

高压快充趋势及产业链降本，加速碳化硅产业进展

新能源车行业深度报告（一）

电力设备及新能源

投资评级：推荐（维持）

分析师：胡鸿宇

分析师登记编码：S0890521090003

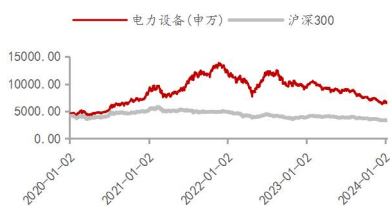
电话：021-20321074

邮箱：huhongyu@cnhbstock.com

销售服务电话：

021-20515355

行业走势图（2024年1月11日）



资料来源：wind，华宝证券研究创新部

相关研究报告

1、《解决续航焦虑最后一棒，快充进程加快催生材料新变化》2023-07-27

投资要点

④**碳化硅物理性能优势明显，适应高温、高压、高频的应用场景。**碳化硅作为第三代半导体，禁带宽度大，具有击穿电场高、热导率高、电子饱和速率高、抗辐射能力强等优势，因此采用第三代半导体材料制备的半导体器件不仅能在更高的温度下稳定运行，适用于高电压、高频率场景，此外还能以较少的电能消耗，获得更高的运行能力。以碳化硅材料为衬底的产业链主要包括碳化硅衬底材料的制备、外延层的生长、器件制造以及下游应用市场。衬底根据电学性能不同分为半绝缘型和半导电型，分别应用到不同的应用场景上。

④**下游新能源发展对高频、大功率射频及电力电子需求的快速增长，极大推动了碳化硅的产业化进程。**新能源汽车是未来碳化硅应用的主要驱动力，预计未来占据碳化硅需求的主要市场。碳化硅器件在新能源汽车产业中主要应用在电机控制器（电驱）、车载充电机 OBC、DC/DC 变换器以及充电桩，碳化硅器件相比硅基器件有更优越的物理性能，体积小，性能优越，节能性强，还顺带缓解了续航问题，更适应新能源汽车增加续航里程、缩短充电时长、提高电池容量、降低车身自重的需求。我们预测 2023-2026 年全球新能源汽车市场碳化硅晶圆需求量为 18、36、73、112 万片；2023-2026 年全球新能源汽车市场碳化硅衬底需求量为 32、62、121、172 万片。

④**2024 年，我们认为碳化硅产业化进展会随着高压快充趋势及碳化硅产业链降本而加速。**高压快充是电车的大势所趋，未来会逐渐下沉到更低区间的价格带，高压快充背景下，电车对碳化硅需求的迫切性预计对应进一步提高。另一方面，随着产能的逐步释放、8 英寸量产的不断成熟、碳化硅长晶及加工工艺的不断改进、进而碳化硅行业良率的提升，尤其是在国产厂商纷纷入局后，可能会进一步加速碳化硅的降本。我们认为 2024 年碳化硅产业化进展会随着高压快充趋势及碳化硅产业链降本而加速，关注碳化硅产业链降本进展、800V 新车放量进展、国内上游材料衬底/外延厂商出货情况、国内下游器件/模块厂商上车验证进展。

④**风险提示：**高压快充渗透率不及预期；碳化硅在车端、桩端渗透不及预期；国产化进度不及预期；扩产进程不及预期；价格战风险；此外文中提及的上市公司旨在说明行业发展情况，不构成推荐覆盖。

内容目录

1. 碳化硅：第三代半导体，物理性能优势明显.....	4
2. 碳化硅产业链包括上游衬底和外延、中游器件、下游应用.....	5
2.1. 碳化硅晶片分为半绝缘型和半导电型，分别应用到不同的应用场景.....	7
2.2. 碳化硅外延是碳化硅器件必不可少的环节，对器件性能影响极大.....	8
2.3. 碳化硅器件的主流形态包括二极管及晶体管两大类.....	10
3. 下游新能源发展加速了碳化硅的产业化进程.....	11
3.1. 半绝缘型碳化硅主要用在射频器件，面向通信基站及雷达应用.....	11
3.2. 半导电型碳化硅主要用在功率器件，新能源是主要市场.....	12
3.2.1. 新能源汽车是未来碳化硅应用的主要驱动力，尤其是高压快充趋势.....	13
3.2.2. 光伏市场逆变器的应用中也具有较大前景.....	19
3.2.3. 工业电源、轨道交通及其他应用.....	20
4. 成本提高与性能提升之间的平衡关系是碳化硅产业化的核心.....	20
4.1. 成本是当下制约碳化硅加速产业化的关键因素.....	20
4.2. 关注产业降本节奏，衬底降本快于器件.....	22
4.3. 2023 年国内碳化硅产业回顾：繁荣与挑战并存.....	24
4.4. 2024 年碳化硅产业化展望：高压快充与降本加速的双重驱动.....	26
5. 风险提示.....	27

