生产的裸片数量会降低, 从而对成本产生影响 (如 15kV 芯片的成本大约是 650V 芯片的 75 倍)。



▲ 不同电压 SiC MOSFET 的漂移电阻情况

企业	器件类型	电压 / 电流	静态	动态
Wolfspeed	JBS diode	10kV/10A	4V@10A	trr=365ns, Qrr=0.84μC@3.15 A
	PiN diode	10kV/50A	3.9V@50A; 5.9V@328A	trr=200ns, di/dt=330kA/s@10kV/20A
GeneSiC	PiN diode	12.9kV	3.3mΩ·cm²@25°C	Not given(NG)
		10kV	5.75mΩ·cm²@25°C	trr=250ns, Qrr=1.67μC@2.4kV/24A
	JBS diode	10kV/2A	114.7mΩ·cm²@25°C	NG
		10kV/7A	127.5mΩ·cm²@25°C	
USCi	JBS diode	3.3kV/50A	2.3V	NG
		6.5kV/15A	3.8V	
		8kV/5A	4.0V	

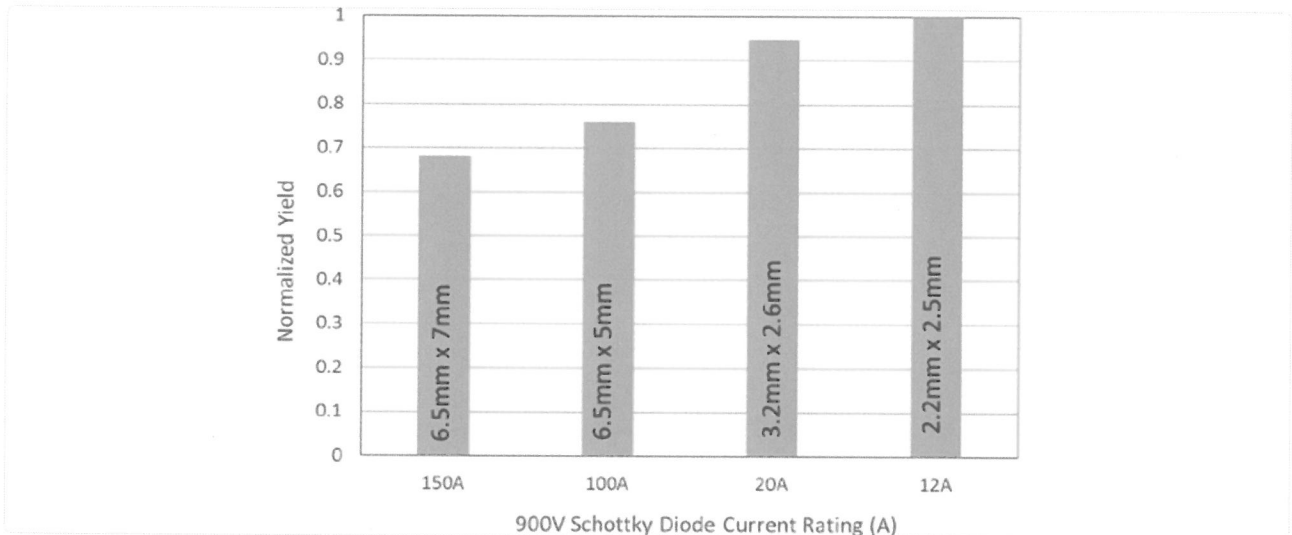
▲ 高压 SiC 二极管最新进展 来源: 田纳西大学 (2021)

企业	器件类型	电压 / 电流	静态	动态
Wolfspeed	Gen-3MOSFET	3.3kV/25A	10.6mΩ·cm²@Vgs=20V	Eon=0.70mJ, Eoff=0.63mJ @1.8kV/25A, 25°C
	DMOSFET	10kV/5A	111mΩ·cm²@Vgs=15V, 25°C	Eon=240μJ, Eoff=50μJ@1.0kV/3A
	Gen-3	6.5kV/30A	100mΩ@25°C	NG
	MOSFET	10kV/10A	127mΩ·cm²@Vgs=20V, 25°C	Eon=4.48mJ, Eoff=0.81mJ@5.3kV/10A
三菱电机	MOSFET	6.5kV/400A	20mΩ@175°C	Eon=0.41J, Eoff=0.11J @3.6kV/400A, 175°C
	半桥模块	3.3kV/750A	5.7mΩ@175°C	Etotal=0.55J @1.8kV/600A, 175°C

▲ 高压 SiC MOSFET 最新进展 来源: 田纳西大学 (2021)

● 提高电流

SiC 单极和双极器件都取得了显著进展, 额定电流高达 100A 左右的 1-3kV 级 SiC 单极器件已经实现了商用化。但是大电流 SiC 器件还存在成本和良率等难题需要克服。以 SiC SBD 为例, 额定电流越大, 采用芯片的面积也越大, 但良率会下降。假设 900V、12A SiC 二极管的良率为 100%, 则 150A 二极管的良率约为 68%; 芯片尺寸增加 8 倍, 成品率降低约 30%。



▲ 不同额定电流的 900V SiC SBD 良率和芯片尺寸 来源: Monolith 半导体

● 提高界面迁移率

目前 SiC MOSFET 的沟道电子迁移率只能达到 $30\text{-}50\text{cm}^2/\text{Vs}$ 左右, 与块材中的 $1000\text{cm}^2/\text{Vs}$ 相去甚远, 如何将载流子迁移率提高到 $100\text{cm}^2/\text{Vs}$ 以上成为了重要的研发方向。SiC MOSFET 的比导通电阻主要由沟道电阻决定, 对于 $20\text{cm}^2/\text{Vs}$ 的典型沟道迁移率, 沟道电阻分别占 600V 和 1200V 器件总导通电阻的 69% 和 58%, 而提高沟道迁移率可以降低 SiC 功率 MOSFET 的导通电阻。

提高沟道迁移率的主要创新包括: 非基面生长、外来元素的界面改性、超高温氧化和后处理、先进的高 k 栅极电介质。例如日本京都大学在 A 面上创建 SiC MOSFET, 将迁移率提升 6 倍以上, 达到 $131\text{cm}^2/\text{Vs}$; 而日立能源采用高 k 介电层, 无需 SiO_2 钝化可将电子迁移率提高到 $80\text{cm}^2/\text{Vs}$; 西安交通大学与西安电子科技大学提出了一种使用低温超临界二氧化碳 (SCCO_2) 或超临界一氧化二氮 (SCN_2O) 流体的低温退火工艺, 将迁移率提到到 $72.3\text{cm}^2/\text{Vs}$ 。

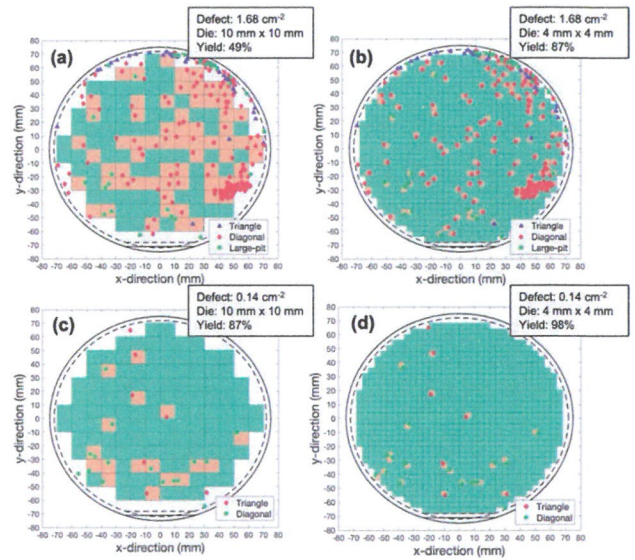
● 提升可靠性、易用性

SiC MOSFET 的可靠性是最终用户最关心的问题之一。2022 年 4 月, 特斯拉因后驱 SiC 逆变器故障, 召回生产日期在 2019 年 1 月 11 日至 2022 年 1 月 25 日期间的部分进口及国产 Model 3 电动汽车。这次召回事件使得紧锣密鼓推出 400V 和 800V 平台 SiC 车型的各大主机厂及从业人员更为重视 SiC MOSFET 的可靠性问题, 行业需要将 SiC 技术提升至一个新的水平, 以满足汽车等行业严格的可靠性、缺陷和成本要求。

高温栅极偏置、高温反向偏置和高湿反向偏置是评估 SiC MOSFET 可靠性的三个主要标准。提高 SiC MOSFET 可靠性的技术和创新主要包括: 栅氧化层优化、功率循环试验影响因子的确定、短路特性和鲁棒性、抗浪涌电流和抗雪崩强度的提高等。

另外SiC MOSFET的易用性也影响了市场的普及速度。目前, SiC MOSFET 的核心技术瓶颈集中在栅氧层界面质量差, 不仅导致沟道迁移率低(通常低于 $10\text{cm}^2/\text{Vs}$), 也会引发阈值电压稳定性问题。驱动电压和栅极电压阈值关系到 SiC MOSFET 在应用过程中的可靠性、功率损耗(导通电阻)以及驱动电路的兼容性等。

检测设备也有助于提高 SiC 器件的可靠性。由于汽车行业正在降低芯片缺陷的可接受水平, “零缺陷”成为行业的共同目标。在 SiC 前道制程工艺中, 离子注入、蚀刻等 100 多道复杂的加工步骤, 不可避免地引发芯片缺陷可能。



▲ SiC 芯片制造通常面临缺陷难题 来源: IEEE 文献

为此,要实现“零缺陷”目标,不仅要从小SiC 芯片设计端避免缺陷,还要在芯片制造和封测阶段对芯片进行充分检测,筛选出不合格产品,尤其是需要使用光学检测设备(比如 AOI)对晶圆表面的缺陷进行识别、分类和标记,辅助晶圆分选,以防止缺陷晶圆流入后续工序。

为了契合中国 SiC 器件企业的发展,自 2020 年起,深圳市智立方自动化设备股份有限公司与高视半导体强强联合,开发出一系列可用于 SiC 衬底、外延、芯粒检测的 AOI 设备。凭借在消费类电子、微电子、汽车电子等芯片检测设备领域的丰富研发经验和技術积累,智立方的 SiC 晶圆 / 芯片外观检测 AOI 设备陆续得到行业标杆客户的高度认可,已经批量应用在 SiC 晶圆产线,为 SiC 半导体国产化提供助力。

智立方AOI设备的主要优势体现在多个方面,其中分辨率达到业界领先的275nm,检测效率可以达到8分钟/片(6寸晶圆)。凭借设备交期短,售后服务效率高,以期实现对进口设备的完美替代。更为重要的是,智立方可以为用户提供质量检测统计结果,为客户进一步提升改善晶圆质量提供数据引导(详见2.7.3 章节)。

影响可靠性、易用性关键点	
栅电压	选择高的栅电压可减小导通电阻并改善器件的导通性能;但高栅电压会导致栅氧化层中应力更高,可能减少器件寿命。栅氧化层的寿命和器件的性能两者必须折中考虑。
驱动难度	采用 15V 驱动电压能够让系统用 SiC MOSFET 直接替换 IGBT,但也有厂商认为下一代的设计(减小尺寸和降低 R_{dson})是 18V。近年来,15V 和 18V 驱动的 SiC MOSFET 成了 2 大阵营;在 15V 的产品上有 Wolfspeed、清纯半导体(2022 年推出)、万国半导体等。
短路耐受	短路耐受时间是一个重要安全参数,随着电流密度的增加,短路条件下的温度也会增加,耐受时间也会减少。解决方案一是降低栅极偏压,同时降低氧化层厚度。纽约州立大学理工学院使用 4° 倾斜角来注入深 P 阱,利用沿 $\langle 0001 \rangle$ SiC 晶格方向的离子通道。这种方法将最大漏极电流降低了约 2.7 倍,并将耐受时间增加了四倍。

▲ 影响 SiC MOSFET 可靠性、易用性关键点 来源: 行家说 Research

● 降低衬底缺陷

SiC 晶锭和衬底片中均含有多种晶体缺陷,如堆垛层错、微管、贯穿螺型位错、贯穿刃型位错、基平面位错等。SiC 衬底缺陷会极大地影响最终器件的良率,尤其是是车规级 SiC MOSFET 对衬底缺陷密度要求非常高。

SiC 器件	MPD 缺陷	BPD 缺陷	TSD 缺陷
二极管	$\leq 0.5 \text{ cm}^{-2}$	/	/
开关器件	$\leq 0.5 \text{ cm}^{-2}$	$\leq 800 \text{ cm}^{-2}$	/
MOSFT/3300V	$\leq 0.1 \text{ cm}^{-2}$	$\leq 500 \text{ cm}^{-2}$	$\leq 300 \text{ cm}^{-2}$

▲ SiC 衬底分级 来源: 道康宁

降低 SiC 衬底缺陷是产业链中非常重要的课题,衬底厂家都在不遗余力地降低 SiC 晶锭缺陷密度。以烁科晶体为例,经过 2021 年的升级优化,他们的 6 英寸导电型 SiC 衬底实现了低缺陷衬底制备技术的突破,量产产品的位错密度均可达到 SiC MOSFET 制程的要求。

烁科晶体的产品已经多家客户充分验证,2022 年下半年开始批量出货,被广泛应用于光伏、新能源汽车等领域。此外,客户端对烁科晶体产品给予了认可,提出了规模供应需求,烁科晶体正在加快扩产节奏。

根据公司规划,2023 年底烁科晶体进一步加大资金投入,预计 2024 年可年产 30 万片 6 吋导电型衬底,2025 年衬底产能将扩大到 60 万片,2026 年将成 150 万片的 SiC 衬底生产基地。

在优化衬底质量方面,合盛新材料也做了很多工作。在业务发展之初,他们首先实现了 SiC 原料的自主开发,开发了独有的技术方法,比如高温方法、直接合成法、化学合成法等。同时,合盛新材料还花费将近一年半时间,实施了打造了自主的籽晶培育粘接、自循环体系。为了验证和提升 SiC 衬底质量,合盛新材料还自主搭建了 SiC 外延片生长工序。

参数	P 级
微管密度	$\leq .0.2\text{ea}/\text{cm}^2$
BPD	≤ 1000
TSD	≤ 200

▲ 合盛新材料 6 英寸导电型 SiC 双面抛光衬底技术参数

2.5 SiC 分立器件封装技术发展

封装是承载芯片的载体,也是保证 SiC 芯片可靠性、充分发挥性能的关键。常见的 SiC 分立器件封装技术挑战包括:高温封装、控制寄生效应、在不牺牲散热性能的情况下减小封装尺寸。

首先,如果封装的电气寄生参数太高,会导致在 SiC 器件的快速开关过程中会产生不必要的损耗和噪声。其次,封装的热阻过高,而热容量过低,会限制了封装在稳态和瞬态时的散热性能。第三,构成封装的材料和组件通常与高温操作 (>200°C) 不兼容,在升高的操作温度下会降低热机械可靠性。第四,对于高压 SiC 器件,封装承受高电场的能力还不够。总之,不是器件本身,器件(包括功率模块)封装成了充分利用 SiC 组件优势的主限制因素之一。因此,应尽最大努力了解未来 SiC 封装所需的特性,并相应地开发新的封装技术。

从封装技术发展看,首先是分立式 SiC MOSFET 器件,从最初的 TO-247-3 到 TO-247-4、D2PAK-7L,后来是采用开尔文连接的 TO-263-7 封装,杂散电感得到不断优化,特别是开尔文连接改善了驱动,允许更快的 di/dt 切换而不会产生过多的栅极振铃,降低了模块损耗,有助于提升 SiC 器件的性能。SiC MOSFET 开关速度快,开启电压 V_{th} 相比硅 MOS 要低不少,如何降低 SiC MOSFET 在高频应用中的误动作风险,是工程师在应用中碰到的最大问题。

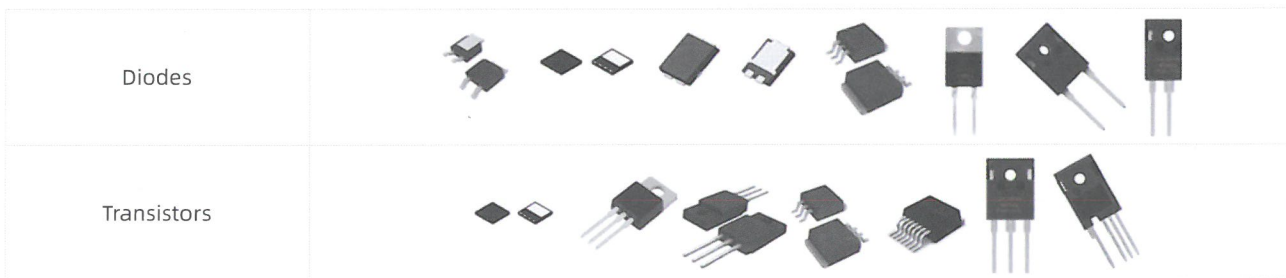
2022 年,国星光电研究院也推出了以 TO-247-4L 为封装形式的 NSiC-KS 系列产品,凭借领先的封装技术优势,以及科学系统的设计,NSiC-KS 系列产品在开关损耗、驱动设计等方面实现了的新突破。并且为提升 SiC 功率分立器件产品的可靠性,国星光电还加大了对热固晶工艺的空洞研究、IOL 应力可靠性研究、高功率密度与散热绝缘研究等,产品性能得到进一步升级。

国星光电的 NSiC-KS 系列可应用于移动储能、光伏逆变、新能源汽车充电桩等场景,并且依托先进的第三代半导体器件生产线,国星光电可响应不同封装及规格的 SiC 功率模块定制开发需求,为客户提供高质量的定制化产品服务,目前为众多合作商完成了生产订单。

随着 650V SiC MOSFET 的推出,在不久的将来,我们可以期待更多的 SiC 封装,如 DFN8x8、TOLL、DPAK-3L 和 D2PAK-3L。

改进方向	挑战
持续性	主要挑战: 更低 R&L 次要挑战: 高可靠性芯片贴装、高可靠性键合; 低应力化合物
突破性	主要挑战: 减少封装 / 芯片占用空间、更好的电压隔离、更好的 CTE 匹配、金刚石散热器、倒装芯片安装、EMI 抗扰度 次要挑战: 高 Tg 塑料

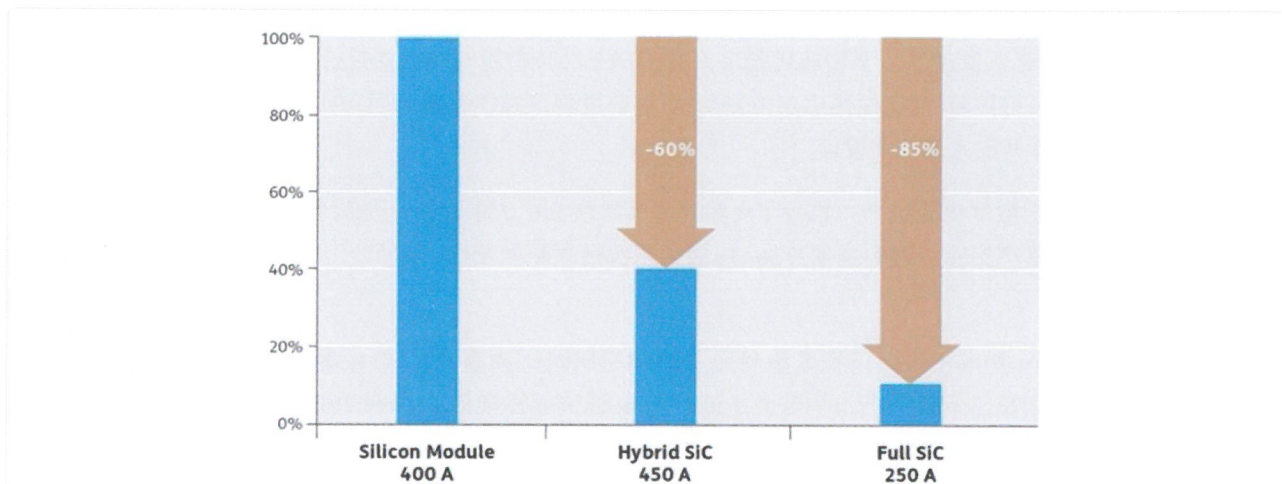
▲ SiC 器件封装挑战 来源: 行家说



▲ 常见的 SiC 器件封装形式

2.6 SiC 模块技术发展

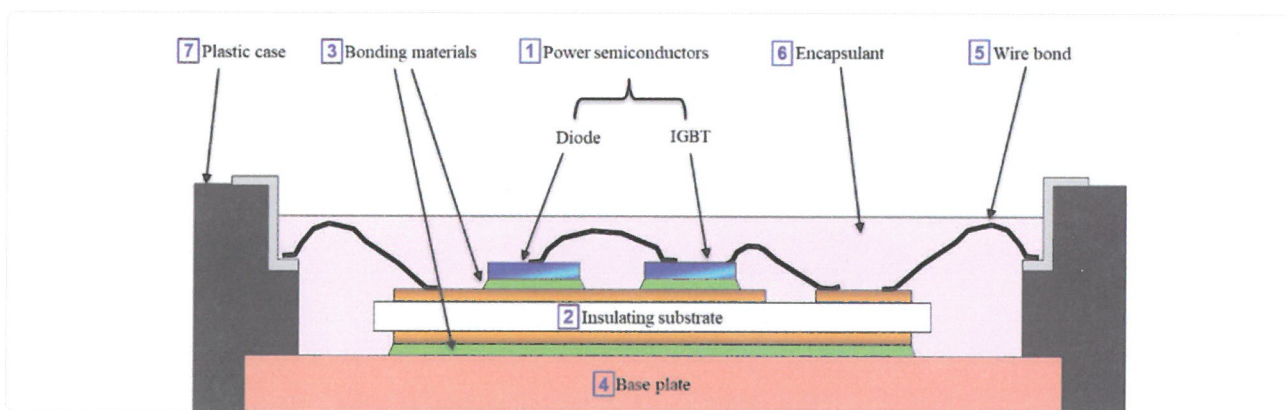
当前, 大电流功率模块中广泛采用的主要是由硅材料的 IGBT 和 FRD 组成的 IGBT 模块, 而由于性能优异, 采用 SiC 器件的混合型 SiC 模块和全 SiC 模块开始在新能源汽车、光伏、充电桩等领域逐渐替代硅模块。



▲ 不同模块的开关损耗情况 来源: 赛米控 - 丹佛斯

在研发领域, SiC 功率模块最大电流容量达到 1200A, 最高工作温度达到 250°C, 通过采用芯片双面焊接、新型互联和紧凑型封装等技术来提高模块性能。目前, 对于市场销售的全 SiC 功率模块, 额定电压一般限制在 1700V, 额定电流通常也不超过 400A, 这是由于商用的 SiC MOSFET 额定值通常在 50A 以内。当前 SiC 功率模块最高电压等级为 3300V, 最大电流 700A, 最高工作温度为 175°C, 功率范围为 10kW-350kW。

总体来说, SiC 模块封装挑战主要包括: 高温、低电感、芯片并联、高可靠性等。SiC 功率模块封装由 7 个部分组成, 即功率半导体芯片、绝缘基板、底板、键合材料、邦定互连、密封剂和塑料外壳。应对上述多个挑战, 通常需要在这 7 个环节进行创新。



▲ 传统功率模块构成 来源: 佐治亚理工学院

国外 SiC 模块代表企业有 Wolfspeed、英飞凌、罗姆、安森美、三菱电机、富士电机、日立、赛米控 - 丹佛斯、博世、GE、Littelfuse、Microsemi 等。国内 SiC 功率模块企业包括斯达半导体、国扬电子、国联万众、芯聚能、致瞻科技、派恩杰、芯光润泽、爱仕特、江苏宏微、中恒微、苏州亿马、基本半导体、无锡利普思、臻驱科技、国星光电等。

电力电子元器件失效 80% 是源于“热问题”，为了更好地理解 SiC 功率模块中热的来源、去向、热传导的途径等关键问题，2020 年国星光电研究院便启动了组建功率器件实验室及功率器件产线的工作，并将“LED 封测”优良品质监控系统延续到“三代半封测”。

不同于大多数企业所采用的传统热管理验证方式，国星光电是通过利用热管理的数字化迭代验证方式，建立模型和验证仿真，在产品研发设计阶段进行数据化和虚拟化研发，从而能够在全面优化模块设计的同时保证封装可靠性，顺利打破传统科学研究的“实验试错”模式。

目前，国星光电已成功将热管理的数字化迭代验证方式应用于芯片位置分布的热管理分析、共晶焊接空洞优化、新品开发的 PDCA 验证等环节，并实现快速定位热点，可提前发现可靠性失效问题，降低方案调整成本，提高效率，并实现多学科指引设计开发人员优化设计。

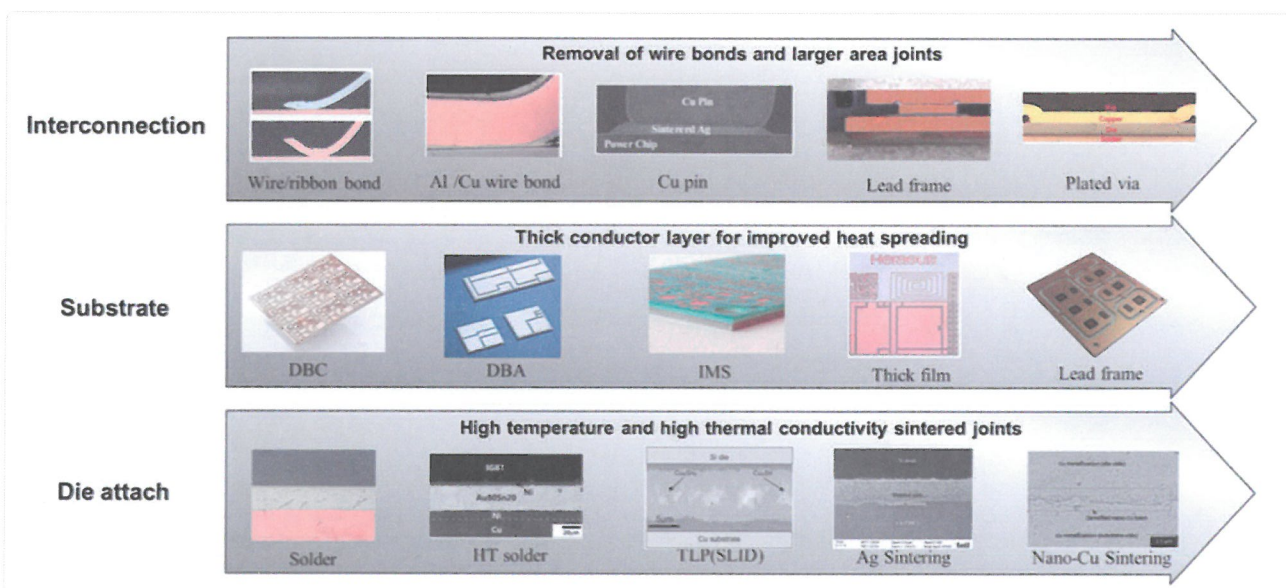
2022 年，国星光电基于数字化验证技术推出了众多的高可靠性 SiC 功率模块，已规划出 34mm、62mm、easy、econo 系列共四类可量产的标准封装类型产品，应用领域包括太阳能发电、新能源汽车、新能源动车、电网传输、风力发电等。

其中，国星光电 NS62m 功率模块采用标准型封装，半桥拓扑设计，内置 NTC 热敏电阻，可实现温度监控；采用 62mm 尺寸标准基板和接口，可兼容行业内各大主流产品，实现快速替换使用；具有 150°C 的连续工作温度 (Tvjop) 和优秀的温度循环能力，器件可靠性表现卓越。

根据实验数据可得，与市场同等电流规格的产品对比，NS62m 功率模块动态特性开通延迟时间减少 79 纳秒；上升时间减少 42 纳秒；关断延迟时间减少 468 纳秒。开启损耗降低 82%，关断损耗降低 92%，整体开关损耗表现优秀。

总的来说 SiC 模块有 3 方面的技术方向：

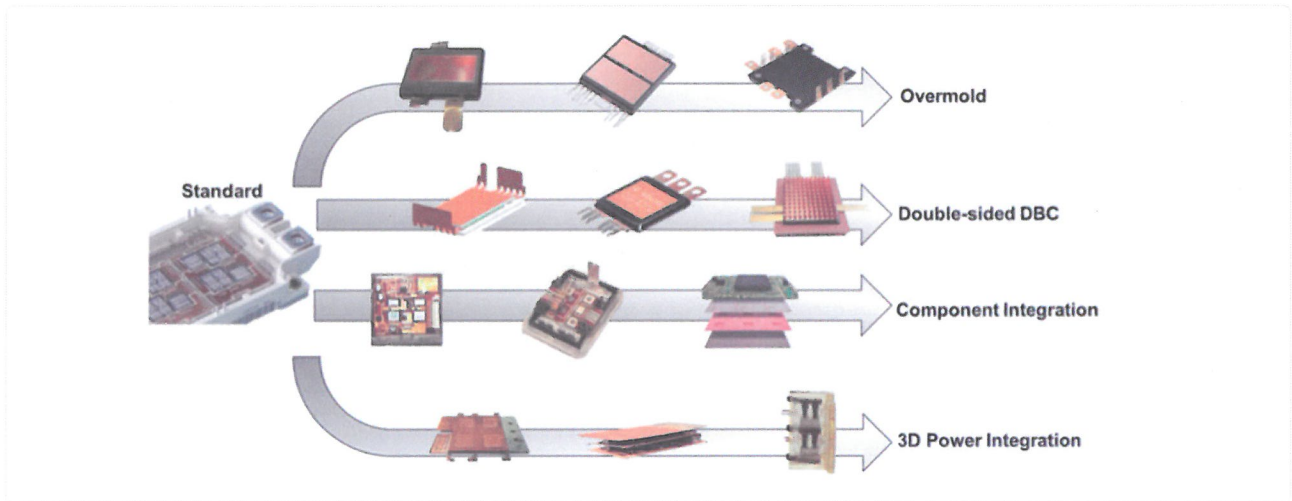
- 互连技术方面，已从导线和带状键合发展到 Al/Cu 复合材料、铜引脚、引线框架和电镀；
- 基板技术已从 DBC 发展到 DBA、IMS、厚膜和引线框架；
- 芯片贴装技术已从焊料发展到 HT 焊料、TLP (或 SLID)、银烧结和纳米铜烧结。



▲ 模块各环节技术趋势 来源：佐治亚理工学院

封装形式方面, 目前 SiC 模块也在改变:

- 包覆成型结构显示出紧凑和扁平的外形, 优化模块体积;
- 分立封装是 SiC 功率模块趋势;
- 双面 DBC 结构可实现从模块的顶部和底部两侧散热;
- 组件集成结构将异构功能组合到模块中, 以实现快速切换;
- 3D 功率集成结构具有垂直方向堆叠的功率管芯, 缓解了 di/dt 和 dv/dt 问题。



▲ SiC 模块封装形式发展趋势 来源: 佐治亚理工学院

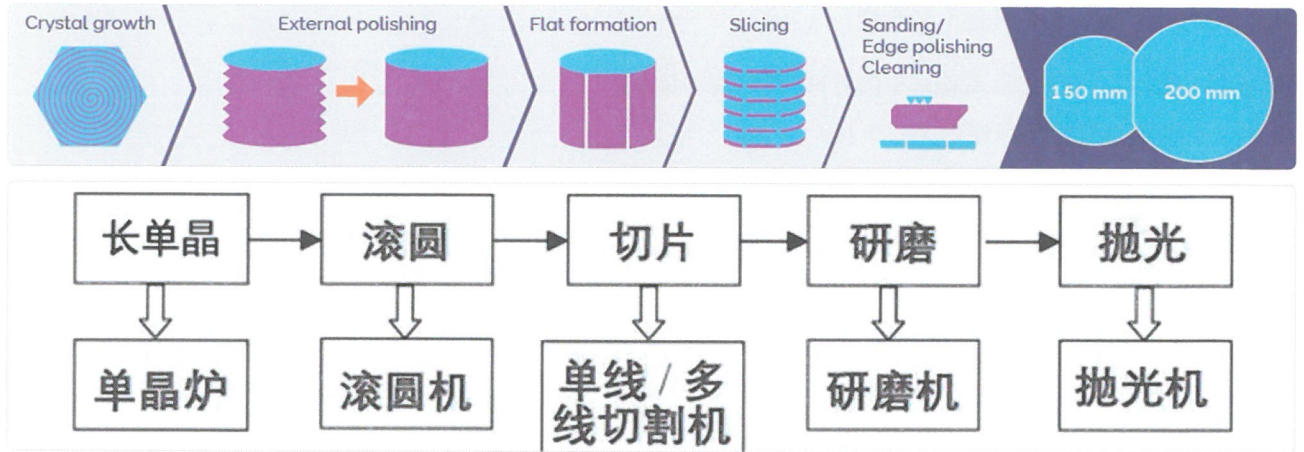
2.7 SiC 关键设备和材料技术进展

SiC 器件能否在中高压、甚至超高压领域加速替代硅基器件, 还需解决器件生产中的成本、可靠性等多个难题, 亟需设备和材料的创新。

◎ 2.7.1 SiC 材料装备

长晶完成后, 就进入衬底生产环节。经过定向切割、研磨 (粗研磨、精研磨)、抛光 (机械抛光)、超精密抛光 (化学机械抛光), 得到 SiC 衬底。

SiC 衬底制备的工艺流程主要有近十道工序, 涉及的主要设备包括单晶生长设备、切割设备、倒角设备、磨抛设备、清洗设备等。



▲ SiC 衬底制备流程及相关设备 来源: 网络

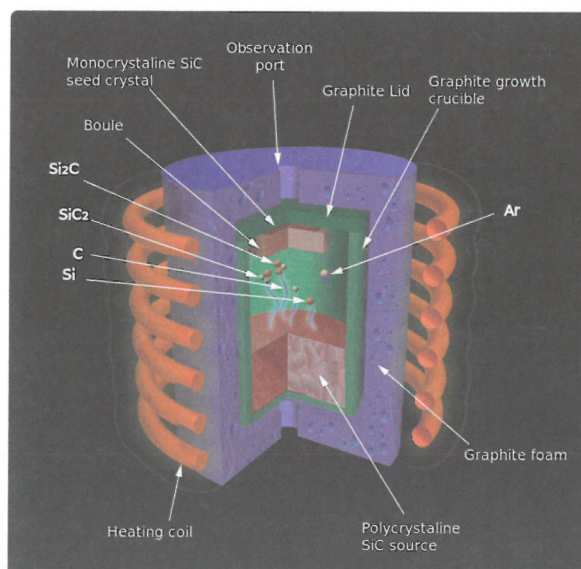
● 长晶炉

目前, SiC 器件的局限性来源于晶体生长技术上的瓶颈, 解决 SiC 衬底成本高居不下的关键在于实现稳定、批量的 SiC 晶体制备, 优化单晶生长工艺对 SiC 材料的工程化应用有着积极的意义。

目前, SiC 晶体的生长方法主要有物理气相传输法 (PVT)、高温化学气相沉积法、液相等。PVT 法是主流的 SiC 晶体生长方法, Wolspeed、天岳先进、天科合达和烁科晶体等都采用该方法。

SiC 单晶生长设备是国产化较高的设备, 国内生产企业主要是北方华创、恒普科技、优晶光电、烁科晶体、天岳先进、天科合达和岚鲸光电等。目前, 国产 4-6 英寸 SiC 单晶生长设备长期运行的可靠性以及一致性已经有了大幅提升, 国内多家企业还推出了 8 英寸 SiC 单晶生长设备。

根据加热方式的不同, PVT SiC 长晶炉可以分为感应式和电阻式 2 种。感应加热长晶炉是在感应线圈中通中高频交流电, 通过坩埚的感应发热对生长室内的原料进行加热, 使原料分解, 在温度较低的籽晶处结晶生长, 从而实现晶体的生长。感应加热装置的优点是加热速度快, 效率较高, 其劣势存在趋肤效应, 发热区仅在生长室的表面, 加热不够均匀; 当生长室尺寸不断扩大时, 由于发热区与生长室中心距离较远, 将产生过大的径向的温度梯度。因此, 在进行大直径的 SiC 单晶生长的过程中, 要求的生长室内轴向以及径向温度梯度的控制更加精确, 传统的感应加热装置难以满足需求。



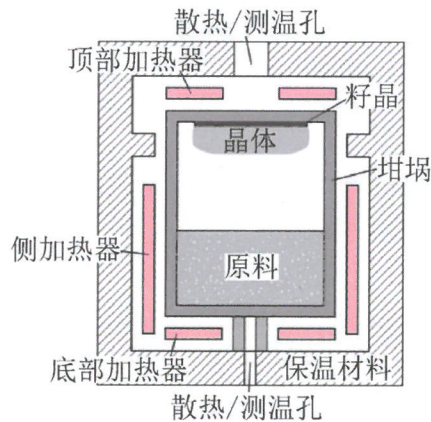
► 感应式 PVT 长晶炉示意图 来源: 网络

在解决感应式长晶炉难以长大、长厚和长快方面,恒普科技做了多方面的工作,2022年推出集各项创新技术于一体的8英寸双线圈感应晶体生长炉。

这款设备通过“准轴径分离”技术,解决了双线圈对石墨坩埚的温度上下无法分离的难题,满足更多客户的使用习惯。同时,恒普科技还研发了内外分离的测温方式,通过设置隔离管,把晶体生长炉腔体内分为检测空间(隔离管内)和被检测空间(隔离管外),有效地解决了前述影响红外测温的问题,实现了利用红外测温仪对晶体生长炉工作温度实时精确地测量,可有效减少晶体缺陷及晶体之间的差异。

另外,压力的稳定性是影响晶体生长的另一项关键参数。压力会影响SiC粉升华过程中的气相组分、气流均匀性以及晶体生长的速度。压力的波动会导致炉内气相组分的变化、气流均匀性的破坏,还可能出现气相组分过冷(如Si液滴的形成)、表面石墨化等现象,这些现象会引发SiC晶体的宏观和微观缺陷的产生。压力控制越精确,生长的晶体缺陷越少、质量越高。现有的技术压力波动一般控制在 $\pm 3\text{Pa}$ 。恒普科技研发的压力传感器和控制阀门及配套的自适应算法,可将压力稳定控制在 $\pm 0.3\text{Pa}$ (设定压力在100-500Pa间)。

在生长6-8英寸SiC晶体方面,电阻加热式设备是较为先进的PVT晶体生长平台。目前,II-VI、东尼电子等公司已使用电阻法PVT系统生长6-8英寸SiC单晶。与感应加热方式不同,电阻加热以电阻体作热源,并以热辐射为主要传热方式加热坩埚外壁,再通过坩埚导热来加热原料。电阻热场生长平台可对轴向温度和径向温度分别进行精确控制,有利于实现大尺寸晶体生长,并提高晶体生长速度。相对来说,电阻法SiC长晶炉工艺简单、自动化程度高、长晶时间短、设备性能稳定,更能够帮助新进入者快速、高效地生长高质量大尺寸SiC晶体。



▲ 电阻法长晶炉结构 来源:清华大学

以优晶光电的第4代机型UKING SiC RV4.0为例,电阻法设备的优势包括:大幅缩短SiC晶体生长时间,可将整个过程控制在5天之内;可兼容生长6-8吋晶体;晶体的利用率高达85%;内部热场分布均匀,解决了低温区的粉末流阻较大导致晶体生长中断的难题,大幅提升粉料的利用率,减少浪费。总的来说,电阻法SiC单晶生长设备能够很好地解决SiC晶体生长良率低、重复性差、规模化量产困难等诸多问题。

优晶光电是中国第一家以电阻法工艺路线为主的设备企业,从2010年开始就专注于电阻法SiC单晶生长设备、提升工艺和技术研发。2019年3月,优晶光电发布6英寸电阻法SiC单晶生长设备及工艺,预计2023年底将推出8英寸SiC长晶设备及工艺。

目前,优晶光电的电阻法长晶设备已经能够稳定量产6英寸SiC单晶,并且设备已经大规模销售,客户已经实现量产,并已得到外延厂家验证,数据表明UKING设备产出的SiC单晶质量国内领先、国际先进。

此外, 优晶光电还建成了电阻法 6 英寸 SiC 中试线, 目的是通过工艺的研发优化设备, 在给客户提供更好更优的设备同时提供综合解决方案, 加速国产 SiC 衬底的量产化进程。此外, 优晶光电还通过独特的工艺, 实现了自动化粘接籽晶, 大幅度提高籽晶粘接良品率, 良率可达 95% 以上。

在电阻法长晶炉方面, 恒普科技推出了石墨发热的 SiC 晶体生长技术新平台, 以“轴径分离”为核心技术, 与“新工艺”相组合, 突破性地解决晶体“长大、长快、长厚”的行业核心难点。“轴径分离”的实现方式是在籽晶径向区域主动调节其区域温度, 轴向温度通过料区热场调节其区域温度。而“一次传质”工艺是采用多孔石墨筒的新式坩埚设计, 将源料置于坩埚壁与多孔石墨筒之间, 同时加深整个坩埚以及增加坩埚直径, 装料量增加的同时, 增加了源料的蒸发面积。该工艺解决了由于源料表面随着生长的进行, 源料上部重结晶, 影响升华的物质通量, 所产生晶体缺陷的问题。新工艺降低了源料区温度分布对晶体生长的敏感度, 传质效率提高且稳定, 生长后期降低碳包裹物的影响, 还可以采用不粘籽晶的无籽晶托固定方式, 自由热膨胀, 利于应力释放, 极大地提高了 SiC 晶体扩径的效率。

此外, 恒普科技还实现了碳化钽涂层等关键部件的国产化, 有助于帮助国内企业大幅降低生产成本, 提升晶体良率。

● 切割设备

SiC 衬底加工的难点在于 SiC 材料硬度高、脆性大、化学性质稳定, 因此传统硅基加工的方式不适用于 SiC 衬底。切割效果的好坏直接影响 SiC 产品的性能和利用率(成本), 因此对切割要求翘曲度小、厚度均匀、低切损。

随着科技的发展进步, SiC 等硬脆性材料的切割方法也在不断改进。目前, 切割 SiC 单晶片的方法主要有金刚石圆锯片切割、电火花线切割、线锯切割、激光热应力控制断裂切割技术(激光热裂切割技术)和激光隐形切割技术等。目前, 固结金刚石是 SiC 晶锭切割的主流技术。

多线切割设备厂家以瑞士梅耶伯格(MeyerBurger)和日本高鸟(Takatori)公司为代表, 目前线速度水平都能够达到 2400m/min。国内主要设备厂家包括中国电子科技集团公司第四十五研究所、唐山晶玉和湖南宇晶等。

切割技术	分类	优势	劣势
金刚石圆锯片	内圆切割	/	表面质量较差、翘曲度大、速度很慢、精度低、噪声大
	外圆切割	/	
电火花线	/	/	切缝宽、表面烧伤层厚度大等
线锯	游离磨料	一次切割多片、加工较薄晶圆、产率高、材料损耗小	速度慢、表面精度低、环境污染、晶片厚度不均匀、降低线锯寿命
	固结金刚石(主流)	效率是游离磨料线锯的数倍以上、切缝窄、环境污染小	耗时长(2吋锭 23 小时)、线锯磨损严重、晶片翘曲度大、难以生产超薄大尺寸晶圆
激光	热裂法	断面质量好、效率高、无污染	厚且不透明材料难以切割、沿着直线路径切割
	隐形切割	减少碎片、污染物和热损伤、零线、速度快、稳定及可靠	需光斑对焦、有效加工深度有限、热损伤、二次损伤

▲ SiC 晶锭切割技术演进 来源: 行家说 Research

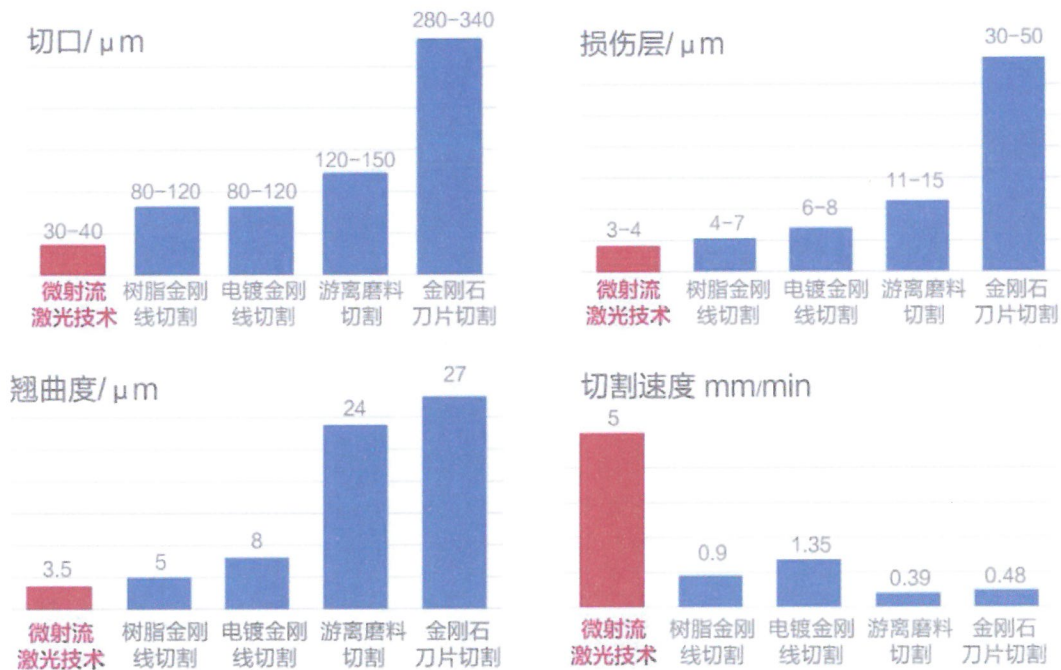
激光热裂法加工硬脆性材料也有一定的局限性,目前已经衍生出双光束热裂切割技术、激光多焦点热裂切割技术、超短脉冲激光热裂切割技术和微射流等一系列新的激光切割方法。

时间	单位	技术类型	进展
2016年	日本京都大学	飞秒激光	实现了 4H-SiC 单晶片剥离, 损失比线锯法小 4 倍以上。
2016年	日本 DISCO	KABRA	切割片数从 32 片提升到 42 片; 效率 30 分钟 / 片; 翘曲度 4 μ m
2017年	英飞凌 Siltectura	冷剥离	SiC 晶片厚度 200 μ m; 20mm 晶锭可切 50 多片; 损耗小于 90 μ m; 翘曲度 4 μ m;
2020年	晟光硅研	微射流	切口 30-40 μ m; 损伤层 3-4 μ m; 翘曲度 3.5 μ m; 切割速度 5mm/分钟
2021年	中科院微电子所	双激光异步	SiC 晶片厚度 200 μ m
2021年	北京大学	飞秒激光	15 μ m 深度仅为主流技术的 1/20

▲ 激光切割技术进展 来源: 行家说 Research

不过, 激光切割技术还有待完善。由于涉及光斑对焦, 传统激光采用的是垂直晶体表面加工, 导致有效加工深度有限, 无法满足 SiC 晶锭滚圆或切片的加工深度的需求, 更适用于对金刚线切割后的 SiC 衬底进行厚度减薄 (450 μ m \rightarrow 120 μ m)。而且传统激光能量较大非常容易对材料造成热损伤, 熔渣如果无法及时排除还会对 SiC 晶锭造成二次损伤。

晟光硅研推出了新一代 SiC 激光加工技术——微射流激光技术 (LASER MICROJET, LMJ), 相较于传统设备, 这项技术在加工良率、加工效率、加工质量、切割厚度、切割损耗、人力成本节省等各方面都有显著优势, 并且在设备耗材更换, 机器连续加工时长以及机器预热方面也有领先优势。



▲ 微射流激光与其他技术的对比 来源: 晟光硅研

激光微射流加工技术利用了激光在水和空气的界面上发生全反射的现象,使激光耦合在稳定的微射流内部,利用微射流内部很高的能量密度来实现材料的去除,可实现高效率、高质量、低成本、低损伤、高良品率 SiC 单晶衬底制备。在同样材料厚度下,传统设备切 2 片 SiC 晶片,微射流激光可以切出 3-3.5 片,能够降低 1/3 的 SiC 衬底总成本。

微射流激光可以有效解决了传统激光切割加工过深度和热灼伤等难题。该技术通过激光和超纯水耦合, SiC 晶锭的有效加工深度可达 9-12 公分,加工时在水流的冲刷下可以实时对材料表面降温,并将切削产生的废渣排出,大大降低材料的热损伤和材料熔融后的二次损伤。

● 研磨设备与耗材

SiC 晶锭经过金刚石线切割后,衬底片表面不平整,会存有大量锯痕,直接抛光加工的材料去除率低,需要花费大量的时间,需要采用研磨方法对 SiC 衬底片表面进行前期加工,除了要以较快的速度去除衬底片切割后表面的刀痕、划痕和表面损伤层等缺陷,还要最大程度降低晶片的翘曲度,保证生产良率。

早期, SiC 衬底研磨采用碳化硼游离磨料研磨加工方式,这种加工方式存在效率低、良率低等许多缺点,不能满足规模化生产高效率、高良率的加工要求。

现阶段, SiC 衬底研磨的主流工艺是金刚石研磨液和金刚石砂轮两种,国内厂商通常会“两条腿”走路。这两种方式各有优缺点:

研磨技术	分类	优点	缺点
游离磨料	金刚石研磨液	1、破片风险低; 2、加工效率高; 3、晶片翘曲度低; 4、晶片间厚度一致性好;	自动化程度低;
固结磨料	金刚石砂轮	1、自动化程度高; 2、破片风险低;	1、加工成本高; 2、晶片间厚度差异大; 3、耗材主要依赖进口;

▲ 不同研磨工艺的对比 来源:行家说 Research

在金刚石磨料方面,联合精密很早就实现了技术领先,他们从创立之初,就以高端研磨抛光材料为目标。多年来,联合精密的磨料已经广泛应用在消费电子、LED、半导体、光伏等高精尖领域,2020 年他们在 LED、蓝宝石领域的市场占比增长到 60%,光伏用金刚石市场份额占比约 30%,持续稳居全国第一。

