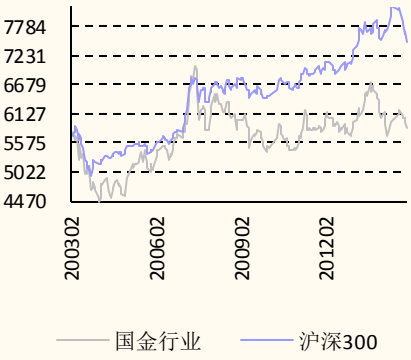
创新技术与企业服务研究中心

半导体行业研究　买入（维持评级）　　**行业深度研究**

砷化镓本土闭环，碳化硅等待“奇点时刻”

市场数据(人民币)

市场优化平均市盈率	18.90
国金半导体指数	5868
沪深 300 指数	5337
上证指数	3509
深证成指	14507
中小板综指	12778



相关报告

1.《新能源车快速发展，碳化硅迎来发展良机-新能源车快速发展，碳化...》，2020.12.31

2.《新技术催化景气上行，国产替代空间广阔-半导体硅片行业深度》，2020.12.26

3.《2021 年年度策略报告-2021—2022 年投资展望，六个...》，2020.11.26

4.《半导体行业 2020 年三季报综述-三季度半导体高度景气，盈利指...》，2020.11.5

5.《集成电路扶持政策点评-全产业链加大扶持力度，分级优惠鼓励做强》，2020.8.5

投资建议

- **行业策略：**在新能源汽车刚性需求驱动下，碳化硅产业链在实现综合成本优势之后，有望迎来爆发式增长；砷化镓未来仍将继续主导 sub-6G 手机射频，国内 PA 厂商的发展带来本土砷化镓代工需求；GaN 在 5G 宏基站和消费级快充上将取得大发展。建议关注碳化硅从衬底、外延片、器件到模块和设备的全产业链，砷化镓和氮化镓建议重点关注本土代工厂。
- **推荐组合：**三安光电（化合物半导体全产业链）、华润微（碳化硅器件）、Cree（碳化硅全产业链）、英飞凌（碳化硅器件）、稳懋（砷化镓代工）

行业观点

- **化合物半导体在射频、光电子和功率领域有望获得大发展：**化合物半导体材料在电子迁移速率、临界击穿电场、导热能力等特性上具有独特优势。砷化镓 PA 平均单机价值从 4G 的 3.25 美元增加至 5G 的 7.5 美元，砷化镓晶圆市场规模从 2019 年的 2 亿美元提升至 2025 年的 3.5 亿美元，核心受益环节是代工厂和射频 IDM；氮化镓具有更高功率密度和更小损耗，GaN HEMT 相比砷化镓体积下降 82%，是 5G 宏基站 PA 的最佳材料，行业发展的核心受益环节是外延片厂商和射频 IDM；碳化硅降低电动车能耗 5%-10%，缩小整体模块体积 80%（以丰田 PCU 为例），降低电池成本，缩短电池充电时间，适应电动车电压从 500V 左右向 1200V 发展的高压化趋势,预计到 2027 年碳化硅功率器件市场规模超过 100 亿美元，行业发展的核心受益环节是衬底生产厂商。
- **GaAs 代工比例提高，本土代工厂迎来发展机会：**化合物半导体因为行业整体规模较小，非标准化程度高，以代工模式为主。欧美主导砷化镓产业链，台湾厂商垄断代工。日本的住友、德国的 Freiberger 和美国的 AXT 三家合计约占全球半绝缘型衬底 90%的市场份额。英国 IQE 占据外延片市场 53%的市场份额。IDM 厂商 Skyworks、Qorvo 和博通合计占 GaAs 射频器件市场约 70%市场份额。砷化镓代工占全球砷化镓器件市场规模 10%左右，而稳懋占据其中超过 70%市场份额。IDM 长为了维持高产能利用率使得产能建设趋于保守，有意愿释放出更多代工订单，叠加高通等 Fabless 设计公司在射频领域崛起使代工比例提升。国内 PA 设计公司如海思、唯捷创芯的成长促进对本土砷化镓代工厂需求。
- **SiC 全球供需即将失衡，跨过“奇点时刻”有望迎来大发展：**碳化硅成本高昂及可靠性问题是阻碍碳化硅发展的最大障碍。两年之内，电动车的快速发展或将造成全球碳化硅衬底的供需失衡。假设未来五年碳化硅模块价格每年下降 10%，IGBT 价格每年下降 5%，电池成本每年下降 10%，中性预计全碳化硅方案相比硅方案能降低能耗 8%，我们测算在 2025 年碳化硅将迎来综合成本低于硅功率器件的 “奇点时刻”，之后迎来爆发增长。碳化硅成本结构使得全产业链布局具有优势，器件厂商也逐渐布局上游材料。在颠覆汽车功率器件进程中，目前车载领域市占率超过 80%的 Cree 有望成为最大赢家，而国内企业也在相关领域积极布局。

风险提示

- 成本下降不及预期、下游发展不及预期、外部贸易环境恶化

郑弼禹　分析师 SAC 执业编号：S1130520010001
zhengbiyu@gjzq.com.cn

内容目录

一、下游应用驱动，GaAs、GaN 和 SiC 各领风骚.....4
1.化合物半导体具有物理特性优势.....4
2.GaAs 主导 sub-6G 5G 手机射频.....4
3.GaN 在 5G 宏基站射频 PA 的大发展.....5
4.SiC 有望颠覆汽车功率半导体未来.....6
二、产业化正循环，“奇点时刻”加速到来.....8
1.发展阶段、核心驱动因素及受益环节分析.....8
2.SiC 成本高昂之源及可靠性问题.....9
3.预计 SiC“奇点时刻”五年之内到来.....11
三、GaAs 代工比例提高，打造本土产业链闭环.....12
1.化合物半导体行业以 IDM 模式为主.....12
2.欧美主导产业链，台湾厂商垄断代工.....13
3.代工比例提升，代工厂大举扩产.....15
4.国内 PA 产业链闭环，代工不可或缺.....16
5.三安光电：全面布局化合半导体.....17
四、Cree 引领 SiC 产业，全球供需即将失衡.....19
1.全产业布局占优,国内追赶海外巨头.....19
2.需求增长，全球供需即将失衡.....20
3.Cree: 宽禁带化合物半导体的引领者.....21
4.英飞凌：全球最大功率 IDM，布局 SiC/GaN.....22
5.华润微：国内首家量产 SiC 商用产线.....23
五、投资建议.....23
六、风险提示.....23

图表目录

图表 1：不同半导体材料比较.....4
图表 2：GaAs/GaN 材料应用.....4
图表 3：中国砷化镓器件市场规模预测（亿元）.....5
图表 4：GaAs 晶圆市场规模预测（按照应用）.....5
图表 5：5G 宏基站+小基站的架构演进.....5
图表 6：GaN HEMT 具有更小尺寸的优势.....5
图表 7：SiC 在高开关高频和高功率应用优势明显.....6
图表 8：汽车逆变器往高压方向发展.....6
图表 9：丰田碳化硅 PCU 与硅 PCU 体积对比.....7
图表 10：OBC 的硅基方案与 SiC 方案 BOM 的比较.....7
图表 11：车厂和零部件厂围绕碳化硅的布局进展.....7
图表 12：SiC 在 EV 上的四大应用领域.....8

图表 13：SiC 功率器件在车载领域应用时间表.....8
图表 14：光伏逆变器中碳化硅功率器件占比预测.....8
图表 15：碳化硅功率器件市场规模预测.....9
图表 16：化合物半导体行业复合增速比较.....9
图表 17：碳化硅功率器件产业链示意图.....9
图表 18：碳化硅晶体制作中的数字仿真.....10
图表 19：碳化硅单晶生长工艺.....10
图表 20：碳化硅加工过程.....11
图表 21：碳化硅的综合成本收益.....11
图表 22：SiC JBS 成本构成.....12
图表 23：国内碳化硅衬底价格及趋势.....12
图表 24：电动汽功率器件碳化硅方案与硅方案成本预测.....12
图表 25： 硅晶圆及砷化镓代工产业比较.....13
图表 26： GaAs 产业链示意图.....14
图表 27：GaAs 外延片竞争格局.....14
图表 28：GaAs 射频器件市场结构（2020E）.....14
图表 29：全球砷化镓代工市场竞争格局.....15
图表 30：稳懋产量、收入变化（2010-2019 年）.....15
图表 31：稳懋与客户客户关系梳理.....15
图表 32：砷化镓器件代工比例变化（2013-2019 年）.....16
图表 33：化合物半导体代工厂最新产能统计.....16
图表 34：国内主要手机 PA 厂商.....17
图表 35：三安光电化合物半导体布局时间表.....18
图表 36：三安集成制程介绍.....18
图表 37：三安集成各类产品的产能规模及变化情况.....19
图表 38：2018 年全球导电型碳化硅晶片市场占有率.....19
图表 39：SiC 产业链示意图.....20
图表 40：国内 SiC 各环节与国际领先水平比较.....20
图表 41：国际碳化硅晶片龙头企业提前锁定订单.....21
图表 42：Cree 在碳化硅上的布局时间线.....21
图表 43：Cree 与国内一线衬底厂商产品比较.....21
图表 44：2019 年全球分立功率器件和模组企业市占率.....22
图表 45：英飞凌 CoolSiC MOSFET 650V 系列.....22
图表 46：英飞凌提供完整的 GaN 解决方案.....22

一、下游应用驱动，GaAs、GaN 和 SiC 各领风骚

1.化合物半导体具有物理特性优势

化合物半导体物理特性具有独特优势。半导体材料领域共经历三个发展阶段：第一阶段是以硅、锗为代表的 IV 族半导体；第二阶段是以 GaAs 和 InP 为代表的 III-V 族化合物半导体，其中 GaAs 技术发展成熟，主要用于通讯领域；第三阶段主要是以 SiC、GaN 为代表的宽禁带半导体材料。硅材料技术成熟，成本低，但是物理性质限制了其在光电子、高频高功率器件和耐高温器件上的应用。相比硅材料，化合物半导体材料在电子迁移速率、临界击穿电场、导热能力等特性上具有独特优势。

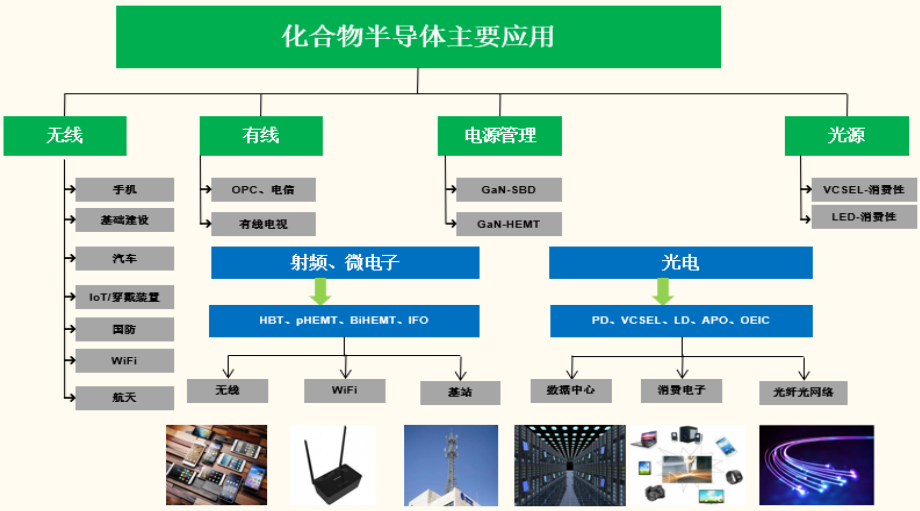
图表 1：不同半导体材料比较

	第一代半导体	第二代半导体		第三代半导体	
内容	硅	砷化镓	砷化铟	碳化硅	氮化镓
带隙（ev）	1.1	1.42	1.35	3.26	3.49
电子迁移率（$cm^2/V*S$）	1200	8500	5400	700	1000-2000
临界击穿电场（Mv/cm）	0.3	0.4	0.5	3.0	3.0
导热系数（W/cm*K）	1.5	0.5	0.7	4.5	1.5
相对介电常数（Er）	11.8	12.8	12.5	9.7	9.8
终端应用	计算、功率等	射频 RF		大功率	中功率/射频