图表目录

图 1： 钻石和莫桑石.....	4
图 2： 特斯拉 Model Y 主驱逆变器采用碳化硅 MOSFET.....	4
图 3： 碳化硅产业链.....	6
图 4： SiC 功率器件成本构成.....	6
图 5： Si 功率器件成本构成.....	6
图 6： 衬底和外延是产业链价值量最大的两个环节.....	6
图 7： 2021 年碳化硅下游市场应用构成.....	8
图 8： 碳化硅根据电学性能不同分为半绝缘型和半导电型.....	8
图 9： 碳化硅晶体的堆垛次序.....	9
图 10： 导电型碳化硅外延示意图.....	9
图 11： 碳化硅材料及器件的主要形式划分.....	9
图 12： 碳化硅二极管的主要结构主要包含 SBD、JBS 及 PiN 二极管三类.....	10
图 13： 不同类型 SiC MOSFET 对比.....	10
图 14： 碳化硅功率器件市场规模.....	11
图 15： 氮化镓射频器件市场规模.....	11
图 16： 中压范围是碳化硅的重点发展方向.....	12
图 17： 碳化硅器件应用场景市场规模预测（单位：亿美元）.....	13
图 18： SiC 有望在新能源车的多个子系统中得到应用.....	14
图 19： SiC MOSFET 与 Si IGBT 在新能源汽车上的应用.....	14
图 20： 采用 SiC 器件替代 Si IGBT 配合 450V 直流母线电压，逆变器效率有望提高 5%.....	15
图 21： 采用 SiC 的逆变器将带来被动元件体积的下降，带来逆变器整体体积的明显降低.....	15
图 22： 采用 SiC 二极管替代 Si 二极管有望使效率提升 0.3%.....	19
图 23： SiC MOSFET 可以改善光伏逆变器性能.....	19
图 24： 工业级 1200V20A-40A 碳化硅二极管价格变化（单位：元/A）.....	20

图 25: 碳化硅衬底生产流程.....	22
图 26: 8 英寸衬底将提高晶圆利用率.....	23
图 27: 8 英寸衬底成本将会显著降低.....	23
图 28: 住友 MPZ (多参数和区域控制) 溶液生长技术.....	24
图 29: 国产 SiC 二极管报价 (单位: 元/A)	26
表 1: 碳化硅材料相比硅材料具备多种优势.....	5
表 2: 碳化硅器件相比硅基器件性能优越.....	13
表 3: Si\Ga\SiC-MOSFET 以及 Si-IGBT 对应的工作环境.....	14
表 4: 配备 SiC MOSFET 的车载 OBC 有望助力系统实现更高效率.....	15
表 5: 碳化硅在新能源汽车上的应用.....	15
表 6: 应用碳化硅的新能源车型.....	16
表 7: 新能源汽车市场碳化硅市场规模预测.....	18
表 8: SiC MOSFET 和 Si IGBT 成本对比.....	21
表 9: 不同切割工艺的差异.....	22
表 10: 国内碳化硅企业扩产进展.....	24