2011 年,联合精密就实现了 SiC 衬底研磨液的技术突破,出货量和专利技术都位居行业领先水平。联合精密在行业内最大的优势是形成了磨料产品的系列化,如单晶金刚石、多晶金刚石、类多晶金刚石、纳米金刚石等,并通过应用实验夯实对研磨和抛光机理的研究,形成了系列化终端产品整体解决方案。其纳米级金刚石抛光液可以实现超光滑的加工表面 ($R_a = 0.3 \text{ nm}$ 和 $TTV < 1 \mu\text{m}$),大幅提高了晶片表面品质。

此外,联合精密拥有业内唯一一家国家级精密研磨抛光应用实验室,同时拥有国际先进的单面研磨机、厚度测定仪、粗糙度检测仪等应用加工设备,可为客户提供各种 SiC 等各种硬脆材料的加工实验,并配合客户开发研磨抛光工艺方案,为客户提供整体产品及技术解决方案。

◎ 2.7.2 SiC 外延生长设备

与 Si 器件不同, SiC 器件不能在晶圆上直接制作, 而是需要在 SiC 晶圆上沉积生长外延层, 利用外延层生产器件, 因此 SiC 外延设备在产业链中处于承上启下的重要位置。超高温 CVD 法具有可以精确控制外延层厚度和掺杂浓度、缺陷较少、生长速度适中、过程可自动控制等优点, 是目前主流成功商业化的 SiC 外延生长技术。

国际上主流的商用 SiC 材料同质外延生长设备机型分别为 TEL 的 Probus-SiC™ 机型, 德国 Aixtron 公司的 G5WW 机型、意大利 LPE 公司的 PE106 机型和日本 Nuflare 公司 EPIREVOTM S6 机型, 这些企业的设备均能够满足尺寸 100 ~ 200mm SiC 晶圆的外延生长工艺。

国内在 SiC 外延设备方面的研制正在逐步追赶, 中国电科 48 所、北方华创、纳设智能、季华实验室、芯三代等企业目前已研制出 SiC 外延生长设备, 并已逐步导入研发和量产线。

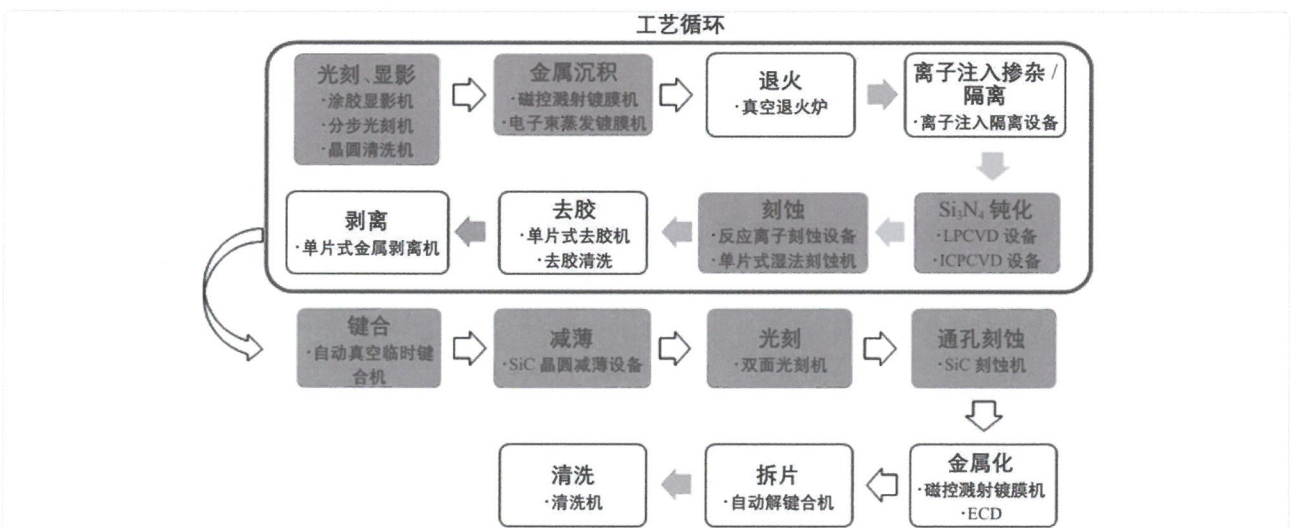
2022 年国产替代需求强劲, SiC 外延国产设备迎来发展良机。中国电科 48 所是其中的典型代表, 他们的 SiC 外延设备在短短半年时间内率先突破了 100 台套以上销售, 创造了第三代半导体设备领域最快的销售上量记录。

早在 2017 年 1 月, 中国电科 48 所就开发了第一代 SiC 外延设备, 外延层厚度达到 20 μm , SiC 外延层缺陷密度降至 0.7 个 / cm^2 。经过多年的升级迭代, 尤其是通过快速生长大尺寸均匀性控制实现了掺杂浓度均匀性控制、缺陷密度控制、维护周期提升等关键技术攻关, 中国电科 48 所的新一代外延设备很好地满足厚外延、高均匀、低缺陷等工艺发展需求, 各项技术指标已经达到国际先进水平, 尤其是致命缺陷密度小于 0.2 个 / cm^2 , 掺杂浓度均匀性也小于 <3%, 进入了行业第一阵营。

◎ 2.7.3 SiC 晶圆制造装备及关键工艺

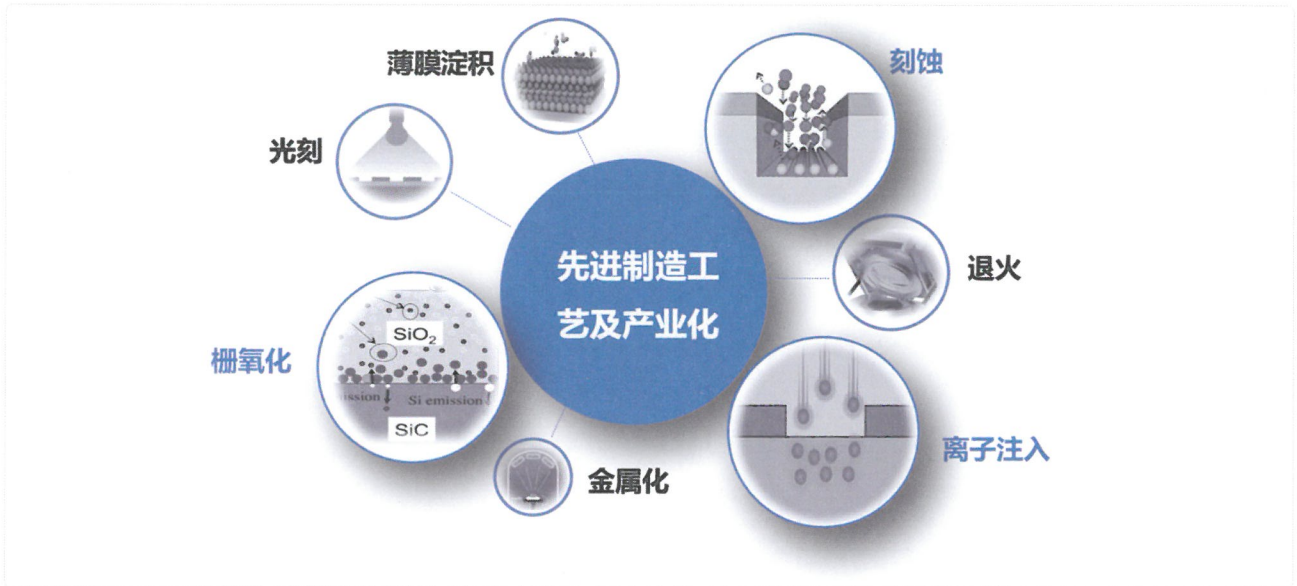
从半导体晶片到制成半导体器件, 按大工序可分为前道工艺 (Front End Of the Line) 和后道工艺 (Back End Of the Line)。

前道工艺包括上百道工序, 包括薄膜沉积、涂胶显影、光刻、离子注入、刻蚀、清洗、检测等, 后道工艺包括把圆片切割成芯片, 把合格的芯片固定 (mount) 在引线框架上, 再进行芯片电极与引线框架电极的键合连接 (bonding) 等。



▲ SiC 器件制造工艺流程及相关设备 来源: 中国电科 48 所

在制程上,大部分 SiC 器件设备与传统 Si 生产线相同,但由于 SiC 具有硬度高等特性,需要一些特殊的生产设备,如高温离子注入机、碳膜溅射设备、高温退火炉等。



▲ SiC 器件制备关键工艺 来源:上海 SiC 功率器件工程技术研究中心

中国电科 48 所是国内拥有 SiC 核心工艺设备最全的单位,在国内率先实现了外延、高温离子注入、高温氧化、高温激活炉、碳膜溅射设备、LPVCD 以及退火设备等设备研发及验证应用,并形成成套应用态势。此外,他们还通过整合中国电科集团其他装备公司的技术,并结合之前的 8 吋硅基整线建设经验,正在实现从提供局部成套设备到提供 SiC 芯片制造整线集成服务的布局。

● 涂胶与显影

SiC 功率器件制造包括光刻、蚀刻、离子注入、退火和氧化等关键工艺,其中光刻工艺需要使用涂胶显影设备。涂胶是光刻的准备工序,是晶圆产线上唯一与光刻机联机工作的关键工艺设备,涂胶质量对光刻和显影效果有重要的影响。显影效果直接决定光刻图形的质量,而且在 SiC 功率器件制造过程中需要多次进行涂胶和显影步骤,因此涂胶显影设备对 SiC 功率器件的制造至关重要。

TEL 公司在涂胶显影设备方面占据最高市场份额,并推出了 CLEANTRACK™ ACT™ 8,这是一款用于 SiC 功率器件的 75mm 至 200mm 晶圆尺寸的涂胶显影设备。通过将设备与曝光设备联机使用,可以实现更高的吞吐量。

● 离子注入

掺杂是制作功率器件不可缺少的工序。基于 SiC 的键强度高,杂质扩散所要求的温度 (> 1800°C) 大大超过标准器件工艺的条件,层间介质和栅极氧化层 (SiO₂, Si₃N₄) 等不能承受这么高的温度,所以器件制作工艺中的掺杂不能采用扩散工艺,只能利用高温离子注入掺杂。在 SiC 器件生产线中,高温高能离子注入设备是衡量生产线是否具备 SiC 芯片制造能力的一个标志。

SiC 离子注入解决方案供应商包括亚舍立 (Axcelis)、爱发科、瓦里安 (Varian)、应用材料公司,以及中国电科 48 所。

中国电科 48 所在 1964 年成立之初就以“三束”设备 (电子束曝光机、离子注入机、分子束外延) 为核心,于 2015 年研发了国内第一台 SiC 高温离子注入机。为推进离子注入机的市场化及产业化,中国电科 48 所将离子注入机业务 (研发生产销售) 转化至子公司北京烁科中科信电子装备有限公司。

● 高温退火

高的杂质激活率、光滑的表面以及较少的缺陷是离子注入追求的目标, 达到这个目标的一个关键工艺就是高温退火。刚刚注入完后, 杂质是电惰性的, 出现了晶格缺陷, 导致了注入层的高电阻率。

注入后退火工艺可以解决 2 个关键问题, 一方面可以有效消除晶格损伤, 另一方面可以将注入离子移至电活性的 Si 或者 C 空位, 激活注入离子, 从而完成掺杂。

一般而言, 对于未非晶化的 SiC 材料, 1400°C 以上的高温退火可以消除几乎所有的晶格损伤。但过高的退火温度也会造成 SiC 材料 Si 原子的析出, 进而导致表面粗糙度的增大, 不利于形成良好的界面, 因此在退火中, 一般会引入碳膜进行保护, 退火后再进行去除。高温退火设备需要最高温度达 2000 °C, 恒温区均匀性 $\leq \pm 5$ °C。

现阶段, SiC 高温退火国内应用较为成熟的设备有北方华创的 SiC-650 系列高温炉、中国电科 48 所的 R2120-3/UM、Centrotherm 的 Activator 150、TOYOKO 的 Aile SiC-2000 等。

北方华创在 8 吋及以下半导体装备领域拥有多年的经验, 可以提供 ETCH、PECVD、PVD、清洗机、LPCVD 和高温氧化 / 退火炉等关键设备, 并广泛应用到 SiC 芯片制造领域, 产品性能优异, 可为客户提供全面的工艺解决方案。其中量产型 SiC 高温氧化 / 退火炉和 LPCVD 炉管, 可覆盖扩散、氧化、退火、Poly、SiO₂/Si₃N₄、TEOS 等工艺, 设备性能业内首屈一指, 已在国内多条主流生产线上量产应用。

例如, SiC-650 系列高温炉, 适用于 SiC 基功率器件制造中的高温工艺环节。而且为实现 SiC 片在高温真空环境下完成离子激活和退火工艺, SiC-650 系列高温退火炉和氧化炉, 均采用立式结构设计, 工艺控制好, 片间温度分布均匀, 工艺气流均匀稳定。SiC-650 系列通过采用加热腔与工艺腔独立的真空密闭设计, 提高工艺腔的气密性和洁净度。

目前中国电科 48 所的退火炉设备出货量在国内处于领先地位, 设备已广泛运行在众多客户的 SiC 芯片制造产线, 各项的工艺指标和良品率都满足了量产要求。中国电科 48 所已经完成了三代 SiC 高温退火炉的工程化设计和应用, 其第一代 SiC 高温激活炉在产线连续运行 4 年, 片内 / 片间方阻均匀性 $\leq \pm 2\%$, 单批产能 25 片, 月产能 1500 片, 产品良率达 95% 以上。第二代 SiC 高温激活炉通过加热器的改进增加了有效恒温区长度, 改进双真空密封结构, 实现了 50 片处理能力, 也增加了全自动传送, 使产能大幅提升。第三代在设备的运行率、能耗及设备外形外观等方面进一步优化, 提升了设备的可靠性和修护性能, 进一步降低了单片工艺的运行成本。



▲ 北方华创 SiC 高温氧化 / 退火炉

● 薄膜沉积

薄膜沉积是芯片前道制程的核心工艺之一，作用是在晶圆表面通过物理 / 化学方法交替堆叠 SiO_2 、 SiN 等绝缘介质薄膜和 Al、Cu 等金属导电膜等，在这些薄膜上可以进行掩膜版图形转移（光刻）、刻蚀等工艺，最终形成各层电路结构。由于制造工艺中需要薄膜沉积技术在晶圆上重复堆叠薄膜，因此薄膜沉积技术可视为前道制造中的“加法工艺”。

以 TEL 公司 ALPHA-8SE™ i 为例，这款适用于 150/200mm 的立式批量热处理系统，于 2018 年发布，以其稳定性和产能优势获得了高度评价。该设备最多可批量处理 150 片晶圆，适用于多种应用，包括氧化 / 退火、Si（多晶硅、a-Si）、 SiN 和 SiO_2 薄膜的化学气相沉积（CVD），以及高 k 薄膜的原子层沉积（ALD）。

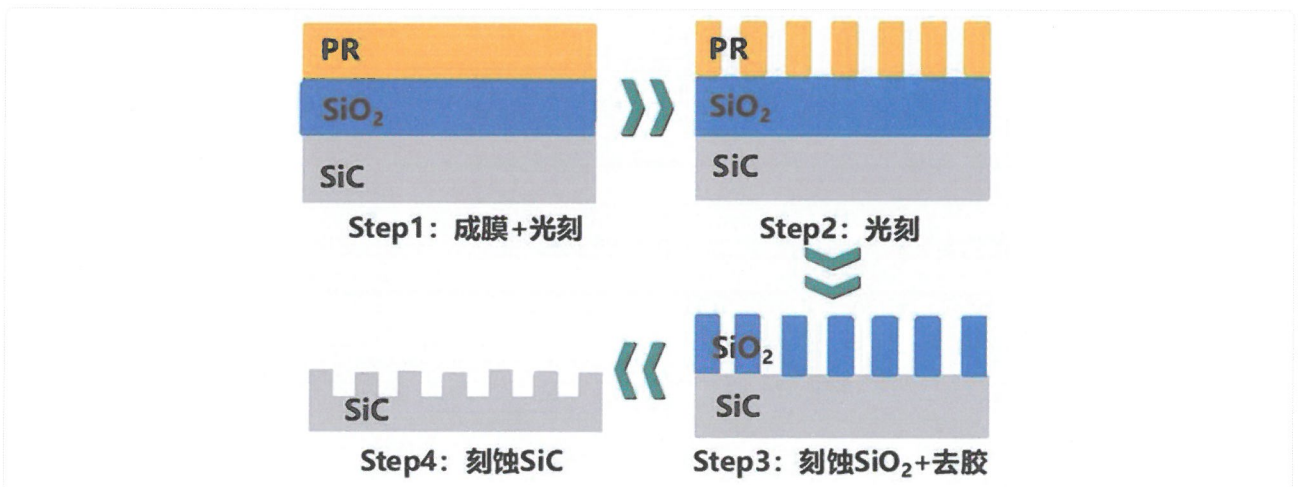
● 刻蚀

刻蚀技术是 SiC 器件研制中的一项关键支撑技术，在 SiC 器件制备过程中，刻蚀工艺的刻蚀精度、刻蚀损伤以及刻蚀表面残留物均对 SiC 器件的研制和性能有致命的影响。

由于 SiC 材料硬度高、SiC 结合键强的特点，湿法刻蚀无法满足要求。目前，SiC 材料的刻蚀多采用干法刻蚀，其中电感耦合等离子体（Inductively coupled plasma, ICP）刻蚀是一种低压高密度刻蚀，具有刻蚀速率高、器件损伤小、操作简单等优点被广泛应用。

以 UNITY™ Me+ 为例该设备最大能够兼容 200 毫米晶圆其等离子蚀刻工艺具备卓越性价比可靠性和生产力。近年来，该系统被广泛应用在 SiC 沟槽蚀刻生产线，获得了大量好评。

UNITY™ Me+ 的特点包括：刻蚀速率高、稳定性能高，内置刻蚀深度控制系统，并且该设备还具有丰富的腔室规格，如用于 SiO_2 / SiN 蚀刻的 DRM 腔室或 SCCM™ 腔室、和用于 SiC 沟槽蚀刻的 UD 腔室。TEL 公司还可以通过使用内部评估工具帮助客户进行工艺方面的 DEMO 评估，为客户提供广泛的蚀刻应用服务。



● 高温氧化

SiC 氧化炉是主要用在 SiC MOSFET 氧化层制备的关键设备。采用热氧化工艺制备栅氧是硅基半导体成熟的工艺制程,但对于 SiC 材料器件,有两方面难度:一是氧化速率非常慢,需要提升氧化的工艺温度,二是热氧化容易由于碳残留,从而造成栅氧的界面态密度低、缺陷多。为此,通常需要再次采用氮化物气氛进行高温退火处理,来改善栅氧的界面态质量,提升栅氧沟道迁移率及可靠性等性能。

热氧化工艺简单成熟、效率高,是当前产业界上的主流方式。目前比较业内主流设备有德国 Centrotherm 的 Oxidation 150、TOYOKO 的 Ailesic-1400 以及国内北方华创的 OxidSiC-650、中国电科 48 所的 M5014-3/UM 等设备。

中国电科 48 所的高温氧化炉设备的研制,采用了最主流热氧化工艺路线,集成了氮氧气氛后退火处理功能,最高温度达到了 1400°C,氧化层片内、片间和批间厚度均匀性均优于 3%,工艺后界面电子迁移率稳定在 20cm²/Vs 以上。目前,该设备已经通过了器件性能验证,高温热氧化制备栅氧表现性能优异,满足器件应用要求,并获得了批量订单,开始在产线中应用。

● 晶圆背面激光退火

欧姆接触在 SiC 功率器件中起着至关重要的作用,降低背面欧姆接触电阻可以有效降低功耗,提高器件性能。但是,由于在 SiC 表面沉积金属通常只会形成肖特基接触,要形成欧姆接触还需要高温退火工艺(约 1000°C),这超过了正面金属化工艺的可承受温度,因此器件的金属化工艺流程只能从背面到正面,导致工艺效率较低。

激光退火工艺的引入提供了一种新的工艺路线。激光退火工艺是采用激光作为热源对材料进行加热的一种退火方法,相比于传统退火工艺,比如管式炉退火、快速热退火等,它具有 3 个明显优势:一是高温作用时间短(10⁻¹⁰—10⁻² 秒),提高生产效率;二是加热仅限于表层,避免了高温对器件正面的影响,使合金表面更平整;三是激光退火制备的欧姆接触在电极表面粗糙度、界面粗糙度和合金组分均匀性等方面都有明显优势。基于这些优点,激光退火作为一种快速热处理手段,在半导体制造业得到广泛关注。

2018 年华卓精科就立项开发用于 SiC 领域的激光退火设备。通过与客户共同开发工艺的过程中,不断地发现问题、修改设计、工艺验证,最终在 2019 年实现了激光退火设备的定型,其第一台 SiC 激光退火设备正式进入客户端。

早期,由于激光退火对 SiC - 金属作用机理较复杂、退火光束整形复杂和实验设备较少等原因,激光退火在 SiC 上形成欧姆接触面临着工艺控制性差、欧姆接触电阻率高、欧姆接触电阻率不均匀等问题,工艺技术还不够完善,工艺条件还需要进一步优化。华卓精科的激光设备很好地解决了这些难题,在多个客户端与国外同类产品进行 PK,最终获得众多头部企业的认可,获得重复订单。目前,华卓精科的激光设备累计订单超过 25 台左右,代表客户有比亚迪、泰科天润等。

与国外进展对手相比,华卓精科的激光退火设备性能相当,且具备一定的优势,包括可根据客户需求进行定制化设计/生产、售后服务、货期及价格。未来,华卓精科还将持续创新研发更高性能的 SiC 激光退火设备,打造退火工艺设备生态圈,更好地服务客户。

● 清洗设备

尽管碳化硅中的材料扩散比类似温度下的硅慢得多,但碳化硅热处理通常在高得多的温度下进行,因此必须将金

属污染降至最低,以保持工艺控制和可靠性。清洗工艺需要在不损伤晶圆表面及电特性的前提下,有效地清除残留在晶圆上的颗粒、微尘、金属离子及有机物杂质是至关重要的。

TEL公司的NS300+ 200mm Conversion清洗系统采用了在300mm设备上得到实际验证的可靠稳定的工艺模块,为SiC半导体行业引入了兼容200mm/150mm晶圆洗涤功能。

该系统最大可以搭载8个洗涤单元,通过高速清洁晶圆的正反面以实现出色的生产率。

● 晶圆检测设备

SiC芯片相关的检测设备主要包括工艺检测(在线参数测试)、晶圆检测(CP测试)、终测(FT测试),国内公司主要涉足于晶圆检测和终测环节,这两个环节的检测设备价值量约占整体制造设备投资的9%左右。

SiC晶圆检测最早采用人工目检的方式,人工目检难度增大、误判率升高、并且可能无法检测某些类型的缺陷,已不再能满足市场的检测要求。自动光学AOI检测技术可以自动定位和检测SiC晶圆和芯片,有效降低工人劳动强度,降低检测误判率,有效提高工作效率,节省人力物力成本,正在被前道芯片制造、先进芯片封装等集成电路制造商广泛采用。

AOI晶圆外观缺陷检测通常采用先进的组合光源打光技术和高速高分辨率相机,可以清楚识别晶圆的外观瑕疵,智立方是国产AOI设备领域的佼佼者,其SiC晶圆检测设备已经成功产品化,实现批量售,并且拥有相当数量的知识产权保护。

其中,智立方AOI设备Explorer plus检测精度达到 $0.275\mu\text{m}/\text{pixel}$,过检率 $\leq 0.5\%$ 。

● 芯片分选

SiC晶圆在切割成晶粒后,在晶粒封装前,通常会使用晶粒分选设备,进行晶粒测试和分选。在晶粒分选过程中快速识别缺陷,帮助工程师快速识别晶圆划片过程中的问题,帮助芯片制造商降低生产风险,确保更高出货质量的SiC晶粒进入封装工艺。

在分选机市场,国外先进厂商早期已经形成了市场的绝对垄断,而国产设备经过多年的潜心研发,也已取得较大技术进步,在设备的每小时产能以及系统的稳定性等方面已取得重要成果。

SiC芯片分选机通常不太会引起制造商的特别注意,但随着厂商对芯片缺陷要求的提高,他们对更高级别分选设备的需求日益强烈。

智立方的芯片分选设备已实现国产化替代,并且性价比更优。目前智立方主要提供2款分选设备,包括MS350-标准版和MS350-IC版,其中MS350-IC版用于SiC芯片的分选,其主要优势包括:设备扩展性强,可兼容12寸、10寸、7寸扩晶环;高精度: $XY\leq\pm 15\mu\text{m}$; $\theta < 3^\circ @3\sigma$;设备灵活性强,可以实现分选、高精度重排功能。

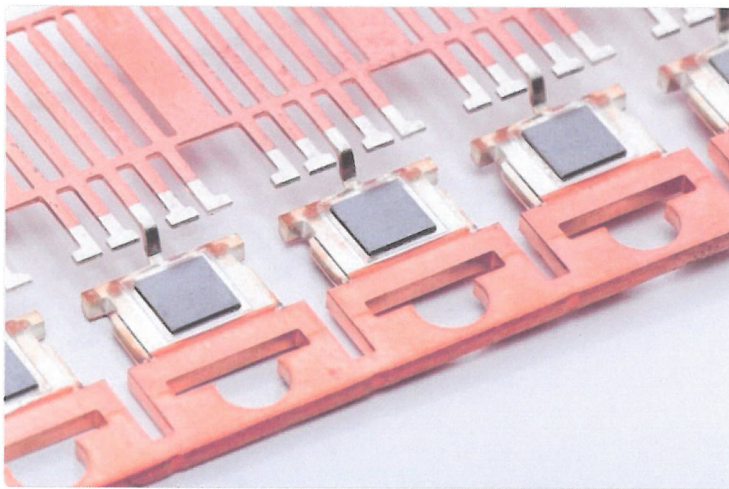
此外,这两款设备因设备软件底层全部自主研发具有定制化优势,可以匹配客户的个性化需求。同时,效率方面优于进口厂商,相对于功率器件的国际主流设备,智立方以其性价比更加优胜。

◎ 2.7.4 SiC 功率模块设备及关键工艺

电子产品正在向着质量轻、厚度薄、体积小、功耗低、功能复杂、可靠性高这一方向发展,这就要求功率模块在瞬态和稳态情况下都要有良好的导热导电性能以及可靠性。

功率模块的体积缩小会引起模块和芯片电流、接线端电压以及输入功率的增大,从而影响了热能的散失,由此带来了一些问题,如温度漂移等,会严重影响功率器件的可靠性,加速器件的老化。为了解决高温大功率器件所面临的问题,近年来,纳米银烧结技术受到了越来越多关注。

第三代半导体连接技术有银低温烧结连接技术、固液互扩散连接 (SLD) 和瞬时液相烧结连接 (TLPS), 其中银烧结技术是目前国外第三代半导体封装技术中发展最为成熟、应用最为广泛的技术,美国、日本等 SiC 模块生产企业均采用此技术,有些企业还开发了铜烧结工艺。



2006 年, 英飞凌 Easypack1 就采用双面银烧结技术; 2007 年, 赛米控 - 丹佛斯的 SkinTer 技术也在芯片和基板之间采用银粉烧结工艺进行连接。2018 年, 特斯拉 Model 3 的 SiC 模块正式让银烧结和相关设备“名声大噪”。

SiC MOSFET 采用双面银烧结, 连接层导热率最大可提升 10 倍, 可靠性可提升 5 倍以上, SiC 模块工作结温可提升至 175°C。国外银烧结技术已经由微米银烧结进入纳米银烧结阶段, 纳米银烧结与微米银烧结技术相比连接温度和辅助压力均有明显下降, 极大扩大了工艺的使用范围。烧结是非常好的技术, 未来成本和技术也会越来越优化。但眼下, 这项技术也存在几个待完善的地方:

- ① 成本, 银烧结技术所用的银浆成本远高于焊膏, 银浆成本随着银颗粒尺寸的减小而增加, 同时基板铜层的贵金属镀层也增加了成本;
- ② 银烧结技术需要一定的辅助压力, 高辅助压力易造成芯片的损伤;
- ③ 银烧结预热、烧结整个过程长达 60 分钟以上, 生产效率较低。

日本松下开发了一种纳米焊料键合材料, 可以获得 200°C 耐热性, 实现与纳米银膏相同的键合特性, 可以节省设备和材料成本, 同时扩散时间大概只有银纳米膏等传统烧结材料的一半左右。

整体来说, 目前 SiC 专用设备市场仍然处于早期发展阶段, 大部分 IDM 仍运营 6 英寸产线, 预计新建的 8 英寸产能将在 2024 年开始集中释放。

第三章、SiC 器件 / 模块细分应用市场分析

以下联合出品方及参编单位对本章节的特别贡献

A 级参编单位



B 级参编单位

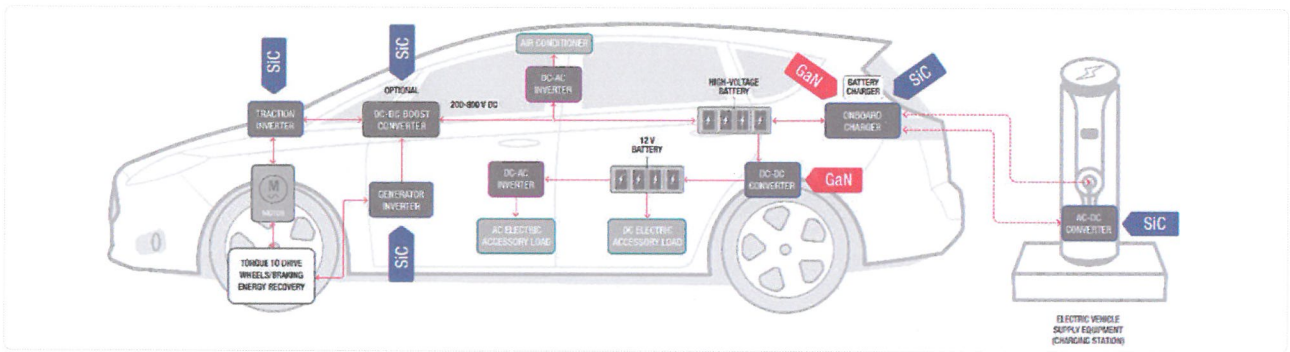


3.1 新能源汽车市场

近年来,随着电动机在更广泛的领域中得到应用,电力电子功率器件的作用变得非常重要。特别是 SiC 功率器件元件具有优异的电子特性,受到了广泛关注。在汽车行业, SiC 功率器件可提高 EV 和 HEV 的能源效率,增加续航里程,甚至降低车身重量和综合成本。

SiC 器件在新能源汽车产业存在七个应用场景,包括电机控制器、车载充电机 OBC、DC/DC 变换器、氢燃料电池汽车 DC/DC 升压变换器 DCF、空气系统以及地面充电超级充电站、11KW EV 无线充电系统。

目前, OBC 采用的 SiC MOSFET 主流规格有 1200V/40mΩ、1200V/80mΩ 以及 650V/45mΩ、650V/60mΩ; DC/DC 采用的 SiC MOSFET 主流规格为 1200V/160mΩ, 电控用 SiC MOSFET 主流规格为 1200V/15mΩ。



▲ SiC 器件在新能源汽车产业存在七个应用场景 来源: 网络

其中,用于电机控制器的功率模块是增长空间最大的车用 SiC 产品,预计占 SiC 芯片市场的 50% 左右。从导入时序来看,车载电源是较早采用 SiC 领域,2018 年开始就有 20 多家企业将 SiC SBD 和 MOS 管用在 OBC 上,近年来,国产 SiC 在车载电源领域 OBC 和 DC/DC 中的市场渗透率逐步提升。

2022 年 SiC “上车”更是如火如荼,全球汽车企业,无论是跑车抑或是乘用车,非常频密地发布 SiC 车型, SiC “上车”整体的时间点大约提前了 2 年。

新能源汽车巨大的市场需求,为 SiC 半导体企业的创新和发展提供了广阔的空间,国内外 SiC 企业已经“厉兵秣马”以便抓住历史性的市场机遇。

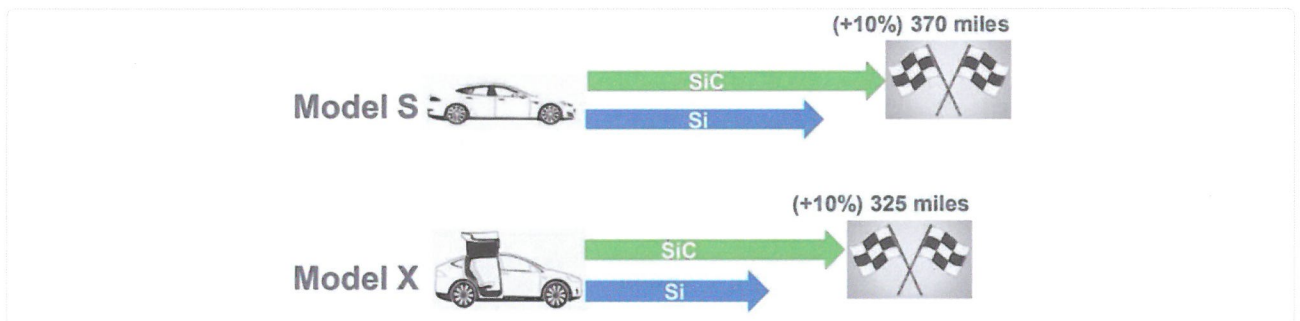
例如飞程半导体,他们早已积极在新能源汽车领域布局,目前已有碳化硅产品成功应用在 OBC 市场,同时,飞程半导体车规新产品开发及认证,会严格执行 APQP 过程管理和 AEC-Q101 可靠性认证,现有多个市场主流规格的车规新产品 APQP 立项,预计将在 2023 年量产。

同时,飞程半导体的众多车规级 SiC MOSFET 也即将面世,其中 1200V/35mΩ/70mΩ/160mΩ 已有车规级工程样品,计划 2023 年 Q1 量产,650V/30mΩ/45mΩ/60mΩ 预计 2023 年 1 月可以提供车规级工程样品,计划 2023 年 Q2 量产。在牵引逆变器应用领域,飞程半导体现在可以提供 1200V/18mΩ 的 SiC 裸芯片用于制作 SiC 模块,另外,飞程半导体也将在 2022 年第 4 季度产出第一批 1200V HPD SiC 模块工程样品,计划 2023 年完成可靠性认证。此外,飞程半导体还与香港应科院合作,加强 SiC MOSFET 在汽车产品上的开发与应用。

◎ 3.1.1 电控逆变器

电池、电机、电机驱动是新能源汽车的三大核心部件。逆变器是一种交流到直流的转换器，可将电池电压转换为牵引电机提供交流电压。

相比于传统的硅器件，SiC 器件可以使纯电动汽车、混合动力车的电机控制系统损失的功率降低到 1/10，实现低功耗化；研究数据显示：在 25°C 结温下，SiC MOSFET 关断损耗大约是 IGBT 的 20%；在 175°C 的结温下，SiC MOSFET 关断损耗仅为 IGBT 的 10%。在电机控制器中引入 SiC 技术成为有效的升级路径，在同等电池续航情况，有望将续航里程提升 5-10%。



▲ 特斯拉采用 SiC 后提升了 10% 续航里程

采用 SiC 器件还可实现电池成本的大幅下降和续航里程的提升，从而有效降低了整车成本。据测算，对于电池容量 80kWh 和 40kWh 的新能源汽车来说，驱动逆变器采用 SiC 器件增加的成本为 200 美元，而从电池、无源元器件、冷却系统等节省的成本分别为 520-1040 美元和 260-570 美元，整车成本分别可以节省 320-840 美元和 60-370 美元。

主逆变器采用 SiC 功率器件，整车成本降低					
电池容量	电池成本	电池节省	综合节省	SiC 增加成本	整车成本降低
80kWh	130\$/kWh	5-10%	520-1040\$	200\$	320-840\$
40kWh	130\$/kWh	5-10%	260-570\$	200\$	60-370\$

▲ SiC 技术降低牵引逆变器综合成本 来源：行家说 Research




目前，几乎所有的新能源汽车企业都把 SiC 电机控制器开发列入到新项目开发的时间表中，而应用 SiC 模块的车厂会越来越多，国内方面，比亚迪、宇通客车、吉利汽车、蔚来、小鹏等车企已经在电机控制器中使用了 SiC 技术。从全球市场来看，预估 2025 年会成为 SiC 在新能源汽车市场的一个爆发点，SiC 的供应有可能会进入到全面供不应求的阶段。通常一辆车会用到 1-2 个 SiC 逆变器，每个逆变器大约需要 24-48 颗 SiC MOSFET，预计 2022 年和 2025 年电动车全球 SiC 牵引逆变器渗透率分别为 17% 和 35%，届时 SiC 器件的需求规模分别将达到 33.12 亿元和 96 亿元。

项目 / 年份	2022F	2025F
全球 EV 销量 (万辆)	1000	2282
SiC 逆变器渗透率	17%	35%
SiC 规模 (亿元)	51	236

▲ 全球汽车牵引逆变器的 SiC 器件需求规模 来源：行家说 Research

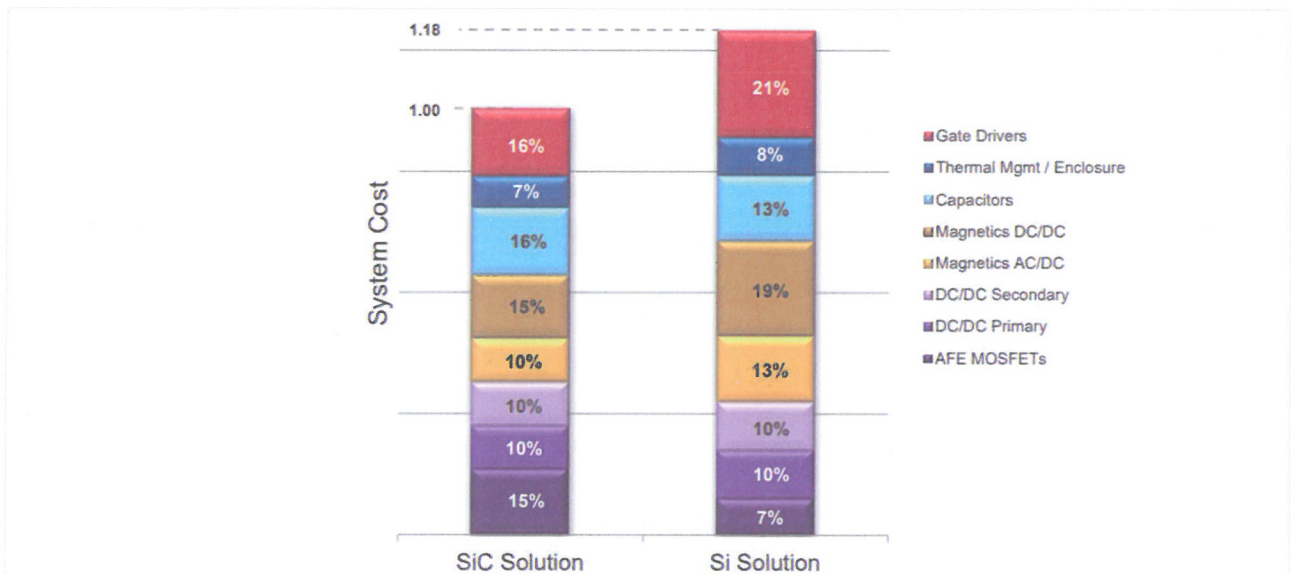
◎ 3.1.2 车载 OBC 与 DC/DC

车载充电器 (OBC) 是一种电池充电器, 是将市电电源的交流电压转换为直流电压为电池充电, 主流的功率范围为 6.6KW、11KW、22KW。当前大多数车载充电器都是单向充电, 即交流电网到电池, 然而许多厂商正计划上双向车载充电器。

	Low Power	Medium Power (Mainstream)	High Power(Trend)
Power	<2kW	2kW~6.6kW	11kW/22kW
Connection	1Φ	1Φ	3Φ
Vehicles			
Remark	Ebike or low speed EV	Mainstream EV: Volt, Chevy, Tesla Model 3	High end EV: Porsche, Maserati

▲ 车载充电及的功率范围和适用车型

SiC 替换硅系统, 通常能够将 OBC 的系统成本降低 20% 左右。其中, 双向 OBC 的散热成本可降低三分之一, OBC 体积可减小 20% 以上, 节省了电动汽车空间和重量。除了能够降低系统成本, 整车系统也更容易实现多合一小型集成化。同时, SiC 方案比普通双向 OBC 效率高 2%-3%。对于双向 OBC 来说, 功率越高, SiC 所带来的节约也就越多。以 22kW 双向 SiC 基 OBC 为例, 系统成本可以节省超过 30 美元 (约 200 元人民币), 整个生命周期可节省近 3500 元人民币。



▲ 采用 SiC 替换 Si 后降低 OBC 的系统成本 来源: Wolfspeed

截止 2018 年, 全球已有超过 20 家汽车厂商在车载充电系统中使用 SiC 功率器件, 比如比亚迪、北汽新能源、吉利汽车、上海大众、日产等, 主流 T4 厂商都已经批量生产 SiC OBC 产品。

在电动汽车电源单元中, 直流转换器 (DC/DC 转换器) 是核心部件之一。DC/DC 转换器充当直流变压器, 可将牵引电池的高压转换为低压, 为所有低压电子设备供电, 如动力转向、电动车窗、雨刷控制、仪表板多功能显示器和其他所有其他电子控制功能。目前电动车的动力电池电压一般在 200V-400V, 但是不少车企正在往 800V 甚至更高电压方向发展。研究表明, 针对 800V 电池系统, SiC MOSFET 是原边全桥主开关器件的性价比最佳选择。若副边二极管使用同步整流 MOSFET, 原边半导体功率器件使用 SiC, 则整机效率可以达到 99% 以上。据研究, 丰田普锐斯 DC/DC 降压转换器和升压转换器, 采用 SiC 技术后, 在成本方面, 最高分别可以降低 11.7 美元和 36 美元, 体积分别缩小 0.4kg 和 2kg。

Table 8-2 Toyota Prius DC/DC buck converter Cost & Weight Potential Analysis

	Price Change % (original system 100%)	Price \$ Reduction	Weight Improvement % (original system 100%)	Weight Improvement (kg)
Inductors and capacitors	70% - 75%	\$7 to \$9	-60%	-0.15 kg
Housings, covers and busbars	75% - 85%	\$1.60 to \$2.70	70% - 90%	-0.35 kg
Using SiC	225%	(\$-2.30) *	N/A	N/A
Using GaN	0%	\$0.00	N/A	N/A
Total		\$6.30 to \$11.70		-0.4 kg

	Price Change % (original system 100%)	Price \$ Reduction	Weight Improvement % (original system 100%)	Weight Improvement (kg)
Inductors and capacitors	75% - 80%	\$20 to \$25	-60%	-1 kg
Housings, covers and busbars	75% - 85%	\$8 to \$11	80% - 85%	-1 kg
Using SiC	225%	(\$-105) *	N/A	N/A
Using GaN	0%	\$0.00	N/A	N/A
Total		\$28 to \$36		-2 kg

▲ 丰田普锐斯 DC/DC 升降压转换器成本和重量潜力分析 来源: Ricardo Strategic Consulting

行家说 Research 预计 2022 年和 2027 年全球 SiC 车载电源 (OBC+DC/DC) 渗透率分别为 20% 和 52%, 届时 SiC 器件的需求规模分别将达到 7.98 亿元和 51.44 亿元。

项目 / 年份	2022	2027F
全球 EV 销量 (万辆)	1000	3738
SiC 车载电源渗透率	20%	52%
SiC 器件规模 (亿元)	7.98	51.44

▲ 全球车载电源的 SiC 器件需求规模 来源: 行家说 Research

3.2 汽车充电桩市场

新能源汽车凭借其环保等优势,受到不少消费者的青睐,在各国政府大力支持下,新能源汽车的发展前景一片光明,但除了续航里程和成本之外,大规模采用电动汽车的障碍还包括充电点的可及性和汽车电池的充电速度。

导入电压高达 800V 的架构发展成为了充电桩领域重要的趋势,保时捷的 Taycon、现代汽车的 Kia EV6、通用汽车的 Hummer EV、小鹏等越来越多新车型均已开始采用 800V 直流快速充电技术, Lucid、广汽埃安更是采用了更高电压等级的 900V-1000V 架构。

目前,充电桩的充电模块主要采用硅基 MOSFET 和 IGBT。硅基 MOSFET 的问题在于阻断电压不可能远远超过 650V, 尽管采用 IGBT 的两级拓扑可以提供高达 1.2kV 的电压, 但尺寸和效率仍然是一个挑战。基于 SiC 的 AC/DC 转换器可以解决硅的所有这些问题, 不仅可以提供超过 98.5% 的峰值效率, 还显著节省了器件数量, 采用 SiC 设计只需 6 颗器件, 而硅基 MOSFET 设计采用维也纳拓扑结构需要 12 颗器件, 因此 SiC 电路占用面积减少了 25%-30%。如果充电桩的充电模块改用 SiC 方案, 由于 SiC 功率器件成本较高, SiC 模块的成本占比将高达 70%。

充电基础设施市场也在加快采用 SiC 功率器件, 目前充电桩主要采用混合模块方案(硅基 IGBT+SiC SBD)。而随着 800V 充电架构的导入, 大功率充电器需要采用全 SiC 模块。预计 2025 年充电桩 SiC 市场规模将达到 3.01 亿美元, 2021 年至 2026 年期间的复合年增长率为 46.13%。

据行家说 Research 综合整理分析(数据来源中汽协、充电桩联盟及 IHS 等), 2022 年全球电动汽车充电桩保有量 1200 万个, 2027 年保有量将达到 6100 万个。预测 2022 年和 2027 年 SiC 器件在充电桩中的渗透率分别为 3% 和 7.7%, 充电桩市场 SiC 器件的市场规模将分别达到 4100 万美元和 4.50 亿美元。

项目 / 年份	2022F	2027F
全球充电桩数量增量 (万个)	450	1300
SiC 充电桩渗透率	3%	8.2%
SiC 规模 (亿美金)	0.41	4.50

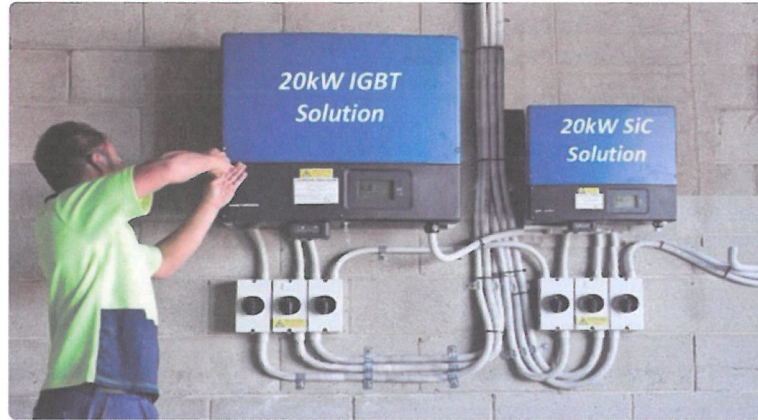
▲ 全球充电桩 SiC 器件需求规模 来源: 行家说 Research

3.3 太阳能光伏市场

2010 年代初, 光伏逆变器就开始使用 SiC 二极管技术了, 使用碳化硅后, 光伏逆变器可以实现更高的能量转换效率, 可以安装较少数量的光伏面板, 尽管碳化硅器件价格贵, 但综合成本可以更低。2016 年左右, 光伏逆变器制造商开始采用 SiC MOSFET, 这是因为碳化硅技术能够帮助 MPPT 跟踪器实现了更高的通道开关频率, 使得系统更小、更轻、更具成本效益。

尤其是在壁挂和屋顶应用, 太阳能逆变器需要理想的重量密度, 例如 1kW/kg。大多数采用硅基 IGBT 的商业

化产品无法很好地满足这一要求，它们的重量密度小于 0.38kW/kg 。为了应对这一挑战，需要开发基于 SiC MOSFET 的光伏串逆变器。在实际应用场合中，光伏逆变模块主要使用 $0.6\text{-}1.2\text{kV}$ 、电流等级在 20A 以上的 SiC 器件。以 250kW 光伏组串逆变器为例，采用 SiC 模块后效率最高可达 99% ，功率密度为 1kW/kg ，逆变器重量减轻到 95kg 。



▲ 基于硅基和 SiC 的 20kW 光伏逆变器产品尺寸对比 来源：安森美

2021 年太阳能光伏市场安装容量实现 148GW ，增长 11% ，未来五年的复合年均增长率为 7% ，2027 年新增容量或将突破 200GW 大关。渗透率方面，2020 年光伏逆变器中使用 SiC 功率器件的占比为 10% ，基于 SiC 逆变器的 50kW 光伏每瓦成本大概是 2.17 美元，逆变器成本大约占 9% 。

预计 2027 年 SiC 光伏逆变器占比也将大幅提升。国内企业预测，预计到 2030 年光伏领域的 SiC 功率器件需求将增长 $5\text{-}10$ 倍，而国产 SiC 二极管将加速替代进口产品，2022 年光伏 SiC 二极管的国产替代率乐观估计将达到 50% 。受市场拉动，预计 2027 年 SiC 器件在能源（含光伏和风电）领域的营收将从 2021 年的 1.75 亿美元增长至 4.99 亿美元，年复合增长率为 19.08% 。

3.4 轨道交通市场

轨道交通是城市公共交通的骨干，也是能耗大户。地铁等城市轨道交通预计年耗电达 400 亿度，占我国总耗电量的 5% 以上，据估算，“十四五”期间，仅上海地铁的年用电量将超 25 亿度。而中国铁路局数据显示，2021 年全国铁路总换算周转量完成 39509.10 亿吨公里，单位能耗为 4.07 吨标准煤 / 百万换算吨公里，总共需消耗约 1600 万吨标准煤。

据测算，采用全 SiC 技术后，整体列车的能耗降低了 15% 。如果全中国的城轨都采用 SiC 器件，每年可节省 15 亿度电；全中国的铁路都采用 SiC 器件，每年可节省 240 万吨燃煤消耗。