来源：维基百科、国金证券研究所

硅材料主导，化合物半导体在射频、功率等领域需求快速增长。目前全球 95%以上的芯片和器件是以硅作为基底材料，由于硅材料极大的成本优势，未来在各类分立器件和集成电路领域硅仍将占据主导地位。但是化合物半导体材料独特的物理特性优势，赋予其在射频、光电子、功率器件等领域的独特性能优势。

图表 2：GaAs/GaN 材料应用



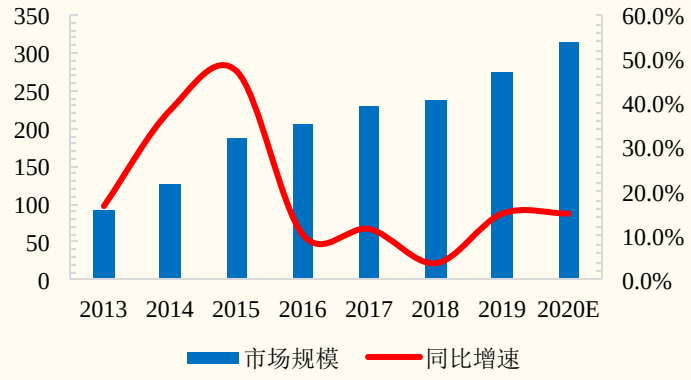
来源：SEMI、国金证券研究所

2.GaAs 主导 sub-6G 5G 手机射频

具体而言，GaAs 在 5G 手机射频和光电子领域占据主导地位。GaAs 是最为成熟的化合物半导体，具有较高的饱和电子速率及电子迁移率，使得其适合应用于高频场景，在高频操作时具有较低的噪声；同时因为 GaAs 有比 Si 更高的击穿电压，所以砷化镓更适合应用在高功率场合。因为这些特性，砷化镓在 sub-6G 的 5G 时代，仍然将是功率放大器及射频开关等手机射频器件的主要材料。根据 Qorvo 报告，5G 手机中射频开关从 4G 手机的 10 个增加至 30 个、

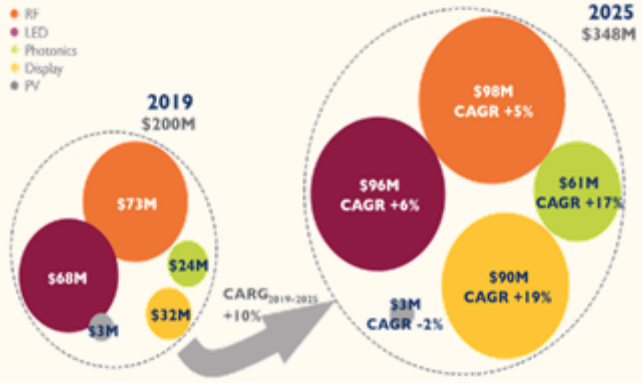
功率放大器平均单机价值从 4G 手机的 3.25 美元增加至 7.5 美元，这些都带动砷化镓器件市场规模的增长。GaAs 的另一个优点是直接能隙材料，所以可以制作 VCSEL 激光器等光电子器件，在数据中心光模块、手机前置 VCSEL 3D 感应、后置 LiDAR 激光雷达等应用带动下，光电子器件是砷化镓器件增长的另外一个重要驱动因素。

图表 3：中国砷化镓器件市场规模预测（亿元）



来源：前瞻产业研究院、国金证券研究所

图表 4：GaAs 晶圆市场规模预测（按照应用）

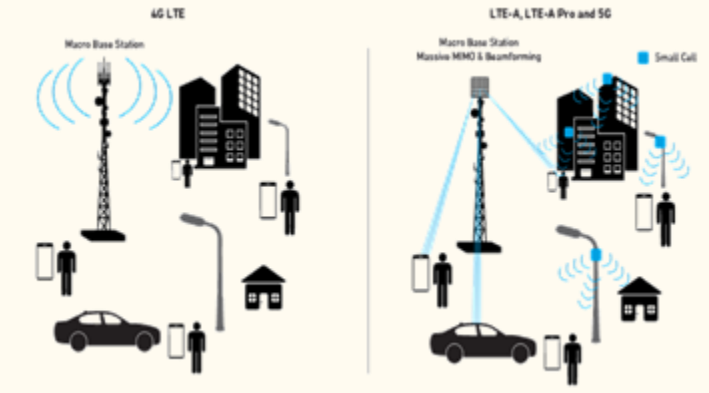


来源：Yole、国金证券研究所

3.GaN 在 5G 宏基站射频 PA 的大发展

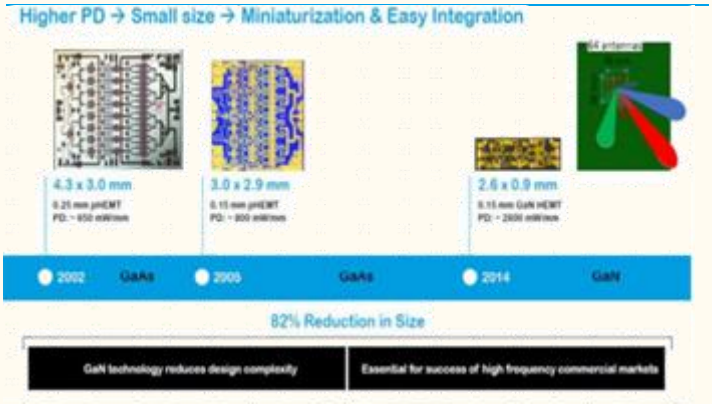
相较于 Si 和 GaAs 的前两代半导体材料，GaN 和 SiC 同属于宽禁带半导体材料，具有击穿电场强度高、饱和电子漂移速度高、热导率大、介电常数小等特点，具有低损耗和高开关频率的特点，适合于制作高频、大功率和小体积高密度集成的电子器件。GaN 的市场应用偏向微波器件领域、高频小电力领域（小于 1000V）和激光器领域。相比硅 LDMOS（横向双扩散金属氧化物半导体技术）和 GaAs 解决方案，GaN 器件能够提供更高的功率和带宽，并且 GaN 芯片每年在功率密度和封装方面都会取得飞跃，能比较好的适用于大规模 MIMO 技术，GaN HEMT（高电子迁移率场效晶体管）已经成为 5G 宏基站功率放大器的重要技术。目前在宏基站上 GaN 主要采用使用 SiC 衬底（GaN on SiC），由于 SiC 作为衬底材料和 GaN 的晶格失配率和热失配率较小，同时热导率高，更容易生长高质量的 GaN 外延层，能满足宏基站高功率的应用。

图表 5：5G 宏基站+小基站的架构演进



来源：Qorvo、国金证券研究所

图表 6：GaN HEMT 具有更小尺寸的优势



来源：Qorvo、国金证券研究所

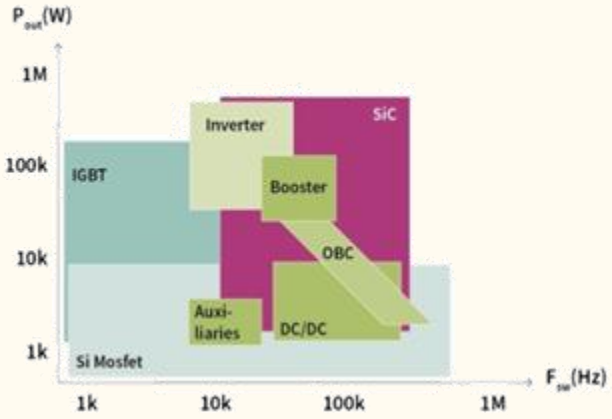
除了运用在基站，消费电子快充市场是 GaN 另外一个快速增长的领域。相较于硅基功率器件，GaN 能大大缩小手机充电器体积。消费电子级快充主要采用硅基衬底（SiC on Si）。虽然在硅衬底上难生长高质量 GaN 外延层，但是成本远低于 SiC 衬底，同时能满足手机充电等较小的功率需求。随着安卓厂商和第三方配套厂商陆续推出相关产品，GaN 快充有望在消费电子领域快速普及。

在光电子领域，凭借宽禁带、激发蓝光的独特性质，GaN 在高亮度 LED、激光器等应用领域具有明显的竞争优势。

4.SiC 有望颠覆汽车功率半导体未来

与 GaN 同属于宽禁带材料的 SiC 同样具有饱和电子漂移速度高、击穿电场强度高、热导率大、介电常数小、抗辐射能力强等特点，并且与 GaN 相比，SiC 热导率是 GaN 的三倍，并且能达到比 GaN 更高的崩溃电压，因此在高温和高压领域应用更具优势，**适用于 600V 甚至 1200V 以上的高温大电力领域，如新能源汽车、汽车快充充电桩、光伏和电网。**

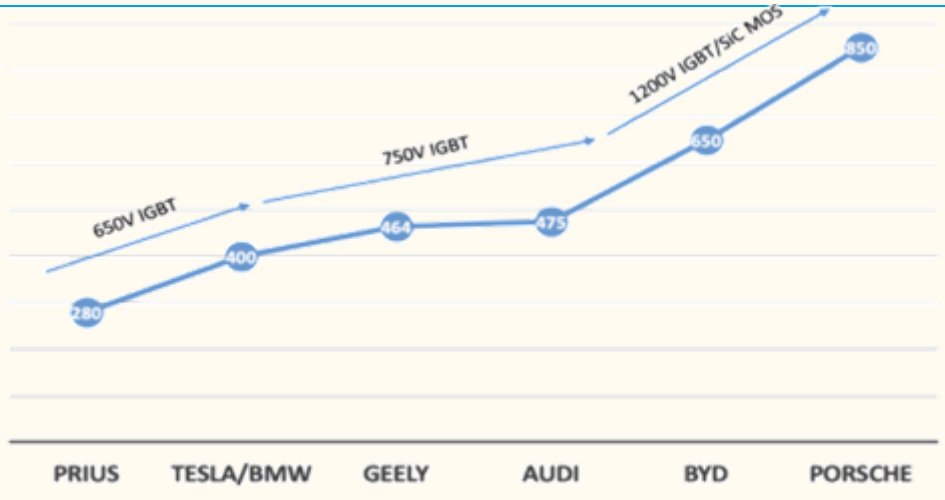
图表 7：SiC 在高开关高频和高功率应用优势明显



来源：Infineon、国金证券研究所

电动车高压化趋势明显。在乘用电动车领域，目前车辆电压普遍 300-400V 左右。随着技术的发展，车企们追求更强动力性能和快充性能的意愿更为迫切，比亚迪唐的额定电压超过 600V，保时捷 Taycan 电压平台为 800V。超级快充和功率提升促使电动汽车不断迈向高压化。