1. 碳化硅：第三代半导体，物理性能优势明显

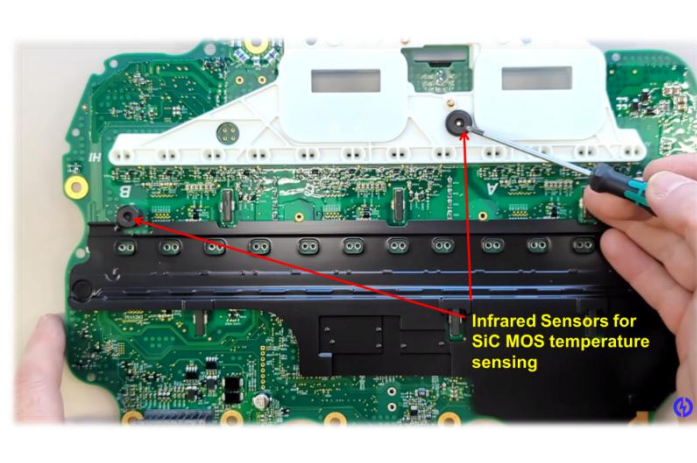
纵观半导体材料发展历史，碳化硅并不是新鲜概念。碳化硅作为材料已有百年历史，商业化也已超过 30 多年。1824 年，瑞典科学家（Berzelius）在人工合成金刚石的实验中意外发现了碳化硅这一物质，其硬度比钻石小但光彩更亮；1893 年，科学家亨利·莫桑在陨石中发现了天然的碳化硅，这种矿物被命名为莫桑石，并因此获得了 1904 年的诺贝尔化学奖；1955 年，LELY 提出生长高品质碳化硅的方法，从此将碳化硅作为重要的电子材料；1987 年，科锐第一个实现了碳化硅的商用，制造了出世界上第一块商用碳化硅衬底，并把它应用在 LED 领域；2001 年，英飞凌和科锐分别推出首款小型碳化硅肖特基二极管；2011 年，科锐推出首款商用碳化硅功率 MOSFET。而碳化硅被正式引爆获得广泛关注的是 2018 年，马斯克首次宣布在特斯拉 Model 3 的主驱逆变器里使用碳化硅 MOSFET 以替代传统的硅基 IGBT，奠定了碳化硅“上车”的里程碑。此后，比亚迪、小鹏、吉利纷纷效仿，开始布局碳化硅器件。

图 1：钻石和莫桑石



资料来源：酷玩实验室，华宝证券研究创新部

图 2：特斯拉 Model Y 主驱逆变器采用碳化硅 MOSFET



资料来源：瞻芯电子，华宝证券研究创新部

碳化硅被誉为第三代半导体，具有耐高温、耐高压、体积小、拥有更高热导率的性能优势。第一代半导体材料以硅和锗为元素半导体为代表，具有低压、低频、低功率的光电性能，可以用来生产传统的 CPU、GPU、MCU 等等，90% 以上的半导体产品都是用硅基材料制作的；第二代半导体材料一般是磷化铟、砷化镓，砷化镓材料的电子迁移率约是硅的 6 倍，具有直接带隙，因此更具有高频、高速的光电性能，主要用来生产射频器件、光模块、LED、激光器、探测器、传感器等微电子和光电子器件，是制作半导体发光二极管和通信器件的关键衬底材料。第三代半导体是指以碳化硅、氮化镓为代表的宽禁带半导体材料，与前两代半导体材料相比，第三代半导体材料禁带宽度大，具有击穿电场高、热导率高、电子饱和速率高、抗辐射能力强等优势，因此采用第三代半导体材料制备的半导体器件不仅能在更高的温度下稳定运行，适用于高电压、高频率场景，此外还能以较少的电能消耗，获得更高的运行能力。其优势具体体现在：

- 1) **高电子迁移率，实现高频开关。**电子饱和漂移速率指电子在半导体材料中的最大定向移动速度，决定器件的开关频率。碳化硅材料的电子饱和漂移速率是硅基的 2 倍，有助于提升器件的工作频率；
- 2) **高临界击穿电场，耐高压。**击穿电场强度大，是硅的 10 倍，用碳化硅制备器件可以极大地提高耐压容量、工作频率和电流密度，并大大降低器件的导通损耗高临界击穿电场的特性使其能够将 MOSFET 带入高压领域，克服 IGBT 在开关过程中的拖尾电流问题，降低开关损耗和整车能耗，减少无源器件如电容、电感等的使用，从而减少

系统体积和重量；

- 3) **更大禁带宽度，耐高温。**更大的禁带宽度可以保证材料在高温下，电子不易发生跃迁，本征激发弱，从而耐受更高的工作温度。碳化硅的禁带宽度约为硅的 3 倍，硅器件的极限工作温度一般不能超过 300°C，而碳化硅器件的极限工作温度可以达到 600°C 以上，高热导率也将带来功率密度的提升和热量的更易释放，冷却部件可小型化，有利于系统的小型化和轻量化；
- 4) **更小的面积，更小的能量损耗，实现高功率。**碳化硅器件具备更小的能量损耗，能够提供较高的电流密度。在相同功率等级下，碳化硅功率模块的体积显著小于硅基模块，有助于提升系统的功率密度。