日本是全球在轨道交通领域较早并且广泛采用 SiC 的国家之一，早在 2012 年东京地铁银座线就实现了世界首次商业测试基于 SiC 牵引逆变器车辆。2015 年，日本的铁路车辆也开始在积极安装 SiC 牵引逆变器，截止 2021 年，已经进入普及阶段。据日本铁路技术研究院，截至 2021 年，日本大约 60 款车型将使用 SiC 牵引逆变器。

日本轨道交通牵引逆变器采用 SiC 情况

运营商	列车型号	SiC 启用时间	模块类型	供应商
JR 北	H100	2020.03	全 SiC	三菱
JR 东	E235	2015.11	全 SiC/ 混合	三菱、东芝
	GV-E400	2019.08	混合	三菱
	E131	2021.03	混合	不详
	E261	2020.03	全 SiC	日立
JR 海	N700S	2020.07	全 SiC/ 混合	东芝、三菱、日立、富士电机、东洋电机
	315	2021	不详	不详
JR 西	323	2016.12	全 SiC	三菱
	227 系 1000	2019.03	全 SiC	东芝、三菱
	271	2020.03	全 SiC	日立
JR 九	811	2017.04	混合	日立
	821	2019.03	全 SiC	三菱
JR 货	DD200	2018.06	混合	三菱

▲ 日本部分轨交牵引系统采用 SiC 技术情况 来源: 日本铁路技术研究院、行家说 Research

中国也于 2015 年启动了 SiC 地铁技术的研发。截至目前, 已经有超过 8 条地铁线路已经采用了 SiC 牵引系统。2021 年 8 月中国交通运输部文件提出, 要通过 3 ~ 5 年时间, 在动车和城轨牵引系统中完成中车时代 SiC MOSFET 装车应用。

国外方面, 欧美在 2014 年左右就启动了 35 亿元的铁路转型计划, 重点希望通过 SiC 技术取代硅基 IGBT。西门子、CAF、庞巴迪和阿尔斯通等公司通过参加 PINTA 等项目引入了 SiC 器件技术。进入 2022 年, 相关动车和地铁采购 SiC 逆变器的新闻越来越频繁。

全球部分国家 SiC 轨道交通应用情况

中国		日本		欧洲	
2015	启动碳化硅地铁研发	2012.02	地铁银座线	2014	欧盟投资约 35 亿人民币启动 Shift2Rail 项目
2018.11	西安地铁 4 号线	2014	小田急电 1000 列车	2018.03	瑞典斯德哥尔摩 C20 地铁
2019.09	广州 8 号线	2015	JR 东海新干线启用 N700S 列车	2019	西班牙 EUSKOTREN 列车
2020.07	珠海 1 号线	2019.02	东京地铁丸之内线 2101 号列车	2021.03	欧盟批准新铁路创新计划 Horizon Europe 2021-2027
2020.07	武汉东湖有轨电车	2019	山手线启用 E235 列车	2021.08	德国慕尼黑 Avenio 有轨电车
2020.1	上海 8 号线	2021.11	JR 东日本相模线采用 E131 Series 500 列车	2021.12	日立与英国高速二号 (HS2) 签署 171 亿合同
2020.1	上海 8 号线	2022.02	都营地铁三田线启用 6500 列车	2022.02	ABB 获得西班牙 Renfe Operadora 8000 万美元碳化硅牵引系统订单
2021.03	苏州轨交 3 号线	2022.03	JR Central 中央干线上启用 315 列车	2022.05	西门子与三菱电机签署谅解备忘录
2021.05	深圳地铁 1 号线	2022.03	E131-600 动车组在大宫运行		
2021.08	交通运输部发布了《交通强国建设试点工作的意见》	2022.05	东急目黑线启用都营 6500 列车		

▲ 中国、日本、欧洲轨道交通采用 SiC 技术情况 来源: 行家说 Research

随着技术的不断成熟, 交织政策的推动, 行家说 Research 预计 2027 年 SiC 在轨道交通领域的营收将从 2021 年的 0.85 亿美元, 增长到 2.33 亿美元, 年复合增长率达到 18.31%。目前, 除了日本的东芝、三菱、日立等先进者外, 中国的中车、天岳, 以及欧美的 Wolfspeed、英飞凌都加快进入轨道交通领域的步伐。

3.5 数据中心市场

得益于云、AI人工智能、分布式存储、5G等行业的快速发展, Facebook、亚马逊和谷歌等公司云计算数据中心的扩容, 而这也导致对服务器电源和算力电源的需求大幅增长。目前, 在美国, 数据中心的电力约占总用电量的 2%。而中国的数据中心耗电量也逐年飙升, 2021年中国数据中心耗电量已经突破2372亿千瓦时, 预计2030年其耗电量将达到4000亿千瓦时, 将占全国总用电量4%以上。由于能效法规越来越严苛, 硅器件已经无法满足数据中心的节能需求, SiC和GaN逐渐在服务器电源中开始取代硅器件。

据测算, SiC 产品设计的电源充分提高了数据中心电源的热性能, 仅在冷却方面就可以节省高达 40% 的能源成本。从 2010 年到 2020 年, 运行 SiC 器件的服务器节省了 6200 亿度电。数据中心对 SiC 技术的需求非常迫切。

3.6 消费级市场

◎ 3.6.1 空调等家电市场

空调、冰箱、充电头等消费级产品的用量大, 相关能耗问题也非常突出, 仅以中国为例, 国家发展改革委 2022 年 2 月公布数据显示, 我国家电保有量已超过 21 亿台, 以空调为例, 2020 年全国居民平均每百户年末空调拥有量已从 2013 年的 70.4 台增长至 117.7 台。

家电产品是居民家庭的电消费主要产品, 国际能源署 2021 报告显示, 家用电器是居民能源消耗的第二大来源, 占住宅总能耗的 20% 以上, 且该比例预计未来仍将呈增长态势。尤其是空调制冷, 据彭博新能源研究显示, 2018 年全球住宅和商业空调用电量达 1932 万亿瓦时, 中国则占 34%。如果能效平均提升 2%, 则可节省 400 亿千瓦时电量, 几乎接近半个三峡大坝的年发电量。为此, 各国政府也在修订新的能效法规, 以推动这一领域开发绿色节能的产品, 服务“双碳”目标。

从功率器件角度来看, SiC 二极管比普通硅快恢复二极管具有更小的正向导通压降、更高的耐温及高温稳定性, PFC 效率能提升 0.7%-1%, 而且由于 SiC 二极管反向恢复时间很短, SiC 二极管 + 硅基 IGBT 的方案, 可以减轻加在 IGBT 上的漏电流, 使 IGBT 温度降低约 2°C -3°C, 提升了系统整体性能和可靠性。从 2010 年开始, 日本空调厂家就开始选择使用 SiC 技术。

时间	企业	概述	节能效果
2010年9月	三菱电机	SiC 二极管就应用在雾峰 ZW 系列 3.6kW 空调压缩机的电机逆变器中。	周期耗电量从传统机型的 1183kWh 降低到 1110kWh, 减少了约 6%。APF (全年能源消耗效率) 为 6.5。
不详	大金空调	室外机逆变器、风扇、压缩机大量使用 SiC 技术。	逆变器节能 17%, 风扇节能 6%, 压缩机节能 20%。
2018年5月	美的旗下威灵控股与英飞凌创建电机驱动联合实验室, 共同探索 SiC 技术在电机驱动中的更多创新应用。		
2019年3月	美的与三安成立第三代半导体联合实验室, 加快国产芯片导入白色家电行业。		
2021年2月	格力电器公开“SiC 肖特基半导体器件”专利。		

▲ 家电企业的 SiC 技术应用和研发情况 来源: 行家说 Research

受成本所限, 目前 SiC 肖特基二极管在空调市场的占比不高, 约为 5%, 预计未来会逐步增多。预计 2025 年, SiC 在消费级市场的营收将从 2021 年的 800 万美元左右, 增长到 900 万美元。此外, SiC MOSFET 在家电领域也有明确需求。

◎ 3.6.2 手机快充市场

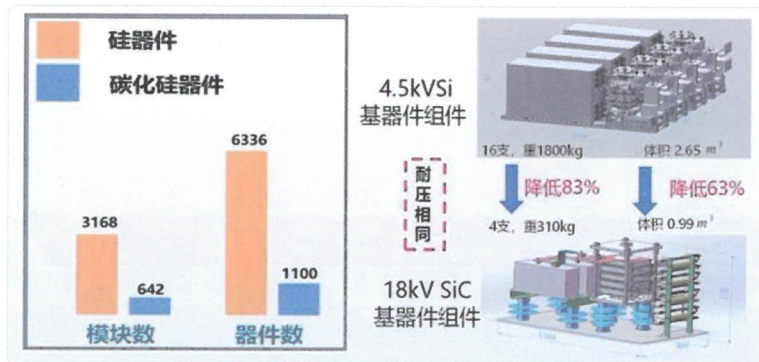
有两个因素在推动手机充电器使用 SiC 二极管。一是 PFC 需求。根据 3C 认证 (中国国家强制性产品认证) 中要求, 75W 以上的快充电源需要配备主动式 PFC 电路, 这是为了增加大功率电源产品的功率因数, 减小谐波对电网的干扰和污染。

二是小型化需求。在升压 PFC 电路中使用 SiC 二极管配合氮化镓, 可以将 PFC 的开关频率由不到 100kHz 提升到 300kHz 以上, 从而可以进一步缩小 PFC 电感体积, 并提高电源的整体功率密度。目前, 手机快充中使用 SiC 二极管已经成为趋势之一, 据估算, 未来氮化镓快充头每年的需求大约为 20-30 亿支, 这对于 SiC 二极管来说将形成 100 亿元级别的潜在需求。

3.7 电网电力市场

要实现碳达峰、碳中和的中长期目标, 还需要整个电力系统的革命, 一是在要调整发电侧的能源结构, 比如采用光伏、风电、水电等清洁可再生能源; 二是提升用电侧的能源利用效率, 例如上述的汽车、数据中心、家电等; 三是提升电力系统中变电、输电和配电环节的能效。

高压柔直输电将是 SiC 材料和器件技术的“舞台”。SiC 器件的优势在于高压 (达数万伏)、耐高温 (大于 500°C), 可突破硅器件在电压 (数 kV) 和温度 (小于 200°C) 等方面的局限性。采用万伏千安级的 SiC 器件可使换流器体积重量减小一半以上, 从而大大降低平台造价。如果采用 18kV SiC IGBT 替代 4500V 硅基 IGBT, 理论上可以减少 3/4 器件数量。北京智慧能源研究院数据显示, 单个换流阀的功率模块数量可以从 3168 个减少到 642 个, 节省了 80%; 器件数量从 6336 只减少到 1100 只, 节省了 82.63%。



▲ 不同换流阀方案的模块和器件数量对比 来源: 北京智慧能源研究院

中国从 2016 年就开始在光伏电站中采用碳化硅技术, 截至目前全国已经有超过 10 个柔直输电网应用案例。

中国基于碳化硅的柔直工程			
序号	时间	实施单位	项目概况
1	2016	国家电网	国产 1200V/20A SiC 二极管和 1200V SiC MOSFET 在青海乌兰铜普光伏电站示范应用。
2	2018 年 8 月	国家电网	智能柔性直流配电网示范工程在浙江杭州江东新城投入运行。
3	2018 年 12 月	南方电网	多端交直流混合柔性配网互联工程在珠海唐家湾成功投运。
4	2019 年 7 月	国家电网	连云港连岛交直流配网项目投入运行
5	2019 年 10 月	国家电网	0.2MW 直流配电示范工程在河南平顶山投运。
6	2021 年 5 月	国家电网	光储直柔多端口直流微网在浙江嘉兴海宁市尖山投运。
7	-	南方电网	深圳柔性配网采用 2MW 级全碳化硅直流变压器。
8	-	南方电网	佛山柔性配网采用 2MW 级全碳化硅直流变压器。
9	2022 年	国家电网	在雄安新区建设全碳化硅柔性变电站。
10	2022 年 9 月	国家电网	35 千伏 5 兆瓦全 SiC 多功能柔性变电站示范工程在河北保定投运。

▲ 中国基于 SiC 的柔直输电网应用案例 来源: 行家说 Research

电网采用的 SiC 器件可分成两类, 一类是中低压的 SiC MOSFET 器件, 电压范围为 1200V-6500V, 主要用在光伏和储能等配电网, 未来三五年 3300V 中低压的国产 SiC 器件能够进入批量化应用。第二类是高压大电流 SiC 器件, 主要应用于电网输电环节的大容量变换设备。按照国家科技部制定的总体目标, “十四五” 末期万伏千安级 SiC 器件会出样品, 到 2030 年万伏千安级 SiC 器件能实现示范工程小批量应用, 2035 年左右应该能够实现商业化应用。

目前, SiC 在电网输配电领域的渗透率大约为 0.2%, 预计 2030 年渗透率将超过 5%, 2050 年将超过 50%。随着技术成熟、芯片尺寸增加, 以及 SiC 器件成本持续下降, SiC 功率半导体将在许多领域被采用, 从而为全球绿色低碳经济提供助力。

总体而言, SiC 市场的兴起受益于全球能效法规的越来越严苛。对于国产 SiC 来说, 在手机、笔记本电脑快充、电动工具等消费级市场已经大批量应用 SiC 二极管; 而诸如数据中心、光伏、充电桩等工业领域已经大批量应用 SiC 二极管, 对 SiC MOSFET 的需求也越来越明显; 车规方面, 目前车载 OBC 和 DC/DC 已经采用了国产 SiC 二极管, SiC MOSFET 也已经爬坡上量; 主驱逆变器方面, 预计很快也将会有国产 SiC MOSFET 的身影。

第四章、全球碳化硅产业扩产及中国碳化硅项目布局概况

以下联合出品方及参编单位对本章节的特别贡献

A 级参编单位



B 级参编单位



参与单位



4.1 碳化硅产业整体扩产概况

自2018年特斯拉Model3发布以来, SiC产业已经预计到市场需求即将爆发, 随后 Wolfspeed、安森美、罗姆、SK Siltron CSS等国外碳化硅大企业就开始大幅扩产, 但受疫情因素影响, 这些扩产项目直到进入2022年后才终于逐个投产。

企业	Wolfspeed	罗姆	安森美	SK Siltron CSS
开建时间	2019.05	2019.02	2021.12	2020
投产时间	2022.04	2022.06	2022.08	2022.08
投资金额	10 亿美元	200-1700 亿日元		6 亿美元
产能变化	扩大 30 倍	产能增加 3-6 倍	扩产 5 倍	12 万片 -50 万片

▲ 国外大企业碳化硅工厂相继投产 来源: 行家说 Research

国内方面, 无论是衬底、外延, 还是器件和模组, 每个环节的领军企业也都从2021年开始加快产能的建设和扩产, 比如三安和同光股份都在着手二期项目的建设。

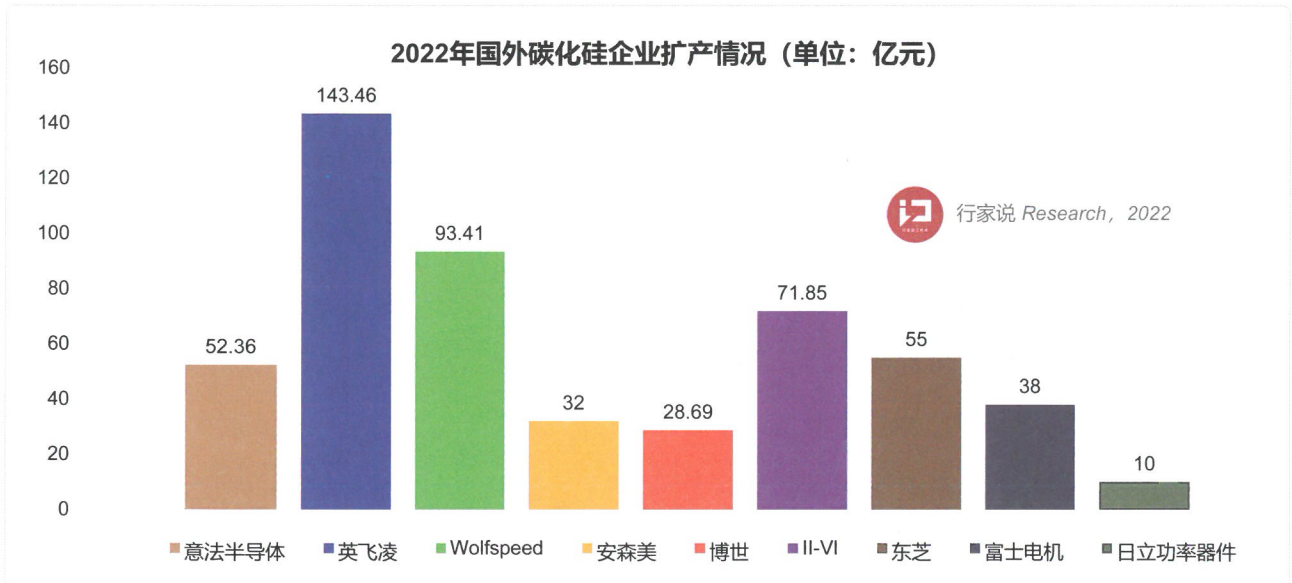
企业	三安光电 (二期)	士兰微	天科合达 (北京)	同光股份 (二期)
投资金额	80 亿元	15 亿元	9.5 亿	10 亿元
产能	36 万片	14 万片	12 万片	10 万片

▲ 国内大企业碳化硅工厂进展 (部分代表) 来源: 行家说 Research

进入2022年, 随着新能源汽车、储能、光伏和充电桩等可再生能源领域的需求越来越明朗, 众多市场需求继续爆发, 鼓励着更多碳化硅企业扩大产能或新建项目。

4.2 2022 年国外碳化硅企业扩产概况

行家说三代半根据公开信息统计, 2022 年, 国外合计有 31 个碳化硅相关项目扩产或投产, 合计投资金额超过了 800 亿人民币, 其中新增衬底产能超过了 250 万片。仅意法半导体、英飞凌、Wolfspeed 等 9 家企业的投入就高达 524 亿人民币。



▲ 2022 年国外碳化硅企业扩产情况 来源: 行家说 Research

详细的扩产项目信息可以查看下表:

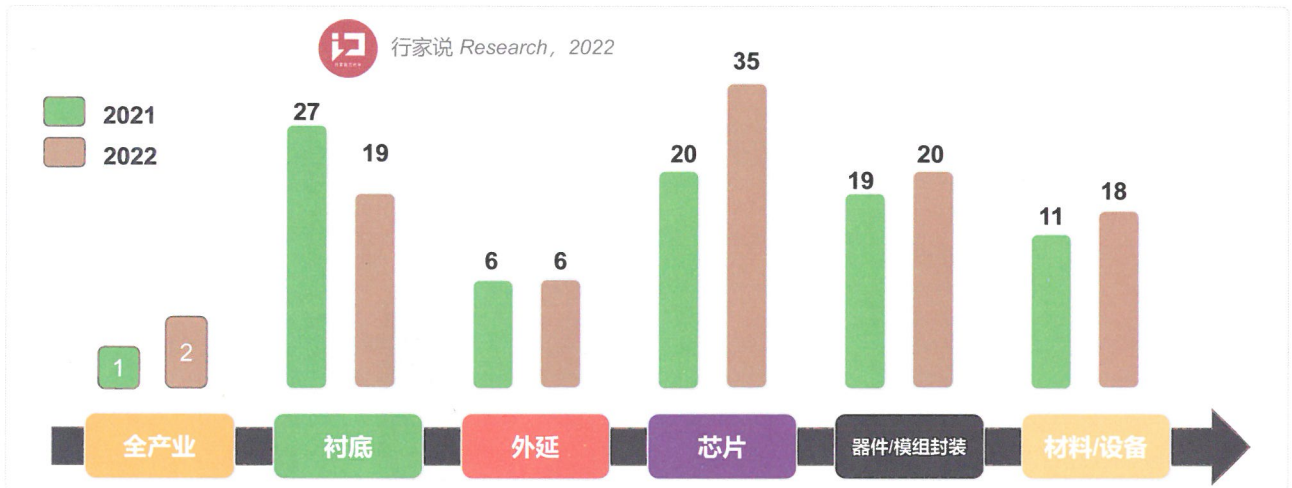
2022 年国外碳化硅企业项目进展概况 (31 个项目)					
时间	企业	概况	金额	年产能	位置
2022 年 10 月	意法半导体	新建 SiC 衬底工厂 2023 年 1 月首批产品量产。	7.3 亿欧元	>37 万片	意大利 卡特尼亚
2022 年 10 月	日立功率器件	宣布投资扩产 到 2026 财年将 SiC 功率半导体产能提高 3 倍	数百亿日元		日本 临海
2022 年 10 月	东部半导体	订购 GaN 和 SiC 生产设备 推进项目量产商业化			韩国
2022 年 10 月	恒诺微	子公司 Power Master 将建设硅和碳化硅电源管理 器件生产线, 2022 年底或 2023 年初开始生产	0.65 亿美元		韩国
2022 年 9 月	Wolfspeed	投资新建世界上最大的 8 吋碳化硅衬底工厂 将产能增加 10 倍以上	13 亿美元		美国 北卡查塔姆
2022 年 9 月	SK Siltron CSS	SiC 衬底新工厂正式建成投产	6 亿美元	50 万片	美国密歇根
2022 年 9 月	KISAB	完成了 750 万欧元融资用于扩大碳化硅衬底生产			瑞典
2022 年 9 月	住友金属	开建 8 吋 SiC 复合生产线, 预计 2024 年完工		12 万片	日本
2022 年 9 月	安森美	扩建碳化硅外延厂, 产能将提高 16 倍	32 亿元		捷克 罗兹诺夫

时间	企业	概况	金额	年产能	位置
2022年8月	西格里碳素	石墨产品产能扩展，未来2年内完成	数百万欧元		德国
2022年8月	安森美	GTAT 碳化硅新工厂完成扩建，产能扩充5倍			美国哈德逊
2022年7月	博世	碳化硅工厂正在有计划地扩建中	4亿欧元		德国 罗伊特林根
2022年7月	英飞凌	宽禁带半导体第三个厂区正式奠基	20亿欧元		马来西亚 居林
2022年7月	安森美	碳化硅研究中心及制造工厂奠基 产能将扩大到目前的10倍以上	10亿美元		韩国京畿道富川市
2022年6月	罗姆	碳化硅半导体工厂开业 2025年投资扩大到1700亿日元	200亿日元		日本
2022年5月	OXIDE	建设8英寸SiC衬底厂，基于名古屋大学液相法	4亿日元		日本
2022年5月	意法半导体	扩大SiC模块产量，洁净室面积扩大了30%	2.44亿美元		西非摩洛哥
2022年4月	丹佛斯	与贺利氏开设Die Top System生产线，生产电动机电源模块，于2023年建设第二条生产线			德国哈瑙
2022年4月	Wolfspeed	碳化硅工厂正式开业 投资10亿美元产能扩大30倍	10亿美元		美国北卡
2022年3月	Halo Industries	计划提高碳化硅晶圆激光切割产能		1.2万片	美国 圣克拉拉
2022年3月	东芝	宣布开始在内部生产碳化硅外延片			日本
2022年3月	II-VI	碳化硅衬底和外延工厂进行大规模扩建 产能增加6倍	10亿美元	100万片	美国宾州 / 瑞典
2022年3月	昭和电工	碳化硅衬底项目扩产，预计2023年12月完工	3.4亿人民币		日本
2022年3月	Soitec	Bernin 4 碳化硅衬底工厂奠基，2024年量产	3.3亿欧元	50万片	法国伯宁
2022年3月	iA集团	子公司TRinno Technology计划建设碳化硅项目	900亿韩元		韩国釜山市
2022年2月	博世	再投资2.5亿欧元，进一步扩大碳化硅等产能 新生产设施计划于2025年投入使用	2.5亿欧元	数亿颗	德国 罗伊特林根
2022年2月	SK Siltron	扩建龟尾2厂，以生产碳化硅晶圆后段工艺	1900亿韩元		韩国龟尾
2022年2月	东芝	功率器件扩产 包括建设8英寸的碳化硅和氮化镓生产线	55亿		日本
2022年2月	TOREX	宣布启动6英寸碳化硅器件线，并将在今年推出碳化硅MOSFET			日本鹿儿岛
2022年1月	富士电机	扩大子公司津轻半导体碳化硅器件产能	38亿元		日本
2022年1月	Senic	正式建设SiC衬底项目			韩国

▲ 2022年国外碳化硅企业项目进展概况 来源：行家说 Research

4.3 2022 年中国碳化硅企业扩产概况

据行家说三代半不完全统计, 2021 年大约全国新增了 84 个碳化硅项目, 而进入 2022 年, 全国再次新增了 101 个碳化硅相关项目。其中, 衬底、芯片和模组项目增幅最大。



▲ 2021-2022 年国内碳化硅产业各环节项目新增数量对比 来源: 行家说 Research

衬底是主要的产能瓶颈, 2022 年众多企业加速推进相关项目, 仅烁科晶体、天岳先进、重投天科和同光股份 4 家企业就打算合计投资超过 100 亿元, 将 SiC 衬底产能扩大到 300 万片左右。

企业	烁科晶体	天岳先进	重投天科	同光股份
投资金额	30 亿元	30 亿元	32.7 亿元	10 亿元
产能	200 万片	25 万片	10 万片	60 万片

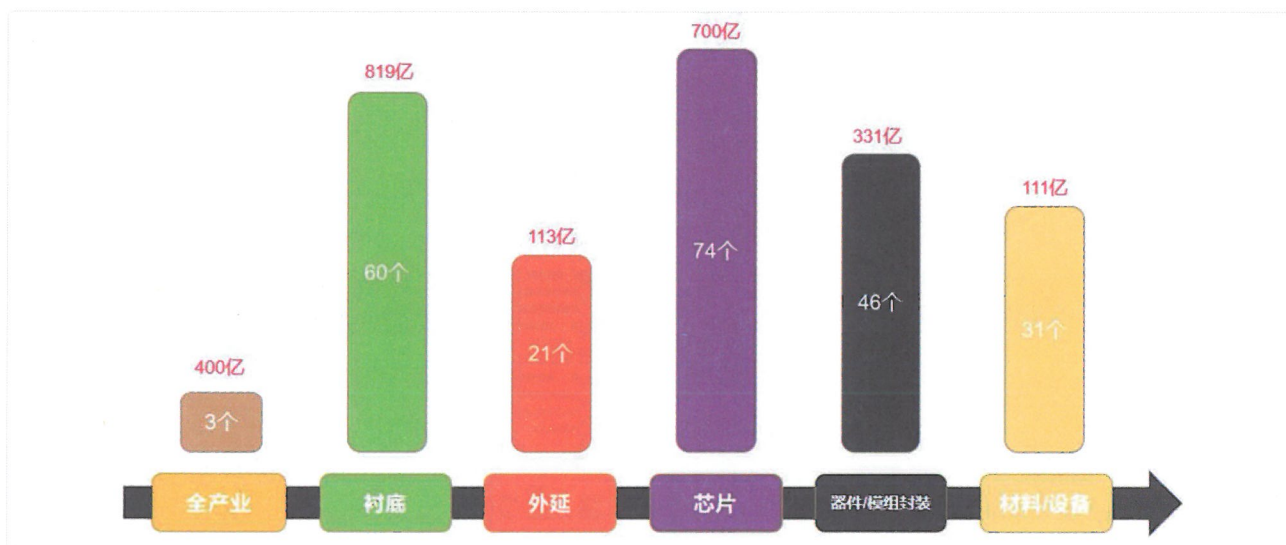
▲ 国内主要厂商的扩产计划 来源: 行家说 Research

此外, 行家说三代半根据公开信息统计, 截止目前, 国内合计大约有 235 个碳化硅相关的项目, 分布在全国各个地区, 下个章节将分别进行详细介绍。(注: 由于各种原因, 部分项目可能已经停建、放弃等, 下述项目统计表仅供参考, 未来持续更新)

4.4 中国碳化硅项目布局

中国的碳化硅建设项目,分环节来看,其中有3家企业在建设从衬底到器件的全产业链项目;项目最多的是芯片环节,大约有74个;其次是碳化硅衬底项目,大约有60个;紧随其后的是器件和模组的封装项目,大约46个;材料和设备合计也超过了31个。

投资金额方面,截止目前,全国所有项目计划投资金额超过2400亿元,其中,衬底项目金额最高合计819亿元;其次是芯片环节,达到700亿元;器件封装和模组环节也达到了331亿元,外延环节的投资金额为113亿元。



▲ 中国大陆碳化硅产业各环节项目数量及投资金额 来源:行家说 Research

◎ 4.4.1 全产业链项目

截止目前,只有三安光电在湖南长沙真正建成了单个碳化硅垂直整合全产业链项目,这是国内首条、全球第三个全产业链项目,项目的总体投资达到160亿元,月产能5万片。此外,同芯积体电路和中能国泰也计划建设从衬底到器件模组的全产业链碳化硅项目,目前相关项目已经签约。

时间	企业	概况	金额	年产能	位置
2022年9月	同芯积体电路	第三代半导体产业园项目签订框架协议,启动改造	160亿元	2.5万颗晶锭	长春二道区
2022年7月	湖南三安	6吋全产业链碳化硅项目二期集中开工,计划于今年投产	80亿元	60万片	湖南长沙
2022年3月	中能国泰	碳化硅材料+IDM一体化项目完成战略合作框架协议签署	>100亿美元		山西太原
2021年6月	湖南三安	SiC全产业链项目点亮	80亿元	36万片	湖南长沙

▲ 中国碳化硅全产业链项目 来源:行家说 Research

同时, 有 2 家国企已经实现了全产业链布局, 其中, 中国电子科技集团的产业链条是最长的, 它通过旗下各个子公司, 实现了从材料设备、衬底、外延、器件和模组都有涉及, 同时 2022 年它开始对相关子公司进行重组。



▲ 中国电科宽禁带半导体产业布局 来源: 行家说 Research

另一家国企——华大半导体则通过投资中电化合物、飞程半导体和积塔半导体的方式, 实现了全产业链的布局。这种模式实现了从衬底端、外延端、制造端等环节无缝衔接, 不仅能够帮助各个环节加速量产、提升技术, 例如, 2020 年飞程半导体协助积塔量产 6 英寸 SiC 二极管, 2021 年第一代 SiC MOSFET 在积塔实现量产, 2022 年第二代 SiC MOSFET 在积塔实现量产。同时这种模式也让飞程半导体在衬底、外延和生产能力上得到了华大半导体的鼎力支持, 在获得产能保障的同时也将保持领先优势。



▲ 华大半导体碳化硅产业布局 来源: 行家说 Research

◎ 4.4.2 碳化硅衬底项目

从 2011 年算起，截止目前，中国大陆合计约有 61 个碳化硅衬底项目，合计投资金额约 800 亿人民币。这些项目公布的产能合计超过了 600 万片。

主要的建设单位包括：烁科晶体、合盛新材料、中电化合物、天科合达、天岳先进、同光股份和露笑半导体等。

不过，大多数项目正在建设当中或者才刚签约，尚未形成规模化量产，而且早期已建成的项目大多生产 4 英寸的半绝缘碳化硅衬底，截至目前，中国大陆的导电型碳化硅衬底有效年产能大约为 15 万片。随着越来越多的衬底项目投产、建设，未来导电型碳化硅衬底的产能将会逐步释放。详细项目信息可以查看下表：

时间	企业	项目概况	金额	年产能	位置
2022 年 10 月	中电化合物	宽禁带半导体材料项目进入宁波“十四五”规划项目汇总表	10.5 亿元	8 万片	浙江宁波
2022 年 10 月	高金富恒	对国宏中能 SiC 衬底项目重组，将实施项目二期工程	7 亿元	11 万片	山东东营河口区
2022 年 9 月	世纪金芯	6 英寸 SiC 单晶衬底项目投产	4.05 亿元	3 万片	安徽合肥
2022 年 9 月	瀚海半导体	拟建 400 台 SiC 长晶炉及切磨抛生产线，后期建 SiC 外延片项目	9 亿元		内蒙古九原区
2022 年 9 月	超芯星	SiC 衬底产业化项目签约，计划生产 6-8 英寸 SiC 衬底	65 亿元	150 万片	南京江北区
2022 年 9 月	天成半导体	6 英寸 SiC 晶体项目二期厂房接近验收，预计 2023 年 1 月建成		1.2 万片	山西忻州市
2022 年 8 月	中弘晶能	总投资约 50 亿元，二期投资 30 亿元主要生产 SiC 半导体	30 亿元		浙江台州黄岩区
2022 年 8 月	赛飞凌	项目环评公示，计划年产 SiC 单晶 2.16 吨、SiC 外延片 1.5 万片	1.14 亿元	1.5 万片	浙江省衢州市
2022 年 8 月	同光股份	SiC 单晶衬底项目二期投产，600 台长晶炉。拟建三期 2000 台 SiC 晶体基地及年产 60 万片衬底加工基地，拟 2025 年末满产	10 亿元	10 万片	河北保定涿源
2022 年 7 月	烁科晶体	对外透露将扩建碳化硅衬底生产线	30 亿元	200 万片	山西太原
2022 年 6 月	青禾晶元	项目签约，拟投资将建设国内首条复合衬底生产线	9.9 亿元		天津
2022 年 6 月	上机数控	弘元半导体 SiC 衬底项目签约落户			江苏无锡滨湖区
2022 年 5 月	天科合达	新疆 SiC 项目二期 6 月竣工达产，安装 100 台套单晶生产设备	1 亿元	1500 锭	新疆
2022 年 4 月	卓弘半导体	SiC 晶体项目集中签约，2022 年 9 月已在施工	20 亿元	20 万片	江西抚州南丰县
2022 年 4 月	天达晶阳	SiC 晶片二期 4-8 吋项目公布，新增 400 台套完整生产线	7.31 亿元	12 万片	河北邢台清河县
2022 年 3 月	天岳先进	上海 SiC 半导体材料项目封顶	25 亿元	30 万片	上海临港
2022 年 3 月	博蓝特	设立子公司，计划建设第三代半导体研发中心			福建厦门
2022 年 3 月	宏丰电工	募资建设 SiC 单晶研发项目	2000 万元	1 吨	浙江温州
2022 年 2 月	罡丰科技	SiC 材料产业化项目生产车间已建成			江苏南通高新区
2022 年 2 月	华芯晶元	化合物晶片衬底项目 (SiC/GaN) 开工	7 亿元	33 万片	山东青岛高新区
2021 年 11 月	微芯长江	SiC 晶圆片项目建筑工程竣工，4 英寸 3 万片、6 英寸 12 万片	13.5 亿元	15 万片	安徽铜陵
2021 年 11 月	天成半导体	6 英寸 SiC 晶体生产项目一期通过审批，2022 年完成中试投产	3000 万元	1500kg	山西太忻

时间	企业	项目概况	金额	年产能	位置
2021年11月	加睿晶欣	GaN/SiC 晶体衬底材料项目建筑主体已经封顶, 长晶炉 1260 台	65 亿元	21 万片	山东济宁
2021年11月	天科合达	北京 SiC 衬底产业化基地建设封顶, 2022 年年初投产	9.5 亿元	12 万片	北京大兴区
2021年11月	露笑半导体	一期进入投产, 年产 24 万片导电型 SiC 衬底片和 5 万片外延片	21 亿元	24 万片	安徽合肥长丰县
2021年10月	晶盛机电	募资建设宁夏创盛 6 英寸 SiC 衬底项目	33 亿元	40 万片	宁夏银川
2021年10月	科友半导体	SiC 产学研聚集区一期项目封顶, 分两期建设建设	10 亿元	10 万片	黑龙江哈尔滨
2021年9月	TBD	6 英寸 SiC 晶片项目审批公告布, 计划在 2021 年 9 月开工	3.58 亿元	1 万片	山西临汾
2021年9月	东旭集团	签订投资合作意向书, 包括建设 SiC 长晶及衬底生产线	120 亿元		内蒙古包头市
2021年9月	同光股份	4-6 英寸 SiC 单晶衬底项目一期投产	40 亿元	10 万片	河北保定市涿源
2021年9月	南沙晶圆	SiC 项目 1-4# 厂房主体结构封顶, 生产衬底片和外延片	9 亿元	20 万片	广东广州南沙区
2021年9月	天科合达	江苏 SiC 衬底二期扩建项目通过了竣工环境保护验收	1.5 亿元	3 万片	江苏徐州市
2021年8月	兴立科技	SiC 衬底项目备案, 生产高阻 SiC 衬底和射频外延片		10 万片	河南三门峡市
2021年8月	艾儿维思智能	生产项目签入园合同, 分两期建设, 一期投资 1 亿元 年产 5000 片 SiC 晶圆片, 3 万吨单质碳晶体纳米粉末	3 亿元	5000 片	湖南怀化高新区
2021年8月	II-VI 高意	SiC 衬底片技改项目启动实施		50 万片	建省福州市
2021年7月	晶越半导体	6 英寸 SiC 晶片项目一期环评公示	1.35 亿元	1.2 万片	浙江嵊州
2021年7月	合盛新材料	SiC 衬底及外延片项目环评公示	3.07 亿元	4 万片	浙江宁波
2021年6月	天达晶阳	4 吋 SiC 晶片一期项目已投产, 54 台单晶生长炉	7337 万元	1.2 万片	河北邢台清河县
2021年6月	国宏中能	SiC 项目一期项目投产 生产 4/6 英寸 4HN 型导电 SiC 衬底片和 4H 半绝缘 SiC 衬底片	7 亿元	11 万片	山东东营河口区
2021年6月	博雅新材料	高性能闪烁晶体项目二期工程 3 号车间封顶, 用于 SiC 研发生产	15 亿元		四川眉山市
2021年6月	重投天科	SiC 单晶和外延片生产线项目遴选方案公示 衬底 10 万片、外延 25 万片	32.7 亿元	10 万片	广东省深圳市
2021年4月	II-VI	建立导电型 SiC 衬底后段加工线			福建省福州市
2021年4月	晶格领域	4-6 英寸液相法 SiC 晶体中试生产线试产, 总投资 7.5 亿元 一期投资 5000 万元, 10 台长晶炉	5000 万元		北京顺义
2021年4月	东尼半导体	募资建设 SiC 半导体材料项目, 将于 2023 年 11 月达产	4.68 亿元	12 万片	浙江吴兴
2021年2月	亮晶新材料	SiC 单晶圆项目签约落户	20 亿元	8 万片	新疆
2021年1月	微芯长江	SiC 中试基地启动		2540 片	上海嘉定
2021年1月	卓弘半导体	SiC 晶圆项目落户, 2022 年 2 月开工建设	20 亿元	20 万片	江西抚州南丰县
2020年10月	天岳先进	SiC 衬底项目投产	10 亿元	7 万片	山东济宁
2020年11月	中科启辰	SiC 晶体工艺技术及相关关键制备设备研发项目立项, 2021 年推进			内蒙呼和浩特
2020年11月	露笑科技	SiC 产业园项目开工	100 亿元	29 万片	安徽合肥
2020年6月	上海合晶	募资研发 6 英寸 SiC 衬底			上海松江区
2020年3月	超芯星	SiC 衬底项目签约		3 万片	江苏南京

时间	企业	项目概况	金额	年产能	位置
2020年5月	烁科晶体	SiC 材料产业基地投产	50 亿元	15 万片	山西太原
2020年1月	溢泰半导体	SiC 晶片产业园项目一期达产	21 亿元	6 万片	黑龙江大庆
2019年5月	博蓝特	签署项目投资协议，计划生产 SiC 衬底及蓝宝石衬底	10 亿元	15 万片	浙江金华
2019年12月	天科合达	江苏 SiC 衬底项目一期投产	3 亿元	4 万片	江苏苏州
2019年12月	中电化合物	宽禁带半导体材料项目签约	10.5 亿元	2 万片	浙江宁波
2019年11月	华进创威	SiC 单晶片生产项目二期许可证获批			北京
2019年	北电新材	拟建设 SiC 衬底生产项目	5.8 亿元	3.6 万片	福建泉州
2014年3月	天科合达	新疆 SiC 晶片高技术产业化示范工程项目验收。		7 万片	新疆石河子市
2011年6月	华进创威	3 英寸 SiC 单晶片产业化项目被发改委列入产业化专项			北京

合计 61 个项目，819.5 亿元，613.45 万片
 (注：由于各种原因，部分项目可能已经停建、放弃等，上述项目统计表仅供参考，未来持续更新)

▲ 中国碳化硅衬底项目概况 来源：行家说 Research

◎ 4.4.3 碳化硅外延项目

除了少数器件企业在自有产线生产碳化硅外延片外，公开信息显示，截至目前，国内合计有 27 个碳化硅外延项目，合计投资金额超过了 110 亿元，公布的产能合计超过 260 万片。天域半导体和瀚天天成是中国大陆最早的第三方碳化硅外延供应商，在 2012 年 2 家企业就已经建成了碳化硅外延项目。

其他主要的建设单位包括：合盛新材料、中电化合物、百识电子、重投天科和普兴等。详细项目信息可以查看下表：

时间	企业	概况	金额	年产能	位置
2022年10月	中电化合物	宽禁带半导体材料项目进入宁波“十四五”规划项目	10.5 亿元	8 万片	浙江宁波
2022年8月	普兴电子	6 英寸碳化硅外延片搬迁项目 2022 年底全面竣工	5 亿元	36 万片	河北石家庄鹿泉
2022年8月	赛飞凌	SiC 项目环评公示，计划生产 SiC 单晶、SiC 外延	1.14 亿元	1.5 万片	浙江省衢州市
2022年5月	瀚天天成	碳化硅产业园项目（二期）完成主体封顶	13.4 亿元	40 万片	福建厦门
2022年4月	天域半导体	将建 6-8 英寸碳化硅外延片生产线，预计 2025 年竣工投产		100 万片	广东东莞
2022年3月	天域半导体	碳化硅外延设备产业化应用项目获得广东省发改委复核通过	2.138 亿元	2 万片	广东东莞
2022年2月	希科半导体	碳化硅衬底修复外延验证技术研发项目	7620 万元	5000 片	浙江苏州
2022年1月	百识电子	第三代半导体外延项目集中签约	8 亿元		江苏扬州江都
2021年11月	露笑半导体	一期进入投产阶段，生产 SiC 衬底和外延片	21 亿元	24 万片	安徽合肥长丰县
2021年9月	密科 / 先进	密科新能源、台湾先进半导体碳化硅外延项目签约			江苏省南京浦口
2021年9月	国盛电子	第三代化合物外延材料产业基地项目签约落户			江苏南京江宁
2021年9月	南砂晶圆	SiC 项目厂房主体结构封顶，生产衬底片和外延片。	9 亿元	20 万片	广东广州南沙区
2021年7月	合盛新材料	6 英寸 SiC 碳化硅衬底及外延片项目环评公示	3.07 亿元	2 万片	浙江宁波

2021年6月	重投天科	SiC 单晶和外延片生产线项目遴选方案公示	32.7 万片	25 万	广东省深圳市
2020年7月	松山湖材料实验室	中科汇珠 SiC 外延工艺研发产线科研项目获得验收			广东东莞
2020年3月	基本半导体	碳化硅外延片的工艺研发和制造项目开工			江苏南京浦口
2019年12月	中电化合物	宽禁带半导体材料项目签约	10.5 亿元	2 万片	浙江宁波
2019年11月	瀚天天成	碳化硅产业园项目一期扩建	6.3 亿元	6 万片	福建厦门
2018年5月	瀚天天成	碳化硅产业园 6 英寸 SiC 外延晶片产业化项目备案			福建厦门
2012年4月	瀚天天成	SiC 外延生产线正式投产			福建厦门
2012年	天域半导体	建成 SiC 外延生产线		2-3 万片	广东东莞
合计 21 个项目, 113.01 亿元, 267 万片 (注: 由于各种原因, 部分项目可能已经停建、放弃等, 上述项目统计表仅供参考, 未来持续更新)					

▲ 中国碳化硅外延项目概况 来源: 行家说 Research

◎ 4.4.4 碳化硅芯片项目

从 2011 年至今, 国内公布的碳化硅芯片工艺生产线 (包括代工线) 合计有 75 个, 合计投资金额超过 700 亿元, 公布的年产能超过 370 万片。泰科天润、世纪金光、中国电科 55 所、国家电网和中车时代是国内最早建设碳化硅芯片生产线的企业。此外, 其他建设建设单位还包括安海半导体、基本半导体、比亚迪、斯达、华润微、士兰微等。

不过, 大多数生产线还在建设当中或者刚签约, 目前已建成的碳化硅芯片线大约有 17 条 (包括中试线), 而且极少生产线能够高良率生产 SiC MOSFET。详细项目信息可以查看下表:

时间	企业	概况	金额	年产能	位置
2022年10月	士兰微	6 吋 SiC 功率器件生产线通线	7.5 亿元	14.4 万片	浙江杭州
2022年10月	基本半导体	新能源汽车用 SiC MOSFET 芯片项目环评公示		7.2 万片	广东深圳光明
2022年9月	绿能芯创	6 寸 SiC 半导体芯片生产线建设项目签约	35 亿元		安徽合肥
2022年9月	苏州赛晶	签约落户, 生产硅基 MEMS 器件、SiC 器件等			江苏苏州高新区
2022年9月	BRUCKEWELL	柏科电子 SiC 器件项目落户			浙江杭州临平
2022年9月	扬杰电子	2024 年增建一条 6 英寸 SiC 芯片生产线		6 万片	湖南长沙
2022年9月	安海半导体	正在建设 SiC 晶圆线, 预计 2023 年完成流片	10 亿元		山西
2022年9月	瑞能半导体	瑞能微恩半导体 (北京) 6 寸晶圆线签约, 2025 年满产	9.4 亿元	12 万片	北京顺义
2022年9月	南砂晶圆	子公司中晟芯科半导体 SiC 芯片实验室项目环评公示	7500 万元	1200 片	广东广州南沙
2022年9月	中航九院 771 所	SiC 半导体生产制造及封装基地项目签订战略合作协议			河南郑州
2022年8月	积塔半导体	SiC 等先进车规级芯片扩产项目开工		36 万片	上海临港
2022年8月	泰科天润	完成用地竞标, 用于建设研发总部及 SiC 功率器件生产基地			北京顺义
2022年7月	瞻芯电子	6 英寸 SiC 芯片车规级工厂投产	5 亿元	30 万片	浙江义乌
2022年7月	国扬电子	车规级 SiC MOSFET 芯片和功率模块项目公示		1000 万颗	江苏扬州

时间	企业	概况	金额	年产能	位置
2022年7月	锆威特	募资用于 SiC 器件升级以及 SiC 功率模块的规模化量产。	近 0.9 亿元		
2022年6月	国联万众	高压 SiC MOSFET 及高压功率模块封装项目环评公示	3.13 亿元		北京顺义
2022年6月	深圳企业	项目达成意向，将建设 6-8 英寸兼容 SiC MOSFET 量产线	45 亿元		江苏南通如东
2022年6月	国联万众	SiC/GaN 芯片、GaN 功放、sic 模块、sic 单管项目公示		12 万片	北京顺义
2022年6月	阿基米德	环评公示，年产功率器件 5 千万只，模块 30 万只	1.2 亿元	5000 万	安徽合肥
2022年5月	芯粤能	SiC 芯片制造项目主体工程封顶	75 亿元	48 万片	广州南沙
2022年5月	海科电力	SiC 电力电子芯片制造项目签约，项目已推进施工	7.1 亿元		浙江省嘉兴市
	复旦大学	宁波研究院宽禁带半导体材料与器件研究所建设虚拟 IDM 项目	4.6 亿元		浙江宁波
2022年5月	大唐半导体	子公司华芯威半导体 SiC 投资项目达成合作共识			山东威海市
2022年4月	宽能半导体	SiC 晶圆代工签约	14 亿元		江苏扬州
2022年4月	中车时代	SiC 芯片生产线技术能力提升建设项目启动建设	4.62 亿元	2.5 万片	湖南株洲
2022年4月	德微创芯	SiC 功率芯片项目备案获得批复	6.66 亿元	9600 片	安徽蚌埠铜陵
2022年4月	清芯半导体	6 英寸 SiC 功率器件中试生产线已建设完成			广东东莞
2022年3月	平创半导体	扩增 6 英寸 SiC 芯片研发生产线研发和生产设备		1 亿元	重庆市
2022年3月	昕感科技	项目签约，将建设 SiC 功率器件芯片及模组生产线	20 亿元		江苏省江阴
2022年3月	积亚半导体	公布建设 SiC 芯片、功率模块等项目	67 亿新台币		中国台湾新竹
2022年3月	中芯微电子	SiC 分立器件芯片制造项目进入市级重点项目名单		80 亿只	山东省滨州市
2022年3月	慧高信息	第三代半导体（SiC、氮化镓）产业项目对接			河北廊坊
2022年3月	芯睿电子	SiC 功率器件项目完成工艺设计，目前进入流片验证阶段			河南新乡
2022年3月	中科汉韵	SiC MOSFET 二期产线设计与建设如期开始		6 万片	江苏徐州
2022年2月	方正微电子	建设项目开始施工，改进 6 吋线，新建 8 吋线	100 亿元		深圳龙岗区
2022年1月	新洁能股份	SiC 产业化项目环评公示	7.3 亿元	825.6 万颗	江苏无锡
2021年12月	英唐智控	计划建 6 英寸 SiC 线，预计 2023 年投产，2025 年达产	18 亿元	72 万片	成都
2021年11月	华润上华	发布设备招标公告，扩建 SiC 晶圆生产线			江苏无锡
2021年11月	恒诺微电子	SiC 器件和模块项目云签约	1 亿美元		浙江嘉兴
2021年10月	瑞能半导体	功率半导体器件项目集中签约	4.5 亿元		上海金山
2021年9月	中国电科 2 所	SiC 芯片 mini 线，2022 年 2 月产出第一批 SiC 芯片。			山西太原
2021年9月	芯睿电子	SiC JBS 功率器件关键技术研发项目发榜	1000 万元		河南新乡市
2021年9月	民德电子	募资投资 SiC 功率器件的研发和产业化项目等	5 亿元	3.6 万片	浙江丽水
2021年8月	士兰微	SiC 功率器件中试线通线			浙江杭州
2021年8月	修雷明等人	SiC 实验室项目达成合作协议，生产 SiC 功率芯片。	8000 万元	6 万片	山西阳城
2021年7月	泰科天润	6 英寸线一期 6 万片已通线，拟 2023 年二期扩至 10 万片	7 亿元	10 万片	湖南长沙
2021年7月	世纪金光	签约建设 6~8 英寸 SiC 芯片生产线，分三期完成建设	35 亿元	22 万片	浙江金华
2021年7月	基本半导体	第三代半导体产业基地已于开工建设，预计 2023 年投产	3.5 亿元	200 万只	深圳坪山
2021年6月	比亚迪半导体	募资建设 SiC 晶圆生产线，建设期为 5 年	7.3 亿	24 万片	浙江宁波