图表 8：汽车逆变器往高压方向发展



来源：搜狐汽车研究室、国金证券研究所

电动车碳化硅方案带来四大优势。目前电动车（不包括 48V MHEV）系统架构中涉及到功率器件的组件包括：电机驱动系统中的主逆变器、车载充电系统（OBC，On-board charger）、电源转换系统（车载 DC-DC）和非车载充电桩。电动汽车采用碳化硅解决方案可以带来四大大优势：1.可以提高开关频率降低能耗。采用全碳化硅方案逆变器开关损耗下降 80%，整车能耗降低 5%-10%；2.可以缩小动力系统整体模块尺寸，以丰田开发的碳化硅 PCU 为例，其体积仅为传统硅 PCU 的五分之一 3.在相同续航情况下，使用更小电池，减少

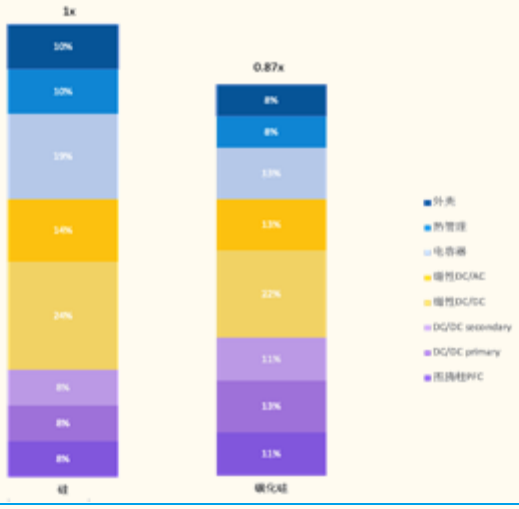
无源器件使用，降低整体物料成本。以电动汽车的 6.6kW 双向 OBC 为例，典型 AC/DC 部分包括四个 650V IGBT、几个二极管和一个 700-μH 电感，占材料清单成本的 70%以上。通过使用四个 650V SiC MOSFET 实现，只需要 230 μH 的电感。这比基于 IGBT 的设计降低了将近 13%的材料清单成本。4.缩短电池充电时间，由于更高的充电功率和更小的电池，可以大幅缩短电动车充电时间。

图表 9：丰田碳化硅 PCU 与硅 PCU 体积对比



来源：丰田、国金证券研究所

图表 10：OBC 的硅基方案与 SiC 方案 BOM 的比较



来源：wolfspeed、国金证券研究所

电动汽车的逆变器、OBC、大功率充电桩对碳化硅需求将大幅度增长。逆变器从整车控制器（VCU）获取扭矩、转速指令，从电池包获取高压直流电，将其转换成可控制幅值和频率的正弦波交流电，才能驱动电机使车辆行驶。电动汽车中，逆变器和电机取代了传统发动机的角色，因此逆变器的设计和效率至关重要，其好坏直接影响着电机的功率输出表现和电动车的续航能力。由于碳化硅的优异特性，围绕 SiC MOSFET 进一步提高车用逆变器功率密度，降低电机驱动系统重量及成本，成为各车企的布局重点。

图表 11：车厂和零部件厂围绕碳化硅的布局进展

时间	企业	事件
2014 年	丰田&电装	正式发布了基于 SiC 半导体器件的零部件——应用于新能源汽车的功率控制单元(PCU)
2014 年	三菱电机	三菱电机开发的新型 EV 用马达里的逆变器，其晶体管和二极管全部使用碳化硅
2017 年	联合电子	联合电子于 2017 年研究完成首个 SIC 逆变器样品
2018 年	特斯拉	特斯拉 Model3 成为全球首个将 SiC MOSFET 器件应用于主驱动逆变器的车型
2019 年	德尔福	德尔福于法兰克福车展推出 800V 碳化硅逆变器
2019 年	采埃孚	采埃孚首次采用 SiC 技术的电驱动系统已经用于法国 Venturi 的电动赛车
2020 年	意法半导体	推出从 SIC 功率器件到逆变器系统的完整解决方案
2020 年	阳光电源	自主研发的车用全 SiC 电机控制器成功装车试运行
2020 年	北汽新能源	搭载第三代半导体 SiC 电机控制器的北汽新能源实车完成夏季高温试验
2020 年	弗迪动力	弗迪动力的电驱动系统研发进行到第四代，国内首家量产 SiC 动力三合一产品
2021 年	蔚来	蔚来 ET7 搭载了全新第二代高效电驱平台，应用 SiC 功率模块

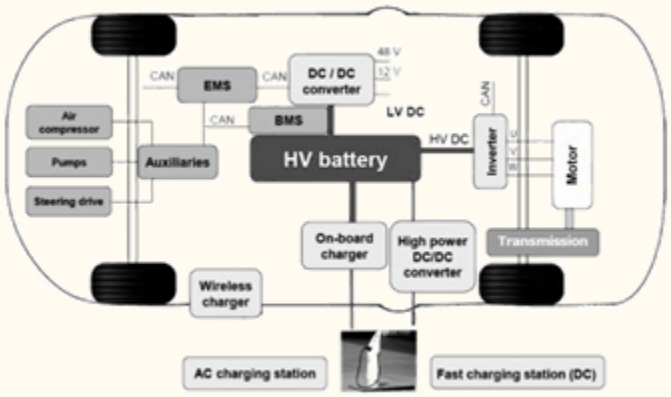
来源：搜狐汽车研究室、国金证券研究所整理

2018 年特斯拉已在 Model 3 的主驱逆变器中使用 SiC MOSFET，每个电机中采用 24 个 SiC MOS 单管模块，拆开封装每颗有 2 个 SiC 裸晶，耐压为 650V，供应商为意法半导体。2020 年比亚迪推出的汉 EV 高性能四驱版本是国内首款在主逆变器中应用自主开发 SiC 模块的电动汽车，与当前的 1200V 硅基 IGBT 模块相较，采用 SiC 方案 NEDC 工况下电控效率提升 3%-8%。预计到 2023 年，比亚迪将在旗下的电动车中，实现 SiC 车用功率半导体对硅基

IGBT 的全面替代。2021 年蔚来最新发布的首款纯电轿车也将搭载采用碳化硅模块的第二代电驱平台。

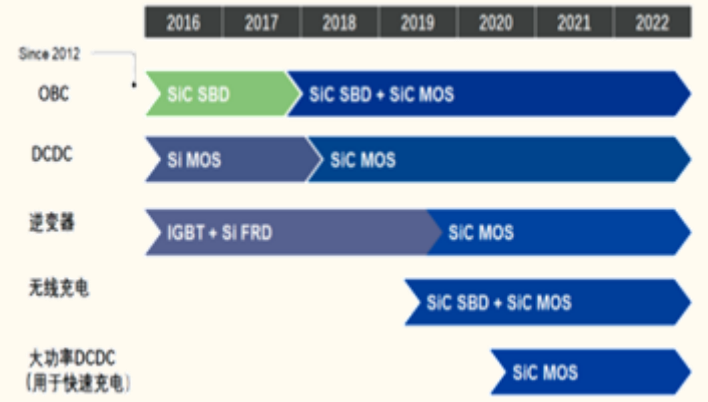
除逆变器之外，碳化硅在 OBC 中已经得到较为广泛的运用，目前有超过 20 家汽车厂商在 OBC 中使用 SiC 器件，随着车载充电机功率的提高，碳化硅方案也从二极管向“二极管+SIC MOS”演进； DCDC 转换器上从 2018 年开始从硅基 MOS 转向 SiC MOS 方案 。对于充电桩，采用碳化硅模块，充电模块功率可以达到 60KW 以上，而采用 MOSFET/IGBT 单管的设计还是在 15-30kW 水平。采用碳化硅功率器件相比硅基功率器件可以大幅降低模块数量。因此，对于城市大功率充电站、充电桩，碳化硅带来的小体积在特定场景中具有优势。

图表 12：SiC 在 EV 上的四大应用领域



来源：ROHM、国金证券研究所

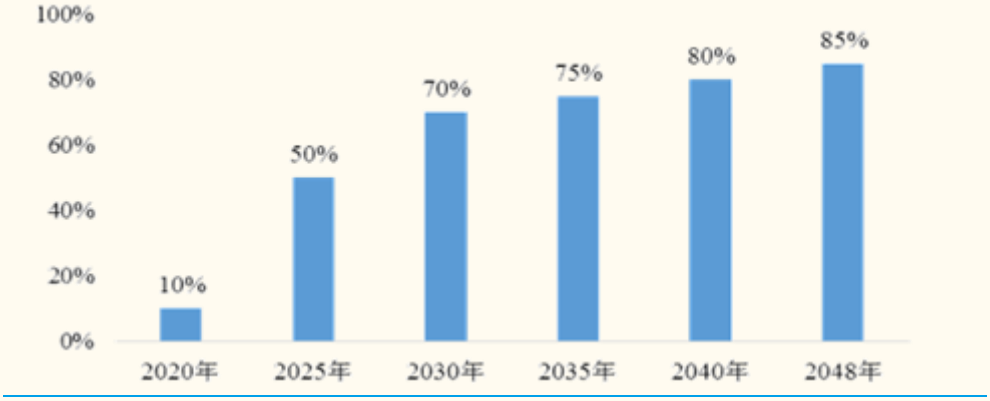
图表 13：SiC 功率器件在车载领域应用时间表



来源：ROHM、国金证券研究所

除了电动汽车，光伏逆变器是碳化硅另一个快速增长的应用领域。用 SiC MOSFET 或 SiC MOSFET 与 SiC SBD 结合的功率模块的光伏逆变器，峰值能源转换效率可从 96%提升至 99%以上，逆变器能量损耗降低 50%以上，设备循环寿命提升 50 倍，从而能够缩小系统体积、延长器件使用寿命。高效、高功率密度、高可靠和低成本是光伏逆变器的未来发展趋势。随着太阳能逆变器成本的优化，在组串式和集中式光伏逆变器中，越来越多的厂商将会使用 SiC MOSFET 作为主逆变器件，来替换原来的三电平逆变器控制的复杂电路。

图表 14：光伏逆变器中碳化硅功率器件占比预测



来源：CASA、国金证券研究所

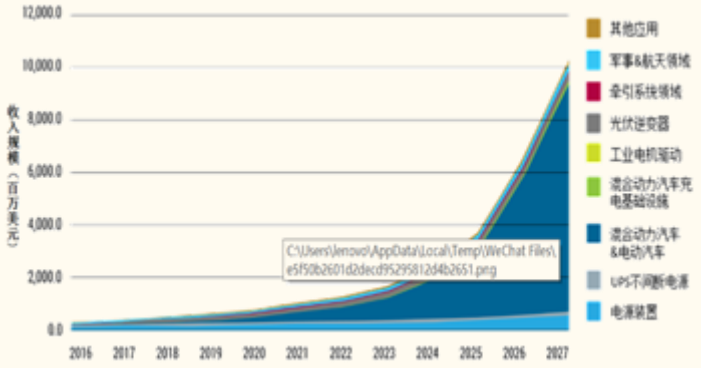
二、产业化正循环，“奇点时刻”加速到来

1.发展阶段、核心驱动因素及受益环节分析

我们认为 SiC、GaN 和 GaAs 处于不同发展阶段。对于 SiC 行业而言，目前整体市场规模较小，2020 年全球市场规模约 6 亿美元。但是下游需求确定且