表 1：碳化硅材料相比硅材料具备多种优势

特征	硅基	4H-碳化硅	GaAs	GaN	备注
禁带宽度: $E_G(\text{eV})$	1.12	3.26	1.43	3.5	禁带宽度越大，耐高电压和高温性能越好
电子迁移率: $\mu_N(\text{cm}^2/\text{Vs})$	1400	900	8500	1250	电子迁移率越高，电阻率越小
空穴迁移率: $\mu_P(\text{cm}^2)$	600	100	400	200	
击穿电场: $E_B(\text{V/cm}) * 10^6$	0.3	3	0.4	3	击穿电场越高越耐高压
导热系数($\text{W/cm}^\circ \text{C}$)	1.5	4.9	0.5	1.3	导热系数越高，工作温度上限越高
饱和漂移速度: $V_s(\text{cm/s}) * 10^7$	1	2.7	2	2.7	高电子饱和漂移速度与低介电常数的
相对介电常数: ϵ_s	11.8	9.7	12.8	9.5	半导体材料具有更高的频率特性
p.n 控制	O	O	O	Δ	是否可控制导电/半绝缘
热氧化层	O	O	X	X	

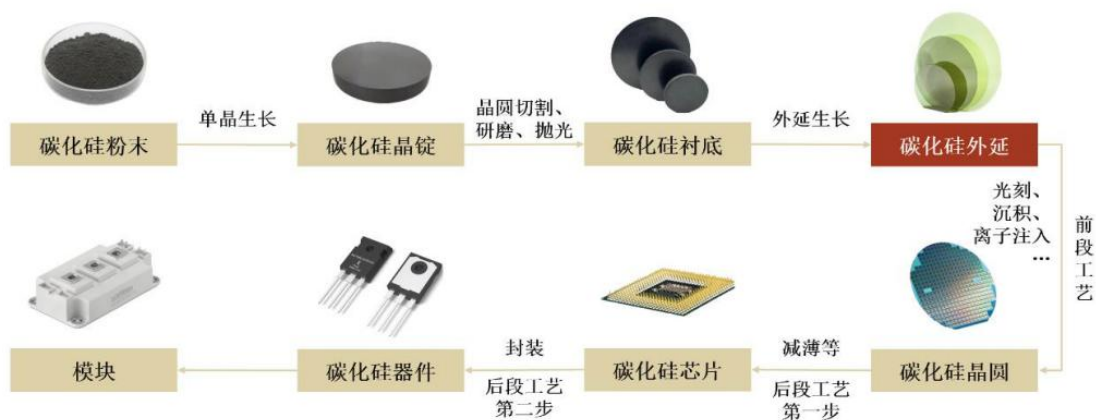
资料来源：Rohm，瀚天天成招股说明书，华宝证券研究创新部

注：目前商业化的只有 4H-SiC 和 6H-SiC 两种，由于 4H-SiC 有着比 6H-SiC 更高的载流子迁移率，故而使之成为 SiC 基功率器件的首选使用材料

2. 碳化硅产业链包括上游衬底和外延、中游器件、下游应用

以碳化硅材料为衬底的产业链主要包括碳化硅衬底材料的制备、外延层的生长、器件制造以及下游应用市场。从工艺流程上看，碳化硅一般是先被制作成晶圆，然后经过切片、打磨、抛光得到碳化硅衬底；衬底上生长单晶外延材料。外延片经过光刻、刻蚀、离子注入、沉积等步骤制造成碳化硅功率器件和碳化硅射频器件。将晶圆切割成 die，经过封装得到器件，器件组合在一起放入特殊外壳中组装成模组。

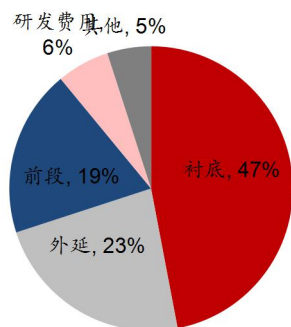
图 3：碳化硅产业链



资料来源：瀚天天成招股说明书，华宝证券研究创新部

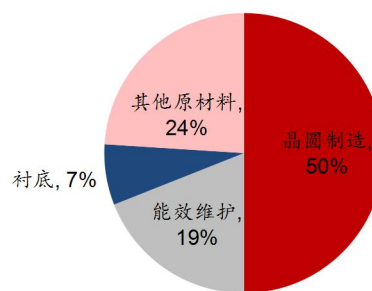
碳化硅产业链附加值向上游集中，衬底和外延的成本占比最高。根据 CASA 整理的数据，产业链中，碳化硅衬底和外延的成本分别占整个器件成本的 47% 和 23%，为产业链中价值量最大的两个环节，相比硅基器件、价值量显著倒挂。