时间	企业	概况	金额	年产能	位置
2021年6月	斯达半导体	募资建设 SiC 芯片、功率模块等项目	12 亿元	8 亿颗	浙江嘉兴
2021年5月	中科汉韵	SiC 器件项目一期通线		6 万片	江苏徐州
2021年4月	燕东微	硅器件线改造成 SiC 器件线工艺研究项目验收通过		1.2 万片	北京
2021年4月	冠杰电子	SiC 器件项目开工	5 亿元		山东临沂
2021年2月	瑞美科技	SiC 功率器件及模组产业化项目开工	15.74 亿元	3000 万只	浙江嘉兴海宁
2021年1月	富能半导体	功率半导体项目实现产品下线	60 亿元	12 万片	山东济南
2020年11月	中芯国际	化合物半导体生产线项目签约落户			浙江绍兴
2020年9月	晶恒电子	以千瓦级大功率低成本 SiC 开关器件为研究重点			山东济南
2020年9月	应能微电子	SiC 功率 MOSFET 器件研发及产业化项目进入市重点项目			江苏常州
2020年9月	启迪半导体	SiC/GaN 器件产线全面贯通	14.5 亿元	5 万片	安徽芜湖
2020年7月	华润微	6 寸 SiC 生产线宣布量产, 2021 扩建 SiC 线		1.2 万片	江苏无锡
2020年3月	华微电子	半导体产业园开工, 将建设 SiC 半导体器件等项目	102 亿元		吉林
2019年11月	绿能芯创	SiC 芯片项目签约, 2022 年 6 月竣工	20 亿元	12 万片	山东淄博
2019年3月	国家电网	SiC 中试线对外服务	3 亿元		
2019年	福联电子	6 英寸 GaN、SiC 集成电路芯片生产线	20 亿元		福建莆田
2018年8月	积塔半导体	生产线项目开工, 一期规划建设 6 英寸 SiC 生产线		6 万片	上海临港
2018年	华天恒芯	签订合作框架协议, 建设 6 英寸 SiC 芯片项目	24 亿元	30 万片	
2018年6月	中国电科 13 所	SiC 芯片产业化项目备案			河北石家庄
2018年	方正微电子	成功量产 6 英寸 SiC 器件			广东深圳
2017年8月	中车时代	SiC 器件生产线生产厂房交付使用			湖南株洲
2016年10月	国扬电子	功率电子产业园项目投产, 建设碳化硅材料、模块等项目	10 亿元		江苏扬州
2015年8月	扬杰电子	募资建设 SiC 芯片、器件研发及产业化项目, 建设周期一年	1.5 亿元		江苏省扬州市
2015年3月	国家电网	建成 4 英寸 SiC 芯片线		2 万片	
2015年	中国电科 55 所	宽禁带半导体电力电子器件国家重点实验室成立		3 万片	江苏南京江宁
2012年10月	世纪金光	建立 4 英寸 SiC 中试线			北京
2011年	泰科天润	建立一条 4 英寸的 SiC 晶圆线, 2012 年 SiC 工艺线试流片	1.2 亿元	8000 片	北京顺义

合计 75 个项目, 700.3 亿元, 374.52 万片
(注: 由于各种原因, 部分项目可能已经停建、放弃等, 上述项目统计表仅供参考, 未来持续更新)

▲ 中国 SiC 芯片项目概况 来源: 行家说 Research

◎ 4.4.5 碳化硅器件、模组封装项目

公开信息显示, 国内碳化硅模组封装生产线是从 2016 年开始建设, 截止目前, 合计已有 46 个项目 (包括 IGBT 模组兼容产线), 合计投资金额超过 330 亿元, 公布产能超过 800 万只。主要的建设单位包括: 比亚迪、理想汽车、

蔚来汽车、长城汽车、基本半导体和爱仕特等。

详细项目信息可以查看下表：

时间	企业	概况	金额	年产能	位置
2022年10月	利普思	SiC 模块封装项目投产，引进2条SiC 模块封装生产线	10亿元	50万台	江苏省无锡蠡园
2022年10月	鲁光电子	SiC 模组下线，新上生产线6条	3.2亿		山东日照
2022年9月	元山电子	推进全碳化硅功率模块研发及量产项目建设，工期18个月	3亿元	60万只	山东济南
2022年10月	仙湖半导体	功率半导体项目初步达成落户意向			江苏盐城亭湖区
2022年9月	芯塔电子	功率器件、模块及驱动研发、设计等研发基地项目签约			安徽芜湖
2022年9月	臻驱科技	功率半导体模块产线项目签约，预计2022年年底生产	10亿		浙江嘉兴平湖区
2022年8月	长城汽车	蜂巢易创第三代半导体模组封测制造基地项目落地	8亿元	120万套	江苏省锡山
2022年8月	北一半导体	碳化硅模块项目签约，引进设备290台(套)		950万只	黑龙江穆稷市
2022年8月	中瓷电子	公告收购博威和国联万众，拟建设SiC 高压功率模块等项目	3亿元		北京顺义
2022年7月	国联万众	项目公示，高压功率模块封装技术，建设周期为五年	3.13亿元		北京顺义
2022年7月	联合汽车电子	太仓工厂二期项目建设启动，预计2023年5月中旬完工	14亿元		江苏苏州太仓
2022年7月	国联万众	项目公示，SiC 功率模块及单管项目，预计2022年底验收		2.4万件	
2022年6月	阿基米德	碳化硅等功率半导体器件及模块产线一期项目环评公告	1.2亿元	30万只	合肥
2022年6月	国扬电子	车规级SiC MOSFET 芯片和功率模块项目公示		15万只	江苏扬州
2022年6月	斯科半导体	碳化硅车规芯片模组的研发及生产项目启动厂房建设		240万只	苏州高新区
2022年6月	谱析光晶	获数千万融资，用于碳化硅模块 / 系统研发与批量生产准备			浙江杭州
2022年6月	海姆希科	碳化硅功率模组研发与产业化项目项目签约			上海闵行区
2022年3月	昕感科技	碳化硅功率器件芯片及模组生产线项目	20亿元		江苏江阴高新区
2022年2月	致瞻科技	新能源车用碳化硅半导体电控器件项目签约	10亿		浙江嘉兴姚庄镇
2021年12月	富康达	SiC 产业园和第三代半导体模组等项目签订投资框架协议书	110亿元		厦门漳州高新区
2021年12月	基本半导体	车规级碳化硅功率模块制造基地实现通线		150万只	江苏无锡新吴
2021年11月	博格华纳	二期项目动工，建三条电控Viper 模块封测生产线			江苏苏州
2021年11月	恒诺微电子	碳化硅器件和模块项目云签约	1亿美元		浙江嘉兴
2021年11月	巨一科技	IPO 申请受理，拟募资建设与碳化硅模块相关的汽车项目	7亿元		
2021年9月	蔚来	自研一条碳化硅功率模块工艺实验线		5000台	上海
2021年9月	瑞美科技	SiC 功率器件及模组产业化项目签约，2021年2月开工	15.74亿元		浙江省嘉兴市
2021年9月	世纪金光	碳化硅功率模块产业化项目获得审批通过			安徽合肥
2021年9月	新佳电子	新增功率半导体模块生产能力100万只/年		100万只	山东威海
2021年9月	中恒微半导体	高功率IGBT、SiC 模块设计与制造项目竣工报告公示	3000万元	20万只	安徽合肥
2021年	国星光电	建成碳化硅器件封测生产线			广东佛山
2021年8月	瀚薪科技	碳化硅项目项目集中签约，将开展碳化硅研制、检测和生产			上海临港

时间	企业	概况	金额	年产能	位置
2021年6月	斯达半导体	建设 SiC 芯片、功率模块等项目	35 亿元	8 亿颗	浙江嘉兴
2021年5月	芯聚能	SiC 功率器件与模块生产基地完成建设	25 亿元	100 万块	广东广州南沙
2021年5月	亿马先锋	亿马半导体碳化硅功率模块等产品正式量产投产	2 亿元	30 万个	江苏苏州
2021年5月	比亚迪	扩建碳化硅模块生产线			广东深圳
2021年5月	泽华电子	SiC 封装项目厂房即将封顶	2 亿元		辽宁辽阳
2021年4月	江智科技	SiC 器件封装项目开工 (10 条线)	10 亿元		安徽芜湖
2021年2月	瑞美科技	SiC 功率器件及模组项目开工, 生产 SiC 器件及电源模块	15.74 亿元	3000 万只	浙江嘉兴海宁
2020年12月	纬湃科技	第二条功率模块封装产线 2022 年年底试产			天津
2020年12月	斯达半导体	募资投资建设全碳化硅功率模组产业化项目	2.29 亿元		浙江省嘉兴市
2020年12月	羿变电气	已建成碳化硅功率器件封装测试及集成化变换器生产线			湖北武汉
2020年12月	同辉电子	SiC 封装线项目竣工投产			河北石家庄
2020年9月	晶恒电子	低成本碳化硅功率器件与模组关键技术项目通过验收			山东济南
2019年12月	爱仕特	功率模块研发及生产项目落地	1500 万元	1.8 万个	广东惠州
2017年8月	国扬电子	SiC 模块线投产	9000 万元		江苏南京
2016年12月	芯光润泽	碳化硅功率模块产业化项目正式开工建设, 2018 年投产。	20 亿元	360 万颗	福建厦门
合计 46 个项目, 331.66 亿元, 约 800 万只 (注: 由于各种原因, 部分项目可能已经停建、放弃等, 上述项目统计表仅供参考, 未来持续更新)					

▲ 中国碳化硅器件及模组封装项目概况 来源: 行家说 Research

◎ 4.4.6 其他碳化硅项目

从碳化硅衬底、外延、芯片生产到器件 / 模组封装, 每个环节都需要配套的材料和设备。相对来说, 早期的衬底企业通常都会自己开发和生产碳化硅粉料和长晶设备, 而其他下游环节的设备难度相对更高, 为此项目方主要以自研为主, 不过, 由于衬底需求爆发, 相关企业难以自给自足, 也开始外购碳化硅粉料和长晶炉。

从 2019-2022 年, 全国合计有 33 个碳化硅材料与设备相关项目建设, 合计投资金额超过 110 亿元, 主要的建设单位包括: 恒普科技、优晶光电、华卓精科、晟光硅研、智立方和岚鲸光电等。

详细项目信息可以查看下表:

时间	企业	概况	金额	年产能	位置
2022年11月	连城凯克斯	半导体高端装备研发制造二期项目开工	10 亿元	180 台	无锡锡山
2022年10月	中辰砂晶	碳化硅抛光片生产项目			昆山
2022年9月	易成新材料	碳化硅半导体材料基地核心设备进场, 主要生产碳化硅微粉			河南平顶山
2022年9月	精测新能源	智能装备生产项目封顶, 研发生产碳化硅模组等测试装备	3 亿元		江苏常州

2022年9月	美尔森	碳化硅石墨扩产项目	980万美元		美国贝城
2022年9月	米格实验室	芜湖市第三代半导体一站式检测服务平台检验项目	1.3亿元		安徽芜湖
2022年7月	顶立科技	碳化钽产业化项目	2941万元		湖南
2022年7月	连城数控	募资建设SiC衬底装备等项目,建设周期预计为18个月	1.38亿元		
2022年7月	冠岚新材料	项目环评受理公示,研究开发碳化硅粉料工艺设备	500万元		湖南张家港
2022年6月	海古德半导体	功率模块用陶瓷基板项目开工	6亿元	1020万片	江苏东台高新区
2022年6月	德智新材	碳化硅蚀刻环项目完成主体工程建设,预计在明年初投产	2.5亿元		湖南
2022年5月	ASM先进	芯片封装设备三期项目封顶,生产银烧结封装设备	3亿元		广东惠州
2022年4月	宝士曼半导体	第三代半导体全球总部基地项目签约,主要生产银烧结设备			江苏苏州吴中区
2022年4月	志橙半导体	SiC材料研发制造总部项目,已经封顶,计划2025年达产	3.32亿元	7.32万片	广州黄埔
2022年4月	衍梓智能	碳化硅气相外延法(VPE)设备项目落户	5亿元		山东青岛莱西
2022年4月	德瀛睿创	项目集中签约,碳化硅/半导体晶圆等装备制造	10亿元		上海
2022年2月	顶立科技	完成了10吨/年高纯碳粉中试线建设			湖南长沙
2022年2月	晶升装备	募资拟从事12英寸硅片长晶炉及SiC长晶炉研发生产	10亿元		南京经开区
2021年11月	大和热磁	SiC晶体生长(300台)及切磨抛设备(70台)项目开工	5亿元		上海宝山
2021年11月	中科钢研	高纯碳化硅粉和高端装备系统集成制项目签约	超10亿元		山东菏泽
2021年11月	中国电科2所	微电子装备制造项目一期公示,拟开工时间为2022年4月	9.184亿		山西潇河产业园
2021年9月	中科同志	封装装备项目签约入驻第三代半导体材料与应用联合创新基地			
2021年8月	润泽半导体	高纯碳粉制备项目环评第二次公示	2.65亿元	300吨	甘肃西凉
2021年6月	百特新材料	宣布将建SiC CMP研磨液项目	1.2亿元	1.5万吨	山东临沂
2021年6月		第三代半导体数字产业园项目完成主体结构封顶	约5.1亿元		福建福州高新区
2021年5月	芯三代	碳化硅外延设备设备项目环评公示	1.3亿元	50台	苏州工业园区
2021年	II-VI	SiC衬底后端加工线			福建福州
2021年4月	北大	宽禁带半导体研究中心产业化项目一期完成厂房装修	1.09亿元		北京
2021年1月	精测/华实	生产基地项目签约,一期投资10亿元	20亿元		湖南浏阳
2020年12月	优晶光电	UKING电阻法6英寸碳化硅生产线正式建设落成			江苏昆山
2020年12月	迪希埃	分子束外延(MBE)项目签约入驻,2021年5月中旬投产运营			北京顺义
2020年7月	博利士纳米	碳化硅抛光液的研发与生产化项目路演			山西临汾
2019年8月	百腾信科技	SiC晶体设备项目签约		400套	江苏镇江

合计33个项目,111.41亿元
(注:由于各种原因,部分项目可能已经停建、放弃等,上述项目统计表仅供参考,未来持续更新)

▲ 中国碳化硅材料与设备等项目 来源:行家说 Research

第五章、全球 SiC 半导体产业格局

以下联合出品方及参编单位对本章节的特别贡献

A 级参编单位



B 级参编单位

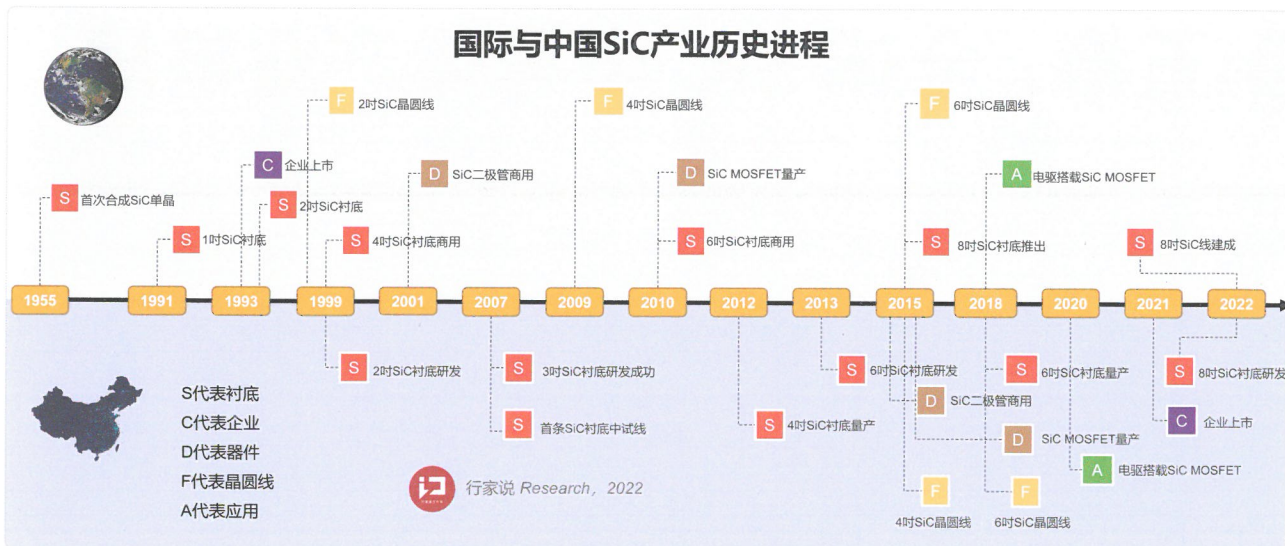


参与单位



5.1 全球与中国 SiC 产业发展历程与所处阶段

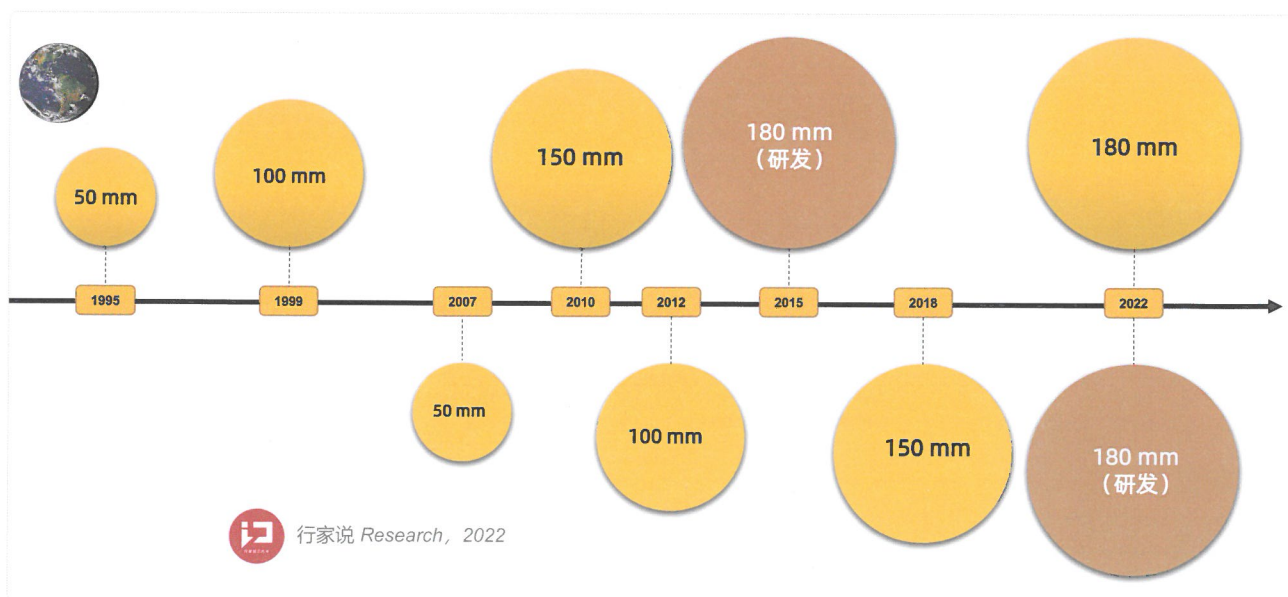
SiC 半导体产业有多个重要的发展阶段：第一个阶段是从 1891 年美国 Edward G. Acheson 合成了 SiC，直到 1955 年荷兰飞利浦实验室 Jan Anthony Lely 通过改良 PVT 法合成了 SiC 单晶。



▲ 国际与中国 SiC 产业历史进程 来源：行家说 Research

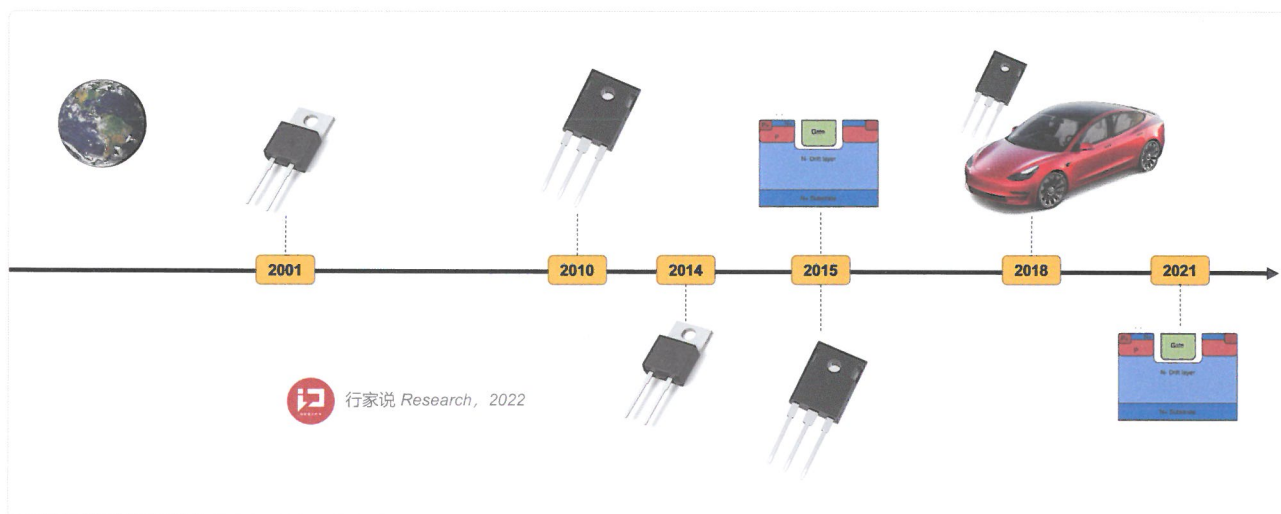
第二阶段是单晶生长的技术积累阶段。1991 年 1 英寸 SiC 衬底量产；1994 年 Wolfspeed 量产 2 英寸 SiC 衬底；1999 年 Wolfspeed 量产 3 英寸 SiC 衬底；2009 年，SiC 产业向 6 英寸方向发展。

相对来说，中国在碳化硅方面的研究相对较晚。“973 计划”和 863 计划先后启动了 SiC 单晶衬底制备和 SiC 高频高温功率器件的项目研究，1998 年左右，中国的高校和科研单位开始了 SiC 单晶衬底的研究。1999 年 2 英寸 4H 和 6H SiC 单晶诞生；2007 年研发出 3 英寸 SiC 单晶；2013 年研发出 4 英寸和 6 英寸 SiC 单晶。



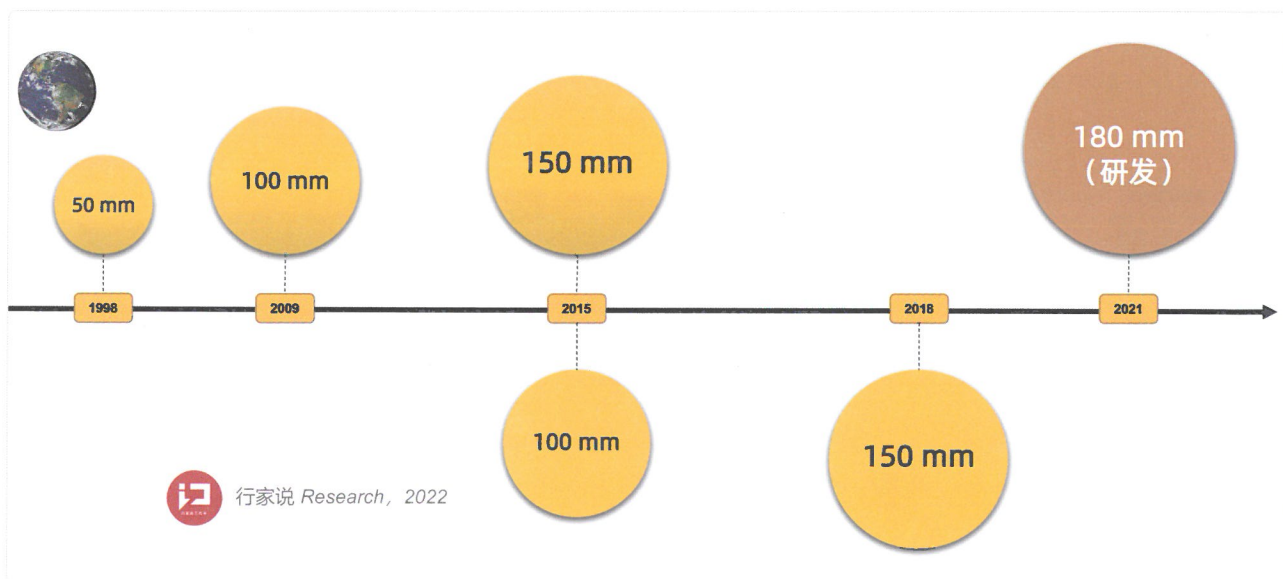
▲ 中外 SiC 衬底量产时间表 来源：行家说 Research

第三个阶段是 SiC 器件及相关技术的研究热潮。2001 年, 第一颗商业化 SiC SBD (300/600V) 量产; 2010 年, 第一颗平面栅 SiC MOSFET 量产; 2015 年, 第一颗沟槽 SiC MOSFET 量产。中国第一颗商业化 SiC SBD 发生在 2014 年, 大约落后国外 13 年; 平面和沟槽 SiC MOSFET 的量产相比国外落后 5-6 年。



▲ 中外 SiC 器件量产时间表 来源: 行家说 Research

在 SiC 芯片晶圆线的建设方面, 国外在 1998 年就开始建设 2 吋线, 2015 年已经开始建设 6 吋晶圆线, 而国内直到 2015 年才建成首条 4 吋线, 2018 年才开始 6 吋晶圆线的建设。



▲ 中外 SiC 晶圆线建设时间表 来源: 行家说 Research

5.2 全球 SiC 区域产业格局

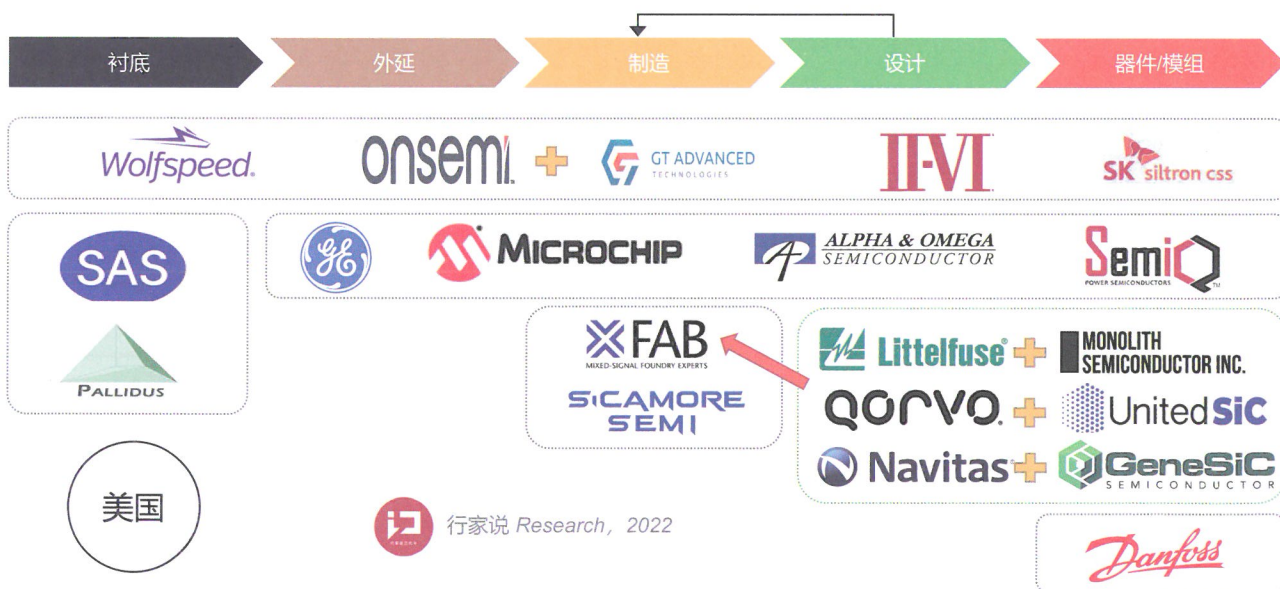
总体来说，目前全球的SiC产业格局呈现美国、欧洲、日本三强争霸的态势。国内SiC产业起步较晚，但已形成一定基础，目前正高速发展。跟硅基半导体类似，目前全球SiC主要的参与者主要集中在美国、欧洲、中国（大陆）、日本、韩国和中国台湾。

● 美国

从整个 SiC 的产业链来说，美国无疑是最为完善、最为领先的。除了汽车企业强势外，他们在 SiC 材料和器件技术的基础研究都比较早。目前，大部分的车规级 SiC 衬底产能都集中在美国，包括 Wolfspeed、贰陆、SK 集团和安森美的衬底工厂都在美国，其中 Wolfspeed 在导电型 SiC 衬底的产能占全球接近一半，同时美国还有 2 家新衬底玩家进入。

美国 SiC 产业第二个具有绝对优势的是拥有 Wolfspeed、贰陆和安森美 3 家全球产业链布局的 SiC 玩家，他们的技术、营收和产能等各方面都位居全球领先地位。

在器件制造方面，美国拥有 2 家代工厂，其中 X-Fab 是全球最大的 SiC 代工厂，美国本土的设计公司都在那里代工，中国的众多企业也都是它的客户。此外，美国传统硅基玩家和上市企业也在通过并购方式，加强 SiC 领域的实力，比如 Qorvo 和 Littelfuse。



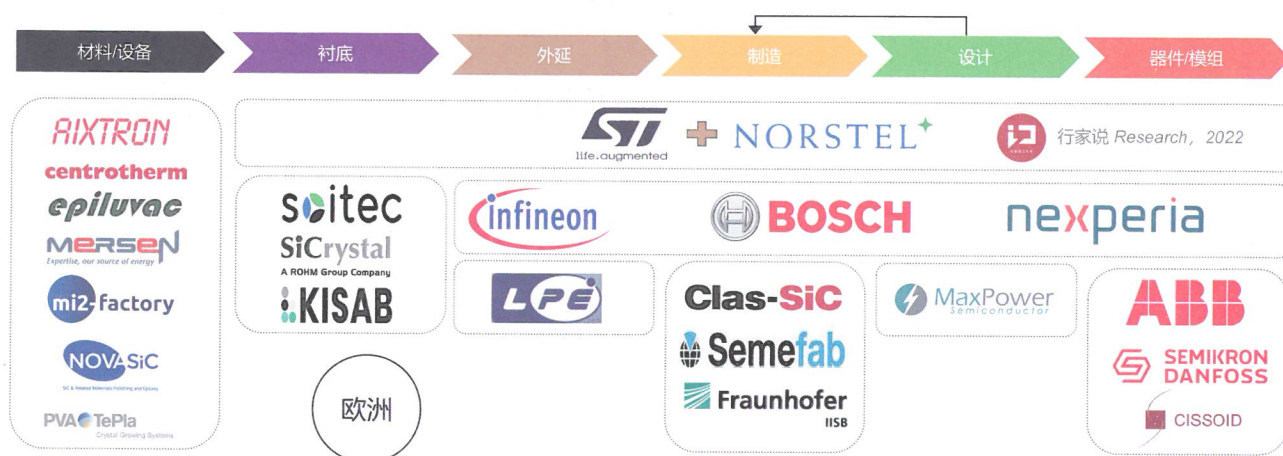
▲ 美国碳化硅供应链 来源: 行家说 Research

● 欧洲

欧洲方面，先进制程的半导体玩家正在式微，但车规和工业领域半导体上的“底子”依旧厚重，在 SiC 产业方面，由于供应链的完整关系重大，为此，从各国政府到汽车企业都非常重视，并成立了许多项目进行大范围的联合研发。从整个产业链来看，欧洲拥有非常多领先的汽车企业，在碳化器件的应用方面具备独天得厚的“地利”。

器件和模块环节, 欧洲也是实力突出, 拥有 ABB、赛米控 - 丹佛斯、英飞凌、意法半导体、博世、安世等传统巨头。这也导致欧洲的器件企业相对集中格局比较固化, 较少设计公司出现。欧洲 SiC 器件的市占率之所以能够实现领先, 这与该区域的研发基因分不开, 尤其是材料端和设备端, 瑞典孕育了许多的 SiC 衬底、外延和设备企业机构。

但 SiC 衬底是目前欧洲不足够强势的环节, 目前仅有的 2 家量产工厂都已被收购, 英飞凌、博世和安世都需要依靠境外衬底资源。欧洲近 2 年新增了 2 家衬底企业, 量产情况还有待观察。



▲ 欧洲碳化硅供应链 来源: 行家说 Research

● 日本

日本属于“第三梯队”, 但具有爆发潜力。首先, 日本拥有丰田、本田等汽车巨头, SiC 器件的应用导入路径非常明确。其次, 日本盘踞着众多传统功率器件的老牌企业, 例如罗姆、富士电机、三菱电机和东芝等, 无论是技术实力和全球营收排名都非常靠前, 也拥有丰富的量产线和技术人才, 日本在 SiC 器件的研发和应用都非常早, 并且在轨道交通等更高电压领域已实现大规模应用。

不过, 相对而言, 除了罗姆外, 其他器件企业在车规级 SiC 的布局方面都稍显落后, 这可能与丰田、本田等车企的新能源汽车布局较慢息息相关, 影响了他们的战略判断, 目前东芝、富士等企业的重心依旧在硅基方面, SiC 的量产进度要到 2025 年以后, 三菱电机 SiC 产品更多是在电力和轨道交通方面。

与此同时, 日本众多 SiC 器件企业的另一面是非常分散, 甚至三垦、三社、TOREX 等代工厂也在加入战局。与欧洲类似, 尽管日本在 SiC 材料和器件方面具备非常强的研究能力, 但日本 SiC 产业链最薄弱的环节是衬底, 量产进度较为缓慢。截至目前, 日本还没有具备一定规模的 SiC 衬底工厂, 昭和电工和电装增长布局对 SiC 新工厂的衬底产能预计要到 2024 年才能释放。

此外, 日本 SiC 衬底进展缓慢跟他们此前的技术路线选择有关系, 目前日本只有昭和电工是采用 PVT 生长法, 而日本电装是采用 HTCVD 法, 住友和 Oxide 正在建设的 SiC 衬底工厂是基于溶液法, 后面 2 种方案具有低缺陷、高良率和低成本优势, 一旦实现量产将具备一定的竞争优势。但在 SiC 设备方面, 日本汇聚了许多优势企业, 在晶体切割、外延生长等方面都处于全球领先地位。

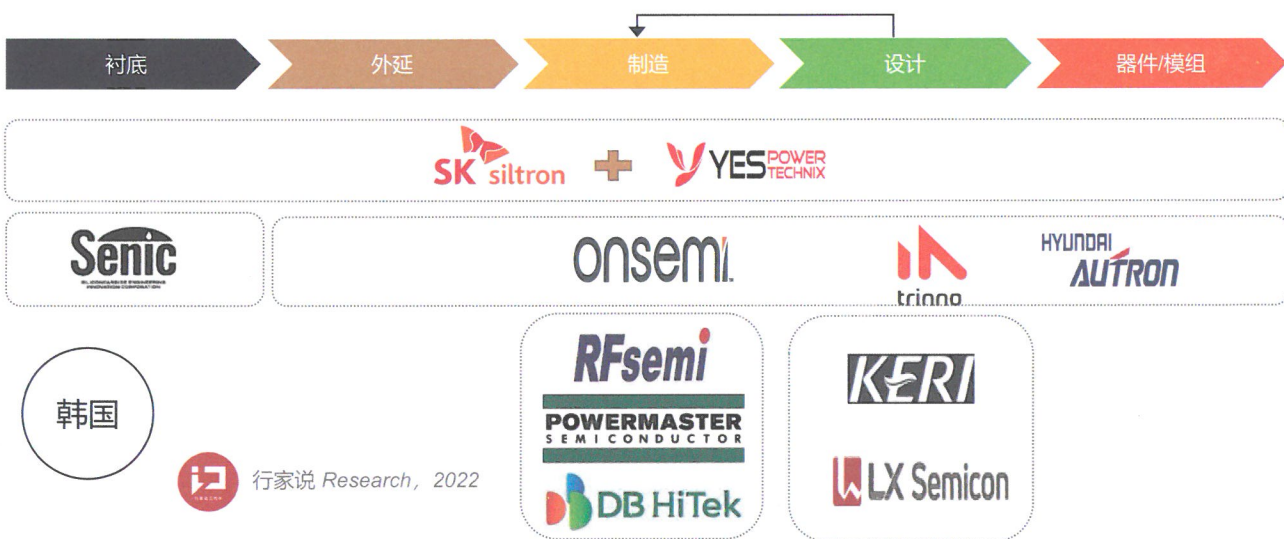


▲ 日本碳化硅供应链 来源: 行家说 Research

● 韩国

近几年, 韩国 SiC 产业布局速度也在加快, 不过整体进度上要落后于中国。目前韩国还没有建成从衬底、器件到模组的 SiC 全产业链条, 各个环节都正在建设当中。衬底方面, SK 集团在收购杜邦 SiC 部门后, 继续将衬底制造留在美国, 今年开始在韩国本土建设 SiC 晶体后段加工工厂, 并且通过收购器件设计和模块相关企业, 实现全产业链的布局。

截至目前, 韩国另一家衬底工厂正在进入设备安装阶段, 产能释放还需要到 2023 年。器件制造环节, 韩国有 3 家代工厂正在介入 SiC 领域, 同时现代汽车子公司、安森美和 Trinno 也正在建设相关生产线, 产能释放最快要到 2023 年底。

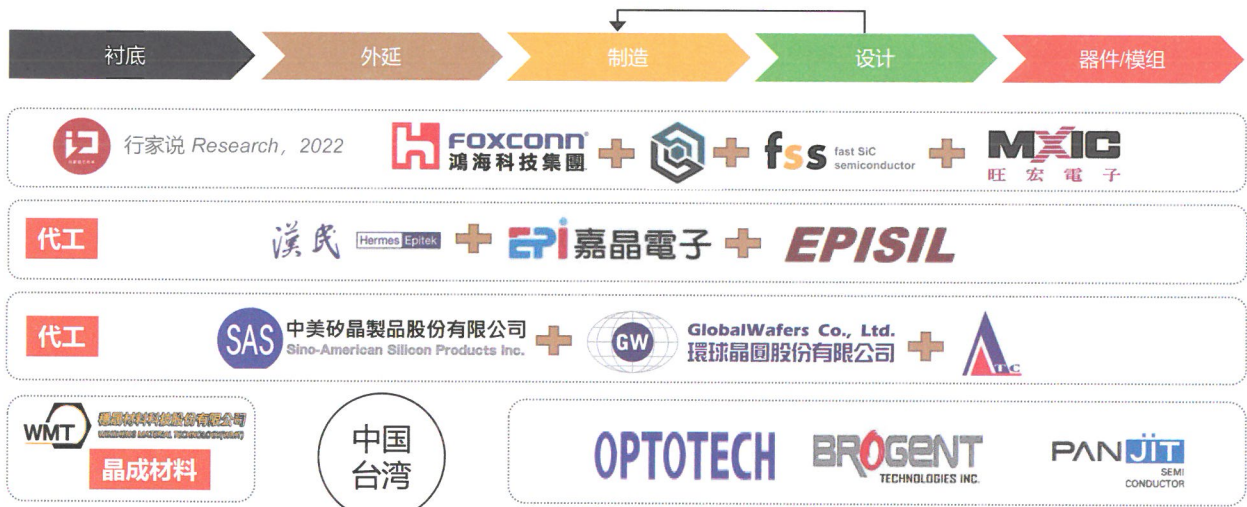


▲ 韩国碳化硅供应链 来源: 行家说 Research

● 中国台湾

中国台湾的 SiC 产业进度可能要比韩国快, 但是由于缺乏有优势的本地汽车资源以及有优势的应用企业, 整体定位以代工为主。目前台湾 SiC 企业中, 走得比较领先的汉民集团, 旗下的汉磊已经成为全球领先的 SiC 器件代工厂, 同时在衬底和外延方面已经具备一定的技术优势, 并且已经在推进产业化进程。

衬底方面, 目前台湾有 4 家企业, 不过总体产能不大, 规划年产能只有 10 万片左右。富士康是值得注意的企业, 他们进军汽车制造领域后, 通过收购和入股, 已经完成了从衬底、器件设计、器件制造的全产业链布局, 预计 2023 年将投产。



▲ 中国台湾碳化硅供应链 来源: 行家说 Research

● 中国大陆

纵观全球, 中国是在 SiC 领域投资力度最大, 项目建设最多的国家, 尤其是在中国大陆, 从中央到地方, 从车企到其他应用领域的玩家, 都在参与投资和建设 SiC 项目。



▲ 中国大陆碳化硅供应链 来源: 行家说 Research

目前, 中国数目庞大的 SiC 项目中“鱼龙混杂”, 不过“相马不如赛马”, 经历了多年的洗礼, 部分 SiC 企业已经陆续“跑出来”, 开始崭露头角, 但整体的产业格局尚未定型。从整个链条来看, 中国 SiC 产业再次具备类似其他制造行业的布局特点, 有机会成为全球的最大的“制造工厂”。

从各个环节来看,中国有望首先在 SiC 衬底环节实现突破,天岳先进、天科合达、烁科晶体等众多企业在导电型衬底、8 英寸晶圆等方面都取得了喜人的成果,相关项目建设进度也在推进当中,产能将在 2023 年实现大规模释放,而这将为中国 SiC 产业链提供非常重要的产能保障。一旦衬底技术和产能能够实现突破,中国有望对欧洲、日本和韩国等地区进行产品出口,目前这些区域的电驱相关企业都非常关注中国的进展。

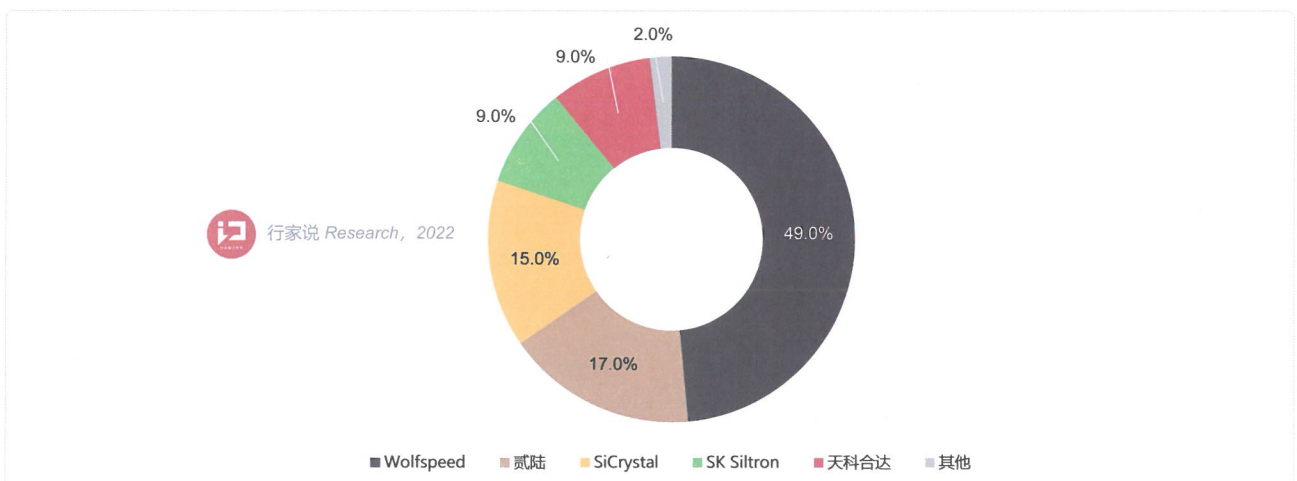
5.3 SiC 功率半导体企业市占率分析

半绝缘衬底方面,主要应用于射频 GaN 器件,全球主要的衬底厂商包括 Wolfspeed、贰陆、天岳先进、烁科晶体、SK Siltron、同光股份等,目前厂商之间的技术水平、产品参数都比较接近。

市场份额方面,2022 年 Wolfspeed、贰陆、天岳先进和烁科晶体 4 家企业的市占率合计超过 90%。国内方面,同光股份、天达晶阳等厂商正在崛起,但主要的供应以天岳先进和烁科晶体为主。

烁科晶体在半绝缘 SiC 衬底方面发展迅速,2018 年 1 月,烁科在国内率先完成 4 英寸高纯半绝缘 SiC 单晶衬底材料的工程化,截止目前,其 4 英寸半绝缘 SiC 衬底在国内的市占率接近 50%,累计出货逾 10 万片。

导电型衬底方面,美国企业处于领先地位,Wolfspeed、II - VI、SK Siltron CSS 公司等企业占据了全球 75% 以上的市场份额。



▲ 2021 年全球 SiC 导电型衬底市场份额 来源: Yole、行家说 Research

从 SiC 衬底的量产进度来看,中国 2 英寸产品大约比国外晚 12 年,4 英寸大约晚 13 年;6 英寸大约晚 8 年。而 8 英寸衬底的研发上也落后大约 7 年。目前与美国、日本等国家相比良率、尺寸等方面存在一定差距,但从整个产业链来看,国内 SiC 衬底布局是相对完整和可控的,可以保证整个供应链的完整性。

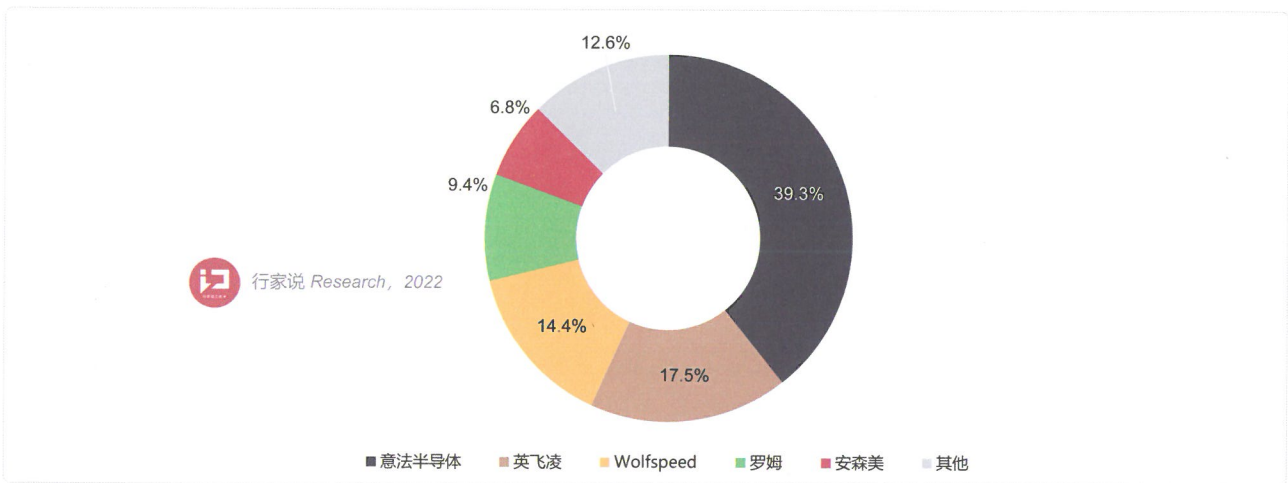
并且国产 SiC 衬底的市占率也在逐步提升,例如天科合达的 2021 年市占率已经达到 9%,天岳的市占率约为 0.1%。随着国内半绝缘衬底企业转型生产导电型衬底,并且产能不断扩大,预计会有更多国内企业将分食导电型 SiC 衬底市场蛋糕,产业格局将发生新的变化。

其中,值得注意的是烁科晶体。烁科晶体多年从事 SiC 材料生长工艺技术的开发与研究,实现了 6 英寸导电型 SiC 单晶衬底产业化,工艺技术达到国际先进水平,同时,通过突破籽晶粘接、扩径生长、大尺寸应力控制等核心技术,最终成功研制出 8 英寸 SiC 单晶晶锭。衬底加工方面,突破高硬材料高效低表面损伤加工、表面质量高精度快速分析测试、表面原子级加工工艺等核心技术,建设形成了 SiC 单晶衬底完整生产线,多项技术达到国际先进水平。

目前,该公司的导电型 SiC 衬底在手订单已有二十万片,大部分用于 SiC MOSFET,技术指标与其他头部企业没太大差异,预计明年产能依然保持国内领先水平。

根据规划,烁科晶体 SiC 产业园将进行两期建设规划。一期 (2019-2022) 总投资 10 亿元,长晶设备 700 余台,导电型衬底规划年产能 30 万片,目前一期投资基本完成,明年年底可达产;二期 (2023-2025) 总投资 30 亿元,长晶设备 2000 台,导电型衬底规划年产能 150 万片。

SiC 器件方面,从营收来看,2021 年全球营收排名前 13 的企业都是国外 SiC 器件企业。其中,意法半导体、英飞凌、Wolfspeed、罗姆和安森美 5 家企业的市场份额合计高达 87.4%。



▲ 2021年SiC器件企业市场份额 来源:行家说 Research

排名	公司	2020年	2021年(预估)	同比增长
1	意法半导体	\$ 290M	\$ 450M	55%
2	英飞凌	\$ 110M	\$ 200M	100%
3	Wolfspeed	\$ 108M	\$ 165M	53%
4	罗姆	\$ 103M	\$ 108M	5%
5	安森美	\$ 55M	\$ 78M	43%
6	三菱电机	\$ 26M	\$ 28M	8%
7	富士电机	\$ 17M	\$ 18M	4%
8	GeneSiC	\$ 14M	\$ 17M	15%
9	东芝	\$ 12M	\$ 12M	7%
10	赛米控-丹佛斯	\$ 8M	\$ 9M	8%
11	UnitedSiC	\$ 6M	\$ 7M	9%
12	Danfoss	\$ 3M	\$ 4M	10%
13	Microchip	\$ 1M	\$ 1M	4%
	其它	\$ 30M	\$ 47M	55%