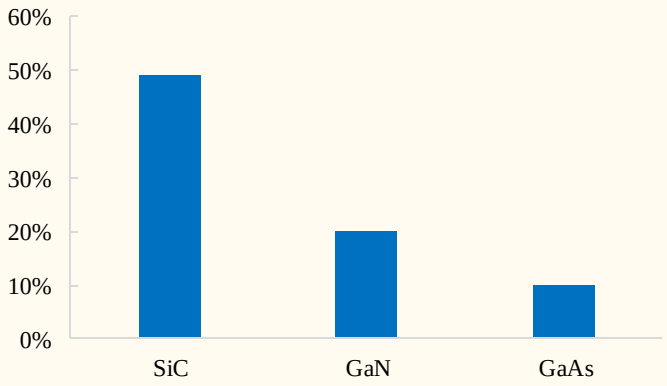
巨大，根据 IHSMarkit 数据，受新能源汽车庞大需求的驱动以及电力设备等领域的带动，预计到 2027 年碳化硅功率器件的市场规模将超过 100 亿美元,2020-2027 年复合增速比较。目前制约行业发展的主要成本高昂和性能可靠性。我们认为 SiC 行业一旦到达综合器件成本趋近于硅基功率器件的“奇点时刻”，行业将迎来爆发性增长。对于 GaN,根据 Grand view research 的测算及预测，2027 年全球 GaN 器件市场规模预计达到 58.5 亿美元，从 2020-2027 年复合增速有望达到 19.8%，增速也较快。而 GaAs 行业发展较为成熟，预计 2020-2025 年全球复合增速约 10%-15%。

图表 15：碳化硅功率器件市场规模预测



来源：IHS Markit、国金证券研究所

图表 16：化合物半导体行业复合增速比较



来源：IHS Markit、Grand view 、前瞻产业研究院、国金证券研究所

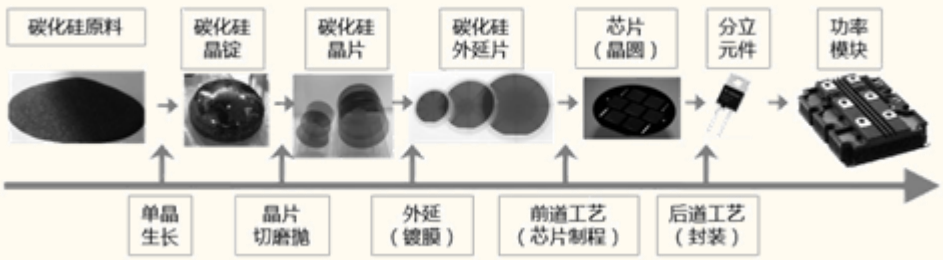
我们认为未来五年驱动 SiC、GaN 和 GaAs 行业的核心驱动因素和核心受益环节不同。对于碳化硅行业，由于成本是制约下游采用的最重要因素，因此驱动 SiC 行业发展的最核心因素是成本的下降速度。而 GaAs 衬底和外延片制备技术相对成熟，成本趋于稳定，而需求增长点主要来源于 5G 手机射频和小基站。因此驱动 GaAs 行业最核心因素是 5G 技术的更新及基站建设周期。对于 GaN,一方面 GaN 外延片目前成本高昂，另一方面需求主要来源于宏基站。由于宏基站对功率器件成本相对敏感度低，因此短期驱动 GaN 行业的核心因素是 5G 的建设周期，长期来看 GaN 如果要运用于毫米波手机射频及中低压功率器件，成本相比现在也需要有很大幅度下降。

核心受益环节方面，由于目前碳化硅芯片成本结构中 60%-70%是衬底和外延片，其中衬底约占 40%-50%，因此材料厂商是核心受益环节；而砷化镓的衬底和外延技术稳定且成本占比相对较低，但是发展模式上越来越多砷化镓射频供应商提高使用代工的比例，因此射频 IDM 厂商和砷化镓代工厂都是核心受益环节。对于氮化镓，由于制造主要以 IDM 为主，因此核心受益环节是外延片供应商如 Sumitomo 及 IDM 厂商如 Qorvo。

2.SiC 成本高昂之源及可靠性问题

高纯度碳粉和硅粉提纯不易、晶体生长缓慢、晶体切割速度慢且良品率低共同导致碳化硅成本短期内难以快速下降。碳化硅器件制作的主要工艺流程包括单晶生长、晶片加工、外延、前道加工及后道封装。

图表 17：碳化硅功率器件产业链示意图

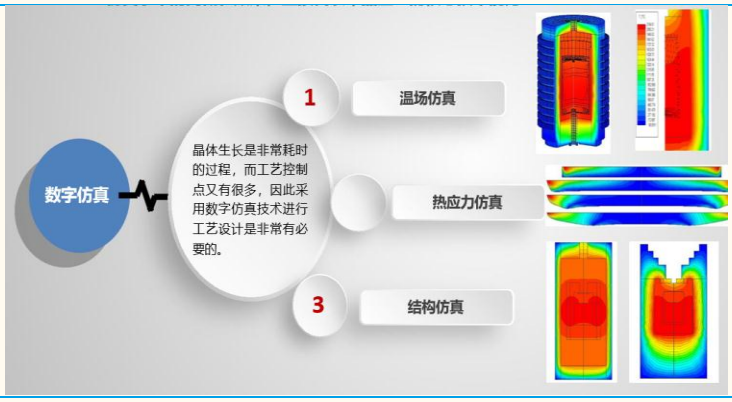


来源：中科院半导体研究所、国金证券研究所

碳化硅衬底制造的核心关键技术点包括电子级高纯粉料合成与提纯技术、数字仿真技术、单晶生长技术、单晶加工（切抛磨）技术。碳化硅衬底配方改进困难、晶体生长缓慢、成品良品率低。具体而言：

- 高纯碳粉是生长高质量 SiC 晶体的基础，尤其对半绝缘型 SiC 晶体生长有至关重要的影响，涉及到制备技术、合成技术和提纯技术。其中高纯度碳粉提纯对工艺要求极高，而合成涉及到的配方技术需要长时间的摸索和积累。
- 数字仿真技术：单晶生长温度在 2350-2500 度，由于炉内温度不可测量，通过高精度数字仿真技术可以节约大量的研发时间和成本，仿真水平的高低也直接代表单晶企业的核心技术能力

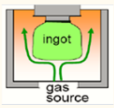
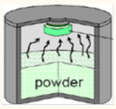
图表 18：碳化硅晶体制作中的数字仿真



来源：国金证券研究所整理

- **单晶生长技术：单晶生长缓慢是碳化硅衬底成本高居不下的重要原因。**目前 Cree 和国内主流厂家都采用 PVT 物理气相传输法。由于碳化硅晶体生长速度远慢于硅晶体，8 寸硅晶圆 2-3 天可以生长至 1-2 米，而碳化硅 4 寸晶圆一周只能生长 2-6cm。影响晶体生长的一个重要因素是仔晶繁殖，仔晶是和碳化硅单晶晶体具有相同晶体结构的“种子” 晶片，是晶体生长之源，晶体生长附着凝结于仔晶之上。仔晶生长是碳化硅制备的核心技术，也是评判所有碳化硅衬底企业的核心技术之一。仔晶一般不对外销售。

图表 19：碳化硅单晶生长工艺

工艺路线	物理气相传输法（PVT）	高温化学气相沉积法（HTCVD）	液相外延法（LPE）
示意图			
工艺简介	在高温区将材料升华，然后输送到冷凝区使其成为饱和蒸气，经过冷凝成核而长成晶体	利用含有薄膜元素的一种或几种气相化合物或单质、在衬底表面上进行化学反应生成薄膜的方法	液相外延是在固体衬底表面从过冷饱和溶液中析出固相物质生长半导体单晶薄膜的方法。
优缺点	**优点**：晶体生长成本低，目前商用最广泛的工艺 **缺点**：SiC晶体内杂质浓度的控制问题，缺少一体化生产设备	**优点**：晶体纯度较高，可实现近匀速晶体生长 **缺点**：气相物质同坩埚反应造成气相成分波动，影响生长晶体的质量，晶体生长成本较高	**优点**：生长速度相对可控，实现无微管缺陷晶体生长 **缺点**：助溶剂对晶体有严重污染，晶体生长成本较高
工艺温度	2100-2450℃	约2200℃	1400-1800℃
主要厂商	Cree、II-VI、Dow Corning、Sicrystal、天科合达	Norstel、日本电装	住友金属

来源：国金证券研究所整理

- 单晶加工技术：由于碳化硅硬度非常高且脆性高，使得打磨、切割、抛光都耗时长且良品率低。硅片切割只用几小时，而 6 寸碳化硅片切割要上百小时。

图表 20：碳化硅加工过程



来源：国金证券研究所整理

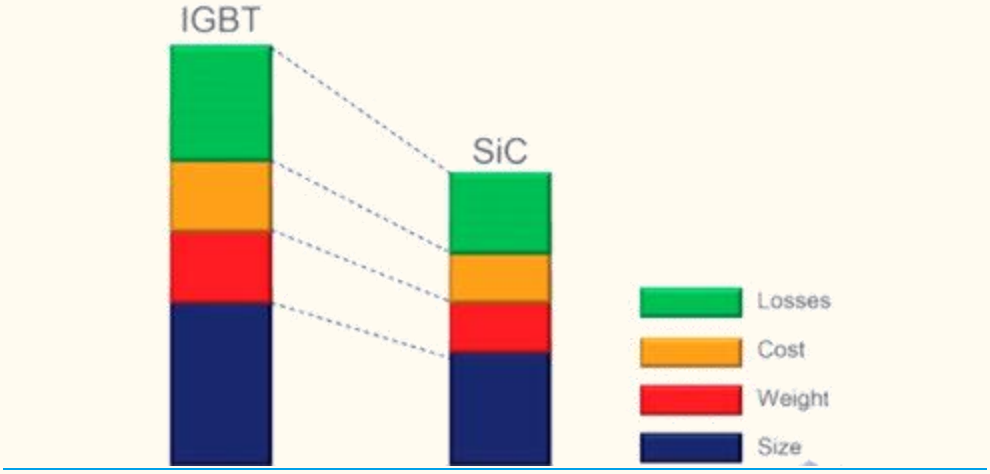
由于碳化硅功率器件主要用于汽车行业，因此对可靠性要求极高。硅功率器件在长时间的质量测试过程中被证实可靠，但是碳化硅则无法假设这一点。SiC 器件主要存在两个可靠性问题——栅极氧化物稳定性和阈值电压稳定性。

- 栅极氧化物稳定性：与功率 MOSFET 类似，SiC 器件也是垂直器件，使用与 MOSFET 相同的栅极氧化物材料（二氧化硅），但是 SiC 器件在更高的内部电场工作，因此栅极氧化物在实际工作中寿命可能缩短。目前 SiC 中的栅极氧化问题已经被理解，TDDB(时变电介质击穿)是时效机制，目前已经已经得到很大解决。
- 阈值电压稳定性：MOSFET 的阈值电压会随着偏置而变化，是由偏置温度不稳定（BTI）的时效机制所引起。BTI 是晶体管的退化现象。

3.预计 SiC“奇点时刻”五年之内到来

系统的角度看碳化硅具有综合成本优势。从前面分析中，碳化硅方案相比硅方案可以提高能效提升续航、减少电池容量缩减成本、降低无源器件及冷却系统体积从而缩减整体模块体积、缩减尺寸。因此从车辆总成本的角度看，碳化硅方案可以给汽车制造商带来成本收益。