图 4：SiC 功率器件成本构成



资料来源：CASA《第三代半导体产业发展报告 2021》，华宝证券研究创新部

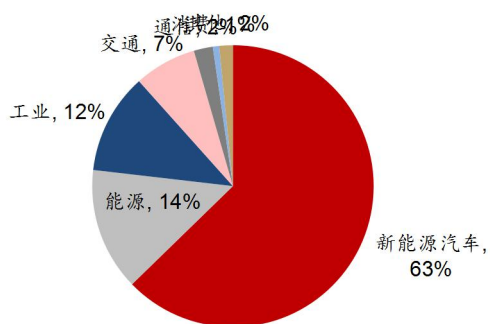
图 5：Si 功率器件成本构成



资料来源：CASA《第三代半导体产业发展报告 2021》，华宝证券研究创新部

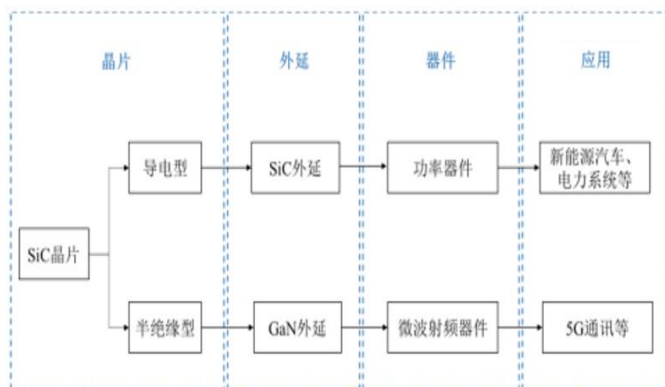
图 6：衬底和外延是产业链价值量最大的两个环节

图 7：2021 年碳化硅下游市场应用构成



资料来源：Yole，华宝证券研究创新部

图 8：碳化硅根据电学性能不同分为半绝缘型和半导电型



资料来源：天科合达招股说明书，华宝证券研究创新部

半绝缘型碳化硅主要用在射频器件上，主要为面向 4G/5G 通信基站和新一代有源相控阵雷达应用的功率放大器。射频器件是无线通讯设备的基础性零部件，扮演信号转换的角色，目前主流的射频器件有砷化镓、硅基 LDMOS、碳化硅氮化镓等不同类型，半绝缘型碳化硅衬底制备的氮化镓射频器件是迄今为止最为理想的微波射频器件，主要为面向通信基站以及雷达应用的功率放大器，根据 Yole 预测，到 2025 年，功率在 3W 以上的射频器件市场中，砷化镓器件市场份额基本维持不变的情况下，氮化镓射频器件有望替代大部分硅基 LDMOS 份额，占据 50% 的射频器件市场份额。

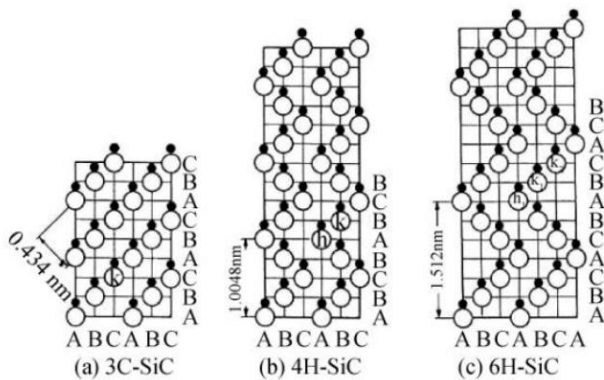
半导电型碳化硅主要用在功率器件上，主要面向电动汽车/充电桩、光伏新能源、轨道交通、智能电网等高压高温高频场景。功率器件又被称为电力电子器件，是构成电力电子变换装置的核心器件，功率器件主要包括功率二极管、功率三极管、晶闸管、MOSFET、IGBT 等。碳化硅功率器件具有高电压、大电流、高温、高频率、低损耗等独特优势，将极大地提高现有使用硅基功率器件的能源转换效率，对高效能源转换领域产生重大而深远的影响，主要应用领域有电动汽车/充电桩、光伏新能源、轨道交通、智能电网等。相同规格的碳化硅基 MOSFET 与硅基 MOSFET 相比，其尺寸可大幅减小至原来的 1/10，导通电阻可至少降低至原来的 1/100。相同规格的碳化硅基 MOSFET 较硅基 IGBT 的总能量损耗可大大降低 70%。