▲ SiC 器件企业营收 (2020-2021 年) 来源: Yole、行家说 Research

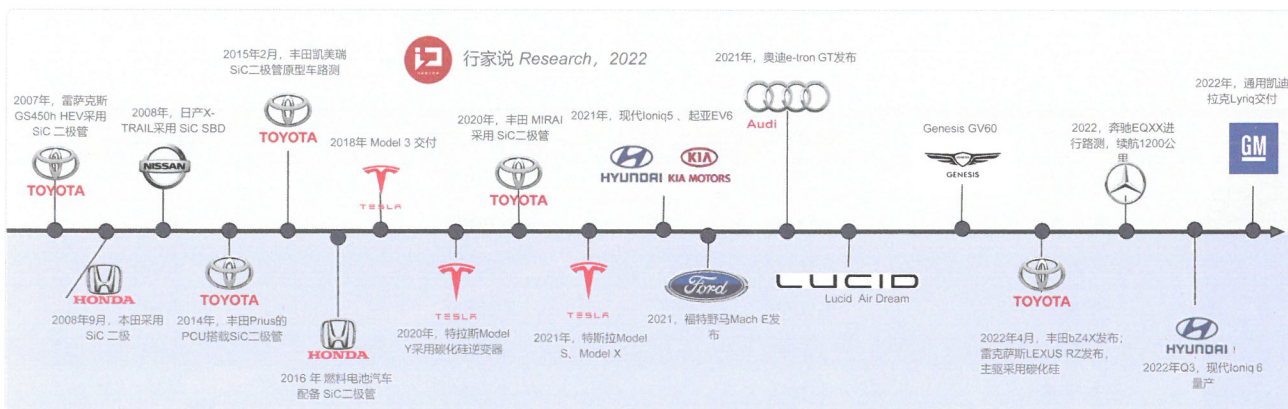
2014年起国内 SiC 二极管产业, 逐渐打破了国外对 SiC 二极管技术的商业垄断。近几年来, 国产 SiC 二极管率先实现了规模商用, 在光伏、充电桩甚至汽车领域实现了一定的渗透率和国产替换。与此同时, 国内的 SiC MOSFET 器件也实现了较大的突破, 已经在车载 OBC、DC/DC 甚至电网等领域实现了应用。例如飞程半导体在直流充电桩领域的出货量处于国内领先地位, 其 SiC 器件依靠其出色的可靠性和稳定的质量得到了国内各行业和应用领域内标杆客户的认可。

客观来看, 在主驱逆变器领域, 现阶段上车的 SiC MOSFET 几乎清一色都是国外产品。不过, 逆变器中采用了国产 SiC MOSFET 也将指日可待, 目前已有车企或者 Tier1 在方案中采用了国产产品。随着越来越多的国内企业逐步攻克从 SiC 材料到关键制造工艺、表征量化、封装、可靠性等环节关键技术障碍, 通过搭乘国内新能源汽车风口, 未来十强榜单预计也将会有更多中国企业的身影。

5.4 新能源汽车 (最大市场) 对 SiC 的应用与投资整合

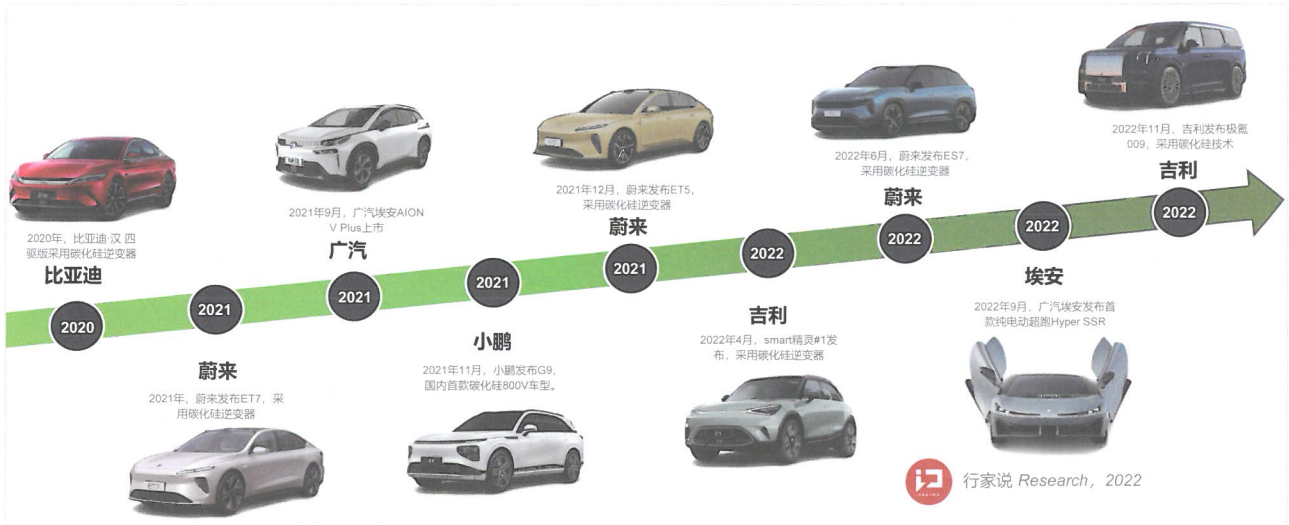
◎ 5.4.1 汽车导入 SiC 功率半导体概况

从全球范围来看, 目前主驱逆变器采用 SiC MOSFET 的车型主要有: 特斯拉的 Model 3/Model Y/Model S、现代汽车的 Ioniq-5/Ioniq-6、起亚 EV6、福特 Mach-E、丰田雷克萨斯 RZ、通用的凯迪拉克 Lyriq 等。



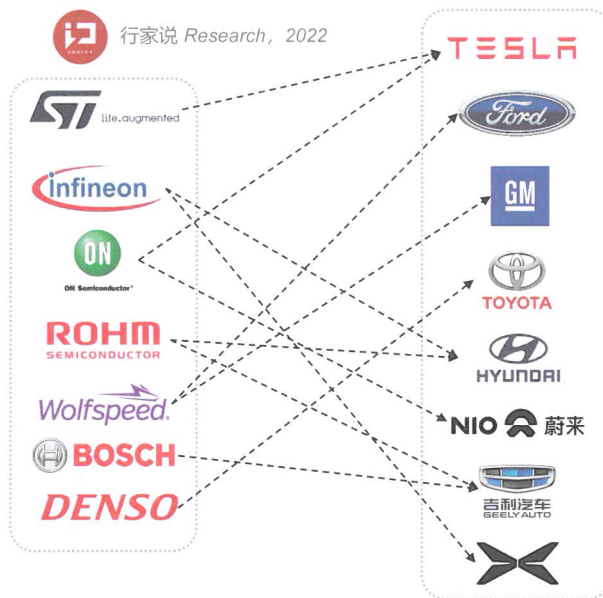
▲ 国外 SiC 主驱逆变器上车概况 来源: 行家说 Research

国内方面, 搭载 SiC MOSFET 主驱逆变器的车型主要有: 比亚迪汉和唐、蔚来的 ET7/ET5/ES7、小鹏 G9、吉利 Smart # 1 和极氪 009、广汽埃安 2 款车。



▲ 国内 SiC 主驱逆变器上车概况 来源: 行家说 Research

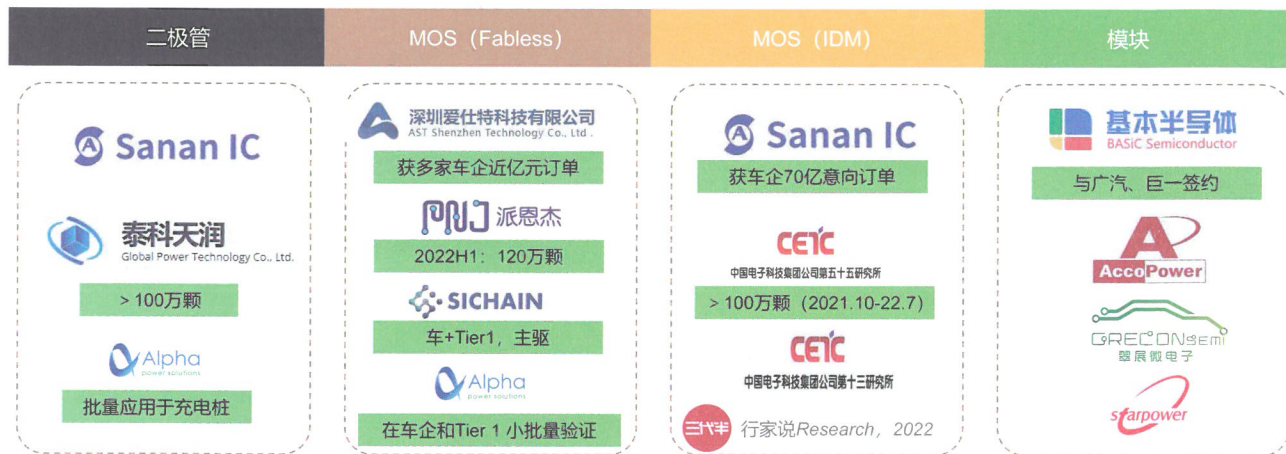
SiC MOSFE 芯片及功率模块是主驱逆变器的重要核心元件, 对产品的功能、性能和可靠性发挥着重要作用。现阶段, 国内外汽车都是主要向境外先进厂商采购, 基本上形成了国际 SiC MOSFET 先进品牌垄断供应的格局, 意法半导体、安森美、英飞凌、Wolf speed、博世、罗姆等占据了全球大部分市场份额, 国内几乎没有 SiC MOSFET 产品应用在主驱逆变器中。



▲ SiC 逆变器合作情况 来源: 行家说 Research

而从目前项目定点的情况来看, 预计未来 3 年, 车规级 SiC MOSFET 将依旧是国外品牌占据主导。国内方面, 中国自主品牌车企正在主驱功率模块中开始采用国产 SiC 模块 (但仍采用国外芯片), 芯聚能和基本半导体的产品已经获得项目定点采用。

OBC 和 DC/DC 车载电源方面则早有采用国产的 SiC MOSFET 和二极管, 截止目前, 中国电科 55 所、派恩杰、爱仕特等企业都获得了超过 100 万颗的订单。车载电源是国产 SiC MOSFET 的“试验基地”, 随着 2022 年 SiC MOSFET 进入爬坡上量阶段, 一旦可靠性得到认可, 未来也有机会“登陆”主驱逆变器, 不过最快也要到 2024 年。



▲ 国内 SiC 功率器件及模块上车概况 来源: 行家说 Research

◎ 5.4.2 汽车企业对 SiC 产业的整合与投资

在碳化硅投资方中,汽车相关的资本是最受欢迎的,而且许多汽车产业链企业都参与到碳化硅领域,比如北汽、小米、汇川、宁德时代、长城、广汽、比亚迪、华为、上汽、一汽、吉利、小鹏、理想、东风、阳光电源、麦格米特等。总体而言,汽车企业进入 SiC 领域主要采取了 4 种模式。

第一种是全产业链布局。比如丰田汽车,目前它的 SiC 芯片、模块等主要由于子公司日本电装公司制造,衬底是外购的。电装正在建设自己的衬底项目,未来将实现整个产业链条的打通。目前,鸿海集团通过并购股权的方式也实现了这样的产业链布局。国内方面,长城汽车也在布局这种全产业链垂直自制的模式,除了衬底通过入股(同光股份)方式外,其他环节都是自己建设。



行家说 Research, 2022

▲ 直接介入碳化硅生产制造的汽车企业 来源: 行家说 Research

第二种是自己生产 SiC 芯片。SiC 衬底和外延部分由于技术门槛较高,管理比较繁琐,车企通常会选择外购,而重点介入 SiC 芯片和模组制造,保障自己产能供应。目前,这种模式已经成为了全球的发展趋势,比如现代汽车、比亚迪、吉利、理想和华为都有相关的项目落地。

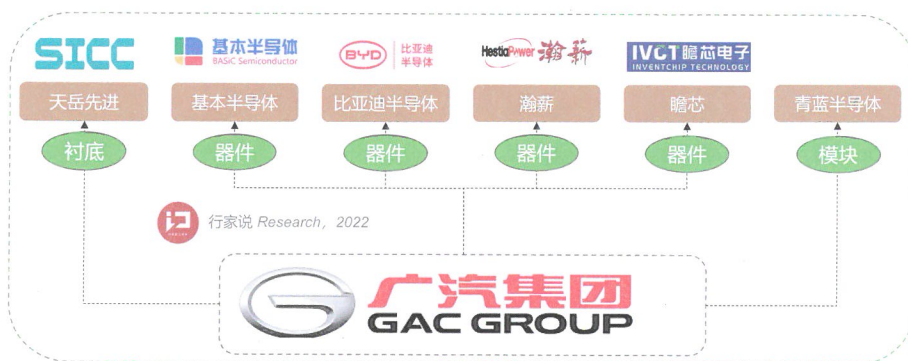
第三种是介入 SiC 模块环节。对于新能源汽车来说,电控的功率模块经常是产品在召回的重灾区,对整车的可靠性影响非常大,技术开发难度较高,而且关系到电驱系统的进一步集成化(比如从目前的三合一走向七合一或者八合一),车企都非常重视 SiC 模块的研制。一汽、广汽、东风、蔚来、上汽、理想等车企都是通过合资或自制的方式去研发制造 SiC 模块。

第四种通过投资方式介入。全产业链介入对车企的考验也非常大,无论是投资、管理还是技术研发的要求都非常高,对于 SiC 产业的部分关键环节,一些车企是通过投资的方式进行参与。对于目前的瓶颈环节(衬底、器件制造),上汽、广汽、小鹏、北汽和比亚迪等都参与投资了相关企业。



▲ 国内车企的产业链布局 来源: 行家说 Research

以广汽为例,其在衬底环节投资了天岳先进,而在器件和模块方面则广撒网,投资了4家企业,从而让自己不仅能够可能赢得投资回报,同时也能的供应链方面实现更好地保障。



▲ 广汽的 SiC 供应链布局 来源: 行家说 Research

不仅车企如此，电驱企业在投资产业链。一些 Tier1 厂商也亲自下场介入 SiC 器件和模块的制造，比如中车和博世已经建设了 SiC 芯片线，联合电子正在建设 SiC 模组线。



▲ 国内车企的产业链布局 来源：行家说 Research

5.5 全球 SiC 整合并购简析

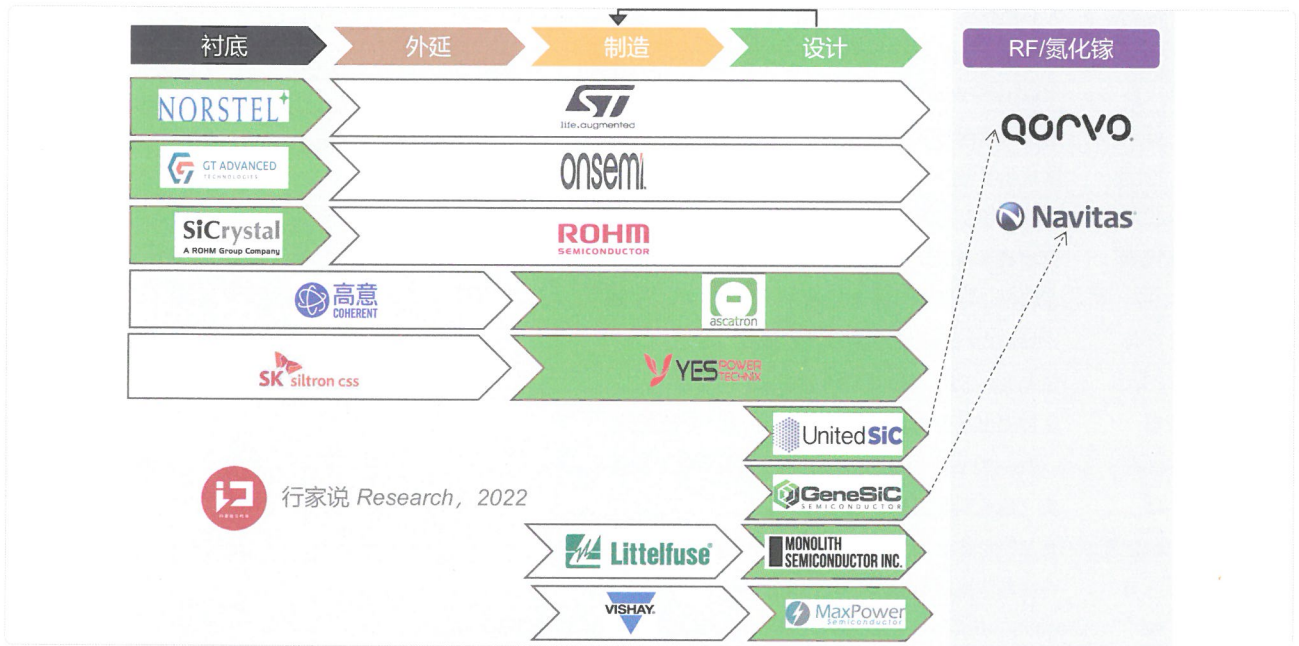
从 1996 年开始，国外 SiC 产业就开始出现收购案，截至目前，可统计的并购案合计 56 起，26 年来产业持续的整合之中。最早的 SiC 玩家中，比如 Wolfspeed，通过收购 ATMI、Intrinsic、APEI 和英飞凌的射频业务，实现了从衬底到器件模组，甚至到射频领域的全产业链布局。而 II-VI 也通过收购诺斯罗普·格鲁曼的碳化硅业务，以及收购 Ascatron 等企业实现了产业链的垂直整合。

时间	收购案	金额
1996 年 1 月	诺斯罗普·格鲁曼收购西屋电气的国防部门	30 亿美元
1996 年 1 月	先进技术材料 (ATMI) 收购 EPITRONICS	
2000 年 4 月	Uniroyal Technology 收购 Sterling Semiconductor	3600 万美元
2000 年春季	SiCrystal 合并西门子旗下 SiC 供应商 Freitronics Wafer	
2000 年 12 月	诺斯罗普·格鲁曼收购 Litton Industries	38 亿美元
2001 年底	II-VI 从诺斯罗普·格鲁曼收购 Litton	
2003 年 1 月	Uniroyal 破产，道康宁收购了 Sterling	1120 万美元
2004 年 3 月	Cree 收购先进技术材料 (ATMI) 的氮化镓衬底和外延业务	
2004 年 8 月	Intrinsic 收购 SiC 晶圆商 Bandgap Technologies	
2004 年 10 月	Intrinsic 收购瑞典 Advanced Micro Device Solutions (AMDS)	
2005 年 11 月	Microsemi 收购 Advanced Power Technology	
2006 年 7 月	Cree (现 Wolfspeed) 收购 Intrinsic	
2008 年 8 月	某财团购买 SiC 衬底和外延厂商 Caracal	
2008 年 12 月	昭和电工收购合资子公司 ESICAT 的 SiC 外延片业务	
2010 年 1 月	瑞典 Fouriertransform 收购 Norstel	1.1 亿瑞典克朗
2010 年	罗姆完成收购 Sicrystal	

时间	收购案	金额
2011年1月	三菱电机从 Gores 集团收购 Vincotech	
2011年4月	飞兆收购 SiC 公司 TranSiC	
2012年	新日铁和住友金属合并	
2013年	昭和电工收购普利司通 7 个 SiC 芯片专利家族	
2015年7月	Cree (现 Wolfspeed) 并购功率模组制造商 APEI	
2015年11月	安森美收购飞兆半导体	24 亿美元
2015年12月	陶氏化学合并杜邦	1300 亿美元
2016年6月	陶氏化学公司完成收购道康宁	
2016年12月	安信资本与三安光电等收购 Norstel 所有股份	
2017年8月	昭和电工收购新日铁住友金属 SiC 业务	
2017年3月	Littelfuse 获得 Monolith 多数股权	1500 万美元
2017年10月	住友金属收购 Sicoxs51% 股权	
2017年	雷神退出半导体领域, Clas-SiC 接手 SiC 晶圆线	
2018年3月	Cree (现 Wolfspeed) 收购英飞凌射频功率业务	3.45 亿欧元
2018年	英飞凌收购德国 Siltecta	
2019年2&12月	意法半导体分别收购 Norstel 55% 股份和 45% 股份	1.375 亿美元
2019年7月	丹佛斯完成收购 UQM Technologie	
2019年	Silicon Power 收购 Microsemi 射频和功率器件厂, 成立 SiCamore	
2019年11月	东芝完成对 Nuflare 的 100% 子公司化	
2020年	昭和电工并购日立化学	
2020年3月	SK Siltron 完成对杜邦 SiC 晶圆部门 (道康宁) 的收购	4.5 亿美元
2020年4月	丰田将电子器件业务转移给电装公司, 包括 SiC 晶圆线	
2020年8月	II-VI 收购 SiC 外延企业 Ascatron 和离子注入企业 INNOVION	
2021年7月	安世完成对英国晶圆厂 Newport Wafer Fab 100% 收购	5.6 亿 RMB
2021年9月	Paratus Investment 收购 SKC 的 SiC 晶圆资产, 成立 Senic	700 亿韩元
2021年11月	Qorvo 收购联合碳化硅公司 (UnitedSiC)	2.27 亿美元
2021年11月	Soitec 收购 SiC 晶圆抛光和回收公司 NOVASIC	
2021年底	LX Semicon 收购 LG Innotek 的 SiC 资产	
2021年11月	安森美收购 GTAT	4.15 亿美元
2021年11月	Mipox 收购 UJC-Crystal 11.5% 股权	
2021年11月	Key ASIC Berhad 拟收购美国某 SiC 代工厂 100% 股份	
2022年4月	SK 集团收购 Yes Power95.8% 股权	1200 亿韩元
2022年3月	罗姆收购海姆希科 20% 股权	
2022年3月	赛米控与丹佛斯 Silicon Power 合并, 成立赛米控 - 丹佛斯	
2022年5月	SK Siltron 完成收购 SiC 模块键合公司 Theraon	370 亿韩元
2022年8月	纳微半导体收购 GeneSiC	约 19 亿元
2022年9月	ABB 收购 PowerTech Converter	
2022年10月	ASM International 收购 LPE	约 36 亿元
2022年10月	Vishay 收购 MaxPower	5750 万美元

▲ 1996-2022 年全球 SiC 收购 来源: 行家说 Research

国外 SiC 器件的早期主流玩家主要以传统功率器件行业巨头为主，比如英飞凌、意法半导体、安森美和罗姆。而这些企业也通过并购衬底企业实现了全产业链的布局。



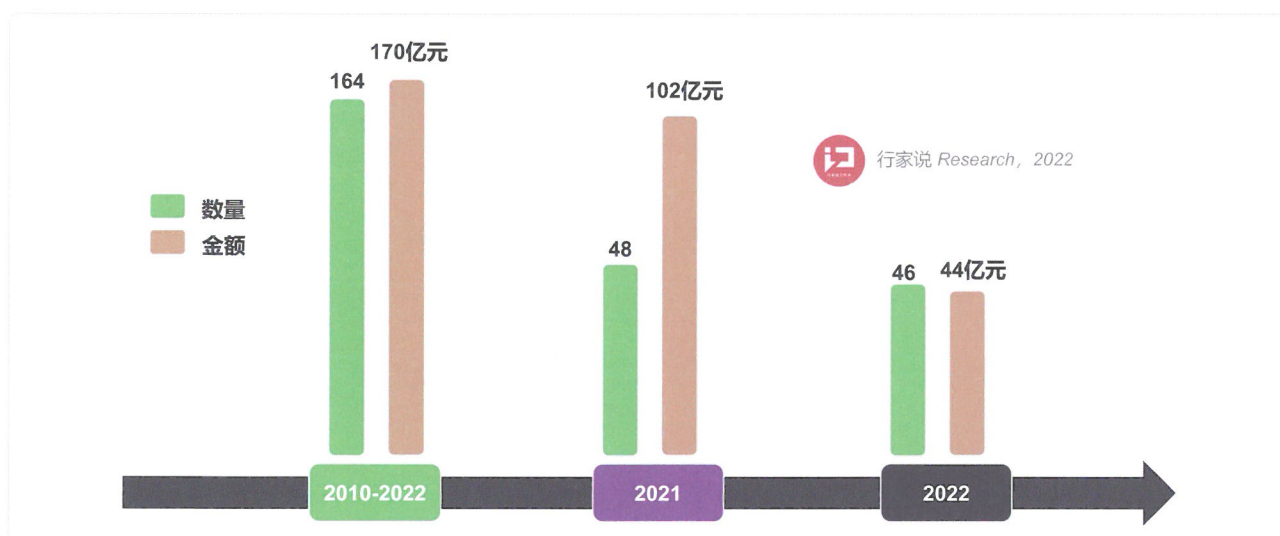
▲ 国外代表性碳化硅整合案例 来源：行家说 Research

值得注意的是，除了瑞萨电子的重心还在硅器件外，富士电机、东芝、威世、安世半导体等 TOP10 企业都加大投资，进入碳化硅领域。而这些企业的介入导致碳化硅器件行业进一步发生整合，几乎所有知名的 Fabless 企业都被整合收购，比如 Littelfuse 收购 Monolith，Vishay 收购了 MaxPower。此外，射频和氮化镓企业也通过收购的方式跨入碳化硅领域，比如 Qorvo 收购了 UnitedSiC，纳微收购了 GeneSiC。

5.6 中国 SiC 产业投融资简析

Wolfspeed 从成立到上市,仅用了 6 年时间(1993 年),而中国第一家上市公司天岳先进用了 11 年(2021 年),而且更多的国内纯碳化硅玩家都是非上市公司,因此他们的发展过程中很大程度上需要靠融资。从 2010 年到 2022 年,过去 12 年国内可统计的碳化硅相关融资案大约为 164 起,融资金额合计接近 170 亿元(不包括未披露的),平均单个案件融资金额超过 1 亿元。

其中,2021 年是融资的高峰,可统计的融资案合计共有 48 起,融资金额超过 102 亿元(不包括未披露的),平均融资金额超过 2.1 亿元,其中积塔半导体一家企业融资 80 亿元。2022 年,中国的碳化硅行业融资依旧活跃,1-10 月合计有 46 起融资案件,融资金额超过 44 亿元(不包括未披露的),平均单个案件融资金额约 1 亿元。而 2010-2020 年合计 70 起融资案的合计融资金额 24 亿元,平均融资金额为 3400 万元。



▲ 2010-2022 年中国 SiC 项目融资数量与金额 来源:行家说 Research

不过“资本热”也为许多碳化硅企业注入了发展的动力,而且越来越多的初创玩家也开始进入这个市场。但是值得注意的是,早期的衬底玩家(烁科晶体、天岳先进、天科合达、同光股份)以及外延玩家(天域半导体、瀚天天成)都已上市或正在筹备上市。

与此同时,在碳化硅器件环节,主流的玩家以纯碳化硅技术企业为主,国内 TOP10 的功率器件企业中,早期只有中车时代一家建设了 SiC 生产线。而最近 2 年,几乎超过 75% 的传统硅基功率器件都开始建线,挺进碳化硅领域,比如华润微、士兰微、扬杰电子、华微电子、斯达半导体和新洁能,以及比亚迪半导体等。

第六章、SiC 价格、产能及市场规模预测

以下联合出品方及参编单位对本章节的特别贡献

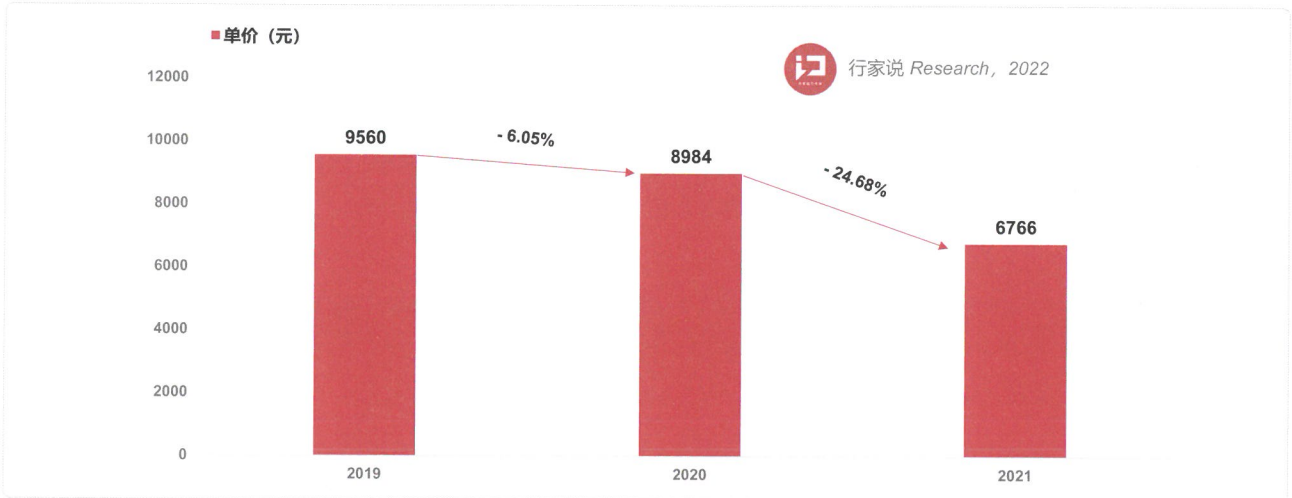
A 级参编单位



6.1 SiC 价格趋势

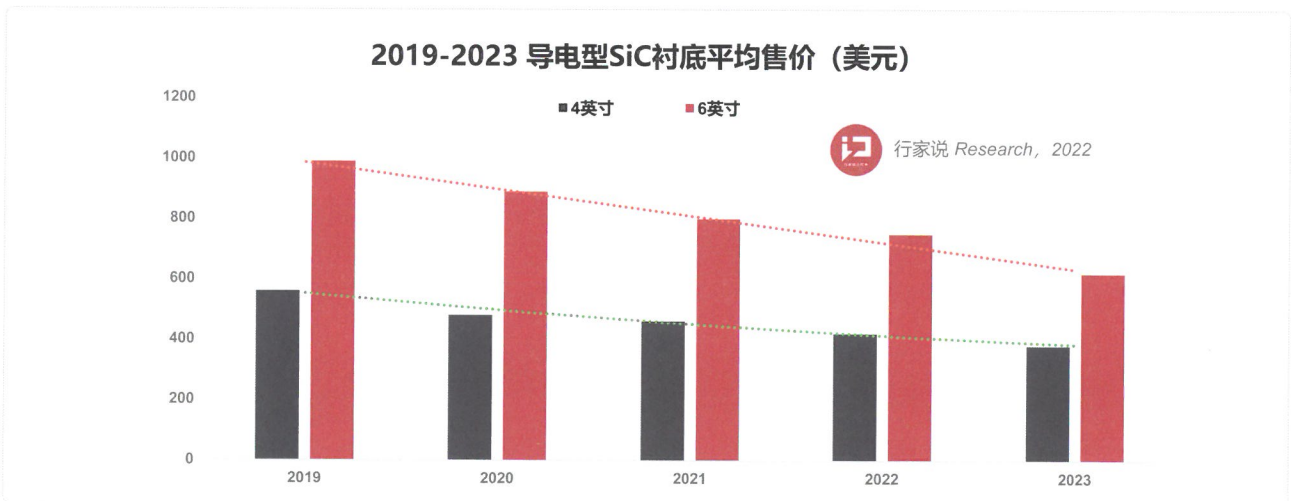
● SiC 衬底价格趋势

半绝缘 SiC 衬底方面,国内 2021 年 4 英寸半绝缘碳化硅衬底价格大约为 6500-8000 元左右;根据某军用单位公布的订单公示,4 英寸半绝缘碳化硅衬底价格大约为 7800 元。进入 2022 年,由于国内半绝缘 SiC 衬底市场相对饱和,价格继续下降,目前价格低于 1000 美元。



▲ 国内某企业半绝缘 SiC 衬底均价走势 来源:行家说 Research

导电型 SiC 衬底方面,目前,国内外的 6 英寸衬底价格在 750-900 美元区间,4 英寸衬底价格为 400-450 美元左右。2022 年,随着国内的导电型 SiC 衬底进入从 4 英寸到 6 英寸的迭代,整个市场的产品价格也有较大幅度的下降。



▲ 2019-2023 年全球导电型 SiC 衬底平均售价及趋势 来源:行家说 Research

预计未来几年 SiC 衬底成本每年以 5%-10% 的速度下行,预计 2023 年 6 英寸衬底价格将降至 620 美元左右,降幅为 17.33%;4 英寸衬底价格将降至 380 美元左右,降幅为 9.52%。

● SiC 外延价格趋势

SiC 外延方面, 国内外并没有太大的价格差异。2021 年 -2022 年, SiC 外延下降幅度较大, 2021 年初, 4 英寸导电型 SiC 外延 + 衬底的报价约为 1.5-1.7 万元, 到了 2021 年第三季度, 4 英寸外延价格降至 1-1.2 万元。随着国内 6 吋 SiC 衬底的成熟, SiC 外延继续下降, 目前 6 吋导电型 SiC 外延 + 衬底的报价约为 1.2-1.9 万元。预计, 未来几年 SiC 外延成本每年以 10%-20% 的速度下行, 预计 2023 年 6 英寸 SiC 外延 + 衬底价格将降至 1-1.7 万元左右。

● SiC 器件价格趋势

2022 年上半年 SiC 器件与硅器件价差进一步缩小。其中, 2022 年 650V SiC 二极管价格已经低于 0.65 元 / A, 1200V SiC 二极管的价格已经低于 0.9 元 / A, 相比之下, 2020 年底, 650V SiC 二极管价格约为 0.7 元 / A, 1200V SiC 二极管的价格约 1.2 元 / A。主流厂商的车规级二极管销售价格显示, 相比硅基二极管, 650V SiC 二极管大约高出 3.2 倍, 1200V SiC 二极管高出大约 2.4 倍。

材料	企业	参数	价格 (美元)
SiC SBD	R 公司	650V/20A	7.37
硅 SBD	I 公司	650V/80A	2.3
SiC SBD	I 公司	1200V/38A	5.9
硅 SBD	I 公司	1200V/30A	2.43

▲ 车规级二极管价格对比 (价格仅供参考) 来源: 行家说 Research、findchips

SiC MOSFET 方面, 主流厂商的 650V、900V、1200V、1700V 产品均价较 2021 年底分别下降了 5-20%。从单个产品均价来看, 650V SiC MOSFET 均价约 100-150 元 / 只; 1200V SiC MOSFET 均价 150 元 -190 元 / 只, 因为供给紧缺, 相较于去年价格有所提高。相比硅基 IGBT, 现阶段, 650V SiC MOSFET 的价格大约高出 3 倍, 1200V SiC MOSFET 大约高出 3.5 倍, 但是 SiC MOSFET 器件具备芯片尺寸小、功率密度高等优势。

相比硅基 IGBT	650V SiC MOSFET	1200V SiC MOSFET
价格	高 3 倍	高 3.5 倍
芯片尺寸	小 5 倍	小 5 倍
功率密度	大 2 倍	大 16 倍
开关损耗	小 6.5 倍	小 11 倍

▲ IGBT 与 SiC MOSFET 价格对比 来源: 行家说 Research

车规级 650V SiC MOSFET 的售价约为硅基 IGBT 的 3-3.6 倍; 部分 1200V SiC MOSFET 的售价约为硅基 IGBT 的 2.7-3.5 倍。

材料	企业	参数	价格 (美元)
SiC MOSFET	R 公司	650V/30A	17.14
硅基 IGBT	R 公司	650V/50A	5.6
硅基 IGBT	I 公司	650V/50A	4.66
SiC MOSFET	R 公司	1200V/31A	22
硅基 IGBT	R 公司	1200V/25A	6.66
硅基 IGBT	I 公司	1200V/57A	7.65

▲ 车规级 IGBT 与 SiC MOSFET 价格对比 (价格仅供参考) 来源: 行家说 Research、findchips

● SiC 模块价格趋势

目前, 相比硅基 IGBT 模块, SiC MOSFET 模块价格约高出 3-5 倍左右。车规级 SiC 模块方面, 相比硅基 IGBT 模块, SiC 模块价格约 2.5-3 倍左右。当 SiC 模块价格降低到硅基 IGBT 模块的 2 倍左右, 且 SiC 衬底产能有保障的情况下, 新能源汽车电机控制器将大规模使用 SiC 模块。

方案	SiC MOSFET 模块	硅基 IGBT 模块
额定值	1700V、250A	1700V、300A
最大功率	1800W	1800W
价格	4200 元	850 元
方案	SiC MOSFET 模块	硅基 IGBT 模块
额定值	1200V、40A	1200V、40A
半桥价格	900 元	300 元
全桥价格	2700 元	900 元

▲ 不同功率硅基 IGBT 和 SiC 模块的价格情况 (价格仅供研究参考) 来源: 行家说 Research、findchips

材料	企业	参数	价格 (美元)
SiC	S 公司	1200V/13mΩ	235
硅	S 公司	1200V/75A	79
硅	I 公司	750V/200A	85

▲ 车规级 IGBT 与 SiC 模组价格对比 来源: 行家说 Research、findchips

6.2 SiC 衬底产能趋势

由于目前 SiC 器件的产能主要受限于 SiC 衬底, 所以近几年 SiC 衬底产能决定了整体 SiC 器件的供应能力。2021 年, 全球 SiC 衬底年产能大约为 150-180 万片, 其中, Wolfspeed 约为 85 万, II-VI 约为 16-17 万片, SiCrystal 约为 15 万片, SK Siltron CSS 约 6 万片。2022 年各大衬底企业启动了大规模的扩产行动, 预计到 2027 年仅 Wolfspeed、II-VI 等 5 家企业的年产能将近 480 万片。

企业	未来产能规划
Wolfspeed	预计 2022 年产能达到 16.7 万平方英尺, 2024 年达到 24.2 万平方英尺
II-VI	2027 年目标产能是 100 万片。
SiCrystal	2024 年 30-40 万片。
意法半导体	2024 年超过 37 万片。
安森美	2023 年产能扩充 4 倍, 约 20 万片 / 年, 预计 2027 年达到 100 万片。
SK 集团	2022 产能约为 12 万片, 2025 年目标产能为 50 万片。
Soitec	2022 年建设 3C-SiC 产线, 2023 年产能 50 万片 / 年。

2021 年, 国内 SiC 衬底产能大约为 20 万片 (折合 6 英寸), 2022 年众多企业也在扩产, 新增项目也非常多。仅下方企业的 SiC 衬底产能将超过 700 万片 (包含 4 英寸和 6 英寸), 建设周期约为 2-5 年。2027 年主流厂商的 SiC 衬底产能合计将达到 1140 万片, 假设真实达产率为 30%, 产能利用率为 90%, 那么届时有效产量将达到 300 万片。

企业	规划产能	企业	规划产能
天岳先进	上海项目新增 30 万片	世纪金光	未来年产能 22 万片
天科合达	多地合计新增 46 万片	南砂晶圆	未来年产能 20 万片
烁科晶体	未来年产能 160 万片	天达晶阳	未来年产能 10.8 万片
三安光电	未来年产能 60 万片	微芯长江	未来年产能 15 万片
同光股份	未来年产能 60 万片	国宏中能	未来年产能 11 万片
东尼电子	规划建设 12 万片	超芯星	未来年产能 150 万片
晶盛机电	未来年产能 40 万片	科友	未来年产能 30 万片
露笑科技	未来年产能 24 万片	晶越	未来年产能 12 万片
中电化合物	未来年产能 10 万片		

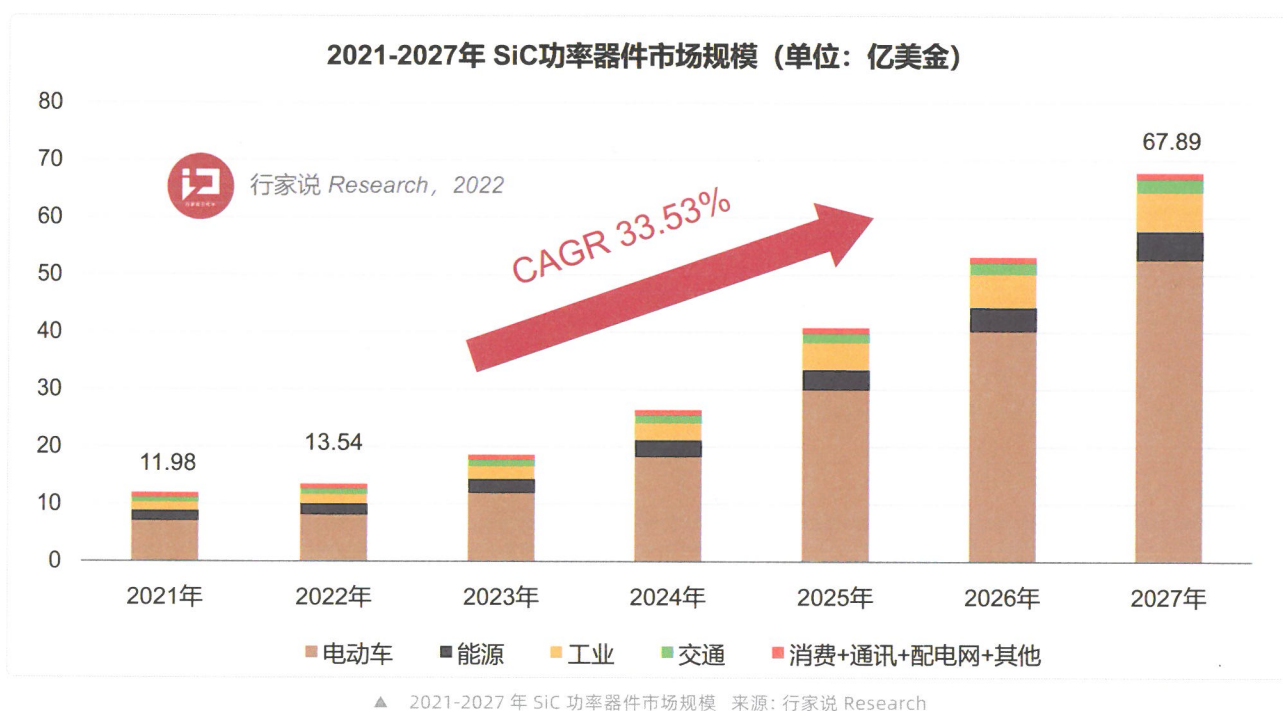
▲ 国内 SiC 衬底未来 2-5 年规划产能 (不区分 4 英寸和 6 英寸) 来源: 行家说 Research、公告

6.3 SiC 市场规模预估

业界把 SiC 器件发展分为三个发展阶段：2019-2021 年为发展初期，2022-2023 年为拐点期，2024-2026 年为爆发期。行家说 Research 估算，2022 年 SiC 器件市场规模将达到 13.54 亿美金，同比 2021 年增长 13%，增速不够快是因为 SiC 产能未释放和汽车定点周期。

此外，随着产能释放和新能源汽车的发展，行家说 Research 预计 2027 年，全球碳化硅功率半导体将从 2021 年的大约 11.98 亿美元增长到 67.89 亿美元，年复合增长率超过 33.53%。而折合 6 英寸的 SiC 衬底 / 晶圆出货量将从几十万片提升至数百万片。

碳化硅功率器件最大市场来自于新能源汽车，2027 年的市场规模将从 2021 年的 7.10 亿增长到 52.66 亿美元，解决碳化硅器件整体市场规模的 75%。其次是工业领域，2027 年市场规模将达到 6.73 亿美元，占比为 10%；能源领域将增长到 4.99 亿美元，市场规模占比为 7.3%。



功率半导体器件作为电力电子技术的核心，目前管理着全球超过 80% 的电能资源，在电能“发、输、变、配、用”各个环节都发挥着重要作用，SiC 材料耐高压、耐辐射、耐高温、耐大电流，在电路中可以降低损耗，在高端功率器件领域将迅速替代硅基器件，是达成“双碳”目标的重要材料，被广泛应用于新能源车、高速充电桩、高速轨道交通、光伏、工业电源等领域。

第七章、SiC 半导体产业模式分析

以下联合出品方及参编单位对本章节的特别贡献

A 级参编单位



7.1 SiC IDM 模式与成本分析

◎ 7.1.1 SiC IDM 模式进展

不同于硅产业,目前出货量领先的 SiC 功率器件厂商大多选择 IDM 商业模式,而且越来越多的企业通过并购或者合作伙伴关系重塑 SiC 生态系统。此前, Wolfspeed、罗姆和意法半导体实现了从 SiC 衬底、外延、芯片、模块等环节的垂直整合,近几年也有诸多 SiC 知名厂商进行垂直整合。

如安森美也选择 IDM 模式,2021 年 10 月,以 4.15 亿美元收购 SiC 衬底生产商 GTAT;2021 年 11 月,II-VI 宣布投资 10 亿美元实现全产业链的垂直整合, SiC 衬底和外延端主要基于公司自身技术、SiC 芯片模块主要基于通用公司的技术;2022 年 4 月,韩国 SK Inc 以 1200 亿韩元收购 SiC 器件企业 Yes Power Technix 95.8% 股权,再加上 2019 年收购美国杜邦 SiC 衬底事业部,也实现了垂直整合。日本电装公司也在着手建设 SiC 衬底产线,很快也会实现全产业链布局。

中国方面,主要的 SiC 制造商较少全产业链模式,目前只有三安集成实现了从 SiC 衬底到器件的垂直整合。另外,比亚迪、世纪金光等企业也在打造 IDM 模式,中国电子科技集团透过下属几个研究所形成了 IDM 布局。

2022 年	企业	新增环节	事件	涉及环节
6 月	日本电装	衬底	宣布即将内部生产 SiC 衬底	衬底、外延、器件、模块
4 月	SK 集团	模块	收购模块材料企业 Teraon	衬底、外延、器件、模块
3 月	东芝	外延	宣布内部生产 SiC 外延片	外延、器件、模块
3 月	昭和电工	衬底	宣布内部建设 SiC 衬底生产线	衬底、外延
4 月	韩国 LX 集团	芯片制造	计划收购美格纳	设计 (LX Semi)、外延 (LGIT)
3 月	鸿海集团	衬底 / 设计	入股盛新,收购 Fast SiC 40% 的股权	衬底、设计、器件制造 (旺宏)

▲ 2022 年 SiC 产业垂直整合进展 来源:行家说 Research

相对来说, SiC 纯晶圆代工 (Fab) 业务才刚刚起步,其中的代表企业包括: X-Fab 美国晶圆厂、Clas-SiC (英国)、汉磊 Episil (中国台湾)、SiCamore 等。从厂商的业绩来看, SiC 代工业务也在快速增长。近年来,越来越多的企业进入了 SiC 代工业务,比如中国的三安、绍兴中芯、积塔、启迪半导体、中科汉韵,以及韩国的 Yes Power 和 Power Master 等。

企业	SiC 晶圆代工产能情况	区域
X-Fab	2020 年 3.5 万 / 月	美国
汉磊	2022 年 6 英寸产能为 2000 片 / 月, 2023 年 4000 片 / 月	中国台湾
积塔	目前产能数百片 / 月, 规划产能 5000 片 / 月	中国上海
芯粤能	规划产能 2 万片 / 月	中国广州

启迪（长飞先进）	规划产能 50000 片 / 年（SiC+GaN）	中国安徽
Clas-SiC	1 条 6 英寸 SiC 产线	英国
中科汉韵	二期规划产能 5000 片 / 月，三期 2 万片 / 月	中国江苏
三安	规划产能 3 万片 / 月	中国湖南
华润微	现有产能 1000 片 / 月	无锡

▲ SiC 代工厂产能规划情况 来源：行家说 Research

◎ 7.1.2 SiC IDM 模式建线成本分析

建线方式	成本说明
专用 SiC 生产线	<ul style="list-style-type: none"> ○ 以某厂为例，一条 6 英寸生产线需要的设备类型大约超过 100 多种，设备数量合计超过 210 台。其中湿法区大约需要 18 种设备，合计 38 台；扩散区需要 18 台设备；蚀刻区需要 15 台设备；外延区需要 2 台设备；光刻区需要 38 台设备；薄膜区需要 22 台设备；研磨区 7 台设备；测试等环节还需要 70 多台设备。 ○ 据统计，建设一条 4 英寸线仅需 1 亿人民币，建一条 6 英寸线需 10 亿人民币，建一条 8 英寸线则需 40 亿人民币。而且从项目落地，到设备引进，到最终投产，可能需要三到五年时间才能实现满负荷生产。在 SiC 产量较低时，建设专用工厂的晶圆成本经济性并不理想，每月生产量超过 1 万片，才能实现效益，因此目前 IDM 模式比较适合头部企业或者已经获得大订单的 SiC 器件企业。
将旧硅线改为 Si/SiC 混合线	<ul style="list-style-type: none"> ○ 与硅芯片相比，SiC 芯片生产的主要差别在高温工艺上，例如高温离子注入、高温氧化、高温激活等，以及这些高温工艺所需求的硬掩模工艺等。高温工艺关乎着 SiC 的良率，是各大 SiC 厂商所着力研发的关键环节之一。因此，采购专用设备，在旧的硅基晶圆线上进行改造，是更省成本、建设速度更快的方式。 ○ 相比建设专线，这种方式预计只需一两千万美元的额外资金投入。2015 年，X-Fab 和 PowerAmerica 平分不到 2000 万美元投资，在旧有商业硅线上实现了硅器件和 SiC 器件的混合生产，在 SiC 订单量不足的同时，通过生产硅基器件来降低成本。