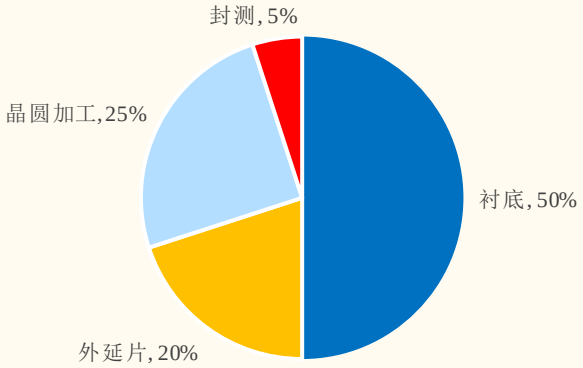
图表 21：碳化硅的综合成本收益



来源：意法半导体、国金证券研究所

随着 SiC 成本下降，碳化硅在电动车上的应用将爆发性增长。从物料成本角度看，目前新能源电动车采用硅基方案的全车功率器件价值约 400 美元左右，我们预计目前在新能源车全碳化硅方案成本约为 1500-2000 美元，是硅基方案成本的 4-5 倍。目前碳化硅方案成本高昂的重要原因是衬底材料成本高昂。我们以 SiC JBS（碳化硅结势垒肖特基二极管）为例，成本结构中，衬底约占 50%、外延片约占 20%、晶圆加工约占 25%、封测约占 5%。

图表 22：SiC JBS 成本构成



来源：基本半导体、国金证券研究所

目前市场 4 英寸碳化硅衬底比较成熟，良率较高，同时价格较低，而 6 英寸衬底价格由于供给少和成片良率低，价格远远高于 4 寸片。未来推动碳化硅衬底成本降低的三大驱动力：1.工艺和设备改进以加快长晶速度 2.缺陷控制改进提升良率 3.设计改进降低使用器件的衬底使用面积。随着产业成熟，预计衬底价格未来五年以每年 10%-15%左右的幅度下降。因此我们预计分立器件成本每年能以 10%左右价格下降。

图表 23：国内碳化硅衬底价格及趋势

	成片率		当前市场价（元）	市场价格走势
	当前	趋势		
4 英寸	70%	复合每年提高 2%	2800-3000	每年 10%-15%左右递降
6 英寸	30%-50%	复合每年提高 5%左右	8000-10000	每年 10%-15%左右递减

来源：国金证券研究所整理

假设未来五年碳化硅模块价格每年下降 10%，IGBT 价格每年下降 5%，电池成本每年下降 10%，中性预计全碳化硅方案相比硅方案能降低能耗 8%，仅考虑相同续航下节省的电池成本，而忽略节省的散热系统成本缩减、无源器件成本缩减以及更好能效节省的使用成本，从 2025 年开始全碳化硅方案相比硅方案就具有综合物料成本优势，开始爆发式增长。在实现综合成本优势之前，碳化硅从售价相对高昂的车型开始被逐步采用，这部分需求也足够拉动行业快速增长。

图表 24：电动汽功率器件碳化硅方案与硅方案成本预测

单位：美元	2020	2021	2022	2023	2024	2025
硅方案	**400**	**380**	**361**	**343**	**326**	**310**
电池成本	9000	8100	9001	8100	8100	8100
节省电池成本	720	648	720.08	648	648	648
全碳化硅方案	1500	1350	1215	1094	984	886
碳化硅成本-节省电池成本	**780**	**702**	**495**	**446**	**336**	**238**

来源：国金证券研究所

三、GaAs 代工比例提高，打造本土产业链闭环

化合物半导体行业因为整体规模较小，非标准化程度高，仍然以代工模式为主，但是我们观察到，在 GaAs 产业中，随着产业逐渐走向成熟以及市场规模增大，代工模式占比在逐渐提高。而在 SiC 产业中，越来越多企业逐步布局全产业链。

1.化合物半导体行业以 IDM 模式为主

跟硅半导体类似，化合物半导体行业商业模式主要分为 IDM(集成器件制造)、Foundry(晶圆代工)+Fabless(无工厂)。化合物半导体产业链分工模式跟跟上文的 SiC 分工模式相同，主要分为单晶生长、晶片加工、外延、前道加工及后道封装。我们从下游应用、生产模式、制程研发、财务及营销等方面比较硅晶圆代工和以砷化镓为代表的化合物半导体晶圆代工的发展模式：

在下游应用方面，材料特性及晶圆结构的不同导致了制造成本的区别以及使用场景的区别。硅晶圆材料生产成本低，普遍用在信息、消费及通讯市场；而砷化镓材料耐高温及高频性能佳，但材料成本贵，目前主要用在无线及光电市场。在生产模式方面，硅晶圆代工行业在设计阶段即提供设计服务，IP 专业化及自动化设计工具发展成熟，设计分工及设计自动化工具发展都很成熟，代工厂可以快速响应客户的需求；而砷化镓代工因为外延片需要根据客户不同定制，同时生产良率低及生产制程没有标准化而使得生产成本较高。目前砷化镓代工产业主要竞争对手是国际 IDM 厂商，他们通过合作及共同开发的策略持续使用彼此的产品，使得 IC 设计公司不易取得市场份额；而在硅晶圆代工行业，竞争对手主要是世界上几家大型代工厂。

在制程研发方面，制程微缩效应在砷化镓器件上体现得不明显。目前 GaAs 器件以 0.13μm、0.18μm 以上制程工艺为主，Qorvo 正在进行 90nm 工艺研发；受衬底尺寸限制，目前的生产线以 4 英寸和 6 英寸晶圆为主，部分企业也开始导入 8 英寸产线，但还没有形成主流。由于砷化镓是以 Emitter-Base-Collector 垂直结构为主，晶体管数量只在百颗数量级；而硅晶圆是 Source Gate Drain 的平面设计，晶体管数量达到数千万数量级，所以砷化镓在制程研发上并没有像硅晶圆代工行业那样明显的优势。财务及营销方面，硅基晶圆厂的巨额投资额已经形成了资本竞争障碍；相比硅晶圆的投资，砷化镓的固定资产投资相对较小。砷化镓市场主要以功率放大器为主，砷化镓代工行业过去不易因为新产品持续升级而产生客户忠诚，客户只要对不同代工厂进行认证通过，就较容易因为价格因素而更换代工厂。

图表 25：硅晶圆及砷化镓代工产业比较

差异点	硅晶圆代工	砷化镓晶圆代工
材料及市场应用	材料整合性及生产成本低，普遍用在信息、消费及通讯市场	材料耐高温及高频性能佳，但材料成本贵，主要用在高频无线及光电市场
生产模式	设计阶段即提供设计服务，IP 专业分工及自动化设计工具发展成熟，可快速大量生产	外延片需定制而影响量产，生产良率低及生产制程没有标准化而使生产成本高
制程研发	不断在晶圆尺寸及制程微缩上研发，目的是提供更便宜及性能更佳的 IC	由于生产良率不高及结构不同，制程微缩并不能显著带来低成本的优势
财务及营销	以资本形成竞争壁垒，在景气循环中迫使 IDM 厂逐渐释放产能	投资建厂成本不高

来源：国金证券研究所整理

综上，化合物半导体行业之所以未出现像硅半导体行业中大规模的专业晶圆代工的根本原因是相比硅半导体，化合物半导体产业规模较小使得高度专业分工不能带来明显的成本优势；制程优势不明显，不用追求先进制程导致固定资产投资壁垒相对较低，所以无需通过多个客户提高产能利用率从而分担资本开支压力。

2.欧美主导产业链，台湾厂商垄断代工

砷化镓产业链上游材料端以欧美日为主。半绝缘型衬底主要由日本的住友、德国的 Freiberger、和美国的 AXT 垄断，三家公司合计约占全球 90%的市场份额。住友是全球半绝缘型砷化镓单晶片水平最高的公司，以 VB 法生产砷化镓为主，能够量产 4 寸和 6 寸单晶片；德国 Freiberger 主要以 VGF、LEC 法生产 2 到 6 英寸砷化镓衬底，产品全部用于微电子领域；美国 AXT 产品中一半用于

LED，一半用作微电子衬底。**国内供应商砷化镓衬底主要用于 LED 芯片，少数公司如云南锗业用于射频的砷化镓衬底逐渐放量。**

图表 26：GaAs 产业链示意图

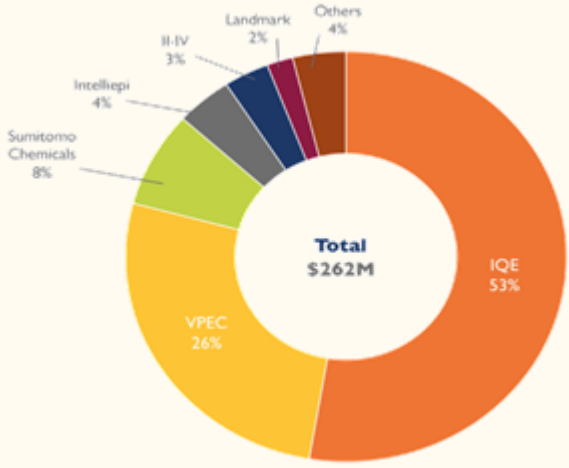
环节		供应链厂商		
砷化镓衬底		Freiberger、AXT 、住友		
砷化镓外延片		IQE、VPEC、SCIOCS、Sumika 、IntelliEPI		
砷化镓 IC 设计		Microsemi、Airoha、RDA	砷化镓 IDM 厂商	Skyworks、Qorvo、Broadcom 、Lumentum、Finisar
砷化镓晶圆代工		稳懋、环宇、宏捷、联颖		
砷化镓 IC 封装		菱生、同欣		
砷化镓 IC 测试		全智、京元电、日月光		
终端应用	手机	华为、Apple、Samsung、OPPP、Vivo、小米		
	基站	华为、爱立信、诺基亚西门子、 Cisco		

来源：稳懋、国金证券研究所

英国 IQE 占据外延片市场 53%的市场份额。具体而言，约 90%射频客户采购外部外延片，射频市场被 IQE 垄断，IQE 和 VPEC 合计占据射频外延片市场约 80%的份额。而光电子外延片，不同下游应用有所区别：应用于数据中心的光模块器件主要由 Finisar 和 Avago 这些垂直供应商提供，而应用于消费电子 VCSEL 等 3D 感应的外延片主要由外部供应商 IQE 提供。

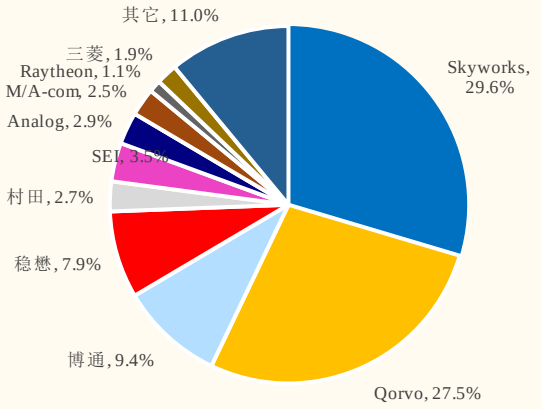
GaAs 射频器件市场主要由 IDM 厂商 Skyworks、Qorvo、博通和日本村田等垄断，其中 Skyworks、Qorvo 和博通市场份额合计约 70%。而这些大型 IDM 厂扩产趋于谨慎，会选择将毛利率较低的 4G 产品外包给砷化镓代工厂商使产能优先满足高毛利产品，在需求旺盛自身产能满载的时候也会外包部分 5G 订单。