▲ 两种 SiC 建线成本分析 来源：行家说 Research

◎ 7.1.3 IDM 模式生产成本分析

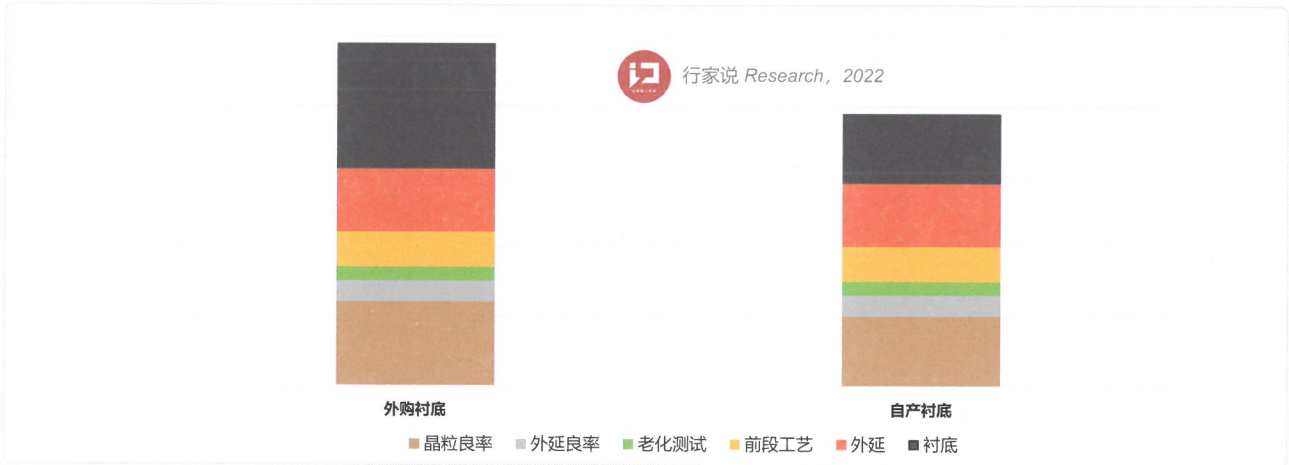
IDM 模式的其中一个优势是可以降低 SiC 器件生产成本，下面分析一下这种模式对器件成本的影响。目前 6 英寸 SiC 衬底价格大约为 5000-6500 元，外延片的价格大约 1 万元人民币，SiC MOSFET 的晶圆成本大约为 3 万元人民币。单颗器件的成本分别为 52 元（裸芯片尺寸 25mm²）和 2.63 元（DFN8*8 封装）。

衬底成本	衬底 + 外延价格	代工成本	晶圆成本	
5000	1 万元	3000 元	3 万元	
裸芯尺寸	器件颗数	良率	良品数量	单颗成本
25mm ²	605	80%	484	62 元
裸芯尺寸	器件颗数		良品数量	单颗成本
1.2-1.3mm ²	12000		9600	3.13 元

▲ SiC 器件各环节成本情况 来源：行家说 Research

目前，第三方商业 SiC 代工厂的加工价格为 3500-5500 元 / 片，大批量生产时的平均报价大约为 3000 元人民币 / 片。如果采用 IDM 模式，自己制造 SiC 器件，那么成本最高可降低 10% 左右。而如果连 SiC 外延片也内部生产，那么成本合计最高可降 20%。如果再进一步垂直整合，像意法半导体、安森美等企业通过收购，内部生产 SiC 衬

底,那么器件成本又可以进一步降低。据 PGC 公司分析,以 1200V、100A 的 SiC MOSFET 芯片为例,仅自己内部制备衬底,其 SiC MOSFET 的单芯片成本大约可以降低 18% 左右。



7.2 IDM 与 Fabless 模式优劣势对比

SiC 器件(芯片制程)环节主要有三种商业模式,一是 IDM 模式,拥有自己的晶圆制造产线;二是 Fabless 企业,只器件设计,让第三方工厂代工生产;三是 IDM 和外协同步模式。目前,全球前五大的 SiC 器件企业(意法半导体、英飞凌、罗姆、安森美、三菱)基本都是 IDM 模式,这种模式有 4 个主要优势:产品开发效率和工艺迭代会更快;器件生产成本更低;产品差异化竞争力强;供应更有保障,服务更及时。

但由于 SiC 产业尚处于起步阶段,企业布局 IDM 模式需谨慎,因为 IDM 模式的投资较重,而且运营成本也较高,在市场回报不足时,投资过大容易导致现金流断裂。同时,投资规模不够大,生产能力有限也会导致出现单位生产成本居高不下、大客户认可度不高的问题。

年产能	主设备数量	洁净室面积	土建配套	年固定支出	固定折旧费
5 万片	100 台套	3000m ²	4 万 m ²	约 0.5 亿元	约 0.5 亿元
10 万片	200 台套	7000m ²	6 万 m ²	约 1 亿元	约 1 亿元
20 万片	400 台套	1.2 万 m ²	10 万 m ²	约 1.5 亿元	约 1.5 亿元

▲ 不同产能 SiC 晶圆线的投资情况(仅供研究参考) 来源:某企业投资说明

Fabless 模式的主要优势包括:资本支出包袱轻;无需管理生产,专注技术研发;代工厂选择灵活;未来切换 8 英寸线更快。

IDM		Fabless	
优势	劣势	优势	劣势
研发效率	建线成本	产品迭代快	技术能力不够
成本管控	经营成本	轻资本	代工资源
产品差异化	产品迭代慢	代工资源	产品同质化
长期供货保证	建线 - 投产周期长	交付速度更快	代工厂配合度

▲ 不同商业模式的优劣势对比 来源:行家说 Research

从全球范围来看, 2021 年全球功率器件营收前十的企业中, 几乎全都是 IDM 模式, 且目前 2021 年全球营收前十的 SiC 企业中, 有 7 家是 IDM 模式, 其他的 3 家企业也已经进行产业整合: 赛米控 - 丹佛斯、UnitedSiC、GeneSiC。国内方面, 部分 Fabless 企业已经建线或正在建线, 实现向 IDM 模式的转型。

全球功率器件 TOP 10 企业营收概况				
企业	市占率	2021	2020	2019
英飞凌	20.90%	48.69	40.02	37.38
安森美	8.80% ↑	20.51	16.12	17.11
意法半导体	7.40%	17.14	11.26	11.92
三菱电机	6.30%	14.76	12.51	12.33
富士电机	5.00% ↑	11.73	9.48	7.75
东芝	4.30%	9.96	8.78	8.61
Vishay	4.30% ↑	9.96	7.74	8.24
安世半导体	2.90%	6.72	4.69	4.96
瑞萨电子	2.80%	6.45	5.05	5.5
罗姆	2.70%	6.34	4.93	4.93

▲ 2019-2021 年全球功率器件企业榜单 (单位: 亿美元) 来源: Omda、行家说 Research

另一个商业模式对比的维度是参考硅基功率器件。目前, 跟 SiC 一样, 国内知名 MOSFET 器件厂商有近百家, 其中亿元以上企业有 21 家。这 21 家企业中 Fabless 企业 12 家, IDM 企业 9 家。2021 年中国硅基 MOSFET 营收 TOP10 企业中, 有 2 家中国的 IDM 企业 (华润微、士兰微) 和 2 家 Fabless 企业 (新洁能、东微), 暂时尚未分出哪种模式更具优势。

中国 TOP20 硅基 MOSFET 企业商业模式			
IDM		Fabless	
安世半导体	华润微	新洁能股份	尚阳通科技
士兰微	吉林华微电子	东微半导体	韦尔半导体
捷捷微电子	扬杰电子	长晶科技	斯达半导体
乐山无线电	深爱半导体	锐竣半导体	恒泰柯半导体
立昂微电子		凯威特半导体	龙腾半导体
		芯派电子	凯思半导体

▲ 硅基 MOSFET 企业商业模式对比 来源: 行家说 Research

从国内企业的实际情况来看, IDM 企业与较为领先 Fabless 企业几乎处于同一起跑线, 这是因为国内 IDM 企业工艺相对比较成熟是 SiC SBD, 而 SiC MOSFET 良率等方面还在爬坡, 而国内市场对 SiC MOSFET 又需求强劲, 因此给了 Fabless 企业一个很好的窗口期, 他们借助代工厂资源迅速跟进, 获得了一定的订单。不过, 长期来看, 由于 SiC MOSFET 较为成熟代工产能主要集中于境外, 而且目前有效产能也比较高度集中, 客观存在单次流片时间长、流片成本高、服务响应慢等问题。目前国内的 SiC MOSFET 代工厂也在逐步完善中, 与设计企业的后期互动也值得关注。

第八章、SiC 产业标准及专利分析概况

以下联合出品方及参编单位对本章节的特别贡献

A 级参编单位



B 级参编单位



参与单位



8.1 SiC 半导体相关标准分析

目前, SiC 半导体器件正处于快速发展的黄金期, 充满着机遇与挑战, 有诸多迫切需要研究并解决的标准化问题。全球 SiC 半导体标准化建设主要围绕 4 个方面开展。

标准化建设	说明
性能表征	SiC 材料与传统半导体材料在特性上有明显的差别, 因此, SiC 半导体器件的电参数表征形式需要重新规范, 研究相关性能表征要求及相应的评价方法。
参数测试方法	由于 SiC 半导体器件属于高压、大功率半导体器件, 其特性参数具有测试项目多、量程变化大、参数之间互相关联和部分瞬态参数快速突变等特点, 使得对参数的测试, 尤其是动态参数的测试变得十分困难, 且现行标准中的部分参数测试方法并不适用。
质量评价与可靠性检测	对于 SiC 制作的器件, 在引用现有标准对其进行检测和试验时会出现考核未满足 SiC 功率半导体器件自身特性、试验应力与考核要求偏低等问题。
封装相关标准	由于 SiC 半导体器件通常应用于较为恶劣的高温或高辐照条件下, 目前 300 ~ 600°C 工作条件下还缺乏成熟的封装技术, 封装材料、衬底材料、贴片材料、键合材料都需要针对 SiC 材料进行优化, 因此也尚未形成标准。

▲ 全球 SiC 半导体标准化建设 4 个主要方向

◎ 8.1.1 国际标准

● IEC 标准

国际电工委员会 (IEC) 是世界上成立最早的电气和电子国际标准化机构, 是世界上最具权威性的国际性标准组织之一。IEC/TC47 是 IEC 的第 47 技术委员会——“半导体器件技术委员会”, 负责制定半导体分立器件、集成电路、传感器、电子元器件组件、接口要求和对环境无害的设计、制造、使用、再利用和试验的国际标准。针对 SiC 半导体, IEC 现有以下几个相关标准:

标准号	名称	发布时间
IEC63068-1 到 4	功率器件用 SiC 同质外延片缺陷的无损识别标准, 第 1 部分到第 4 部分分别是: 缺陷分类、使用光学检测的缺陷测试方法、使用光致发光的缺陷测试方法、使用光学检查和光致发光的组合方法识别和评估缺陷的程序。	2019-2022
IEC63229	半导体器件 -SiC 基氮化镓外延膜缺陷分类	20201
IEC63275-1 和 2	SiC 分立金属氧化物半导体场效应晶体管的可靠性测试方法, 两部分分别是偏置温度不稳定性的测试方法、由于体二极管操作导致的双极退化的测试方法。	2022

▲ IEC 已发布了 SiC 相关标准 来源: 行家说 Research

● JEDEC 标准

固态技术协会 (JEDEC) 成立于 1958 年, 1999 年 JEDEC 从电子工业协会 (EIA) EIA 中独立出来, 不隶属于任何一个政府或公司。作为全球半导体行业标准的领先开发组织, JEDEC 由近 300 家各个国家的公司推选的大约 3000 名行业专家组成。

JC-70 是 2017 年成立的分技术委员会, 该分会由 JC-70 由 23 个成员公司组成, 目前拥有超过 60 个成员公司, 由英飞凌、德州仪器、Wolfspeed 等公司的专家领导, 目前包括 GaN 和 SiC 两个小组。该分会目前重点关注器件可靠性、认证程序和测试方法的标准化以及电参数项目的规范化。目前, JEDEC 已发布了 4 个 SiC 标准:

标准号	名称	发布时间
JEP190	评估 SiC 功率器件 dv/dt 稳健性的指南 (1.0 版本)	2022 年 8 月
JEP187	数据表中表示 SiC MOSFET 开关损耗的指南	2021 年 12 月
JEP184	用于电力电子转换的 SiC 金属氧化物半导体器件的偏置温度不稳定性评估指南	2021 年 3 月
JEP183	测量 SiC MOSFET 的阈值电压 (VT) 的指南	2021 年 1 月

▲ JEDEC 已发布了 4 个 SiC 标准 来源: 行家说 Research

● SEMI 标准

SEMI (国际半导体产业协会) 是全球性的产业协会, 创立于 1970 年, 拥有 2000 多家会员公司, 涉及半导体、平面显示、太阳能光伏等多个领域。SEMI 全球 SiC 工作组成立于 1999 年。该工作组由欧洲 SEMI 委员会领导, 旨在为 SiC 行业制定标准文件。最近 2 年, SEMI 还成立了 3 个新的工作组, 包括 SiC 外延片工作组、SiC 衬底工作组和 SiC 测试方法工作组。

SEMI 已经发布了两个专门针对 SiC 材料标准, 包括: “SEMIM55-0817 SEMI 抛光单晶 SiC 晶圆规范”, 和 “M81-0611 单晶 SiC 衬底缺陷指南”。SEMIM55 标准的最新版本即将发布, 增加 8 英寸 SiC 的规格要求, 为 8 英寸 SiC 产业化做准备。

发布单位	名称	发布时间
SEMI	SEMIM55-0817 SEMI 抛光单晶 SiC 晶圆规范	/
SEMI	M81-0611 单晶 SiC 衬底缺陷指南	/

▲ SEMI 已发布的 SiC 标准 来源: 行家说 Research

SEMI 还在起草 4 个 SiC 材料标准, 包括: “6693-4H-SiC 外延片规范和三种测试方法 (瀚天成牵头)”, “6768-通过激光反射对 SiC 晶片微管密度的测试方法”, “6767-通过光干涉对 SiC 晶片平整度的测试方法”, 以及 “6769-SiC 晶片残余应力的测试方法”, 这四份文件也将涵盖 8 英寸材料尺寸。最后一个小组目标是制定 “6717-用于量化 4H-SiC 晶体中 TSD 的测试方法”。

◎ 8.1.2 中国国内标准

在中国, 关于 SiC 半导体的标准包括国家标准、行业标准和地方标准。

● 中国国家标准

全国半导体设备和材料标准化技术委员会 (SAC/TC203) 是在国家标准化管理委员会和工业和信息化部共同领导下, 从事全国半导体设备和材料技术领域标准化工作的组织, 主要对口 SEMI 组织, 工作范围涉及半导体材料、光伏材料、平板显示材料、LED 照明材料、电子化学品、电子封装材料、电子工业用气体、微光刻、设备等。在 SiC 半导体方面, 有关的中国国家标准包括:

代号	名称	状态
现行标准		
GB/T41153-2021	SiC 单晶中硼、铝、氮杂质含量的测定 - 二次离子质谱法	实施
GB/T37254-2018	高纯 SiC 微量元素的测定	
GB/T32278-2015	SiC 单晶片平整度测试方法	
GB/T31351-2014	SiC 单晶抛光片微管密度无损检测方法	
GB/T30656-2014	SiC 单晶抛光片	
GB/T30866-2014	SiC 单晶片直径测试方法	
GB/T30867-2014	SiC 单晶片厚度和总厚度变化测试方法	
GB/T30868-2014	SiC 单晶片微管密度的测定 - 化学腐蚀法	
国标计划		
20202829-T-469	半绝缘 SiC 单晶的电阻率非接触测试方法	正在批准
20202830-T-469	SiC 单晶位错密度的测试方法	
20200799-T-469	SiC 单晶抛光片	
20220134-T-469	SiC 外延片	起草
20214654-T-469	半导体器件 - 功率器件用 SiC 同质外延片缺陷的无损检测识别判据 - 第 1 部分: 缺陷分类	
	半导体器件 - 功率器件用 SiC 同质外延片缺陷的无损检测识别判据 - 第 2 部分: 缺陷的光学检测方法	
	半导体器件 - 功率器件用 SiC 同质外延片缺陷的无损检测识别判据 - 第 3 部分: 缺陷的光致发光检测方法	
20213238-T-469	SiC 晶体材料缺陷图谱	征求意见
20210888-T-469	SiC 抛光片表面质量和微管密度的测试 - 共焦点微分干涉法	
20204893-T-469	SiC 外延层厚度的测试 - 红外反射法	
20204762-T-604	电热和电磁处理装置基本技术条件: SiC 单晶生长装置	
20203728-T-469	SiC 外延片表面缺陷的测试 - 激光散射法	

▲ SiC 相关的中国国家标准 来源: 行家说 Research

● CASA 标准

第三代半导体产业技术创新战略联盟 (CASA) 标准化委员会已经发布众多 SiC 相关表, 包括:

标准号	名称	状态
T/CASAS 001-2018	SiC 肖特基势垒二极管通用技术规范	已发布
T/CASAS 002-2021	宽禁带半导体术语	已发布
T/CASAS 003-2018	p-IGBT 器件用 4H-SiC 外延晶片	已发布
T/CASAS 004.1-2018	4H-SiC 衬底及外延层缺陷术语	已发布
T/CASAS 004.2-2018	4H-SiC 衬底及外延层缺陷图谱	已发布
T/CASAS 006-2020	SiC 金属氧化物半导体场效应晶体管通用技术规范	已发布
T/CASAS 007-2020	电动汽车用 SiC (SiC) 场效应晶体管 (MOSFET) 模块评测规范	已发布
T/CASAS 009-2019	半绝缘 SiC 材料中痕量杂质浓度及分布的二次离子质谱检测方法	已发布
T/CASAS 010-2019	GaN 材料中痕量杂质浓度及分布的二次离子质谱检测方法	已发布
T/CASAS 011.1-2021	车规级半导体功率器件测试认证规范	已发布
T/CASAS 011.2-2021	车规级半导体功率模块测试认证规范	已发布
T/CASAS 011.3-2021	车规级智能功率模块 (IPM) 测试认证规范	已发布
T/CASAS 012-202X	电动汽车用 SiC 电机控制器评测规范	委员会草案
T/CASAS 013-2021	SiC 晶片位错密度检测方法 KOH 腐蚀结合图像识别法	已发布
T/CASAS 014-2021	SiC 衬底基平面弯曲的测定高分辨 X 射线衍射法	已发布
T/CASAS 015-2022	SiC 金属氧化物半导体场效应晶体管 (SiC MOSFET) 功率循环试验方法	已发布
T/CASAS 016-2022	SiC 金属氧化物半导体场效应晶体管 (SiC MOSFET) 结壳热阻瞬态双界面测试方法	已发布
T/CASAS 017-2021	第三代半导体微纳米金属烧结技术术语	已发布
T/CASAS 018-2021	微纳米金属烧结件剪切强度测试方法	已发布
T/CASAS 019-2021	微纳米金属烧结体电阻率试验方法四探针法	已发布
T/CASAS 020-2021	微纳米金属烧结体热导率试验方法闪光法	已发布
T/CASAS 021-202X	SiC MOSFET 阈值电压测试方法	制定中
T/CASAS 023-202X	宽禁带半导体封装用烧结银膏	制定中
T/CASAS 024-202X	SiC MOSFET 开关运行条件下阈值稳定性测试方法	制定中
T/CASAS 025-202X	8 英寸 SiC 晶片基准标记及尺寸	制定中

▲ CASA 发布 (含制定中) SiC 相关标准 来源: 行家说 Research

◎ 8.1.3 车规 SiC 标准

AEC-Q101、AQG-324、IATF16949 等认证是车规 SiC 功率器件和模块的敲门砖, 是必要的最低要求, 更严格的是客户认证。

● AECQ-101

汽车电子委员会 (Automotive Electronics Council, AEC) 创立于 1994 年, 是由美国三大汽车公司为了一套通用的零件资质及质量系统标准而联合发起的。对于 SiC 器件, 通常需要额外的测试, 例如体二极管可靠性 (连续和脉冲)、动态栅极应力测试、扩展热循环测试 (TCY) 和功率循环寿命测试, 以确保器件质量。AEC-Q101 要求的一些测试对 SiC 来说可能更具挑战性, 其中包括:

AEC-Q101 要求的一些测试对 SiC 的挑战	
1	100% 额定栅极电压下的高温栅极偏置 (HTGB) 1000 小时。这是对 SiC 的一项重要测试。制造稳定的 SiC MOSFET 栅极一直是 SiC 面临的巨大挑战之一。
2	100% 额定电压下的 1000 小时高温反向偏压 (HTRB)。由于栅极稳定性, 这也是对 SiC 的一项具有挑战性的测试。目前, 该测试是在没有栅极偏置的情况下完成的, 但鉴于负栅极偏置通常与 SiC MOSFET 一起使用, 未来它可能会发生变化。
3	温度循环 (TC) 测试会在器件上产生表面应力, 这可能会对某些栅极结构造成挑战。

● AQG324

欧洲电力电子中心 (ECPE) 是由 150 余家机构组成的庞大行业组织, 成员公司如 ABB、Siemens、Bosch、ST、Valeo、Infineon 和 Daimler 等。ECPE 工作组 AQG324 成立于 2017 年 6 月, 主要制定用于机动车辆电力电子转换器单元的功率模块的欧洲认证指南。2021 年 AQG324 发布第 3 版指南, 描述了汽车驱动逆变器应用中基于 SiC 的功率模块的认证要求。尤其是执行有效的功率循环测试例程所需的调整以及几个成熟的鉴定例程扩展。

● ISO26262 功能安全完整性等级 D (ASIL-D)

ISO26262 标准最初是由欧洲整车厂推动成立, 目前美国、日本、韩国、中国都在陆续跟进这一标准, 已获得汽车界的广泛认可, 成为汽车供应链厂商的“准入许可”。ASIL (Automotive Safety Integration Level) 表示汽车安全性等级。这是对道路车辆的功能安全性定义的风险分类系统。

ISO26262 确定了四种 ASIL-A、B、C 和 D。ASIL-A 代表最低程度的汽车危害, ASIL-D 则代表最高程度的汽车危险, 只有构成最高危害组合 (即: S3+E4+C3) 时, 才能达到 ASIL-D 等级。目前, 国内已有多家 SiC 控制器企业建立了符合功能安全“ASIL-D”级别的产品开发流程体系, 包括中科意创、精进电动等。

● IATF16949

车规级生产厂商的认证主要分两个认证体系。一个是 ISO9001, 这是对于所有生产厂商或是质量管理体系厂商的核心标准; 另一个是 IATF16949, 主要针对汽车零部件制造管控体系标准。国际汽车工作组 (International Automotive Task Force, IATF), 由世界上主要的汽车制造商及协会于 1996 年成立, 目的是协调国际汽车质量体系规范, 减少汽车供应商不必要的资源浪费和利于汽车整车厂全球采购战略的实施。IATF16949 是针对汽车整车厂和其直接的零部件制造商的质量管理体系。目前还没有车规 SiC 材料的相关标准和认证, 但上述车规级认证要求会传递到 SiC 材料的认证和要求上, 未来也需要给出标准来选择符合汽车法规的高可靠性 SiC 材料。

● 总结

SiC 半导体标准化工作可有序促进科技成果产业化、支撑产业规范发展, 目前, SiC 外延片工艺技术及测试方法正在进一步完善, 未来 SiC 材料会在产品良率、稳定性和价格成本方面取得重大突破, 加快 SiC 产业走向市场化和产业化, 从而引发电力电子技术的新革命。

8.2 SiC 半导体相关专利分析

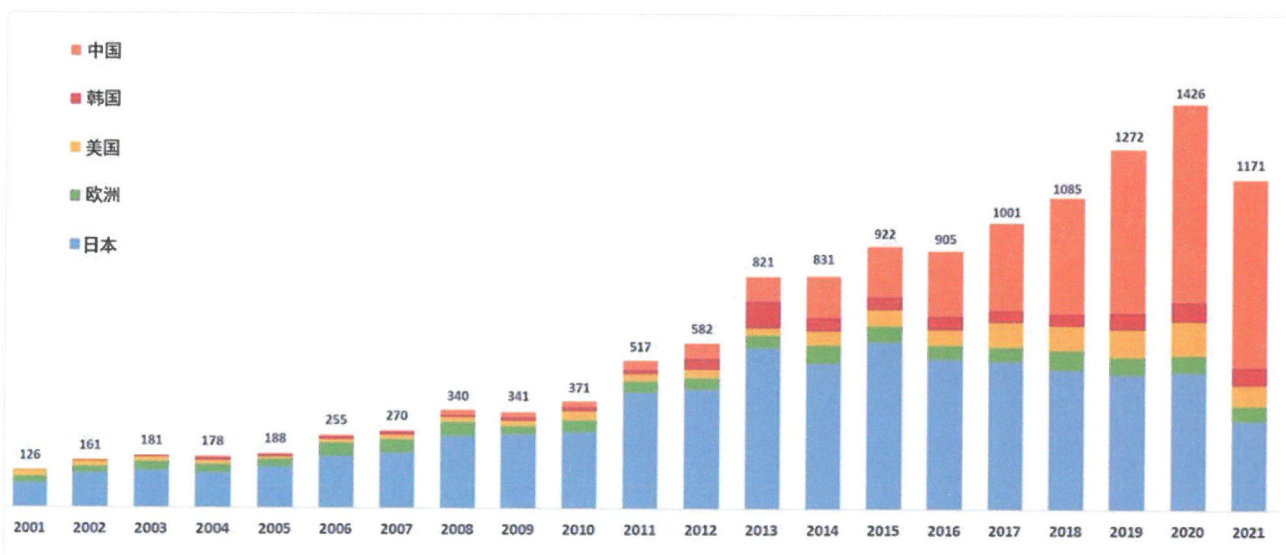
◎ 8.2.1 SiC 相关专利布局概览

本章节将通过全球 SiC 专利布局趋势、主要申请主体进行研究与分析,使企业和机构更好地了解行业竞争态势,以便制定更有针对性、实施性更强的专利发展战略和风险应对方案。总体来说,近十年以来,全球 SiC 产业专利申请和发布数量急剧增长,随着 SiC 材料技术的不断完善,自 2013 年以后模组和电路应用相关的专利数量大幅增长。



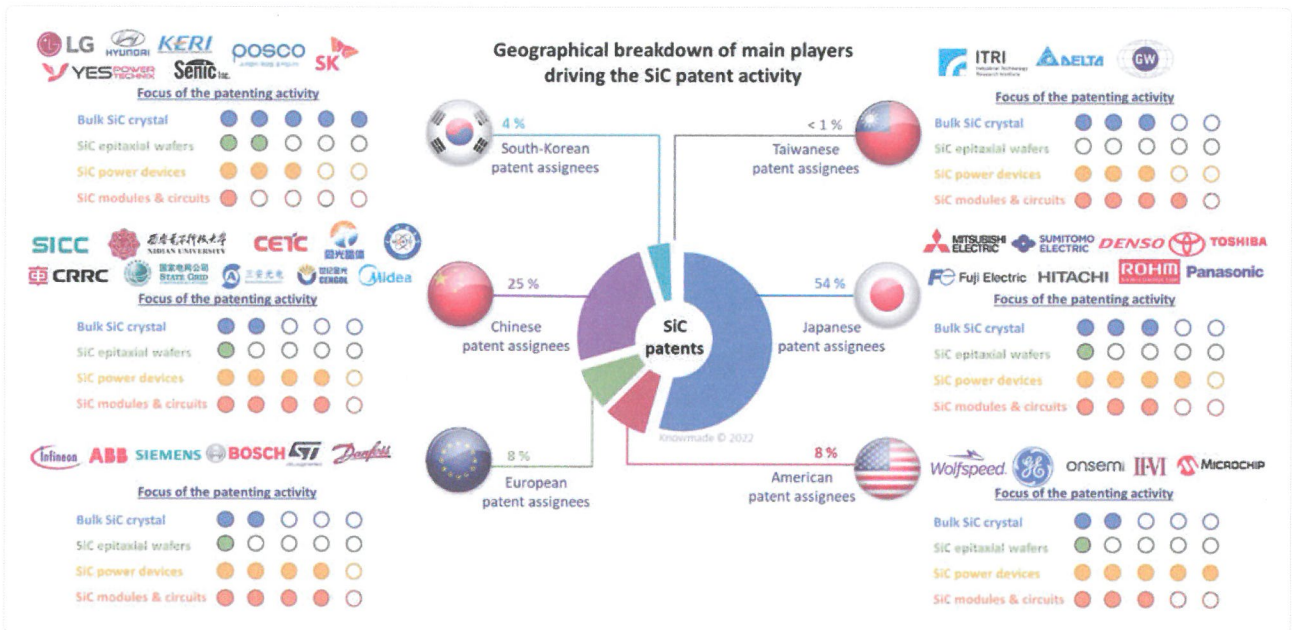
▲ SiC 产业不同环节专利申请变化情况 来源: Konwmade、行家说 Research

从全球各个区域来看,2012 年以前,日本是全球主要的 SiC 专利申请国,而到了 2023 以后,中国企业和机构的专利申请数量大幅增长,从 2019 年以后就成为了全球专利申请数量最多的国家。



▲ 全球各地 SiC 专利申请变化情况 来源: Konwmade、行家说 Research

韩国的 SiC 专利主要集中在单晶和器件, 中国、美国和欧洲的专利主要集中在器件、模组和电路, 日本在单晶、器件和模组的专利申请居多。

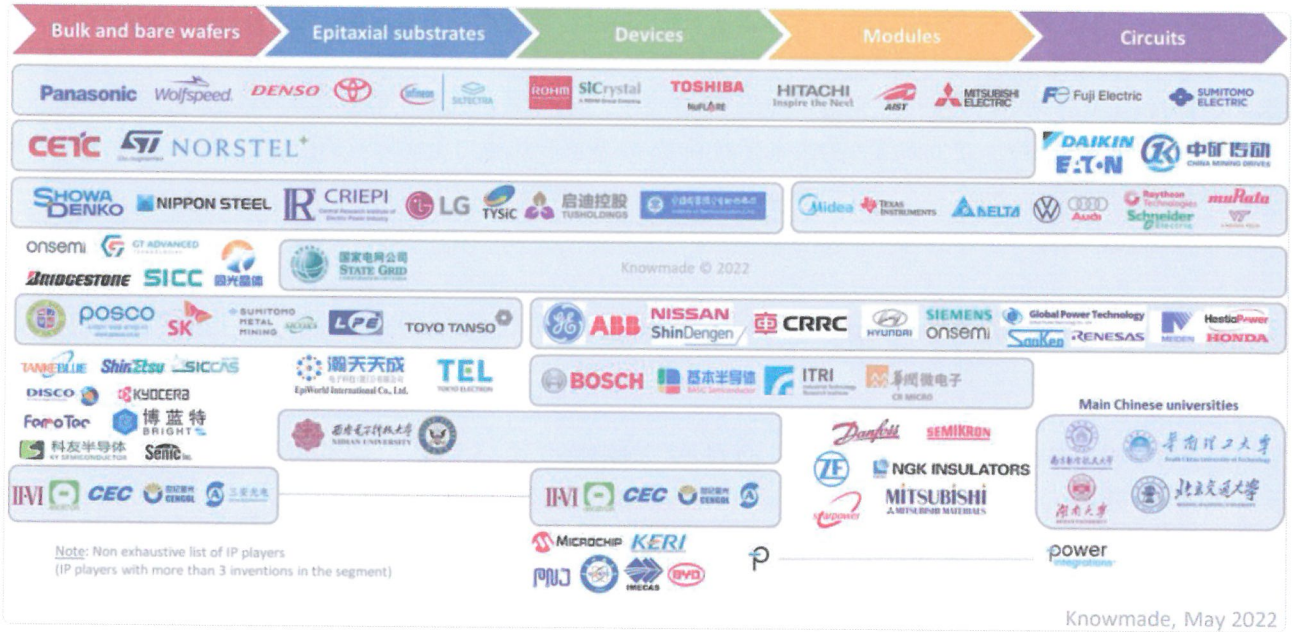


▲ 全球各地 SiC 专利内容侧重情况 来源: Konwmade、行家说 Research

从全球来看, SiC 专利申请靠前的企业包括三菱电机、丰田、住友、富士电机、松下、英飞凌、罗姆、东芝、日立、Wolfspeed、安森美和意法半导体。中国方面, 中国电科集团的 SiC 专利遍布整个产业链, 三安、天域、启迪的专利覆盖了衬底到器件环节, 国网和中车则是覆盖从外延到电路。

专利申请企业	2021排名	专利数量	单晶	外延	器件	模组	电路	2016-2021变化
三菱电机	6	1222	38	56	481	511	196	54%
丰田		1198	409	86	530	150	37	45%
住友		940	239	156	476	70	9	24%
富士	7	786	9	57	531	154	60	110%
松下/三洋		409	55	28	231	37	29	8%
英飞凌	2	369	18	8	205	124	20	103%
罗姆	4	367	41	10	169	121	40	66%
东芝	9	366	11	44	278	39	24	60%
日立		360	15	20	179	114	55	41%
Wolfspeed	3	329	43	34	222	25	15	12%
安森美	5	76	8	1	49	15	4	62%
意法半导体	1	54	5	8	36	3	1	46%

▲ 全球 TOP10 SiC 专利申请企业 来源: Konwmade、行家说 Research



▲ 中国企业申请 SiC 相关专利概览 来源: Konwmade

◎ 8.2.2 SiC 单晶生长专利

目前, PVT 法是主流的 SiC 晶体生长方法, 在这方面, 国外起步较早, 1991 年就有相关方面的专利申请, 从 2003 年起专利申请量开始逐年增长, 到 2011 年达到申请量的巅峰; 相比之下, 中国在 1999 年后才开始有相关方面的专利申请, 2007 年后开始逐年增长, 2016 年专利申请量到达巅峰 (68 件)。总体来看, 在 PVT 生长 SiC 晶体相关专利申请方面, 国外申请量大于国内申请, 且国外申请早于国内, 国外申请人掌握着该领域的主要技术。



▲ 全球 PVT 法 SiC 单晶生长专利申请概况 来源: 国家知识产权局

从国别来看,日本的PVT法专利申请占了全球近一半的申请量,申请人包括新日铁、富士康、日新制钢、松下、三菱、日本电装、普利司通等;韩国位居其后,占32%的申请量。可见,在PVT法生长SiC晶体方面,日本和韩国掌握着大部分的关键技术。中国在PVT法专利申请方面,山东大学、中科院物理研究所、中科院上海硅酸盐研究所、天岳先进等是主要申请人,企业申请人的技术相对领先,许多高校也致力于该领域的技术改进,国外申请人同样占有不可小觑的比例。

◎ 8.2.3 SiC 器件专利

根据德温特数据库DWPI,截至2020年3月25日,全球有1790项“SiC器件”专利搜索结果,其中中国大陆的发明专利申请共有689项。从申请趋势来看,2010年之后,全球SiC功率器件的年申请量急剧增加,2017年达到160多件的申请量,这一阶段是SiC功率器件的爆发期。2013-2015年全球申请趋势有所回落,而中国大陆继续呈现着上升势头。

全球SiC器件专利前10名申请主体中,日本住友、三菱、电装、富士、NIIT、日立占据6席,且日本并且包揽前4名。美国Wolfspeed排名第5,德国英飞凌排名第10。而中国电子科技大学和西安电子科技大学占据第7、第8位。

排名	企业 / 单位	申请量 (项)	排名	企业 / 单位	申请量 (项)
1	住友电气	285	6	NIIT	45
2	三菱电机	228	7	电子科技大学	38
3	电装	220	8	西安电子科技大学	37
4	富士电机	179	9	日立	34
5	Wolfspeed	49	10	英飞凌	30

▲ 全球SiC器件专利申请TOP10来源:国家知识产权局

中国SiC器件专利申请方面,日本依旧表现抢眼,Wolfspeed和英飞凌也有很强的布局,中国大陆企业方面,除了2所高校外,中车和世纪金光进入前10。

排名	企业 / 单位	申请量 (项)	排名	企业 / 单位	申请量 (项)
1	住友电气	111	6	富士电机	32
2	三菱电机	65	7	Wolfspeed	23
3	电装	39	8	中车	20
4	电子科技大学	38	9	英飞凌	19
5	西安电子科技大学	37	10	世纪金光	18

▲ 在华SiC器件专利申请TOP10来源:国家知识产权局

从专利申请情况来看,全球SiC功率器件领域的产业垄断程度相对较低,申请人集中度指数基本保持在50%以下,但是全球范围内SiC功率器件的市场竞争则会更加激烈。而中国申请人的进入,改变了全球申请人集中度持续上升的趋势。

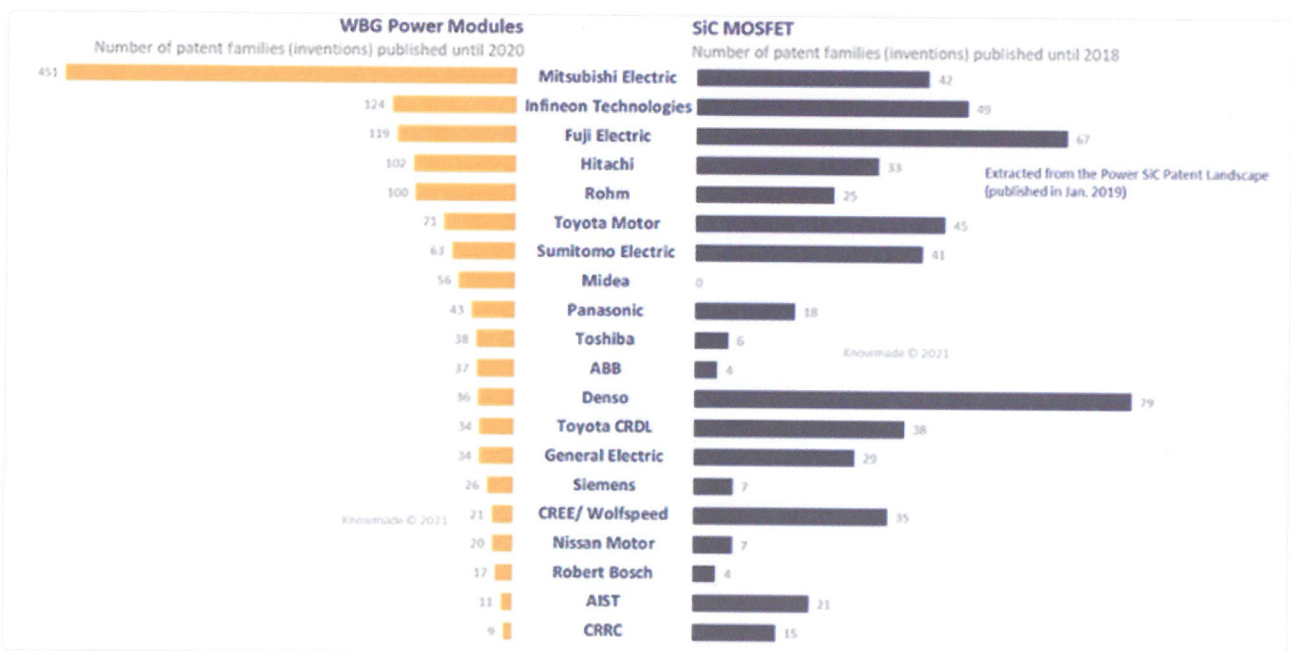
根据 Innography 平台数据,中国前 10 个 SiC MOSFET 高产机构中,公司类机构占 4 个,高校及研究院所占 6 个;而美国前 10 个高产机构均为公司类机构。因此,在 SiC MOSFET 器件技术领域,中国还处于实验室科研孵化阶段,而美国已经处于大量产业化阶段。

中国			美国		
排名	企业 / 单位	申请量 (项)	排名	企业 / 单位	申请量 (项)
1	中芯国际集成电路	165	1	通用电气	163
2	中国科学院	119	2	Wolfspeed	85
3	电子科技大学	83	3	穆巴达拉投资公司	64
4	西安电子科技大学	70	4	埃克森美孚石油	60
5	广州悦智计算机	47	5	德州仪器	56
6	上海华力微电子	37	6	IBM	50
7	西安交通大学	31	7	英特尔	41
8	中山大学	29	8	Dow 公司	29
9	浙江大学	26	9	霍尼韦尔	28
10	中国石油天然气	26	10	UnitedTechnologies	22

▲ 中美 SiC MOSFET 专利 TOP10 来源: 东南大学图书馆

◎ 8.2.4 SiC 模块专利

根据 Knowmade 报告,到目前为止,宽禁带功率模块相关的专利活动以 SiC 为主,但最近 GaN 模块技术的专利申请越来越多,主要集中在降低高开关时的寄生电感频率。在宽禁带功率模块相关的专利申请中,中国中车进入 TOP20。



▲ 全球宽禁带功率模块专利申请 TOP20 来源: Knowmade

第九章、SiC 半导体主要厂商及策略发展分析

以下联合出品方及参编单位对本章节的特别贡献

A 级参编单位



B 级参编单位



参与单位



备注: 本章节内容主要通过企业公开信息收集整理而成, 部分信息或有滞后, 若有出入请以企业官网和公告为准。

9.1 SiC 产业链全景图及重要厂商布局分析

地区	企业	设备	材料	SiC 衬底	SiC 外延	SiC 设计	SiC 制造	SiC 封测	SiC 器件	SiC 模组	应用
北美	Wolfspeed			√	√	√	√	√	√	√	
	II-VI/Coherent			√	√	√	√	√	√	√	
	安森美			√	√	√	√	√	√	√	
	博格华纳										√
	采埃孚										√
欧洲	英飞凌				√	√	√	√	√	√	
	意法半导体			√	√	√	√	√	√	√	
	赛米控 - 丹佛斯									√	√
	博世半导体					√	√	√	√	√	√
	纬湃科技										√
	X-Fab				√		√		√		
日韩	罗姆集团			√	√	√	√	√	√	√	
	SK Siltron			√					√	√	
	电装			√	√	√	√	√	√	√	√
	Resonac			√	√						
	TEL	√									
中国大陆	三安光电			√	√	√	√	√	√		
	世纪金光			√	√	√	√	√	√		
	泰科天润					√	√	√	√		
	比亚迪			√	√	√	√	√	√	√	√
	湖南中车					√	√	√	√	√	√
	中国电科 55 所				√	√	√	√	√		
	国联万众					√	√	√	√	√	
	烁科晶体			√							
	天岳先进			√							
	天科合达			√	√						
	中电化合物			√	√						
	合盛新材料			√	√						
	天域半导体				√	√	√	√	√		
	瀚天天成				√						
	飞镗半导体					√				√	√
	国星光电								√	√	√
	安海半导体					√				√	√
	森国科					√				√	√
	斯达半导体					√				√	√
	基本半导体					√				√	√
	爱仕特					√				√	√
	瀚薪科技					√				√	√
	芯聚能									√	√
	利普思								√	√	√
	派恩杰					√				√	√
	瑞能半导体					√			√	√	√
	清纯半导体					√				√	
	汉磊					√		√		√	
	积塔半导体							√			
	北方华创	√									
	恒普科技	√									
	优晶光电	√									
	中国电科 48 所	√									
	华卓精科	√									
智立方	√										
岚鲸光电	√			√							
联合精密			√								

▲ SiC 产业链全景图及重要厂商 来源: 行家说 Research

9.2 SiC 产业重要玩家产业链分析: IDM 模式

意法半导体 (ST Microelectronics)

总部地址	瑞士日内瓦
营收情况	2021 年全年净营收为 127.6 亿美元, 比去年增长 24.9%; 净利润 20.0 亿美元, 净利润增长 80.8%; 2020 年 SiC 业务收入约 3 亿美元, 2021 年将达到 5.5 亿美元, 预计到 2023 年将达到 10 亿美元。
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	第一家供货特斯拉主驱逆变器的 SiC 企业, 目前已经实现了全产业链布局。 2019 年 2 月, 意法半导体收购 Norstel, 实现了全产业链布局。
扩产情况	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2021 年 11 月, 意法半导体宣布将投资数亿欧元, 在意大利卡塔尼亚建立新基地, 生产 8 英寸 SiC 衬底, 目标是到 2024 年实现 40% SiC 衬底的自主供应。 ○ 2022 年意法半导体大幅扩产。5 月份开始扩大摩洛哥 Bouskoura 工厂的 SiC 模块产量, 洁净室面积扩大了 30%, 达到了 3 万平方米。目前, 意法半导体在卡塔尼亚 (意大利) 和宏茂桥 (新加坡) 工厂的两条 6 英寸晶圆线上生产 STPOWER SiC 产品, 并在其位于深圳 (中国) 和 Bouskoura (摩洛哥) 的后端工厂进行组装和测试。
生产基地	全球拥有 13 个生产基地, 前端生产基地分布在意大利、新加坡、法国等, 后端生产基地涉及菲律宾、马来西亚、中国等。
客户代表	特斯拉、台达电、华为、现代汽车集团、雷诺集团、小鹏、BMW 集团、比亚迪、Rivian、吉利、长城汽车、Arrival、法雷奥、Marelli 和赛米控 - 丹佛斯等。

Wolfspeed

总部地址	美国北卡罗纳州
营收情况	2022 财年整体营收为 7.462 亿美元 (约 50.8 亿人民币), 同比增长 42%; 净收入已达到 2.285 亿美元 (约合人民币 15.56 亿元), 2023 财年收入将超过 10 亿美元。
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 第一家提供商业化 SiC 衬底的公司, 1991 年和 1998 年分别推出了 25mm 6H SiC 和 50mm 4H SiC, 2015 年推出了 8 英寸 SiC 衬底, 目前公司 SiC 衬底市占率超过 60%。 ○ 2020-2022 财年, Wolfspeed 已经获得了大约 110 亿美元 (约合人民币 749 亿元) 的定点项目订单。其中, 2022 财年 Wolfspeed 的定点项目总额为 64 亿美元 (近 436 亿人民币), 与 2021 财年相比增加了 119%, 比 2020 财年增加了 3 倍。2022 财年第四季度定点项目价值为 26 亿美元, 大约有 70%-75% 是汽车行业应用。
扩产情况	Wolfspeed 很早就着手 SiC 产能扩产, 2019 年 5 月宣布投资 10 亿美元, 在美国北卡罗莱纳州建造 8 寸 SiC SiC 超级工厂, 产能扩大 30 倍。2022 年 4 月该工厂正式开业, 2022 年底该工厂将正式量产出货, 2024 年将实现满产运营。
生产基地	纽约、北卡
客户代表	大众、通用、福特、Lucid、宇通、采埃孚、博格华纳、ABB、丹佛斯等

英飞凌 (Infineon)

总部地址	德国慕尼黑
营收情况	2022 财年 (截止 2022 年 9 月 30 日): 营收达到 142.18 亿欧元, 同比增长 29%; 利润达到 33.78 亿欧元, 同比增长 63%; 2021 财年, 英飞凌在全球市场总营收约为 110.60 亿欧元。
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 英飞凌是全球第一家商用 SiC 器件供应商, 2001 年英飞凌就推出全球第一颗 SiC 二极管, 经历 20 多年发展, 2021 年 SiC 器件营收全球第二, 达到 1.7 亿欧元 (13.25 亿人民币), 同比增长 100%。 ○ 英飞凌在全球已经拥有超过 3000 家 SiC 的活跃用户, 发布了 200 款 Cool SiC 产品, 其中有 130 类产品源自于客户定制。目前国内外超过 20 家整车厂和 Tier1 的客户正在使用及评估英飞凌的 SiC 产品。 ○ 2021 年 6 月, 英飞凌 SiC 模块已被应用于现代汽车集团的下一代电动汽车主驱中 ○ 2018 年, 英飞凌耗资 1.24 亿欧元 (约 9.45 亿人民币), 收购了晶圆切割公司 Siltectura, 他们的 Cold Split (冷切割) 技术能够在相同 SiC 晶锭的情况下, 可以提供 3 倍的材料, 将 SiC 器件成本降低 20%-30%。
扩产情况	2022 年 2 月, 英飞凌投资 20 亿欧元提高在宽带隙 (SiC 和 GaN) 半导体领域的制造能力, 将在位于马来西亚居林的工厂建造第三个厂区, 以大幅增加产能。
客户代表	大众、凯迪拉克、雷诺、现代、Stellantis、日产、蔚来及小鹏等;

安森美 (onsemi)

总部地址	美国亚利桑那州凤凰城
营收情况	2021 年财年收入达 67.4 亿美元, 同比增长 28.3%
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2021 年 10 月, 安森美以 4.15 亿美元现金收购 SiC 衬底企 GTAT, 实现了全产业链布局。并从 6 英寸向 8 英寸布局, 着力推进 8 英寸晶圆的市场化; ○ 安森美的 SiC 已经被用特斯拉和蔚来等车企所采用; ○ 2022 年一季度, 安森美已经跟相关客户签订了超过 25 亿美元 SiC 芯片长期合作协议, 其中 70% 的收入 (约 120 亿人民币) 来自汽车主驱逆变器。未来三年, 安森美 SiC 方面的合同金额约为 40 亿美元 (约 270 亿人民币); ○ 2022 年 Q3 从客户处获得了价值 53 亿美元的 LTSA, 使得记录在册的协议总金额达到惊人的 141 亿美元; 安森美超百亿 LTSA 中, 有大约 50 亿美元来自碳化硅器件。
扩产情况	2022 年 8 月 GTAT SiC 新工厂已完成扩建, 预计到 2022 年底 SiC 晶锭产能同比增加 5 倍。此外, 2022 年 7 月, 安森美投资 10 亿美元在韩国京畿道富川市建设一个 SiC 研究中心及制造工厂, 预计到 2025 年 SiC 半导体产能将扩大 10 倍以上。
生产基地	生产碳化硅衬底与器件的工厂包括美国纽约东菲什基尔工厂、新罕布什尔州哈德逊工厂, 欧洲的捷克罗兹诺夫工厂, 韩国富川工厂等。
客户代表	蔚来、特斯拉、奔驰等

罗姆半导体集团 (ROHM)