图表 27：GaAs 外延片竞争格局



来源：Yole、国金证券研究所

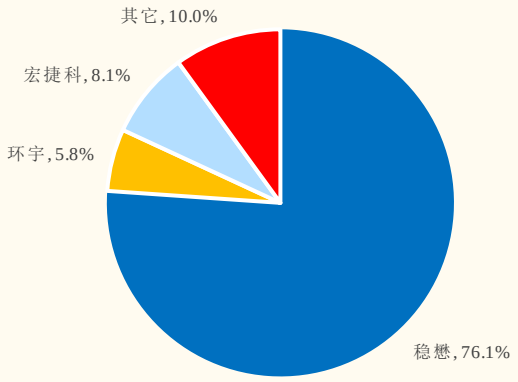
图表 28：GaAs 射频器件市场结构（2020E）



来源：: Strategy Analytics、国金证券研究所

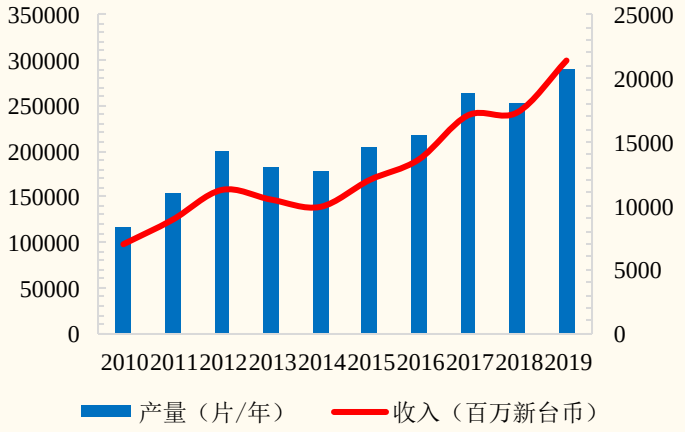
稳懋是砷化镓代工市场绝对龙头。砷化镓代工市场规模占全球砷化镓器件市场规模 10%左右，其中稳懋、环宇和宏捷科约占这其中 90%的市场份额，而稳懋占据其中超过 70%市场份额。截至 2020 年三季度，稳懋月产能达到 4.1 万片。砷化镓代工厂主要生产功率放大器，稳懋和环宇超过 90%营收来自于功率放大器。

图表 29：全球砷化镓代工市场竞争格局



来源：稳懋年报、国金证券研究所

图表 30：稳懋产量、收入变化（2010-2019 年）



来源：稳懋年报、国金证券研究所

绑定下游大客户，锁定客户需求是化合半导体主要策略。以稳懋为例，第一大客户博通在 2019 年营收贡献占比达到 30%-40%。2017 年 12 月，博通以 1.85 亿美元入股稳懋，深度绑定和稳懋的合作关系。博通在 5G 和光通讯有强大的布局，并且这种合作关系使得博通无需自己扩充产能，能专心作在它的强项产品设计。过去博通的 HBT 有一半自己做，一半由稳懋代工，未来有望也会把另外一半的订单逐步转移给稳懋，除博通外，Skyworks、Qorvo 和紫光展锐也是稳懋的重要客户。宏捷营收来源高度依赖 Skyworks，其营收中约 8 成左右来自于 Skyworks。环宇与三安成立了合作公司，而全球重要的 LED 外延片生产企业台湾晶电与环宇战略合作，并为环宇提供 6 寸晶圆代工服务。

图表 31：稳懋与客户客户关系梳理

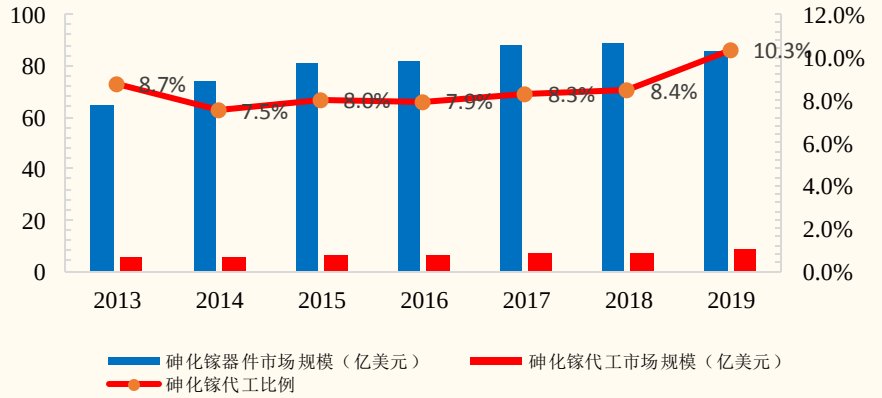
时间	合作伙伴	合作内容
2008 年	Skyworks	稳懋半导体已获得 Skyworks 公司认证
2009 年	ANADIGICS	为 ANADIGICS 提供砷化镓代工服务
2017 年	Avago	入股稳懋，与稳懋签订合作备忘录 Avago 退出生产 HBT 生产，将设备出售给稳懋， HBT 生产线产品将全数委由稳懋代工。
2017 年	Lumentum	稳懋是 Lumentum 的 VCSEL 的独家代工厂
2019 年	高通	高通 5G 射频元件订单已经独家委给稳懋
2020 年	SpaceX	稳懋为公司功率放大器（PA）供应商，目前已有供货 SpaceX，为 SpaceX 的重要供应商之一。

来源：国金证券研究所整理

3.代工比例提升，代工厂大举扩产

随着射频、光电子等应用带动砷化镓器件等下游需求快速增长，GaAs 代工比例逐步提升。过去几年砷化镓器件代工比例保持稳定。从 2013 年-2019 年，砷化镓器件代工比例逐渐小幅提升，从 2014 年的 7.5%提升至 2019 年的 10.3%。代工比例的波动取决于 IDM 厂的盈利情况带来的释放订单意愿的强弱和代工厂自身扩产的节奏。随着代工厂技术的成熟以及长期合作过程中打消技术泄密的疑虑，同时 IDM 厂了维持高产能利用率使得产能建设趋于保守，因此 IDM 厂有意愿释放出更多代工订单。除此之外，高通、联发科、海思等 Fabless 设计公司在射频领域崛起都新增加砷化镓代工需求。

图表 32：砷化镓器件代工比例变化（2013-2019 年）



来源：Strategy Analytics、国金证券研究所

针对快速增加的砷化镓代工需求，代工厂大举扩产应对。稳懋拟投资 200 亿元人民币在高雄建厂，计划分三年投资，新增总产能超过 10 万片/月，公司现有月产能约 4.1 万片，新增产能超过现有产等的两倍。预计 2021 年一季度宏捷科月产能达到 1.5 万片，2021 年底达到 2 万片月产能。三安集成 2020 年底产能在 3000 片-4000 片，预计 2021 年一季度扩产到 8000 片。

图表 33：化合物半导体代工厂最新产能统计

	稳懋	宏捷科	环宇	三安光电	海特高新
产能	砷化镓 4 万片/月	砷化镓 1.5 万片/月	-	砷化镓 3000-4000 片/月；氮化镓 2000 片/月	砷化镓 2000 片-3000 片/月；氮化镓 600 片/月
产能规划	高雄厂三年后达产预计增加两倍产能	预计 21 年底总产能达到 2 片/月	与晶成合作正式投产后，GaN RF 射频月产能可达 2000 片，环宇与晶成合作的 6 寸晶圆厂每月总产能最高可达 7000 片	砷化镓预计 21 年底到 12000 片/月，氮化镓规划产能 6000 片/月以上	威海华芯投资的一期研发线年产能 3 万片，二期年产能为 4 万片
销售收入	2019 年 49 亿元	2019 年 5.3 亿元	2019 年 4.2 亿元	2019 年 2.4 亿元收入	2019 年收入 8800 万元
毛利率	38%	32%	44%	-	25%

来源：国金证券研究所

4.国内 PA 产业链闭环，代工不可或缺

砷化镓主要用于手机 PA、Wifi PA 和小基站 PA。目前国产 PA 在 4G 领域已具备比较成熟的性能和量产能力，市占率达 10%-20%，在中功率 4G PA，国产产品与国外基本相差不大，而在高功率 4G PA，虽然整体性能还有部分差距，但是足够满足手机客户需求；在 5G 领域，针对华为海思的制裁或将延缓内 PA 领域的追赶。除海思外，唯捷创芯、昂瑞微、慧智微、紫光展锐等厂家有机会在 5G PA 上取得突破，预计在 2021 年会有部分出货。

图表 34：国内主要手机 PA 厂商

厂家名称	简介	工艺	应用场景	代表客户	备注
昂瑞微	前身为汉天下，小米基金入股	CMOS/GaAs/GaN	2G/3G/4G/5G	三星电子、传音、TCL、酷派、联想、爱国者等	HS82XX 系列射频 PA，累计出货量超过 20 亿颗
唯捷创芯	大股东：联发科 Gaintech	GaAs	4G/5G	小米、苹果、vivo 等	国内最大的射频 IC 设计公司，4G PA 出货量国内第一
紫光展锐	收购锐迪科+展讯，国家大基金注资	CMOS/GaAs	2G/3G/4G/5G	LG、传音、中兴等	传音手机中 90%以上采用紫光展锐芯片
飞骧科技	前身为国民技术	GaAs	2G/3G/4G/5G	华为、中兴、小米、索尼、诺基亚、传音等	拥有业内最完整的 4G 射频解决方案
慧智微	由国际大厂 Skyworks 与 Qorvo 的技术人员回国创业	SOI+GaAs	4G/5G	中国移动、中兴等	国内首款 5G NR 射频集成模组，世界首款可量产的可重构射频前端平台 AgiPAM

来源：国金证券研究所整理

Wi-Fi PA 是除手机 PA 外的第二大增长点。Wifi PA 也正在经历国产替代，主要差距体现在高功率产品上。具体而言，对于 WIFI 4 PA，国内中功率产品成本优势明显，整体性能上也已经不差于 Skyworks 和 Qorvo；对于 WIFI 5 PA，国内康希 5.8G 中功率 FEM 性能上最好；对于 WIFI 6 FEM（射频前端模块），国产 WIFI6 中功率已经面世，2018 年 Skyworks 和 Qorvo 高功率的 WIFI6 FEM 面世，预估国内产品的差距至少是 3 年。

国产砷化镓代工必不可缺，国内厂商有望受益。虽然对于射频器件来说，设计和制造工艺紧密结合，使得射频 Fabless 设计公司更倾向与有丰富经验的台湾代工厂合作，但是在外部环境导致供应链不确定性加大的背景下，国内砷化镓代工厂也有望获得更多参与机会，这一过程中三安集成和威海华芯有望受益。

5.三安光电：全面布局化合半导体

2014 年三安光电成立全资子公司三安集成，是中国第一家 6 寸化合物半导体晶圆代工厂，开发砷化镓、氮化镓外延片和衬底，涵盖射频、电力电子、光通讯和滤波器板块。2020 年上半年三安集成实现销售收入 3.75 亿元。砷化镓射频出货客户累计将近 100 家、氮化镓射频产品重要客户产能正逐步爬坡；电力电子产品客户累计超过 60 家，27 种产品已进入批量量产阶段；光通讯业务除扩大现有中低速 PD/MPD 产品的市场领先份额外，高端产品 10G APD/25G PD、VCSEL 和 DFB 发射端产品均已在行业重要客户处验证通过，进入批量试产阶段。公司在长沙设立子公司湖南三安从事碳化硅等第三代半导体的研发及产业化项目，项目正处于建设阶段。

图表 35：三安光电化合物半导体布局时间表



来源：公司公告、国金证券研究所

射频是三安集成短期内收入的主要来源。公司射频业务产品应用于 2G-5G 手机射频功放 WiFi、物联网、路由器、通信基站射频信号功放等市场应用；其中手机用射频器件以 GaAs 为主，基站用射频器件以 GaN 为主。三安射频工艺制程主要包括 HBT（异质结双极型晶体管）、pHEMT（伪型态高电子迁移率晶体管）、BiHEMT（异质结双极暨假晶高电子迁移率晶体管外延芯片）。目前用于无线基站功放的 GaN 射频工艺，已获得主流基站的性能认可。650V GaN 工艺开发已经取得突破，某国际化大客户下单，开始流片验证。

电力电子业务布局逐渐完善。公司电力电子业务主要在湖南全资子公司进行，公司从 SiC 衬底到外延到模组都有布局。三安光电长沙项目将包括长晶—衬底制作—外延生长—芯片制备—封装产业链。

图表 36：三安集成制程介绍

晶圆代工制程	制程系列	主要用途
HBT（砷化镓异质结双极型晶体管）	H20HL（高线性制程）	● 手机，无线宽带功率放大器 ● 手机，无线宽带功率放大器增益器 ● 通讯信号切换器 ● 通讯微波器件 ● 增益器 ● 通讯信号切换器 ● 通讯微波器件
	H20HR（高韧性制程）	
pHEMT（砷化镓伪型态高电子迁移率晶体管）	P25ED（增强/耗尽混合型）	
	P25PA（功率型）	
	P25SM（低启动阻抗型）	
GaN SBD（氮化镓肖特基二极管）	快速回复肖特基二极管	绿能节能器件： ● 消费电子产品的电源转换/反向器 ● 汽车/交通工具使用电源转换/反向器 ● 工业用大功率电源转换/反向器
GaN FET（氮化镓场效应晶体管）	耗尽型场效应三极管	
	增强型场效应三极管	

来源：公司官网、国金证券研究所

公司化合物半导体业务客户开拓取得积极拓展。在射频代工领域，国内主要客户包括海思、紫光展锐、昂瑞微等。在光通讯领域，PD 产品的客户包括瑞谷、铭普、储翰等；数通产品领域客户中际旭创、AOI、光迅、剑桥等，公司目前已处于送样评估阶段。在电力电子板块，公司已布局能源市场领域：在逆变器方面，三安集成与主要客户阳光电源确认了合作开发项目意向。在国家电网方面，已进入南瑞、许继电器供应链，并已小量试产；充电桩方面，产品已进入行业领先客户永联供应链的样品测试阶段；在交通领域，公司已正式启动汽车行业认证体系；在数据中心电源行业龙头的科华恒盛、长城电源都已成功送样并测试通过，目前正在小量样品导入阶段。

三安集成营收规模增长，公司亏损幅度收窄。三安集成目前虽仍处于亏损状态，但是随着收入规模上升公司亏损幅度收窄。由于前期产能利用率低，良品率低，三安集成 2017-2019 年分别亏损 9600 万元、1700 万元和 8200 万元，2020 年上半年亏损幅度收窄至 1100 万元。

图表 37：三安集成各类产品的产能规模及变化情况

板块	产品	产能规划	最新产能预计
射频板块	砷化镓射频芯片产品	21 年底到 12000 片/月	4000 片/月
	氮化镓射频芯片产品	6000 片/月以上	2000 片/月
电力电子板块		长沙 SiC 外延片规划月产能 3 万片	
光通讯板块	光通信芯片产品	5000 片	1000-2000 片/月

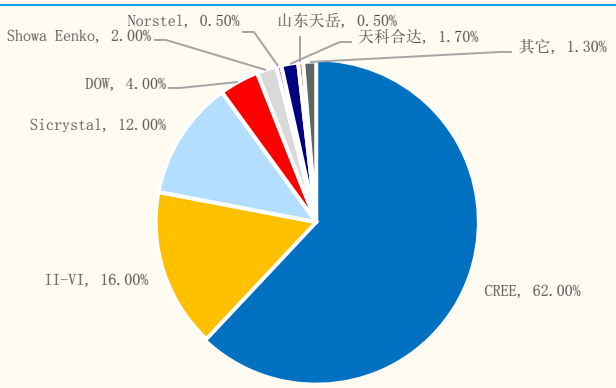
来源：公司公告，国金证券研究所

四、Cree 引领 SiC 产业，全球供需即将失衡

1.全产业布局占优,国内追赶海外巨头

成本结构导致 SiC 全产业链布局具有优势。以碳化硅为衬底的产业链主要分为衬底、外延和器件三个环节。由于衬底在器件中的高成本占比，使得掌握衬底工艺和产能的企业在竞争中具有优势。美国的 Cree 和日本的罗姆都是拥有从衬底、外延片到器件的碳化硅全产业链生产能力，所生产的碳化硅衬底除对外销售外，其余部分为自用。目前 Cree 在衬底方面产能和市占率领先所有竞争者，2019 年宣布建设 8 英寸衬底产线，2020 年全球市场份额约 50%。除了 Cree 和罗姆，在衬底方面处于领先地位的还有 II-VI，国内的有天科合达和东天岳，6 寸衬底开始规模化生产或者开始建设产线。

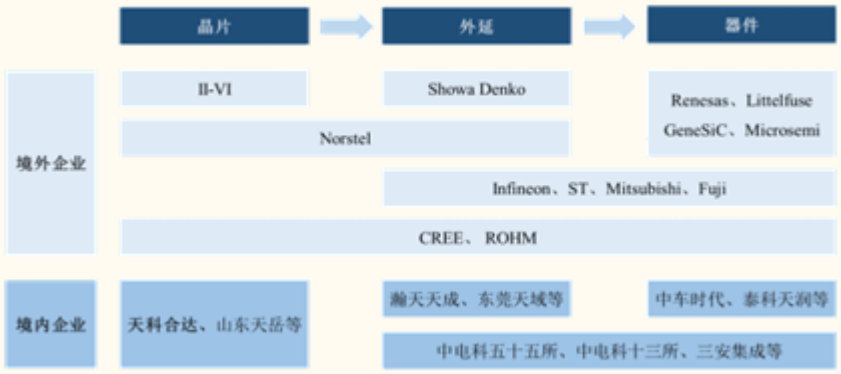
图表 38：2018 年全球导电型碳化硅晶片市场占有率



来源：Yole、国金证券研究所

外延片市场主要被 IDM 公司主导，如三菱、英飞凌和意法半导体。在国内纯粹做外延片的有瀚天天成和东莞天域，均可供应 4-6 英寸外延片，中电科 13 所、55 所亦均有内部供应的外延片生产部门。器件方面，意法半导体、安森美、英飞凌和罗姆都是重要供应商，华润微的国内首条 6 寸商用 SiC 产线已经正式量产，三安光电拟投资 160 亿元的碳化硅全产业链布局的湖南子公司也于 2020 年开工。由于碳化硅器件的成本结构导致全产业链的优势，我们看到器件公司逐步布局上游材料，如意法半导体在 2020 年 2 月份以 1.4 亿美元现金收购了瑞典 SiC 晶圆制造商 Norstel，Norstel 生产 6 英寸 SiC 衬底和外延晶圆。

图表 39：SiC 产业链示意图



来源：天科合达招股说明书、国金证券研究所

在碳化硅产业链各个环节，国内领先水平与国际领先水平仍有一定差距，但是工艺水平和发展状况的差距远小于相比硅半导体。

图表 40：国内 SiC 各环节与国际领先水平比较

工艺阶段	具体环节	国内	国际
材料	衬底	国内主流：4-6 英寸	国际主流：6-8 英寸
	外延	国内主流：实现 6 英寸规模制备	国际主流：6 英寸
	SiC 微管密度（4 寸导电型）	小于 1 个/cm^{-2}	小于 1 个/cm^{-2}
	生长速率(4 寸，cm/周)	2-4	4-6
外延设备	CVD、高温离子注入机等	北方华创等市占率较低	LPE、Aixtron 和 Nuflare 市占率 87%
功率器件	SiC SBD	电压：650-1200V 电流：2-40A	电压：650-1200V 电流：2-40A
	SiC MOSFET	电压：650-1200V 电流：20-100A	电压：650-1700V 电流：3.7-118A
	SiC IGBT	电压最高 3.3KV	电压最高 6.5kV，工作频率 2kHz 至 50kHz
应用		工业等场景，价格相对较低	在相对一些高端的领域，例如激光器、射频、功率电子等应用领域

来源：国金证券研究所整理

2.需求增长，全球供需即将失衡

特斯拉 Model 3 逆变器集成意法半导体的 SiC MOSFET 的功率模块，该主逆变器需要 24 个电源模块。另外假如 OBC、DCDC 转换器、快充电桩等都使用 SiC 的话，每台特斯拉约消耗 0.5 片 6 英寸碳化硅衬底。

2020 年特斯拉全年共交付新车 49.96 万辆，同比增长 35.87%。如果 2022 年特斯拉车型全部采用碳化硅，交付量达到 100 万辆的话，那么仅特斯拉一年就将消耗掉 50 万片晶圆产量。目前全球碳化硅衬底产能为 40-60 万片。因此电动车的快速发展或将造成碳化硅衬底短时间的失衡。

在此背景下，全球加大碳化硅衬底投资：2020 年 Cree 计划投资 10 亿美元用于碳化硅产能扩充，这次产能扩大在 2024 年全部完工后，将带来碳化硅晶圆制造产能的 30 倍增长和碳化硅材料生产的 30 倍增长，以满足 2024 年之前的预期市场增长。罗姆公司也宣布 2024 财年碳化硅生产能力相比 2019 财年提升 5 倍以上。

国际企业通过提前锁定衬底产能保证未来供应。如 Cree 与英飞凌、意法半导体等欧美主要碳化硅下游企业签订长期供货协议，公司四分之三的材料业务都签订了长期协议。

图表 41：国际碳化硅晶片龙头企业提前锁定订单

时间	详情
2018.02	CREE 宣布了一项价值 8,500 万美元的长期协议，将为一家未公布名称的“领先电力设备公司”供应碳化硅晶
2018.10	CREE 与英飞凌签订了 1 亿美元的长期供应协议，为其光伏逆变器、充电基础设施、工业源牵引和变速驱动等产品提供碳化硅晶片
2019.08	CREE 与安森美签订了 8500 万美元的 6 英寸碳化硅衬底和外延片供应协议，CREE 将为安森美生产和供应碳化硅衬底及外延片，安森美将用于新能源汽车和工业应用等高速增长的碳化硅功率器件市场
2019.11	CREE 与 意法半导体 签署一项为期多年的 5 亿美元的生产供应协议， CREE 将向 意法半导体 供应 6 英寸碳化硅晶片
2020.01	罗姆和意法半导体宣布达成超 1.2 亿美元的协议，由罗姆旗下的 SiCrystal 向意法半导体供应 6 英寸碳化硅晶片

来源：CASA、国金证券研究所

3.Cree：宽禁带化合物半导体的引领者

Cree 是碳化硅领域的绝对领先者。其在导电型碳化硅衬底的市场占有率约 60%，车载领域市占率超过 80%，公司在 SiC 基板领域研发超过 35 年，主要技术来源实际是北卡莱罗纳大学，1991 年即发布世界上第一个商业 SiC 晶片。