总部地址	日本京都市
营收情况	2021 财年营业收入为 32.54 亿美元, 同比下降 3.51%; 净利润 3.35 亿美元, 同比增长 40%
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 全球第一家开始量产 SiC MOSFET 的企业, 在 SiC 产品技术开发方面一直是行业佼佼者。2015 年罗姆就已展示了 8 英寸 SiC 衬底, 预计 2023 年左右开始量产。 ○ 2009 年 7 月, 罗姆通过收购了 SiC 衬底企业 SiCrystal, 实现了全产业链布局。
扩产情况	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2019 年 2 月, 罗姆就宣布扩充 SiC 芯片产能, 总投资金额将扩大到 1700 亿日元 (约 85 亿人民币), 目标是将 SiC 全球市场份额提高到 30%。 ○ 2021 年 10 月, 罗姆与正海集团成立 SiC 功率模块新公司上海海姆希科半导体有限公司, 预计海姆希科电动汽车模块产品将于 2022 年投入量产。 ○ 2022 年 6 月新工厂生产大楼正式开工, 相比 2017 年产能扩大了 5 倍。2022 年 5 月份, 罗姆也在扩大 SiC 衬底产能, SiCrystal 德国纽伦堡总部员工数量扩大到 450 名左右, 2025 年 SiC 衬底产能大约 10 万片。
生产基地	日本、韩国、菲律宾、泰国、中国、马来西亚
客户代表	丰田、三菱、吉利汽车、纬湃科技、现代汽车、北汽新能源、臻驱科技等

Coherent (原名 II-VI/ 贰陆)

总部地址	美国宾夕法尼亚州萨克森堡
营收情况	2021 年财年收入达 67.4 亿美元, 同比增长 28.3%
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2001 年底收购了 Litton-Airtron 的 SiC 研发部门, 在 SiC 领域有接近 20 年的研究经验, 目前也已经研发成功 8 英寸 SiC 晶圆 2020 年 8 月收购碳化硅外延晶片和器件企业 Ascatron AB 的所有已发行股份, 建立 SiC 垂直集成平台; 2021 年 11 月, II-VI 对外宣称, 他们将不再局限于 SiC 衬底, 将要发展成为类似 Wolfspeed 的垂直整合模式。 ○ II-VI 于 2022 年 7 月收购 Coherent, 并将 II-VI 公司名称更改为 Coherent。
扩产情况	2022 年 3 月, II-VI 表示将对美国和瑞典工厂进行大规模扩建, 总投资额近 64 亿元。通过这次扩建, 未来五年内, SiC 衬底产量将增加至少 6 倍, 计划到 2027 年将达到相当于年产 100 万片 6 英寸衬底。而且该工厂还将成为 II-VI 的 8 英寸 SiC 外延片制造中心。

博世半导体 (Bosch Semiconductors)

总部地址	德国
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	2018 年, 博世正式将汽车半导体部门与 Bosch Sensortec 合并, 成立了专门的半导体事业部; 在 SiC 方面, 博世的客户包括吉利、芯聚能和江淮等汽车用户。
扩产情况	2021 年 10 月, 博世宣布将在 2021 年至 2023 年期间投资 1.5 亿欧元, 将 SiC 洁净室扩建到 3000 平方米; 2022 年 2 月, 博世再投资 2.5 亿欧元 (约 18 亿人民币), 进一步扩大 SiC 等产能, SiC 洁净室增加到 44000 多平方米, 目标产能是数亿颗, 新生产设施计划于 2025 年投入使用; 2022 年 7 月, 博世将投资金额提到到 4 亿欧元。

三安光电股份有限公司

总部地址	福建厦门
营收情况	2021 年, 三安光电实现销售收入 125.72 亿元, 同比增长 48.71%, 其中三安集成收入 15.33 亿元, 增长 151.31%
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2016 年 12 月, 安信资本和三安收购了碳化硅衬底企业 Norstel 的所有股份, 2017 年将相关碳化硅衬底技术导入北电新材。北电新材于 2019 年拟投资约 5.8 亿元在福建安溪县建设碳化硅衬底生产项目, 年产能 3.6 万片 (折合 6 英寸)。2020 年 8 月, 三安光电以现金 3.815 亿元收购电新材料科技有限公司 100% 股权; ○ 通过收购、合作、自研等方式, 三安光电现已完成了碳化硅全产业链的建设, 包括长晶衬体制作、外延生长、芯片制作、封装等环节。 ○ 2022 年 11 月, 获得汽车企业 38 亿元的碳化硅合同。
扩产情况	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2021 年 6 月, 三安湖南碳化硅生产基地正式点亮投产, 总投资高达 160 亿元, 是全国首条、全球第三条碳化硅垂直整合产业链, 目前已实现月产能 12000 片, 达产后将实现年产能 50 万片碳化硅 6 寸晶圆。 ○ 2022 年 5 月, 三安和理想汽车合资组建的苏州斯科半导体项目正式签约落户苏州, 专注于碳化硅车规芯片模组的研究及生产。
生产基地	厦门、泉州、长沙
客户代表	比亚迪、阳光电源、英飞源、科华、英威腾等

北京世纪金光半导体有限公司

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 成立于 2010 年 12 月, 前身为“国营 542 厂”。 ○ 2015 年世纪金光就开始 SiC 全产业链生产线建设。 ○ 2016 年 6 月, 世纪金光就宣布成功研制 6 英寸 4H-SiC 单晶, 并于 2016 年 12 月基本解决了 6 英寸 SiC 单晶的加工技术。 ○ 2018 年 2 月 1 日, 世纪金光的 6 英寸碳化硅器件生产线成功通线, 是我国首次实现碳化硅全产业链贯通, 其产品范围涵盖: 碳化硅高纯粉料→单晶材料→外延材料→器件→功率模块制备。 ○ 2020 年 3 月 12 日, 世纪金光还与合肥产投资本签署投资协议, 将在合肥高新区投资建设 6 英寸碳化硅单晶生长及加工项目。 ○ 2021 年 9 月 3 日, 世纪金光完成 2.57 亿元融资, 是成立以来最大规模单笔融资。
扩产情况	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2021 年 7 月, 世纪金光项目与浙江省金华市金义新区正式签约, 该项目总投资 35 亿元, 将建设年产 22 万片 6-8 英寸碳化硅芯片生产线, 项目分三期完成建设, 全部达产后可实现年产值约 40 亿元。 ○ 2022 年 9 月 9 日, 全资子公司合肥世纪金芯半导体有限公司年产 3 万片 6 英寸碳化硅单晶衬底项目投产
生产基地	北京、金华、合肥

泰科天润半导体科技(北京)有限公司

总部地址	北京
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 拥有 10 年碳化硅器件量产经验，集设计、研发、制造、应用为一体，是中国第一家获得国际船标 DNV 认证和美国海岸警卫队 USCG 认证的碳化硅电力电子企业。 ○ 国内碳化硅晶圆制造首家通过车规级别 SGS16949 的企业；相关碳化硅产品通过车规 AECQ-101 可靠性测试的企业。 ○ 泰科天润是国内两家首批入选工信部《汽车芯片推广应用推荐目录》的碳化硅器件企业之一，碳化硅二极管已应用在比亚迪秦、五菱宏光 mini 等车型。 ○ 2022 年 4 月，泰科天润官微宣布，截止到今年 4 月，其碳化硅器件订单已经破亿元。 ○ 2022 年 9 月，昱能科技将发布公告称，他们的全资子公司创智新能源与泰科天润签订《增资协议》，并按照投前估值为 40 亿元拟向泰科天润投入增资款 1 亿元。
扩产情况	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2013 年投资 1.2 亿元在北京建立了一条 4 英寸的 SiC 晶圆线，产能为 8 千片 / 年。 ○ 2021 年 1 月泰科天润浏阳项目实现了投产，目前已经有一条生产线投入使用，满产将实现年生产 6 万片 6 英寸碳化硅功率芯片。 ○ 2022 年 8 月，正在北京设办公研发总部基地及 6 至 8 英寸碳化硅功率器件生产基地。
生产基地	北京、湖南浏阳

比亚迪半导体股份有限公司

总部地址	深圳
营收情况	2021 年营业收入 31.66 亿（2020 年营业收入 14.41 亿），其中功率半导体业务收入 13.51 亿，2021 年归母净利润为 3.95 亿。
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 比亚迪半导体是中国第一家将 SiC 模块应用在新能源汽车电机驱动控制器中的企业。目前比亚迪半导体 SiC 模块在比亚迪汉、唐四驱等旗舰车型上已实现大规模应用。 ○ 2017 年，比亚迪微电子团队自主研发出了适合于新能源汽车使用的 2 款 SiC MOSFET，开发了 1200V/200A 和 1200V/400 A 全 SiC 功率模块。2020 年比亚迪汉电驱系统开始搭载比亚迪半导体的 SiC 模块。 ○ 2018 年 12 月，比亚迪半导体成功研发了新一代 SiC MOSFET，提出 2023 年将在旗下的电动车中，实现 SiC 半导体对硅基 IGBT 的全面替代。 ○ 比亚迪半导体旗下共有宁波半导体、节能科技、长沙半导体 3 家子公司，最新一轮融资显示其估值已超过百亿。 ○ 2021 年比亚迪与中电化合物等共建车规级 MOS 器件用大尺寸碳化硅项目。
扩产情况	2022 年 1 月 27 日，比亚迪半导体创业板 IPO 上会获通过。本次 IPO，预计募集资金约 20 亿元，将用于功率半导体关键技术研发项目等，其中计划投资 7.3 亿元建设 SiC 晶圆生产线，年产能达 24 万片。项目将以宁波半导体作为实施主体，将在宁波厂房建设 SiC 功率半导体晶圆制造产线，项目建设期为 5 年。
生产基地	宁波、长沙、深圳

北京国联万众半导体科技有限公司

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 国联万众已与比亚迪、格力电器、苏州华泰等知名企业达成合作，运用于比亚迪新能源汽车、家用电器中的 PFC 电路中，如空调、冰箱等，国联万众 2022 年上半年收入已超 1 亿元，预计全年收入超 2 亿元。
扩产情况	<ul style="list-style-type: none"> ○ 截至 2022 年累计投入将近 6 亿元，正在建设一条 6 英寸可扩至 8 英寸的芯片生产线，目前已进入设备调试阶段，将于 2022 年底投入使用，年产能达 2.4 万片。后期计划重组上市公司进行募资，再投 9 亿元扩产，预期产能将提升至每月 1 万片以上。
生产基地	北京

中电国基南方集团有限公司 (中国电科 55 所)

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 55 所是国内最早从事 SiC 电力电子器件研发和生产的的企业，是宽禁带半导体电力电子器件国家重点实验室依托单位，实现了 600~6500V SiC SBD 二极管和 650~6500 V SiC MOSFET 规模量产及批量销售，在新能源汽车车载充电机领域实现装车 100 余万辆。旗下的国扬电子致力于 SiC 功率模块封装及应用推广，芯片及模块产品已在新能源汽车、光伏发电等领域实现了批量商用。在更高压 SiC 器件方面，55 所及国扬电子在 10kV/15kV/20kV 超高压芯片及模块产品领域也取得了突破性进展。
扩产情况	<ul style="list-style-type: none"> ○ 55 所 2018 年完成 6 英寸 SiC 量产型芯片线建设，SiC 晶圆产能 30000 片 / 年。产品电压覆盖 650V~6500V，电流覆盖 2A~50A 的 SiC 肖特基二极管，以及 650V~6500V SiC MOSFET，导通电阻 9mΩ~1000mΩ 的 SiC MOSFET 芯片及器件， ○ 国扬电子在江苏省扬州市建设车规级 SiC MOSFET 芯片和功率模块项目，年产 1000 万颗的能力，功率模块形成年产 150 万只的能力。
生产基地	南京、扬州

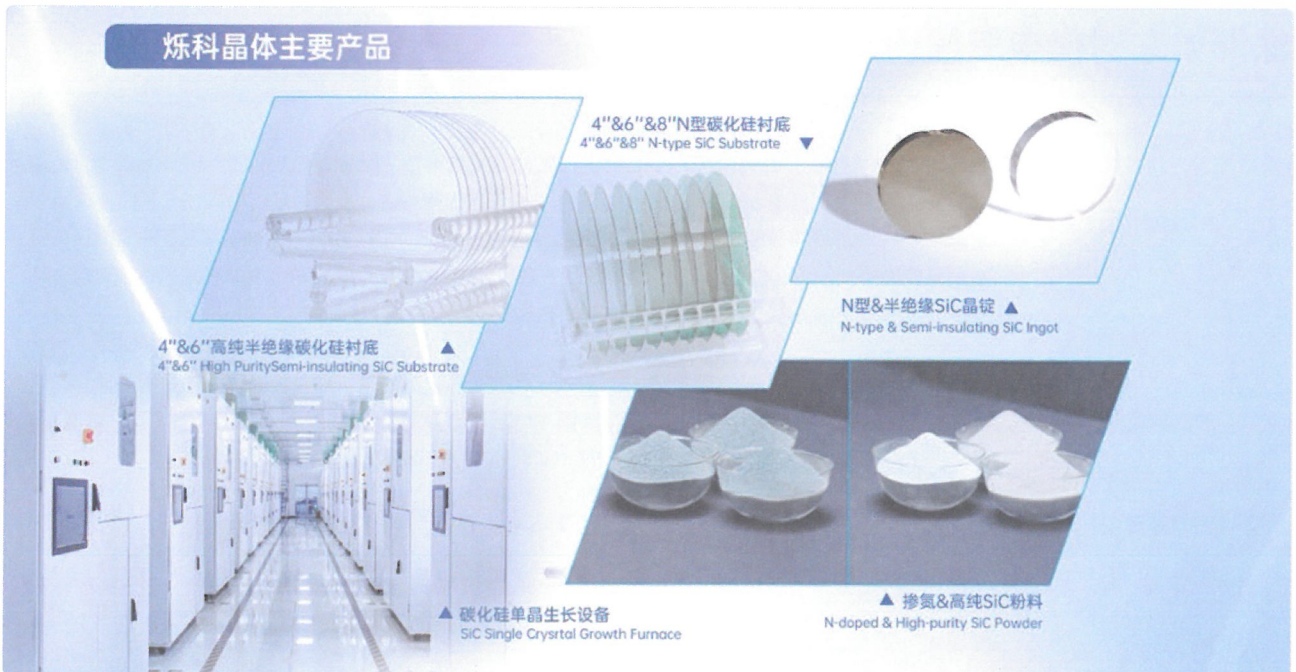
株洲中车时代电气股份有限公司

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 其半导体事业部 SiC 产品开发团队已经完成了 SiC 芯片结构设计、高温离子注入机等 50 余台工艺设备和 90 余项工艺调试，实现 SiC 二极管和 MOSFET 芯片工艺流程整合，成功试制 1200V SiC 肖特基二极管功率芯片，3300 V 平面栅 SiC MOSFET 芯片的制造。2018 年 4 月，中车时代推出适用于轨道交通牵引变流器系统的 3300V/500A SiC 混合模块；生产线方面，2017 年中车时代电气碳化硅器件项目通过科技成果鉴定，2018 年碳化硅生产线小批量量产产品，4 英寸碳化硅芯片线年产 10000 片。
扩产情况	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2022 年 4 月，中车时代拟投资 4.62 亿元进行碳化硅芯片生产线技术能力提升建设项目，将现有 4 英寸 SiC 芯片线年 10000 片 / 年的能力提升到 6 英寸 SiC 芯片线 25000 片 / 年，还将把现有平面栅 SiC MOSFET 芯片技术能力提升到满足沟槽栅 SiC MOSFET 芯片研发能力。
生产基地	湖南株洲

9.3 SiC 产业重要玩家产业链分析: 衬底

本衬底小节主要列举的是非 IDM 模式的代表厂商, IDM 模式代表如意法半导体、英飞凌、Wolf speed、罗姆半导体、安森美、三安光电等全产业链企业, 请见前面 IDM 章节。

	
企业全称	山西烁科晶体有限公司
公司网址	www.semisic.cn
产业基地	中电科(山西)碳化硅产业园(山西·太原) I 期厂房占地 2.6 万平方米, II 期厂房规划占地 8 万平米
专利情况	已累计获得专利 30 项, 其中发明专利 7 项, 实用新型专利 21 项, 软件著作权 2 项
产业链环节	碳化硅单晶生长设备、碳化硅单晶衬底
业务范围 / 主营产品	4、6、8 英寸高纯半绝缘及 N 型碳化硅单晶衬底; 碳化硅高纯及掺氮粉料及各类晶锭产品; 碳化硅单晶生长设备 可为客户提供碳化硅材料方面的集成一体化产品及服务。
团队优势	烁科晶体核心技术团队自 2009 年始就致力于碳化硅材料研发, 涵盖碳化硅生长设备制造、粉料合成、晶体生长到衬底加工等碳化硅材料全产业链, 先后突破碳化硅单晶生长装备制造技术、高纯度碳化硅粉体合成工艺技术、低缺陷大直径碳化硅单晶生长工艺技术, 以及碳化硅单晶衬底加工关键技术等核心技术难题, 已实现 4、6 英寸高纯半绝缘及导电型碳化硅单晶衬底产业化生产, 此外, 在国内率先突破 8 英寸高纯半绝缘及导电型碳化硅单晶衬底制备工艺技术, 并已实现小批量销售, 工艺技术达到国际先进水平。
联系方式	0351-5266802; marketing@semisic.cn



HOSHINE

企业全称	宁波合盛新材料有限公司
公司网址	www.hs-mmcs.com
总部地址	浙江宁波
公司简介	宁波合盛新材料有限公司, 成立于 2018 年, 是一家专业从事新型材料研究、生产的高新技术企业。公司注册资本 1 亿元, 由合盛硅业股份有限公司 100% 控股。公司业务涵盖导电型 6 英寸碳化硅衬底与外延的研发与生产。目前, 公司正在建设导电型 6 英寸碳化硅衬底与外延片产线, 项目投资规模 10 亿元, 建成后将拥有碳化硅半导体材料研发中心和碳化硅合成 - 晶体生长 - 晶片加工 - 清洗检测 - 衬底外延等碳化硅生产基地, 公司将成为具有国际竞争力的碳化硅半导体材料研发生产企业。
三代半相关产品	SiC 衬底, SiC 外延, SiC 晶锭, SiC 合成颗粒料
产业链环节	从原材料提纯, 到 SiC 颗粒料合成, 单晶生长, 衬底切磨抛加工以及晶片外延, SiC 材料全产业链布局。
联系方式	杨先生 13626732423

代表产品

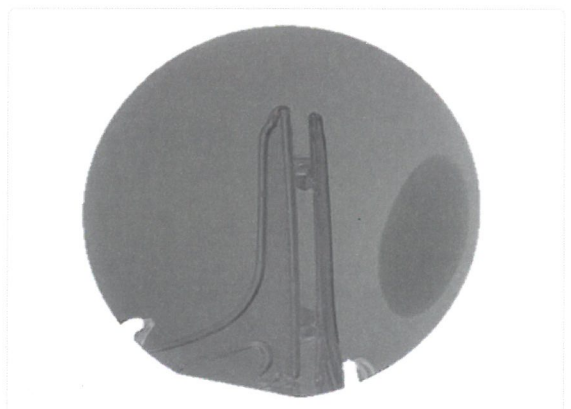
外延片 SiC EPI-Wafer

- » 膜厚范围 Epi layer Thickness: 5-30 μ m
- » 厚度偏差 Epi layer Thickness uniformity: $\leq 2\%$
- » 掺杂范围 Doping range: 1E15-1E19 cm⁻³
- » 掺杂均匀性 Doping tolerance: $\pm 10\%$
- » 致命缺陷 Die defect: ≤ 0.5 cm⁻²
- » 可用面积 Die yield (2mm \times 2mm): $\geq 95\%$



衬底片 SiC Substrate

- » 微管 Micropipe Density: ≤ 0.2 cm⁻²
- » 位错 BPD/ TSD/ TED: $\leq 1000/200/7000$
- » 掺杂 Dopant: N-type nitrogen
- » 电阻率 Resistivity: 0.015-0.025 ohm·cm
- » 晶向 Surface deflection: 4.0° toward <11-20> $\pm 0.5^\circ$
- » 面型 TTV/Bow/Warp: $\leq 5\mu$ m/15 μ m/30 μ m



SK Siltron

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 全球五大硅片生产商之一，2019 年以 4.5 亿美元收购杜邦碳化硅晶圆事业部，成立了美国子公司 SK Siltron CSS。 ○ SK Siltron 希望通过与大功率半导体客户的技术合作，以 2023 年底实现量产 8 英寸 SiC 衬底为目标，推进相关产品开发。 ○ SK Siltron 计划与 RFHIC (艾尔福) 和 Yes Power Technix 成立一家合资企业，开发与 SiC 和氮化镓 (GaN) 半导体相关的技术。
扩产情况	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2021 年 7 月，SK 宣布计划投资 3 亿美元在美国扩大碳化硅产能； ○ 2022 年 9 月，SK 官网宣布，其美国子公司 SK Siltron CSS 在密歇根州贝城的 SiC 衬底新工厂正式建成投产，并在未来几年内将制造能力提高四倍。计划今年将 6 英寸 SiC 衬底的产能提高到 12 万片 / 年，未来目标年产能冲 50 万片；
公司总部	韩国

山东天岳先进科技股份有限公司

公司营收	2021 年公司营收 4.94 亿，SiC 衬底营收 3.87 亿。
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2022 年 1 月 12 日，天岳先进科技股份有限公司正式敲钟上市，登陆科创板，证券代码为 "688234"。此次 IPO 拟募资 20 亿元，将在上海建碳化硅半导体材料项目，该项目建设期为 6 年，计划于 2022 年试生产，2026 年 100% 达产。 ○ 2022 年 7 月，天岳先进宣布与客户签订了价值 13.93 亿元的导电型 SiC 衬底订单合同，预计明年开始供货。 ○ 天岳 8 英寸碳化硅衬底研发进展顺利，晶型均一稳定，具有良好的结晶质量。接下来，将在前期自主扩径实现 8 英寸产品研发成功的基础上，继续加大技术和工艺突破，并根据市场需求，积极布局产业化
SiC 相关产品	导电型及半绝缘型 SiC 衬底
公司总部	山东济南

北京天科合达半导体股份有限公司

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 成立于 2006 年 9 月，由新疆天富集团、中国科学院物理研究所共同设立， ○ 2022 年 11 月 15 日，据金龙湖发布官微消息，天科合达举行了 8 英寸碳化硅新产品发布会，向行业宣布了 8 英寸产品的关键进展； ○ 北京二期和徐州二期也在进一步规划中，预计 2025 年底，6 英寸有效年产能达到 55 万片，6 到 8 英寸可根据实际需求进行快速产能切换；
SiC 相关产品	SiC 晶片，SiC 晶体，莫桑钻，SiC 单晶生长炉，切磨抛代加工，清洗、返抛
公司总部	北京

9.4 SiC 产业重要玩家产业链分析: 外延

本外延小节主要列举的是非 IDM 模式的代表厂商, 如意法半导体、英飞凌、Wolfspeed、罗姆半导体、安森美、三安光电等, 请见前面 IDM 章节。

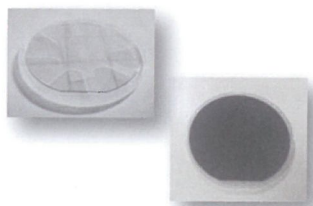
	
企业全称	中电化合物半导体有限公司 (CEC Compound Semiconductor Co.,Ltd)
企业简称	中电化合物 (CECS)
公司网址	www.cecsic.com.cn
总部地址	宁波杭州湾新区
主营产品	碳化硅晶体、碳化硅衬底、碳化硅外延片、氮化镓外延片
公司简介	<ul style="list-style-type: none"> ○ 中电化合物半导体有限公司于 2019 年 11 月 1 日注册成立, 公司聚焦于第三代半导体 SiC 材料和 GaN 材料的研发、生产和销售, 已贯通从原料合成、晶体生长、衬底加工到晶片外延的全流程材料产业链, 拥有国际主流和先进的 SiC 外延设备、GaN 外延设备及各类检测设备。 ○ 公司已于 2021 年 2 月通过 ISO9001、ISO14001 和 ISO45001 体系认证, 并于 2021 年 11 月取得 IATF16949 质量管理体系认证。已经持续稳定的向客户提供了 650V/1200V/1700V 系列 SiC 外延片和 GaN 外延片等产品。
联系方式	联系人: 张昊翔 电话: 13757120789 邮箱: zhanghx@cecsic.com.cn 联系人: 罗 鹏 电话: 13818650793 邮箱: luopeng@cecsic.com.cn

CECS的产业规划 (一期)



产业定位:

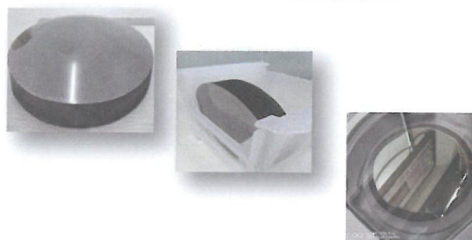
- 射频用碳化硅基氮化镓外延片
GaN on SiC wafer for RF
- 射频/功率用硅基氮化镓外延片
GaN on Si wafer for RF&Power



产能规划Planned Capacity :

4/6吋GaN外延片2万片/年
4/6inch GaN Epi wafer:
20000 pcs/year

- 碳化硅晶体 SiC crystal
- 碳化硅衬底 SiC substrate
- 碳化硅外延片 SiC epi wafer



6吋SiC同质外延片7万片/年
6inch SiC EPI wafer:
70000 pcs/year

Resonac (原昭和电工)

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ Resonac 是昭和电工于 2020 年收购了昭和电工材料（原日立化成）后，双方整合成的子公司 ○ 2022 年 9 月 29 日，昭和电工宣布将与昭和电工材料于 2023 年 1 月全面合并，将新整合的公司采用控股公司结构、更名为“Resonac”，实现了衬底 + 外延的整合 ○ 昭和电工的 8 英寸产品取得突破，2022 年 9 月 SiC 外延片样品已开始出货。 ○ 昭和电工实现了衬底和外延 "2 条腿" 走路，2021 年 8 月，昭和电工宣布融资 3.4 亿进行碳化硅衬底方面的扩产，项目预计 2023 年 12 月完工。
SiC 相关产品	SiC 外延 + SiC 衬底
公司总部	日本东京都港区

瀚天天成电子科技(厦门)有限公司

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2011 年 3 月在厦门成立，2012 年 3 月 9 日宣布开始接受商业化碳化硅半导体外延晶片订单，正式向国内外市场供应产业化 3 英寸和 4 英寸碳化硅半导体外延晶片； ○ 2014 年 4 月，公司接受商业化 6 英寸碳化硅外延晶片订单，正式向国内外市场供应商业化 6 英寸碳化硅外延晶片； ○ 近期目标是成为全球市场主要的碳化硅外延晶片供应商。 ○ 瀚天天成碳化硅二期项目于 2022 年 11 月投产，将建 10 条 6 英寸碳化硅生产线，据称，届时瀚天天成的年出货量将超 10 万片。
SiC 相关产品	SiC 外延晶片，半导体晶片检测
公司总部	福建厦门

东莞市天域半导体科技有限公司

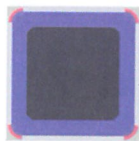
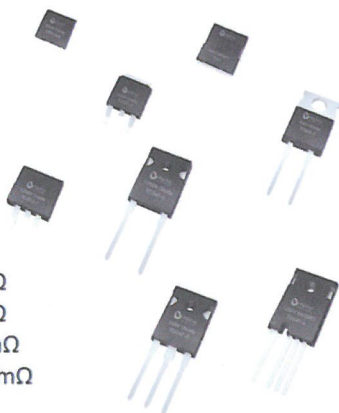

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 成立于 2009 年，是中国第一家从事碳化硅外延晶片市场营销、研发和制造的民营企业。2010 年，天域与中国科学院半导体研究所合作，共同创建了碳化硅研究所。 ○ 目前，天域在中国拥有最多的碳化硅外延炉 - CVD，月产能为 5000 片，2021 年营收达 1.6 亿元。 ○ 天域半导体于 2021 年 7 月完成第一轮战略融资，投资方为哈勃投资。2022 年 6 月 28 日，东莞天域半导体官网宣布，他们于近日相继完成第二轮和第三轮战略投资者的引入工作。其中，第二轮战投为比亚迪、上汽尚颀等，第三轮战投为海尔资本、晨道资本、东莞大中和中能欣锐等。
SiC 相关产品	SiC 外延晶片、SiC 外延代工服务、SiC 晶片检测服务、外延晶片清洗服务、表面金属残留检测服务
公司总部	广东东莞

9.5 SiC 产业重要玩家产业链分析: 设计 / 封测 / 器件 / 模组

本小节主要列举的是没有自建 SiC 晶圆厂设计方案让代工厂代工或是外购 SiC 晶圆制成 SiC 器件或是模组的公司。

	
企业全称	飞程半导体(上海)有限公司 Alpha Power Solution Limited (APS)
公司网址	www.alpha-powers.com.cn
总部地址	中国上海(销售办事处: 深圳、香港、北京)
主营产品	碳化硅二极管、碳化硅 MOSFET、碳化硅模块
业务布局	飞程半导体是中国领先的第三代半导体供应商, 专业从事碳化硅器件的研发、生产及销售。公司总部位于中国上海, 在深圳、香港、北京均设有分、子公司。2019 年, 飞程已大规模量产 650V 及 1200V 碳化硅二极管; 2021 年第四季度, 飞程开始批量出货碳化硅 MOSFETS。其产品广泛应用于 EV 快充、光伏、储能、OBC 及 EV 电驱等。
团队优势	飞程已与多个外延片供应商及晶圆代工厂建立了长期合作关系, 其核心团队拥有丰富的晶圆大规模生产及制造经验, 具备打通从设计到制造的能力及拥有丰富的产业资源。
主要成就	<ul style="list-style-type: none"> ○ 国内首家在硅晶圆代工厂成功生产 6 吋碳化硅器件 ○ 国内首家主力生产并成功大量出货 1200V 碳化硅器件 ○ 国内首家在碳化硅二极管生产上采用 Thinning Technology 工艺 ○ 国内首家拥有自主专利的 JBS 架构 ○ 已获得或在申请中几十项中国和美国专利
联系方式	上海: +86 21 58598677; 深圳: +86 0755 86269959; 香港: +852 2122 6009 邮箱: inquiry@alpha-powers.com 微信: alpha-powers

飞程半导体碳化硅产品系列

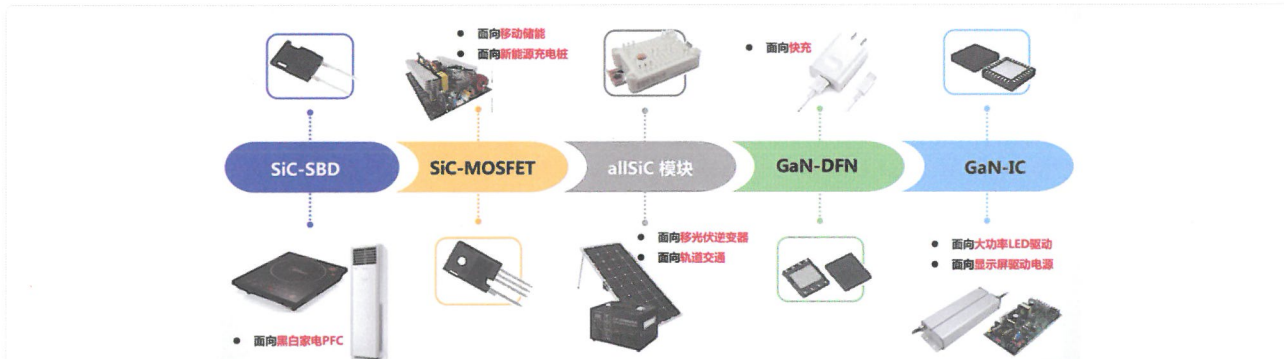
SiC Schottky		650V / 4A - 50A 900V / 18A - 40A 1200V / 10A - 70A 1700V / 6A - 40A	
SiC MOSFET		650V / 15mΩ - 120mΩ 900V / 30mΩ - 220mΩ 1200V / 18mΩ - 160mΩ 1700V / 280mΩ - 800mΩ	



企业全称	佛山市国星光电股份有限公司
公司网址	www.nationstar.com
公司总部	广东佛山
产业链环节	SiC/GaN 功率器件封测, 应用方案设计
业务范围 / 主营产品	<ul style="list-style-type: none"> ○ 各种规格型号的 SiC SBD、SiC MOSFET、GaN HEMT 分立器件及功率模块; ○ 面向新能源充电桩、储能逆变器、UPS、大功率工业电源等应用方案设计;
团队优势	<ul style="list-style-type: none"> ○ 国星光电第三代半导体技术团队实力雄厚, 带头人为国务院特殊津贴的博士专家, 教授级高级工程师, 佛山“大城工匠”得奖者。团队其他骨干成员行业经验丰富, 为封测专家、国家级、省级科技进步一等奖的主要完成人、海外引进的高级科研人才等。国星光电核心技术团队深耕半导体封测十几年, 具有丰富的工艺、仿真、设计和可靠性研究经验, 并与国内外各创新联盟、科研院所、院校都有着深入且密切的合作关系。 ○ 团队依托国星光电研究院在三代半功率器件封测与应用方案的工艺、仿真、设计与可靠性研究上深入专研; 依托具备丰富封测经验与品质管控能力的国星光电子公司风华芯电开展科研成果产业化。现已孵化出 SiC SBD、SiC MOSFET、SiC 功率模块、GaN 器件、GaN-IC 五大产品体系, 面向不同的市场, 积极推广产业化落地。
联系方式	15986093025

国星光电产品线与技术路线

1) 产品线



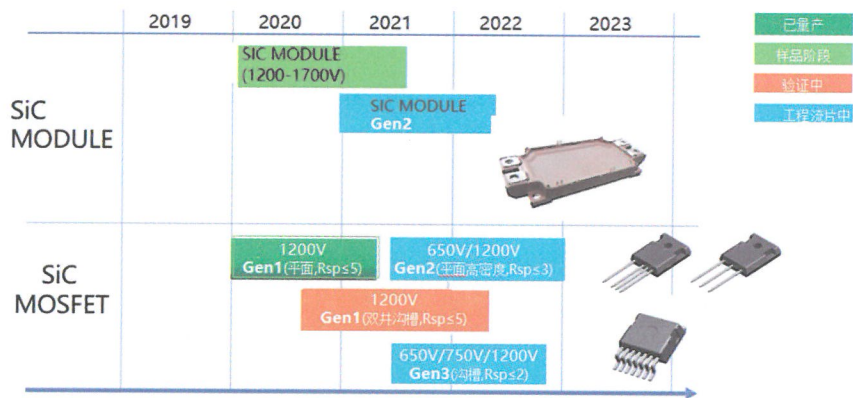
2) 技术路线图





企业全称	济南安海半导体有限公司
公司网址	www.anhisemi.com
总部地址	中国 (山东) 自由贸易试验区济南片区经十东路 7000 号汉峪金谷 A1-3 栋 12 楼
专利情况	申请了 1 个 SiC MOSFET 版图设计专利, 另外有 14 个 SiC MOSFET 待申请
产业链环节	产品设计、晶圆制造、封装测试, IDM 功率半导体模式。
业务范围 / 主营产品	安海半导体公司, 提供完整的功率器件产品, 包括工艺技术研发、器件设计、产品设计、封装测试和系统应用。主营产品: 功率 MOSFET 产品。国内独家领先世界同步推出 1200V/1700V/1900V 平面高密度 / 沟槽 SiC MOSFET, 1200V 已形成批量销售。
团队优势	安海技术团队平均年龄超过三十五岁, 主要核心人员均在国际一流半导体公司有超过十年的经验。安海具备一流功率半导体公司的完整功能块, 包括工艺技术研发、器件设计、产品设计、封装测试和系统应用。
联系方式	zxzeng@anhisemi.com ; qrchai@anhisemi.com

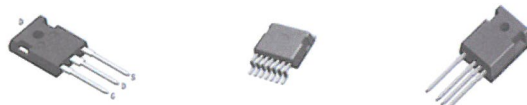
SiC产品规划



已批量供应中的1200V~1900V SiC MOS



产品类型	TO247-3L	TO247-4L	TO263-7L	VDSmax(V)	Current (A)	Ron typ (mΩ)	Ron max (mΩ)	Vth (V)
SiC Mosfet	ADW120N040	ADQ120N040		1200	76	35	40	3.2
SiC Mosfet	ADW120N040L	ADQ120N040L		1200	76	35	40	2.5
SiC Mosfet		ADQ120N080A		1200	35	80	130	3.7
SiC Mosfet	ADW120N080	ADQ120N080	ADG120N080	1200	38	80	100	3.5
SiC Mosfet	ADW120N100	ADQ120N100		1200	26	100	120	3.2
SiC Mosfet	ADW170N100	ADQ170N100		1700	29	100	130	2.7
SiC Mosfet		ADQ170N055		1700	40	55	70	2.7
SiC Mosfet		ADQ190N055		1900	35	65	80	2.7





企业全称	深圳市森国科科技股份有限公司
公司网址	www.gokeic.com
总部地址	深圳市南山区粤海街道深圳湾生态科技园 10A 栋 12 楼
专利情况	12 份
产业链环节	碳化硅功率器件 (SiC 二极管、SiC MOSFET、SiC 功率模块), 功率集成电路 (预驱、电机驱动控制和 LDO)、Fabless 模式
业务范围 / 主营产品	- 650V、1200V 6 英寸 SiC 肖特基二极管的裸晶圆、裸芯片 die; - 1200V 6 英寸 SiC MOSFET 的裸晶圆、裸芯片 die; - 各种型号和规格的分立器件、模块。
团队优势	森国科是国内领先的可以独立完成碳化硅功率器件设计的企业之一, 掌握从器件原理、器件结构设计、器件性能模拟、器件的工艺设计、器件测试等全流程的技术, 掌握碳化硅 JBS 和碳化硅 MOSFET 的核心技术。创始人毕业于电子科技大学, 擅长芯片研发和运营, 其带领的研发团队来自联发科、海思、比亚迪微电子、罗姆、华润上华等机构, 囊括清华大学、电子科技大学、西安电子科技大学、西北工业大学等微电子专业知名院校。
联系方式	0755-86158855

碳化硅功率器件产品业务布局

碳化硅二极管	KS20120A (TO-247-2L)	<ol style="list-style-type: none"> 1、1200V 车规级 SiC JBS。 2、采用第三代半导体 SiC 材料, 禁带宽度大, 电子饱和和漂移速度高, 热导率高。 3、低导通压降、器件导通损耗低。 4、零反向恢复, 器件开关损耗低。 5、正温度系数, 易于并联使用。 6、HTRB 1000H pass, 器件可靠性高。 
碳化硅 MOSFET	KM040120-J (TO-247-4L)	<ol style="list-style-type: none"> 1、第三代 SiC MOSFET: Narrow pitch & Optimized EPI。 2、更好的 BV&Rdson trade off。 3、沟道自对准工艺, 沟道长度更短, 更小的沟道电阻。 4、工艺制程优化, 优化欧姆接触工艺, 降低 Rdson。 5、超薄晶圆厚度, 降低 Rdson, 优化热阻。 6、国际领先的晶圆代工工厂代工, 品质稳定。 7、增加开尔文源引脚, 优化开关性能。 
碳化硅模块	KC006F12W2M1 (Easy 2B)	<ol style="list-style-type: none"> 1、全碳化硅半桥模块。 2、极低寄生电感。 3、超低损耗、高工作频率。 4、零关断拖尾电流。 5、散热要求低, 降低系统成本。 6、用于充电桩、高效转换器 / 逆变器、电机驱动和智能电网 / 并网分布式发电等。 

赛米控 - 丹佛斯 (SEMIKRON-Danfoss)

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 赛米控 - 丹佛斯是于 2022 年 8 月, 由德国赛米控 (Semikron) 与丹佛斯硅动力 (Danfoss Silicon Power) 合并成立, 大股东是丹佛斯集团。 ○ 2019 年 11 月, 丹佛斯获得采埃孚汽车牵引电源模块供应合同。 ○ 2022 年, 赛米控获得德国汽车制造商超过 100 亿元人民币的 SiC 逆变器功率模块合同, 计划于 2025 年开始批量生产。
SiC 相关产品	SiC 器件 / 模块
公司总部	德国

嘉兴斯达半导体股份有限公司

公司营收	2021 年公司营收 17.07 亿, 归母净利润 3.98 亿。
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 成立于 2005 年 4 月, 专业从事以 IGBT 为主的功率半导体芯片和模块的设计研发、生产及销售服务, 是目前国内功率半导体器件领域的领军企业。 ○ 2021 年 6 月, 斯达半导体发布公告称, 募资 35 亿元, 包括“SiC 芯片研发及产业化”和“功率半导体模块生产线自动化改造项目”, 合计金额为 12 亿元。 ○ 应用于乘用车主控制器的车规级 SiC MOSFET 模块开始大批量装车, 同时公司新增多个使用车规级 SiC MOSFET 模块的 800V 系统的主电机控制器项目定点。
SiC 相关产品	SiC 器件 / 模块
公司总部	浙江嘉兴

深圳基本半导体有限公司

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 创立于 2016 年, 是中国领先的 SiC (设计向 IDM 转型) 企业之一。 ○ 2020 年 4 月, 基本半导体自主研发了车规级全 SiC 功率模块。 ○ 2021 年 7 月, 基本半导体举行了 SiC 功率模块装车测试发车仪式。 ○ 2021 年 12 月 30 日, 基本半导体的无锡汽车级 SiC 功率模块制造基地正式通线运行, 首批模块产品成功下线; 将在 2022 年年中实现量产交付 ○ 2022 年产能为 25 万只模块, 2025 年之前将提升至 150 万只。 ○ 2022 年基本半导体与广汽埃安签订了《战略合作协议》和《长期采购合作协议》。 ○ 2022 年 9 月, 9 月 15 日, 埃安发布 1.9s 百公里加速超跑 Hyper SSR, 该车型搭载了基本半导体汽车级全碳化硅三相全桥模块 Pcore™ 6, 可使电机工作频率提高 2.5 倍, 降低 80% 的功率损耗。
SiC 相关产品	SiC 器件 / 模块
公司总部	深圳

深圳爱仕特科技有限公司

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 在惠州建设了 SiC 功率模块研发及生产项目，项目总投资 1500 万元，年产 SiC 功率模块 18000 个，而且通过 IATF16949 汽车质量体系认证。 ○ 2022 年 8 月，爱仕特 1200V SiC 功率器件通过 AEC-Q101 认证。 ○ 2022 年，爱仕特拿下比亚迪 SiC MOSFET 订单，产品用在车载 OBC 上，年需求量近 300 万只，双方已经签下供货协议。爱仕特的 SiC 产品已出口到欧洲和美国。
SiC 相关产品	SiC 器件 / 模块
公司总部	广东深圳

上海瀚薪科技有限公司

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2019 年 10 月成立，致力于研发与生产碳化硅功率器件及功率模块，是国内一家能大规模量产车规级碳化硅 MOS 管、二极管并规模出货给全球知名客户的本土公司。 ○ 瀚薪的中高电压的 1200V、1700V 和 3300V 的车规级碳化硅 MOSFET 经多家国际主流车企 2 年以上的量产使用，成为先进进入国际一线车企供应链的中国本土碳化硅功率器件企业。 ○ 2022 年上半年，上海瀚薪科技在新能源汽车领域的车规级碳化硅 MOSFET 订单已超过 1200 万颗。 ○ 2022 年 9 月 28 日，瀚薪科技宣布完成 A 轮融资，融资规模超 6 亿人民币，投资机构为上汽、汇川、宁德时代、阳光电源、广汽资本、国投招商、临港科创等。
SiC 相关产品	SiC 器件 / 模块
公司总部	浙江嘉兴

广东芯聚能半导体有限公司

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 广东芯聚能半导体有限公司成立于 2018 年 11 月，注册资本 1.62 亿，位于广州。 ○ 主营业务为碳化硅基和硅基功率半导体器件及模块的研发、设计、封装、测试和销售，主要产品包括车规级功率模块、工业级功率模块和分立器件等。 ○ 2021 年 12 月，广东芯聚能半导体有限公司通过 IATF16949:2016 符合性审核。 ○ 2022 年 4 月 25 日，smart 精灵 #1 量产车型在北京发布，其核心电驱总成搭载了芯聚能的碳化硅（SiC）模块产品。 ○ 2022 年 9 月 17 日，广汽埃安、芯聚能、博世签署三方战略合作协议，启动在碳化硅电驱系统业务上的全面战略合作。
SiC 相关产品	SiC 器件 / 模块
公司总部	广东广州

无锡利普思半导体有限公司

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 成立于 2019 年，主要产品包括新能源汽车和工业用的高可靠性 SiC 和 IGBT 模块；利普思目前有两条封装产线，日本封装代工厂已于 2022 年正式投入运营，并成功拿到了国际知名汽车公司的样品及小批量订单，能做到年产 30 万个 SiC 模块。 ○ 2021 年 7 月，利普思的 SiC 模块封装线正式开工，总投资为 2 亿元，计划引进 2 条 SiC 模块封装生产线，达产后模块产能为 50 万 / 年，建设周期为 2021-2024 年。
SiC 相关产品	SiC 模块
公司总部	江苏无锡

派恩杰半导体 (杭州) 有限公司

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 成立于 2018 年 9 月，是全国领先的 SiC 功率器件供应商，自成立之初就按照车规级标准研发设计 SiC 功率器件，合作的代工厂也是有 30 年车规的全球首家提供 150mm SiC 工艺的 X-FAB。2021 年 12 月，派恩杰 SiC MOSFET 产品在新能源汽车 OBC 应用验证取得了突破，获得了新能源汽车龙头企业数千万订单。2022 年上半年派恩杰供货量超 1.2kk，其中大部分为大功率 SiC MOSFET 芯片。
SiC 相关产品	SiC 功率器件
公司总部	浙江杭州

瑞能半导体科技股份有限公司

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2016 年，瑞能研制出首款全系列封装形式的 650V 碳化硅二极管产品，并被微软、台达、光宝等知名企业认可，2019 年，瑞能推出全系列封装的 1200V 碳化硅二极管产品，现已量产销售第五代碳化硅二极管，同时开发了第六代碳化硅二极管。 ○ 具有国内相对完整的二极管产品布局，从 650V 到 1200V，1A-50A 的各种封装的产品；也是国内目前能量产 SiC-MOSFET 的少数厂商之一。
SiC 相关产品	SiC 功率器件
公司总部	运营中心落户上海

清纯半导体 (宁波) 有限公司

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 成立于 2021 年 3 月，开发出自主知识产权的 SiC 二极管及 MOSFET 器件产品，是目前基于国内产线量产 SiC MOSFET 的企业，相关产品已经在光伏储能、电源、新能源汽车等领域得到广泛应用。2022 年 5 月，推出首款国内量产 15V 驱动 SiC Mosfet 国内 SiC 功率器件。2022 年 8 月，推出了 1200V/14mΩ SiC MOSFET 产品 - S1M014120H，并通过了车企和 tier1 厂商的测试。
SiC 相关产品	SiC 器件
公司总部	浙江宁波

9.6 碳化硅 (SiC) 产业重要玩家产业链分析: Foundry

本小节主要列举的是自建 SiC 晶圆厂, 并为其他企业提供 SiC 晶圆代工服务的企业。

X-FAB

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 全球第一家提供 150mm SiC 工艺的代工企业。2019 年一季度其位于拉伯克工厂 SiC 芯片制造产能翻了一番, 达到 26000 片 / 月并向上游延伸, 增加外延服务能力。 ○ X-Fab 于 2020 年启动了 SiC 内部外延生产线, 客户增至 23 个, tape outs 数量从 106 增至 216 个, 有 8 个客户在进行生产, 4 个客户采用 X-Fab 提供的外延片。
SiC 相关产品	SiC 外延与晶圆代工
公司总部	德国 Erfurt

汉磊科技股份有限公司

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 自 2015 年开始生产宽禁带半导体, 可为 600V-1200V SBD 和 MOSFET 提供 4 英寸 SiC 代工服务, 6 英寸 SiC 生产线于 2019 年下半年试产; 同时, 汉磊还在开发 1700V 的 SiC SBD 和 SiC 沟槽 MOSFET 工艺。 ○ 2021 年 4 月 29 日, 台湾官方通过了 8 件投资案, 汉磊科技将在竹科投资 50 亿新台币 (约 11.6 亿人民币), 全力发展化合物半导体技术, 包括氮化镓 (GaN) 和碳化硅 (SiC) 外延和器件代工。
SiC 相关产品	SiC 外延与晶圆代工
公司总部	台湾

上海积塔半导体有限公司

碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 专注于半导体集成电路芯片特色工艺的研发和生产制造基地, 已建和在建产能共计 28 万片 / 月 (折合 8 吋计算), 其中 6 吋 7 万片 / 月、8 吋 11 万片 / 月、12 吋 5 万片 / 月、碳化硅 3 万片 / 月, 为汽车电子、工业控制和高端消费电子领域提供微控制器、模拟电路、功率器件、传感器等核心芯片特色工艺制造平台和技术服务。 ○ 积塔半导体拥有国内领先的碳化硅 6 寸代工生产线, 直至 2022 年 2 月 21 日, 各项目已顺利开展, 稳步按计划推进碳化硅 MOSFET 的投片、生产及产出。
SiC 相关产品	SiC 晶圆代工
公司总部	上海

9.7 碳化硅 (SiC) 产业重要玩家产业链分析: 应用

纬湃科技 (Vitesco Technologies)

公司背景	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2019 年初由大陆集团的动力总成部门分拆独立而成，主要生产汽车的电动与内燃机的传动总成与动力总成零部件，2021 年 9 月在法兰克福证券交易所上市。 ○ 是全球为数不多的有能力提供全套涵盖从汽车电子、软件、系统集成的动力总成电气化供应商。其创新新的产品组合可运用于 48 伏中混、插电式混合动力及纯电动汽车驱动系统。
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2021 年纬湃科技获得了现代汽车约 20 亿欧元的 800 伏 SiC 逆变器订单； ○ 2022 年，800V SiC 逆变器获得了北美某汽车制造商的订单，价值超过 10 亿欧元。 ○ 器件供应商方面，2020 年 6 月纬湃科技宣布与罗姆合作开发 800V SiC 逆变器解决方案以及 400V SiC 逆变器解决方案。2022 年 5 月，纬湃科技宣布与英飞凌签署了合作协，将采用英飞凌的 SiC 功率器件开发 800V 汽车逆变器功率模块。
公司总部	德国雷根斯堡