图表 42：Cree 在碳化硅上的布局时间线

时间	重要事件
1991 年	Cree 发布世界上第一个商业 SiC 晶片
1998 年	Cree 发布首款采用 SiC 的 GaN HEMT
1999 年	Cree 4 英寸碳化硅晶圆量产
2001 年	Cree 发布碳化硅二极管
2002 年	Cree 发布首款 600V 商用 SiC JBS 肖特基二极管
2004 年	Cree 收购了 AdvancedTechnology Materials（ATMI）获得 GaN 和外延业务
2011 年	Cree 发布业界首款 SiC MOSFET
2012 年	Cree 6 英寸碳化硅晶圆量产
2014 年	Cree 发布业界首款 1700V SiC half-bridge Module
2018 年	Cree 收购英飞凌射频功率业务
2019 年	Cree 投资 10 亿美元扩产 SiC，整合一座 8 寸晶圆厂和一座 SiC 材料厂
2019 年	Cree 8 英寸碳化硅晶圆制样，预计 2022 年量产

来源：CREE、国金证券研究所整理

国内衬底技术与 Cree 存在差距。目前国内长晶炉效率不到 Cree 的五分之一。Cree 在车载领域市占率超过 80%，而车规级 SiC MOSFET 单价达到 7~10 美元/颗，而工业级碳化硅二极管产品单价是几毛到几块钱不等。公司 2020 年旗下 Wolfspeed 实现营收约 4.7 亿美元左右， 公司预计 2025 年实现营收 15 亿美元，实现毛利率 50%。

图表 43：Cree 与国内一线衬底厂商产品比较

	CREE	国内一线
长晶速度（4 寸，cm/周）	4-6	2-4
技术阶段	6 寸规模化供应，8 寸成功研制并投建	6 寸实现规模化供应
主要产品	车规级、MOS	工业用，二极管
良率	70-80%	40-50%
技术发展时间	33 年（1987）	15 年
6 寸一周产出（片）	37.5	6.7

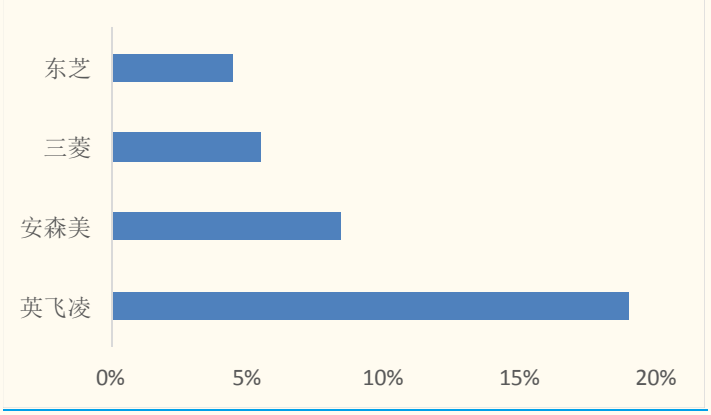
来源：Cree、天科合达招股说明书、国金证券研究所整理

而在 GaN 上，Cree 也积极布局。2018 年，Cree 以 3.45 亿欧元的对价收购英飞凌的射频部门，其中包括位于加利福尼亚州摩根希尔的 LDMOS 和 GaN 技术工厂。在宣布的 10 亿美元扩产中，GaN 的外延（on SiC）和器件制造也包含其中。Cree 在宽禁带半导体上的技术、应用、资产和市场上有三十多年积累，2019 年剥离照明部门之后专注于宽禁带化合物半导体，是我们在此领域建议关注的重点公司。

4.英飞凌：全球最大功率 IDM，布局 SiC/GaN

英飞凌是全球最大的功率器件供应商。碳化硅布局方面，2018 年公司收购初创公司 Siltectra，其研发了冷切割技术，可高效处理晶体材料，并最大限度减少材料损耗可用于切割碳化硅晶圆，使单片晶圆可产出的芯片数量翻倍，公司推出了 650V 和 1700V 的 CoolSiC MOSFET 系列，2020 年 12 月公司与 GT Advanced 签订碳化硅晶锭五年供货协议，进一步确保未来碳化硅材料供应需求。2020 财年英飞凌来自于碳化硅营收达到 8000 万欧元。

图表 44：2019 年全球分立功率器件和模组企业市占率



来源：英飞凌、国金证券研究所

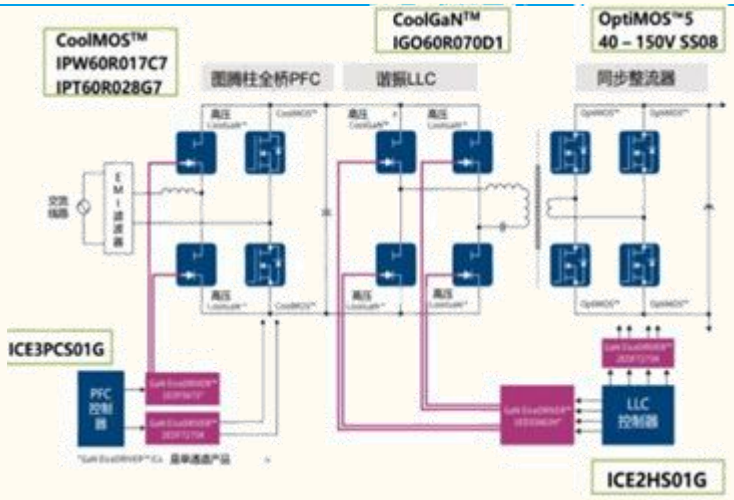
图表 45：英飞凌 CoolSiC MOSFET 650V 系列

产品系列				目标应用
$R_{DS(on)}$（最大值）[mΩ] 18 V	$R_{DS(on)}$（典型值）[mΩ] 18 V	TO-247-4	TO-247-3	
34	27	IMZA65R027M1H	IMW65R027M1H	
64	48	IMZA65R048M1H	IMW65R048M1H	
94	72	IMZA65R072M1H	IMW65R072M1H	
142	107	IMZA65R107M1H	IMW65R107M1H	

来源：英飞凌、国金证券研究所

英飞凌在氮化镓上提供丰富的解决方案。市场上 GaN 方案主要分成三种方式，分别是：分立式+外部驱动器；多片集成，开关和驱动采用不同的衬底，但是封装在同一个壳子里；单片集成，氮化镓的开关、驱动、其他器件作为同衬底的一个解决方案。而英飞凌能满足不同解决方案需求。公司对于碳化硅技术和氮化镓采取稳扎稳打推进的方式，利用覆盖从前端到后端的研发能力，从材料到封装端确保自身优势。

图表 46：英飞凌提供完整的 GaN 解决方案



来源：英飞凌、国金证券研究所

5.华润微：国内首家量产 SiC 商用产线

公司是国内最大的 MOSFET 功率器件公司,2020 年实现营收约 70 亿元，实现归母净利润 9.6 亿元。在碳化硅方面，公司通过华润微电子控股参股国内碳化硅外延片企业瀚天天成 3.2%的股权；2020 年 7 月正式发布 1200V 和 650V 工业级 SiC 肖特基二极管功率器件产品系列，1200V 产品电流等级从 2A 到 40A，主要聚焦于太阳能、UPS 电源、充电桩、储能、车载电源等应用领域，650V 产品电流等级为 4A 到 16A，主要瞄准服务器电源、通讯电源等高效开关电源应用市场；与此同时公司的国内首条 6 英寸商用 SiC 晶圆产线正式量产。在 GaN 方面，公司利用现有的全产业链和足够的现金流支持从衬底材料、器件设计、制造工艺，封装工艺全面的硅基氮化镓的研发工作。

五、投资建议

在新能源汽车刚性需求驱动下，碳化硅产业链在实现综合成本优势之后，有望迎来爆发式增长；砷化镓未来仍将继续主导 sub-6G 手机射频，同时国内 PA 厂商的发展也带来本土代工需求；GaN 在 5G 宏基站和消费级快充上将取得大发展。我们从产业链各环节，建议重点关注：

- 衬底：Cree、山东天岳、天科合达等
- 外延：东莞天域、瀚天天成等
- 器件：华润微、英飞凌、意法半导体等
- 代工：三安集成（三安光电）、威海华芯（海特高新）、稳懋等
- 设备：晶盛机电等

六、风险提示

成本下降不及预期、下游发展不及预期、外部贸易环境恶化

公司投资评级的说明：

买入：预期未来 6—12 个月内上涨幅度在 15%以上；
增持：预期未来 6—12 个月内上涨幅度在 5%—15%；
中性：预期未来 6—12 个月内变动幅度在 -5%—5%；
减持：预期未来 6—12 个月内下跌幅度在 5%以上。

行业投资评级的说明：

买入：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 15%以上；
增持：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 5%—15%；
中性：预期未来 3—6 个月内该行业变动幅度相对大盘在 -5%—5%；
减持：预期未来 3—6 个月内该行业下跌幅度超过大盘在 5%以上。

特别声明：

国金证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。

本报告版权归“国金证券股份有限公司”（以下简称“国金证券”）所有，未经事先书面授权，任何机构和个人均不得以任何方式对本报告的任何部分制作任何形式的复制、转发、转载、引用、修改、仿制、刊发，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。经过书面授权的引用、刊发，需注明出处为“国金证券股份有限公司”，且不得对本报告进行任何有悖原意的删节和修改。

本报告的产生基于国金证券及其研究人员认为可信的公开资料或实地调研资料，但国金证券及其研究人员对这些信息的准确性和完整性不作任何保证，对由于该等问题产生的一切责任，国金证券不作出任何担保。且本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次公开发布时的判断，在不作事先通知的情况下，可能会随时调整。

本报告中的信息、意见等均仅供参考，不作为或被视为出售及购买证券或其他投资标的邀请或要约。客户应当考虑到国金证券存在可能影响本报告客观性的利益冲突，而不应视本报告为作出投资决策的唯一因素。证券研究报告是用于服务具备专业知识的投资者和投资顾问的专业产品，使用时必须经专业人士进行解读。国金证券建议获取报告人员应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。报告本身、报告中的信息或所表达意见也不构成投资、法律、会计或税务的最终操作建议，国金证券不就报告中的内容对最终操作建议做出任何担保，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。

在法律允许的情况下，国金证券的关联机构可能会持有报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，并可能为这些公司正在提供或争取提供多种金融服务。

本报告反映编写分析员的不同设想、见解及分析方法，故本报告所载观点可能与其他类似研究报告的观点及市场实际情况不一致，且收件人亦不会因为收到本报告而成为国金证券的客户。

根据《证券期货投资者适当性管理办法》，本报告仅供国金证券股份有限公司客户中风险评级高于 C3 级（含 C3 级）的投资者使用；非国金证券 C3 级以上（含 C3 级）的投资者擅自使用国金证券研究报告进行投资，遭受任何损失，国金证券不承担相关法律责任。

此报告仅限于中国大陆使用。

上海

电话：021-60753903

传真：021-61038200

邮箱：researchsh@gjzq.com.cn

邮编：201204

地址：上海浦东新区芳甸路 1088 号紫竹国际大厦 7 楼

北京

电话：010-66216979

传真：010-66216793

邮箱：researchbj@gjzq.com.cn

邮编：100053

地址：中国北京西城区长椿街 3 号 4 层

深圳

电话：0755-83831378

传真：0755-83830558

邮箱：researchsz@gjzq.com.cn

邮编：518000

地址：中国深圳市福田区中心四路 1-1 号嘉里建设广场 T3-2402