博格华纳 (BorgWarner)

公司背景	<ul style="list-style-type: none"> ○ 是全球最大汽车零件供应商之一，位列全球汽车行业供应商前 25 名； ○ 最近几年，博格华纳通过多次并购，加快电气化战略布局，以增加电动汽车营收。在 SiC 领域，博格华纳也收购了 2 家公司。 ○ 2020 年 10 月收购了全球首家量产 800V SiC 逆变器的公司德尔福科技。 ○ 2022 年 8 月收购了 SiC 充电器企业 Rhombus Energy Solutions。 ○ 子公司 Cascadia Motion 也在研发 SiC 逆变器，2022 年 8 月完成了设计工作，预计将于 2023 年第一季度发布。
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 德尔福在 2019 年就获得德国车企 27 亿美元 800 伏 SiC 逆变器订单，预计 2022 年推出；2020 年，德尔福获得了欧洲 TOP3 豪车制造商 800V SiC 逆变器供货合约，预计将于 2024 年启动交付。 ○ 2022 年 2 月，博格华纳与中国豪车品牌签订 800V SiC 逆变器合同，开发三款逆变器，首款车型预计将于 2023 年第一季度推出。2022 年 5 月，博格华纳 800V SiC 逆变器获得了 2 家汽车品牌订单，计划于 2023 年和 2024 年投产。 ○ SiC 器件供应方面，2019 年，德尔福与 Wolfspeed 开展汽车 SiC 器件合作。博格华纳的车企客户大众也与 Wolfspeed 签订了战略合作协议
公司总部	美国密歇根州

采埃孚 (ZF Friedrichshafen)

<p>公司背景</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 一家全球领先的汽车零部件供应商，2020 年全球汽车零部件企业百强排名第 5，其汽车动力传动系统和底盘技术具有世界领先地位。 ○ 参与了大约 50 个不同的新能源汽车项目，服务于十多家汽车制造商。 ○ 采埃孚的动力总成开发可追溯到 1989 年，2008 年正式量产第一批混合动力模块，为奔驰、宝马提供混合动力电机。
<p>碳化硅 SiC 重要动态 / 进展</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2021 年采埃孚发布 800V SiC 电驱动桥，将在多个项目中引入，包括某中国主机厂多款车型，以及欧洲某跑车制造商。 ○ SiC 芯片供应方面，2019 年 11 月，采埃孚与 Wolfspeed 达成合作，共同开发 SiC 逆变器，预计到 2022 年推向市场；模块方面，2020 年采埃孚与丹佛斯达成合作。
<p>公司总部</p>	<p>德国腓特烈港市</p>

电装 (DESON)

<p>公司背景</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 创立于 1949，在汽车零部件制造商中，营收达到世界第二，一直以来电装都致力于技术研发。目前正以电动化、自动驾驶领域为中心，加速相关的技术开发进程。
<p>碳化硅 SiC 重要动态 / 进展</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 电装碳化硅研发的历史追溯可以看到早在 1960 年代初期，当时电装发现从市面购买的半导体很难符合车载标准，特成立了专门针对车载半导体内制化的研究机构。 ○ 2014 年，电装在实现了将 SiC 晶体管应用到音响，2015 年 1 月，丰田将碳化硅二极管应用在公交车上。 ○ 2018 年实现了 SiC 二极管的车载化应用，首次被采用到了燃料电池大巴上。2020 年 12 月 9 日上市的 TOYOTA MIRAI 也采用了该技术。
<p>公司总部</p>	<p>日本</p>

弗迪动力有限公司

<p>公司背景</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 创始于 2003 年，原隶属于比亚迪集团旗下第十四事业部及第十七事业部，2019 年底弗迪动力正式挂牌成立，主要为比亚迪汽车及相关车企配套用发动机、变速器、减速机、电动车桥的自主研发及产销。 ○ 弗迪动力背靠比亚迪，电机控制器装机量遥遥领先其他供应商，在 2022 年上半年，装机量达 60 万套，远超第二名特斯拉，市场份额达 25.9%。截止至目前，弗迪动力的电驱动系统研发已经进行到第四代，国内首家量产 SiC 动力三合一产品。
<p>碳化硅 SiC 重要动态 / 进展</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 弗迪动力采用的 SiC 模块为比亚迪半导体自研。SiC 模块正面采用铜夹互连工艺，降低寄生电感，提升芯片过电流能力。最终 SiC 模块实现了可达 200KW 的输出功率，提升一倍的功率密度。比亚迪汉 EV 率先采用了该系统，实现了百公里加速 3.9 秒的成绩。
<p>公司总部</p>	<p>广东深圳</p>

深圳市汇川技术股份有限公司

公司背景	<ul style="list-style-type: none"> ○ 创始于 2003 年，是国内工业自动化控制领域的佼佼者和上市企业。 ○ 2021 年汇川技术的伺服系统份额跻身中国市场第一，低压变频器、新能源汽车电控、SCARA 机器人等产品份额皆位列中国市场前三 ○ 汇川技术自 2012 年便开始进军新能源汽车领域，并在 2016 年加大战略投入，重点布局新能源汽车的电机控制器、电机以及电驱总成，以及电源总成产品。 ○ 汇川和理想汽车在常州合资成立了常州汇想新能源汽车零部件公司。除了小鹏、理想、威马等新势力定点外，汇川在国内一线车企及国际车企的定点取得良好进展。
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 投资了瀚薪、积塔和同光股份。汇川的“玄奘”电控项目可以做到 28 Kw/L，采用双面水冷的模块，通过碳化硅技术目标是做到 35 Kw/L
公司总部	广东深圳

精进电动科技股份有限公司

公司背景	成立于 2008 年，自主掌握驱动电机、控制器、传动三大总成的核心技术，是我国少数能够持续获得全球知名整车企业电驱动系统产品量产订单的核心零部件企业
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2020 年精进电动发布高功率车用碳化硅控制器产品，获得了大众旗下的商用车集团 TRATON 的批量定点。 ○ 德国 MAN 最新款的 eTruck，瑞典 SCANIA 的 BEV1、BEV2 平台产品，荷兰 DAF 电动 XD 和 XF 重卡，福田 49T 氢燃料电池重卡都搭载了精进电动碳化硅控制器。
公司总部	北京

深圳威迈斯新能源股份有限公司

公司背景	<ul style="list-style-type: none"> ○ 成立于 2005 年，主要产品包括车载电源的车载充电机、车载 DC/DC 变换器、车载电源集成产品，电驱系统的电机控制器、电驱总成，以及液冷充电桩模块等。 ○ 2017 年，公司成功量产车载电源集成产品，成为业内最早实现将车载充电机、车载 DC/DC 变换器和其他相关部件集成的厂商之一。 ○ 已成为国内小鹏汽车、理想汽车、合众新能源、零跑汽车、上汽集团、吉利汽车、奇瑞汽车、长安汽车等众多知名车企的核心供应商，以及向海外知名车企 Stellantis 集团量产销售车载电源集成产品，并取得雷诺、通用汽车等海外车企定点。
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	车载电源产品中，威迈斯通过使用高耐压的 SiC MOSFET 替代硅基 MOSFET，使得产品的转换效率有所提升。同时，为解决充电慢问题，也在开发 800V 碳化硅高压平台。截至目前，威迈斯公司已经成功将 SiC MOSFET 应用在 11kW 车载电源产品及 40kW 液冷充电桩模块产品中，并实现了量产发货
公司总部	广东深圳

深圳欣锐科技股份有限公司

公司背景	<ul style="list-style-type: none"> ○ 专注新能源汽车高压“电控”解决方案，主要在车载 DC/DC 变换器和车载充电机。 ○ 2021 年新增氢能与燃料电池业务的燃料电池相关产品，目前，已经承接了上汽大通、广汽、长城、长安、红旗等国内燃料电池乘用车项目（DCF 集成）；并承接了清能客车 / 重卡项目、上燃专用车项目、杰宁重卡项目、潍柴重卡项目等主要的国内燃料电池商用车项目。
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 2012 年开始与 Wolfspeed 合作，探索 SiC MOSFET 在车载 DC/DC 变换器中的应用；2013 年全球首次将碳化硅技术引入新能源汽车车载电源中，为培育全球 SiC 产业链做出了贡献。 ○ 目前欣锐科技已经在 6 个 SiC 器件应用场景中均取得了全球技术领先优势，包括 DC/DC 变换器、车载充电机、氢燃料电池汽车 DCF、空气系统以及地面充电超级充电站、11KW EV 无线充电系统。
公司总部	广东深圳

宁波均胜电子股份有限公司

公司背景	成立于 2004，为全球汽车智能与安全科技领导者，根据《中国汽车报》排名，均胜电子位居全球汽车零部件企业第 37 名。
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> ○ 均胜电子子公司均胜普瑞 (Preh) 于 2019 年推出 800V SiC 逆变器技术，率先应用于保时捷 Taycan 车型。 ○ 2022 年 1-9 月，均胜累计新获 800V SiC 高压平台项目定点全生命周期订单总金额约 90 亿元。均胜电子旗下还有 DC/DC 电压转换模块等产品，可以与 OBC 和 PDU 形成三合一功率电子产品。
公司总部	浙江宁波

珠海英搏尔电气股份有限公司

公司背景	成立于 2005 年，主营产品为新能源汽车动力总成、电源总成以及驱动电机、电机控制器、车载充电机、DC-DC 转换器等新能源汽车动力域核心零部件，与吉利汽车，上汽通用五菱、长安汽车、北汽、江淮、威马、小鹏以及福特、采埃孚等众多国内外知名车企和大型零部件集团的长期合作。
碳化硅 SiC 重要动态 / 进展	发布了基于碳化硅的 OBC 产品方案，同时也布局了 800V SiC 电控。英搏尔的 800V “集成芯”驱动总成 2.0 产品采用了碳化硅技术，目前已向美国福特汽车交样 SiC 电机控制器，一汽大众搭载该公司采用 SiC 单管集成的双电机控制器联合开发顺利推进。
公司总部	广东珠海

9.8 SiC 产业重要玩家产业链分析：设备材料



企业全称	北京北方华创微电子装备有限公司
公司网址	www.naura.com
总部地址	北京经济技术开发区
公司介绍	北方华创微电子的主要产品包括刻蚀机、薄膜沉积设备、氧化 / 扩散炉、清洗机、气体质量流量计等半导体工艺装备及核心零部件，广泛应用于集成电路、半导体照明、光伏、平板显示等领域，为半导体、新能源、新材料等领域提供解决方案。
SiC 相关产品	SiC 长晶炉、SiC 外延炉、刻蚀机、PVD、PECVD、炉管、清洗机等
代表客户	各 SiC 衬底、外延、器件制造商
优势简述	北方华创在 SiC 芯片制造领域拥有多年的经验，可以提供 ETCH, PECVD, PVD, 清洗机, LPCVD 和高温氧化 / 退火炉等关键设备，产品性能优异，可为客户提供全面的工艺解决方案。SiC 长晶炉、SiC 外延炉成为行业首选。拥有经验丰富的售后服务团队，为客户提供优质的售后服务。
联系方式	联系人：李经理 电话：18701188617 邮箱：lishiqun@naura.com 微信 ID：aohan412



SiC 高温退火炉

产品具备如下特点：

- » 4/6 英寸兼容, 单次工艺 ≥ 50 片;
- » 激活率高, 表面粗糙度小;
- » 水冷加热, 环境温升小;
- » 自动装片 Cassette to Cassette;
- » 本质安全设计, 符合 CE, SEMI S6 标准。

SiC 高温氧化炉

产品具备如下特点：

- » 4/6 英寸兼容, 单次工艺 ≥ 50 片;
- » 膜厚均匀, WIW W2W 和 R2R 一致性好;
- » 最高温度 1500°C, 温区均匀性 $\leq \pm 1^\circ\text{C}$;
- » 水冷加热, 环境温升小;
- » 自动装片 Cassette to Cassette;
- » 本质安全设计, 符合 CE, SEMI S6 标准。





企业全称	Tokyo Electron Limited (简称 TEL)
公司网址	www.tel.com
总部地址	日本东京
营收情况	FY2022 财年 (2021.04.01-2022.03.31) 营收额 20038 亿日元
三代半相关产品	SiC 外延生长设备 Probus-SiC™、薄膜扩散设备 ALPHA-8SE™ i、涂布显影设备 CLEAN TRACK™ ACT™ 8、刻蚀设备 UNITY™ Me+、清洗设备 NS300+ 200mm Conversion 等相关制程设备
代表客户	全球各大领先的 SiC device 制造商
优势简述	<ul style="list-style-type: none"> ○ 碳化硅外延设备 (Probus): 自 2010 年起, 作为量产 HVM 外延设备被世界主要厂商广泛使用, 市占率 50% 以上; ○ 碳化硅刻蚀设备 (UNITY™ Me+): 内置刻蚀深度控制系统的 UD Chamber, 可直接用于 SiC 沟槽蚀刻。被各大主要制造厂商广泛采用。 ○ ALD 成膜设备 (ALPHA-8SE™ i): 提供均匀且覆盖形貌优良的薄膜并实现精细可控的沉积工艺。
中国布局	成立于 1963 年的 TOKYO ELECTRON LIMITED (TEL), 作为全球知名的半导体制造设备供应商, 从事多方位产品领域的开发、制造和销售。TEL 在中国注册有三家法人公司, 他们是在上海张江高科技园区的东电电子 (上海) 有限公司、设立在上海外高桥保税区的东电半导体设备 (上海) 有限公司和在江苏省昆山市的东电光电半导体设备 (昆山) 有限公司, 分别作为 TEL 在中国的售后服务和培训中心、物流中心及生产制造基地。2022 年, TEL 中国区员工发展到 1000 多人, 分支机构遍布上海、北京、无锡、西安、南京、昆山、成都、武汉、厦门、深圳等地, 提供紧邻客户的全面服务。
联系方式	李先生 13611963618; 郑先生 13501763786

碳化硅解决方案 设备阵容

Epitaxial Growth	Hard Mask	Photoresist Coat & Develop	Ox Etch In-situ Ash	SiC Trench Etch	Gate Dielectric formation	Poly Si	Poly Si Etch Back
Probus-SiC™	ALPHA-8SE™i	CLEAN TRACK ACT™8	UNITY™ Me+ DRM chamber	UNITY™ Me+ UD chamber	ALPHA-8SE™i	ALPHA-8SE™i	UNITY™ Me+ UD chamber
							NS300+200mm Conversion for SCR

HIPER | 恒普

企业全称	宁波恒普真空科技股份有限公司
公司网址	www.hiper.cn
总部地址	浙江省慈溪高新技术产业开发区新兴一路 365 号
三代半相关产品	SiC 长晶设备, CVD 外延生长设备
业务范围 / 主营产品	<ul style="list-style-type: none"> ○ 宁波恒普真空科技股份有限公司是一家以材料研究为基础, 以高温热场环境控制为技术核心的金属注射成形 (MIM) 领域和宽禁带半导体领域的关键设备供应商, 主要从事金属注射成形 (MIM) 脱脂烧结炉、碳化硅晶体生长炉、碳化硅同质外延设备等热工装备的研发、生产和销售。 ○ 恒普科技凭借在材料研究和设备设计方面, 十年的控温控压技术沉淀, 通过温度闭环控制, 高精度压力控制, 轴径向分离技术, 以及双控技术, 为 SiC 长晶行业提供更大、更快、更厚的解决方案, 为国产外延设备突破到国际水准做出贡献。
联系方式	联系人: 邹先生 手机: 13567416699 邮箱: xiangwei.zou@hiper.cn

产品信息

代表产品: SiC Resistance therme field growth platform/ 电阻热生长平台 SRCG8-M07

电阻热场平台是目前先进的 PVT 晶体生长平台。感应加热由于电磁感应作用, 轴向温度和径向温度存在耦合现象, 无法兼顾长晶速度和长晶质量。电阻热场生长平台, 可对轴向温度和径向温度分别进行精确控制, 有利于实现大尺寸晶体生长, 并提高晶体生长速度, 是未来高品质 8 英寸碳化硅晶体生长的解决方案之一。

技术特点:

1. 内外分离测温组件

- 整个晶体生长周期全程采用温度闭环控制
- 内外分离, 大幅度提高了温度测量的抗干扰性

2. 多区控温设计:

- 减少热应力产生的缺陷
- 实现更灵活的温度梯度调整
- 对原料温度区域与籽晶温度区域单独控制





公司全称	苏州优晶光电科技有限公司
公司网址	www.ukingtech.com
总部 / 生产基地	江苏苏州
主营产品	电阻法碳化硅 N 型 6 英寸、8 英寸长晶炉 6 英寸 N 型晶锭
公司动态	苏州优晶光电科技有限公司成立于 2010 年，总部坐落于江苏省苏州市，是一家专注材料装备、工艺和技术的服务商。自成立以来，优晶光电一直致力于新材料、新工艺、新装备的研发和制造，并可提供装备的升级、改造等成套技术服务。公司与各大高校、科研院所紧密合作，拥有先进的技术力量，随时随地为客户定制完整的解决方案。优晶团队专家在各自业务领域均有 30 年以上的丰富专业技术与实操经验，为公司新装备、新工艺、新材料的研发和技术创新提供强有力的技术支撑。目前公司在碳化硅单晶生长设备及工艺领域拥有发明专利 7 项，实用新型和外观设计专利 17 项，正在申请和受理中的专利及软件著作权多项。
联系方式	联系人：裴舒宁 电话：13698977776 邮箱：peishuning@ukingtech.com 微信 ID：13698977776

产品信息

优晶光电已推出第四代机型 UKING ERH SiC RV4.0 电阻法碳化硅长晶设备，该机型有如下特点：

- 完美解决了感应炉温场均匀性差的技术难点，可实现径向和轴向温度梯度的精确控制，晶体内部缺陷少，良率高、重复性好；
- 相比传统工艺长达 7-14 天的制备时间，UKING ERH SiC RV4.0 长晶速度快，生长时间大幅缩短，整个过程可控制在 5 天之内；
- 设备自动化程度高，设备生长过程中无需人为操作，规模化量产、扩产速度远高于其他工艺方法；
- 炉内最高温度可达 2250°C，超过碳化硅晶体生长所需的温度。电源精度 $\pm 10w$ （万分之三），温度精度控制 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ （万分之 1.5），压力精度控制 $\pm 0.5\text{Pa}$ ，气体流量精度控制 $\pm 0.01\text{L/h}$ ，以上各项指标均超过国内其他碳化硅晶体生长设备。

电阻法碳化硅长晶炉
(6-8 英寸)



▲ UKING ERH SiC RV4.0



中国电子科技集团公司第四十八研究所
THE 48TH RESEARCH INSTITUTE OF CHINA ELECTRONICS TECHNOLOGY GROUP CORPORATION

企业全称	中国电子科技集团公司第四十八研究所
总部地址	湖南长沙
第三代半导体相关产品	SiC 成套设备: SiC 外延生长炉、SiC 高温离子注入机、SiC 高温退火炉、SiC 高温氧化炉、碳膜溅射设备、LPCVD-Poly、LPCVD-TEOS
企业简介	<ul style="list-style-type: none"> ○ 中国电子科技集团公司第四十八研究所又名“长沙半导体工艺设备研究所”，成立于 1964 年，是国内唯一从事以离子注入机、电子束曝光机、分子束外延等三束（离子束、电子束、分子束）装备为主的军民两用型骨干科研生产单位。 ○ 48 所装备涵盖半导体装备和新能源装备两大门类：半导体装备包括硅基半导体装备、第三代半导体装备和红外器件装备；新能源装备包括锂电池材料热工装备、光伏装备、磁性材料装备、冶金材料装备等，是国内唯一在半导体和新能源领域具有成套装备整线集成能力的单位。 ○ 作为国家第三代半导体技术创新中心装备分中心，中国电科 48 所在第三代半导体装备领域布局已久，在国内率先开展 SiC 专用装备研发，已具备 SiC 工艺装备成套能力，是第三代半导体成套装备国产解决方案首选供应商。
联系方式	联系人：黎先生 电话：18774917475 邮箱：lidin@cs48.com

中国电科 48 所第三代半导体成套装备国产解决方案

制程	外延生长	注入掩膜、多晶硅栅	激活退火	栅氧层制备
设备名称	SiC 外延生长炉	立式 LPCVD	SiC 高温退火炉	SiC 高温氧化炉
性能指标	1、晶片尺寸：6 寸； 2、最高温度：1700°C； 3、最高生长速率：> 90 μ m/h； 4、控温精度： \pm 0.1°C； 5、厚度均匀性：0.3%~1.5%； 6、掺杂浓度均匀性：1.5%~5%； 7、表面形貌缺陷：< 0.5 个/cm ² ；	1、最大升温速率：10°C / min； 2、最大降温速率：3°C / min； 3、恒温区温度均匀性： \pm 1°C； 4、单点控温精度： \pm 0.5°C； 5、新增颗粒： \leq 30 (\geq 0.2 μ m)；	1、晶片尺寸：6 寸； 2、最大载片量：50 片 / 批； 3、工艺温度：1000°C ~1900°C； 4、恒温区长度：250mm； 5、控温精度： \leq \pm 1°C； 6、炉内温度均匀性： \leq \pm 5°C； 7、最大升温速率：100°C / min；	1、晶片尺寸：6 寸； 2、最大载片量：50 片 / 批； 3、工艺温度：800°C ~1500°C； 4、恒温区长度：250mm； 5、控温精度： \leq \pm 1°C； 6、温度均匀性： \leq \pm 5°C； 7、膜厚均匀性： \pm 2.5%；
产品图片				



企业全称	北京华卓精科科技股份有限公司
公司网址	www.u-precision.com
总部地址	北京经济开发区
三代半相关产品	SiC 激光退火设备、SiC 晶圆键合设备、超精密运动模组
优势简述	<ul style="list-style-type: none"> 北京华卓精科科技股份有限公司自 2012 年成立以来，依托强大的研发技术团队，集研发、生产制造于一体的第三代半导体功率器件研发企业。 团队核心领军成员来自于清华大学 IC 装备团队，拥有超过 15 年的碳化硅工艺、仿真、设计和可靠性研究经验。自 2014 年开始，华卓精科市场份额一直占据行业市场前列，功率器件激光退火与先进制程激光退火设备市场占有率高达 60%。设备性能与国外产品相当的同时，货期、价格、售后服务等方面具备很大优势。目前我司碳化硅激光退火设备国产化率可达到 95% 以上，并且配备专业的质检团队及专业的设备仪器，为客户提供始终如一的高质量产品。创新与研发是公司的根本，每年大量资金投入项目研发中心，拥有超过 100+ 自主专利，可满足更多种设备研发、生产制造应用等需求。
联系方式	联系人：李鑫 电话：15210969099 邮箱：lix@u-precision.com

设备名称	SiC 激光退火设备	NSLA 激光退火设备	SDLA 激光退火设备	IGBT 激光退火设备
产品介绍	SiC 材料激光退火加工机台，可灵活配置紫外或绿光波长，采用优秀的模块化设计，及灵活可靠的集成方式，对比振镜方案性能显著提升。可实现超薄晶圆、大翘曲晶圆、键合晶圆的精确定位及高效可靠传输，具备工艺腔室氧含量控制 <10ppm、视觉定位、各工艺参数实时监控等功能。	自主研发的 NSLA 系列 Silicide 激光退火设备应用于 28nm 及以下节点的 silicide 工艺，实现优良的 silicide 欧姆接触，解决 creep up、bridging 和 piping 等问题。	是一款面向 40-14nm 芯片制程的前道退火关键设备，即晶圆前道栅工艺制程的超浅结 USJ 和 SD 退火，实现注入掺杂离子激活和结深控制，解决了前道退火栅工艺中重要难题 - 图案效应。	专为硅基功率器件背面退火量产工艺开发，采用优秀的模块化设计及升级版方案，可实现超薄晶圆和大翘曲晶圆的精确定位及快速可靠传输，采用独特的定制化红光技术，可完成超薄片单 / 多层掺杂的深度激活，满足 IGBT 等功率器件又薄又深的多样化退火工艺需求。
产品图片				



企业全称	西安晨光硅研半导体科技有限公司
总部地址	陕西西安
代表客户	中国领先的 SiC 衬底厂商
产业链环节	SiC 衬底加工设备
核心技术	微射流激光技术
设备技术优势	<p>A、一套设备可实现籽晶剥离、定位边切除、晶锭滚圆、异型晶体加工、晶锭切片、衬底修复、晶圆划片等功能；</p> <p>B、激光无需对焦，可进行 3D 切削，有效加工深度可深达 100-120mm；</p> <p>C、微射流技术保持平行水射流中的激光束完全平行，柱形激光束实现平行切边，确保高质量加工壁和切边；</p> <p>D、大长宽比，可实现 30μm 以下切边宽度，可以最小的材料损失钻更深的孔；</p> <p>E、水射流的冷却作用避免热损伤和材料变化从而维持设计的疲劳强度；</p> <p>F、水膜消除了加工废料粒子的堆积和污染，无需加工表面的保护层；</p> <p>G、水射流的高动能驱散融化废料粒子，避免毛刺，清洁高质量的形成加工面。</p> <p>○ 与传统技术相比，碳化硅晶锭滚圆时间效率提高 50%，良率提高到 99% 以上、人力降低 90%；碳化硅晶锭切片，微射流激光技术切片可直接进行精磨、CMP；器件划片，微射流激光因水柱的作用，将每个脉冲残留的热量迅速带走不会累积在工件上，因此切割道干净利索，对于传统“隐切”+“裂片”方式，减少加工工艺。</p>
应用领域	<p>专注碳化硅晶锭滚圆 / 切片 / 划片设备及工艺定型之余，同时服务特种材料探索及代工，从碳化硅成熟应用为起点，打样测试及代工包括但不限于：氮化镓晶体、超宽禁带半导体材料（金刚石、氧化镓）、航空航天特种材料、陶瓷复合材料、闪烁晶体等，解决硬、脆、贵材料加工瓶颈。微射流激光技术设备也将行业提供领先的解决方案。</p>
联系方式	联系人：杨森 电话：13772002366 邮箱：523553959@qq.com 微信 ID：cordysen

设备名称：LCSA-100/LCSA-200

微射流激光技术 Laser MicroJet (LMJ) 结合了高功率脉冲激光和纤细水射流的优点：激光用于去除材料，水射流用于引导激光、冷却边缘并避免工件上形成熔渣或毛刺。其有效可加工区域长达 100mm 以上，钻孔深径比大于 20:1。可以有效进行 SiC 晶体的滚圆、切片，SiC 晶圆的划片、打孔、异型加工等应用。滚圆和切片的表面粗糙度值 Ra 小于 0.8 μ m，SiC 滚圆兼容 8inch 及以下的晶锭。





企业全称	深圳市智立方自动化股份有限公司
第三代半导体相关产品	芯片分选机、Wafer&Chip 自动光学检测设备
第三代半导体重要动态 / 进展	深圳市智立方自动化设备股份有限公司成立于2011年,创业板上市公司,股票代码301312。公司拥有专利128项,软件著作权46项,围绕精度、速度、稳定性三项工业自动化设备性能的关键指标,先后开发出光学成像球面分布属性测试技术、光学感应灵敏度标定测试技术、光学测量与校准技术、成像模组自动调焦技术、高稳定性成像模组定位技术、振动模拟仿真控制技术、精密滑台及相关机构组件技术等多项技术,形成核心技术优势。先后推出了 Wafer&Chip 自动光学检测设备、芯片分选机等半导体标准设备,用于 SiC、GaN、Mini/MicroLED、MIP、CSP、UVLED、光通讯等行业。
生产基地	深圳、东莞、苏州
公司相关信息	联系人: 毛 建 电话: 13811928592 邮箱: jian.mao@incubecn.com

第三代半导体产业布局

制程	wafer&Chip 外观检测	芯片分选	芯片分选
设备名称	自动光学检测 /AOI Explorer plus	分选机 MS350- 标准版	分选机 MS350-IC 版
性能指标	1. 芯片处理能力 3mil*5mil~60mil*60mil; 2. 设备绝对精度: X=±1um; Y=±1um; Z=±1um; 3. 检测精度: 0.2um/pixel; 4. 过检率: ≤0.5%; 5. 明暗场检测, 机器学习 & 特检 & 检测算法三道卡控;	1. 芯片处理能力 3mil*5mil~45mil*45mil; 2. 高精度: XY<±15um; θ < 3°@3σ; 3. 混分、高精度重排功能;	1. wafer 端兼容 12 寸, 10 寸, 7 寸扩晶环; 2. 芯片处理能力 3mil*5mil~200mil*200mil; 3. 高精度: XY<±15um; θ < 3°@3σ; 4. 混分、高精度重排功能;
设备图片			

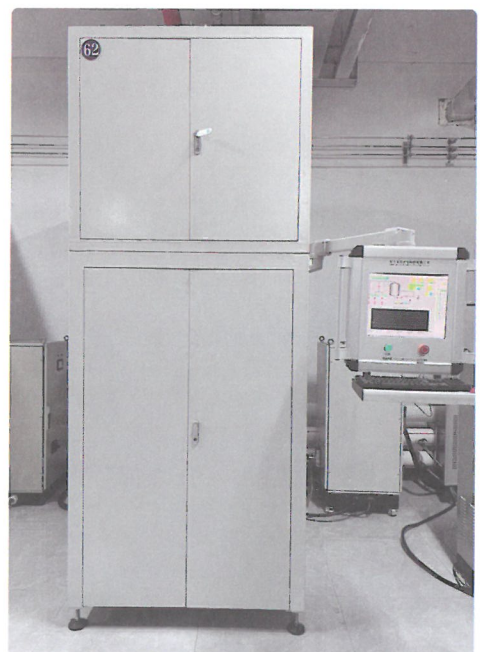
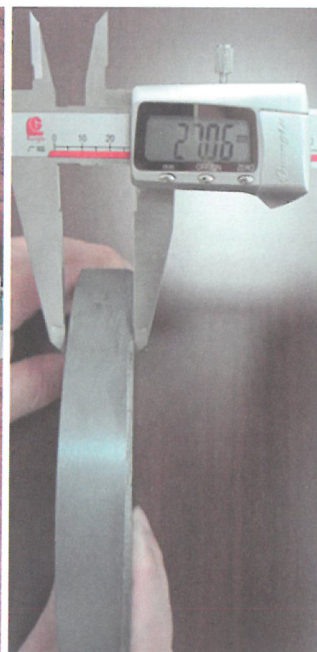


企业全称	河北岚鲸光电科技有限公司
公司网址	https://www.ljsic.com/
总部地址	河北省石家庄市井陘矿区鑫鸿工业园内
三代半相关产品	<ul style="list-style-type: none"> ○ 4/6 英寸碳化硅单晶生长炉 (感应式、电阻式) ; ○ 碳化硅单晶生长原料、碳化硅单晶及衬底 (导电型、半绝缘型) ; ○ 碳化硅相关技术与工艺服务
优势简述	<ul style="list-style-type: none"> ○ 通过 7 年时间深耕于高品质 SiC 单晶炉的研发及长晶工艺; ○ 历经 3 英寸 -4 英寸 -6 英寸碳化硅长晶炉研发与验证, 相比国内其他厂家, 我们具有长晶炉 / 原料 / 长晶工艺 / 籽晶粘接技术等完整的技术链; ○ 自主研发了数字 DSP IGBT 高稳定性中频电源, 籽晶键合设备, 相衬显微无损 sic 晶片检测系统等; ○ 我们前前后后投入了数千万元进行设备研发和长晶实验, 七年累计的经验和数据可以使客户少走弯路, 帮助客户节省研发时间、提高生产效率。
技术保障	<ul style="list-style-type: none"> ○ 我们的技术是由国内专家、日本专家、台湾专家 (取长补短) 结合我们自主研发的长晶炉进行了长达 7 年的技术验证; ○ 每一台设备都将为客户进行完全的长晶验证, 并进行严格的售后服务; ○ 我们将提供多种合作方式, 并以满足用户要求为服务宗旨进行多方面的合作
联系方式	联系人: 王新新 电话: 18435132922 邮箱: 825505251 微信 ID: 18435132922

产品名称



▲ 河北岚鲸导电型单晶及其厚度



▲ 河北岚鲸碳化硅单晶生长炉



企业全称	河南联合精密材料股份有限公司
公司网址	www.union-diamond.com
总部地址	河南郑州
产业链环节	SIC 晶片
三代半相关产品	金刚石切割粉、钻石研磨液、研磨垫
代表客户	天科合达、河北同光股份、山西烁科、湖南三安、中电化合物
优势简述	<ul style="list-style-type: none"> ○ 国内领先的金刚石微粉、钻石液及研磨抛光耗材生产商，市场占有率 50% 以上； ○ 致力于为半导体晶片（硅晶圆、碳化硅、LED 衬底等）、消费电子玻璃（智能手机、智能手表等）、精密陶瓷等硬脆加工行业提供整体研磨抛光解决方案； ○ 在军工、热界面材料生产领域，不断创新、打破国外垄断实现国产替代。
第三代半导体重要动态 / 进展	<ul style="list-style-type: none"> (1) 拥有多项碳化硅晶片加工相关专利，包含加工工艺、切磨抛光耗材等； (2) 拥有水性、油性碳化硅晶片切割液，稳定性好，切割后晶片翘曲度小； (3) 拥有碳化硅晶片研磨整体解决方案，加工速率高，晶片质量领先；
联系方式	联系人：宋腾飞 电话：13838329027 邮箱：alan@union-diamond.com

产品性能以及优势

产品名称	水性碳化硅晶片多线切割液	油基碳化硅晶片多线切割液	水基钻石粗磨液	水基钻石精磨液
产品特性	<ul style="list-style-type: none"> (1) 切割过程中对切割线有很好的黏附力； (2) 切割效率高，切割晶片翘曲度小； (3) 配方不含水，具有很好的防锈性能； (4) 较油性切割液相比，更环保和易清洗； (5) 严格的质量控制，确保产品质量的一致性和稳定性。 	<ul style="list-style-type: none"> 1) 切割过程中对切割线有很好的黏附力； (2) 采用油性载体，切割效率高，切割晶片翘曲度小； (3) 金刚石磨料悬浮稳定性较好，提高工艺稳定性； (4) 严格的质量控制，确保产品质量的一致性和稳定性。 	<ul style="list-style-type: none"> (1) 搭配铸铁盘使用能够实现材料高去除率的同时保证碳化硅晶片质量 (Warp 值, 翘曲度, TTV)； (2) 具有良好的防锈性； (3) 对金刚石磨料悬浮性稳定，长时间放置无明显沉降现象； (4) 严格的质量控制，确保产品质量的一致性和稳定性。 	<ul style="list-style-type: none"> (1) 搭配专门的碳化硅研磨垫使用达到高去除率，提升效率 (2) 精磨加工后的碳化硅晶片表面质量高 (粗糙度, 划伤, 亚表面损伤层等参数)； (3) 水溶性载体配方，具有较好清洗性能； (4) 悬浮稳定性好； (5) 较于常规的水基配方，润滑性能更优；

第十章、SiC 半导体供应链信息库

以下联合出品方及参编单位对本章节的特别贡献

A 级参编单位



B 级参编单位



参与单位



10.1 SiC 产业衬底制造商列表

SiCrystal GmbH

- » 产业链环节: SiC 衬底
- » 公司网址: www.sicrystal.de

SK Siltron

- » 产业链环节: SiC 衬底
- » 公司网址: www.sksiltron.com

Soitec

- » 产业链环节: SiC 衬底
- » 公司网址: www.soitec.com/en

山西烁科晶体有限公司

- » 产业链环节: SiC 衬底
- » 公司网址: www.semisic.cn

北京天科合达半导体股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 衬底、SiC 外延片
- » 公司网址: www.tankeblue.com

山东天岳先进科技股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 衬底
- » 公司网址: www.sicc.cc

河北同光股份股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 衬底
- » 公司网址: www.synlight.cn

合肥露笑半导体材料有限公司

- » 产业链环节: SiC 衬底、SiC 外延片
- » 公司网址: www.hefeiroshow-semi.com

浙江晶盛机电股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 衬底、SiC 设备
- » 公司网址: www.jsjd.cc

宁波合盛新材料有限公司

- » 产业链环节: SiC 衬底、SiC 外延片
- » 公司网址: www.hs-mmcs.com

浙江东尼电子股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 衬底
- » 公司网址: www.tonytech.com

广州南砂晶圆半导体技术有限公司

- » 产业链环节: SiC 衬底、SiC 外延片
- » 公司网址: www.summitcrystal.com

哈尔滨科友半导体产业装备与技术研究院有限公司

- » 产业链环节: SiC 衬底、SiC 设备
- » 公司网址: www.ky-semiconductor.com

江苏超芯星半导体有限公司

- » 产业链环节: SiC 衬底
- » 公司网址: www.hypersics.com

10.2 SiC 产业外延 / 芯片 / IDM 制造商列表

意法半导体有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.st.com

Wolfspeed

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.wolfspeed.com

英飞凌 (Infineon)

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.infineon.com/cms/cn/

安森美 ONSEMI

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.onsemi.cn

罗姆半导体集团

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.rohm.com.cn

Coherent

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.ii-vi.com

三安光电股份有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.sanan-e.com

博世半导体

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.bosch-semiconductors.com

瑞萨电子株式会社

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www2.renesas.cn/cn/zh

闻泰科技股份有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.wingtech.com/cn/

泰科天润半导体科技(北京)有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.globalpowertech.cn

北京绿能芯创电子科技有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.gietsic.com

恒诺微电子国际有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: /

深圳方正微电子有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.founderic.com

中国电子科技集团第五十五研究所

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.cetc55.com

北京世纪金光半导体有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM、SiC 衬底
- » 公司网址: www.cengol.com

华润微电子有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.crmicro.com

杭州士兰微电子股份有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.silan.com.cn

比亚迪半导体股份有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM、SiC 衬底
- » 公司网址: www.bydmicro.com/cn/

中车株洲电力机车研究所有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: /

扬州扬杰电子科技股份有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.21yangjie.com

上海瞻芯电子科技有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.inventchip.com.cn

吉林华微电子股份有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.hwdz.com.cn

北京燕东微电子有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.ydme.com

嘉兴斯达半导体股份有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.powersemi.cc

江苏宏微科技股份有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.macmicst.com

中科汉韵半导体有限公司

- » 产业链环节: SiC IDM
- » 公司网址: www.sicchip.com

Resonac (原昭和电工)

- » 产业链环节: SiC 外延、SiC 衬底
- » 公司网址: www.sdk.co.jp

瀚天天成电子科技(厦门)有限公司

- » 产业链环节: SiC 外延
- » 公司网址: www.epiworld.com.cn

东莞市天域半导体科技有限公司

- » 产业链环节: SiC 外延
- » 公司网址: www.sicthy.com

南京百识电子科技有限公司

- » 产业链环节: SiC 外延
- » 公司网址: www.bestcompsemi.com/cn

中电化合物半导体有限公司

- » 产业链环节: SiC 外延、SiC 衬底
- » 公司网址: www.cecsic.com.cn

南京国盛电子有限公司

- » 产业链环节: SiC 外延
- » 公司网址: www.gs-epi.com

河北普兴电子科技股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 外延
- » 公司网址: www.poshing.cn

X-Fab

- » 产业链环节: SiC 代工
- » 公司网址: www.xfab.com

汉磊科技股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 代工
- » 公司网址: www.episil.com/index/

YES POWER TECHNIX

- » 产业链环节: SiC 代工
- » 公司网址: www.ypt.co.kr/zh/

上海积塔半导体有限公司

- » 产业链环节: SiC 代工
- » 公司网址: www.gtasemi.com.cn

安徽长飞先进半导体有限公司

- » 产业链环节: SiC 代工
- » 公司网址: www.yascsemi.com

绍兴中芯集成电路制造股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 代工
- » 公司网址: www.smecs.com

10.3 SiC 产业功率器件设计 / 模块与制造商列表

深圳基本半导体有限公司

- » 产业链环节: SiC 器件设计、模块
- » 公司网址: www.basicsemi.com

飞程半导体(上海)有限公司

- » 产业链环节: SiC 器件设计
- » 公司网址: www.alpha-powers.com.cn

清纯半导体(宁波)有限公司

- » 产业链环节: SiC 器件设计
- » 公司网址: www.sichainsemi.com

瑞能半导体科技股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 器件设计
- » 公司网址: www.ween-semi.com/cn

上海瀚薪科技有限公司

- » 产业链环节: SiC 器件设计
- » 公司网址: www.hestiapower.cn

深圳市森国科科技股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 器件设计
- » 公司网址: www.gokeic.com

派恩杰半导体(杭州)有限公司

- » 产业链环节: SiC 器件设计
- » 公司网址: www.pnjsemi.com

安徽芯塔电子科技有限公司

- » 产业链环节: SiC 器件设计
- » 公司网址: www.topelectronics.cn

佛山市国星光电股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 器件设计、SiC 模块
- » 公司网址: www.nationstar.com

厦门芯光润泽科技有限公司

- » 产业链环节: SiC 器件设计
- » 公司网址: www.chinasicpower.com

深圳市美浦森半导体有限公司

- » 产业链环节: SiC 器件设计
- » 公司网址: www.maplesemi.com

无锡芯朋微电子股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 器件设计
- » 公司网址: www.chipown.com.cn

深圳爱仕特科技有限公司

- » 产业链环节: SiC 器件设计、SiC 模块
- » 公司网址: www.astsic.com

广州安海半导体股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 器件设计
- » 公司网址: www.anhisemi.com/index.html

芯众享(成都)微电子有限公司

- » 产业链环节: SiC 器件设计、GaN 器件
- » 公司网址: www.xzxme.com

成都蓉矽半导体有限公司

- » 产业链环节: SiC 器件设计
- » 公司网址: www.novusem.com

三菱电机机电(上海)有限公司

- » 产业链环节: SiC 模块
- » 公司网址: www.mitsubishielectric-mesh.com

富士电机(中国)有限公司

- » 产业链环节: SiC 模块
- » 公司网址: www.fujielectric.com

赛米控 - 丹佛斯

- » 产业链环节: SiC 模块
- » 公司网址: www.semikron-danfoss.com

上汽英飞凌汽车功率半导体(上海)有限公司

- » 产业链环节: SiC 模块
- » 公司网址: www.ixys.com

广东芯聚能半导体有限公司

- » 产业链环节: SiC 模块
- » 公司网址: www.accopower.com

无锡利普思半导体有限公司

- » 产业链环节: SiC 模块
- » 公司网址: www.leapers-power.com

元山(济南)电子科技有限公司

- » 产业链环节: SiC 模块
- » 公司网址: www.yshn.cn

上海芯华睿半导体科技有限公司

- » 产业链环节: SiC 模块
- » 公司网址: /

翠展微电子(上海)有限公司

- » 产业链环节: SiC 模块
- » 公司网址: www.grecon-semi.com

合肥仙湖半导体科技有限公司

- » 产业链环节: SiC 模块
- » 公司网址: www.lakesemi.com

安徽瑞迪微电子有限公司

- » 产业链环节: SiC 模块
- » 公司网址: www.redpowersemi.com

10.4 SiC 产业下游应用厂商分类及列表

深圳麦格米特电气股份有限公司

- » 产业链环节: 光伏电源
- » 公司网址: www.megmeet.com

阳光电源股份有限公司

- » 产业链环节: 光伏电源
- » 公司网址: www.sungrowpower.com

深圳市盛弘电气股份有限公司

- » 产业链环节: 光伏电源
- » 公司网址: www.sinexcel.com

深圳科士达科技股份有限公司

- » 产业链环节: 光伏电源
- » 公司网址: www.kstar.com.cn/vision1.jhtml

伊顿电气有限公司

- » 产业链环节: 光伏电源
- » 公司网址: www.eaton.com/tw/zh-tw.html

山特电子(深圳)有限公司

- » 产业链环节: 光伏电源
- » 公司网址: www.santak.com.cn

万帮数字能源股份有限公司(星星充电桩)

- » 产业链环节: 光伏电源
- » 公司网址: www.starcharge.com/zh-CN

深圳威迈斯新能源股份有限公司

- » 产业链环节: 光伏电源
- » 公司网址: www.vmaxpower.com.cn

深圳欣锐科技股份有限公司

- » 产业链环节: OBC
- » 公司网址: www.shinry.com

铁城信息科技有限公司

- » 产业链环节: OBC
- » 公司网址: www.tccharger.com

深圳市得润电子股份有限公司

- » 产业链环节: OBC
- » 公司网址: www.deren.com/default.aspx

台达电子(东莞)有限公司

- » 产业链环节: 光伏电源
- » 公司网址: www.delta-china.com.cn/zh-CN/index

锦浪科技股份有限公司

- » 产业链环节: 光伏电源
- » 公司网址: www.ginlong.com/cn

深圳英飞源技术有限公司

- » 产业链环节: 充电桩
- » 公司网址: www.infypower.com

特来电新能源股份有限公司

- » 产业链环节: 充电桩
- » 公司网址: www.teld.cn

杭州中恒电气股份有限公司

- » 产业链环节: 充电桩
- » 公司网址: www.hzzh.com/index/index.html

苏州瑞驱电动科技有限公司

- » 产业链环节: 电机电控
- » 公司网址: www.wise-drive.cn

南京博兰得电子科技有限公司

- » 产业链环节: 电源
- » 公司网址: cn.powerlandtech.com

10.5 SiC 产业设备与材料制造商列表

宁波恒普真空科技股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 晶体生长设备
- » 公司网址: www.hiper.cn

苏州优晶光电科技有限公司

- » 产业链环节: SiC 晶体生长设备
- » 公司网址: www.ukingtech.com

河北岚鲸光电科技有限公司

- » 产业链环节: SiC 晶体生长设备
- » 公司网址: www.ljsic.com

迪思科科技(中国)有限公司

- » 产业链环节: SiC 衬底切磨抛设备
- » 公司网址: /

西安晟光硅研半导体科技有限公司

- » 产业链环节: SiC 衬底切磨抛设备
- » 公司网址: /

德国爱思强股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 外延生长设备
- » 公司网址: www.aixtron.com

Tokyo Electron (简称: TEL)

- » 产业链环节: SiC 外延生长、薄膜沉积、刻蚀、涂胶显影、清洗
- » 公司网址: www.tel.com

LPES.p.A/ASM International 收购

- » 产业链环节: SiC 外延生长设备
- » 公司网址: www.lpe-epi.com

NuFlare Technology, Inc.

- » 产业链环节: SiC 外延生长设备
- » 公司网址: www.nuflare.co.jp/english/

中国电子科技集团公司第四十八研究所

- » 产业链环节: SiC 成套设备: SiC 外延生长炉、SiC 高温离子注入机、SiC 高温退火炉、SiC 高温氧化炉、碳膜溅射设备、LPCVD-Poly、LPCVD-TEOS
- » 公司网址: www.cs48.com

应用材料股份有限公司

- » 产业链环节: CMP/ 离子注入 / 刻蚀 /CVD/ LPCVD/PVD
- » 公司网址: www.appliedmaterials.com

深圳市纳设智能装备有限公司

- » 产业链环节: SiC 外延生长设备
- » 公司网址: www.naso-tech.com

KLA Corporation

- » 产业链环节: 检测设备 (外延光片检测和带图形晶圆检测)
- » 公司网址: www.kla-tencor.com

牛津仪器科技(上海)有限公司

- » 产业链环节: ALD 原子层沉积设备
- » 公司网址: www.oxford-instruments.cn

北京北方华创微电子装备有限公司

- » 产业链环节: CMP/ 离子注入 / 刻蚀 /CVD/LPCVD/PVD
- » 公司网址: www.naura.com

浙江晶盛机电股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 长晶炉 / 外延炉制造商
- » 公司网址: www.jsjd.cc

亚舍立半导体贸易(上海)有限公司

- » 产业链环节: 离子注入设备
- » 公司网址: www.axcelis.com

爱发科商贸(上海)有限公司

- » 产业链环节: 离子注入设备
- » 公司网址: www.ulvac-shanghai.com

北京华卓精科科技股份有限公司

- » 产业链环节: SiC 激光退火和 SiC 晶圆键合设备
- » 公司网址: www.u-precision.com

北京特思迪科技有限公司

- » 产业链环节: 减薄、抛光、CMP
- » 公司网址: www.tsd-semicon.com

苏州博湃半导体技术有限公司

- » 产业链环节: 银烧结设备、塑封设备、AMB 覆铜陶瓷基板
- » 公司网址: www.bopaisemi.com

ASMPT 有限公司

- » 产业链环节: 多芯片贴片机, 银烧结炉, 粗铝线铝带机, 丝网印刷等后段封装测试设备
- » 公司网址: www.semi.asmpt.com

深圳市先进连接科技有限公司

- » 产业链环节: 银烧结设备
- » 公司网址: www.ajmtech.cn

嘉源昊泽半导体(苏州)有限公司

- » 产业链环节: 银烧结设备
- » 公司网址: www.ksjyh.com

深圳市智立方自动化设备股份有限公司

- » 产业链环节: 芯片分选机、晶圆检测设备
- » 公司网址: www.incubecn.com

忱芯科技(上海)有限公司

- » 产业链环节: SiC 测试设备
- » 公司网址: unisic-tech.com

是德科技汽车与能源事业部

- » 产业链环节: SiC 测试设备
- » 公司网址: www.keysight.com.cn

嵊州市西格玛科技有限公司

- » 产业链环节: SiC 石墨托盘
- » 公司网址: www.sigmacarbon.cn

西格里碳素股份公司

- » 产业链环节: SiC 石墨托盘
- » 公司网址: www.sglcarbon.cn

日本东洋炭素株式会社

- » 产业链环节: SiC 石墨托盘
- » 公司网址: www.sttanso.com

日本东海碳素有限公司

- » 产业链环节: SiC 长晶 / 长外延热场材料
- » 公司网址: www.tokaisz.com

广州志橙半导体有限公司

- » 产业链环节: SiC 涂层石墨基座
- » 公司网址: www.orangecvd.com

厦门中材航特科技有限公司

- » 产业链环节: SiC 长晶 / 长外延热场材料
- » 公司网址: www.samtco.cn

河南联合精密材料股份有限公司

- » 产业链环节: 金刚石切割粉、研磨液、研磨垫
- » 公司网址: www.union-diamond.com

贺利氏电子

- » 产业链环节: 碳化硅模块封装材料
- » 公司网址: www.heraeus.cn