2.2. 碳化硅外延是碳化硅器件必不可少的环节，对器件性能影响极大

外延是碳化硅器件必不可少的环节，外延质量对器件性能影响极大。碳化硅外延晶片是指在碳化硅衬底的基础上，经过外延工艺生长出晶格一致、高纯度、低缺陷的特定单晶薄膜。由于采用升华法制备的单晶衬底无法实现对载流子浓度的精密控制，且无法有效降低晶体缺陷，因此需要在衬底上生长高质量的外延层方可用于器件制造，即外延生长技术是碳化硅器件必不可少的环节，外延质量对器件性能影响极大。

按照晶格堆垛结构的不同，常见的碳化硅单晶材料（衬底和外延）主要包括以下三种晶型：3C-SiC、4H-SiC、6H-SiC。由于原子堆垛结构的差异，导致 4H-SiC 在垂直型方向拥有更高的临界电场强度、电子迁移率和更低的导电各向异性，因此 4H-SiC 更适合商业化的垂直型功率器件（SBD 和 MOSFET），对应 SBD 和 MOSFET 器件特性也优于 3C-SiC 和 6H-SiC 单极型器件的理论极限。

图 9：碳化硅晶体的堆垛次序



资料来源：瀚天天成招股说明书，华宝证券研究创新部

图 10：导电型碳化硅外延示意图



资料来源：瀚天天成招股说明书，华宝证券研究创新部

根据掺杂元素不同，碳化硅外延晶片分为 N 型、P 型和 PN 多层材料。N 型碳化硅外延晶片是在生长外延层的过程中使用氮 (N) 元素进行掺杂形成，氮与硅结合后多出一个自由电子，为其导电性的主要来源；P 型碳化硅外延晶片是在生长外延层的过程中使用铝 (Al) 元素进行掺杂形成，铝和碳结合后，会缺失一个电子，形成空穴，而空穴吸引束缚电子移动使得 P 型碳化硅外延晶片具有导电性；PN 多层碳化硅外延晶片是指在衬底上生长两层或数层外延，每层外延生长分别用氮元素或铝元素进行掺杂，形成 N 型、P 型外延层叠加的结构。N 型碳化硅半导体型外延晶片是碳化硅功率器件厂商主要使用的型号，应用于新能源车、光伏、工业电源领域所需碳化硅功率器件（如 SBD 与 MOSFET）的工业化生产；P 型和 PN 多层碳化硅半导体型外延晶片，由于物理特性（例如 P 型垂直方向载流子迁移率较低）和行业应用领域（例如智能电网应用的双极型超高压耐压器件）仍需开发，行业内出货量较少。

图 11：碳化硅材料及器件的主要形式划分



资料来源：瀚天天成招股说明书，华宝证券研究创新部

2.3. 碳化硅器件的主流形态包括二极管及晶体管两大类

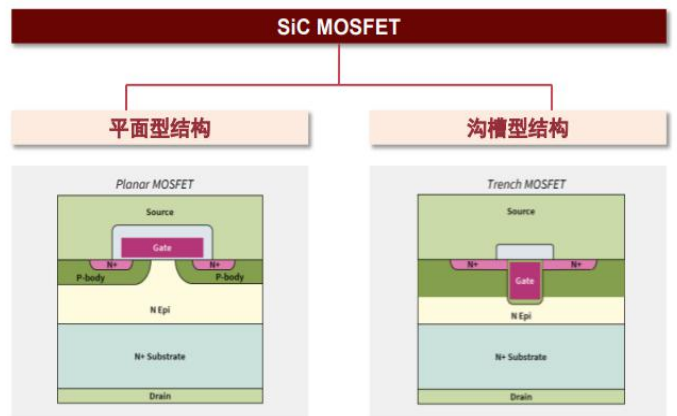
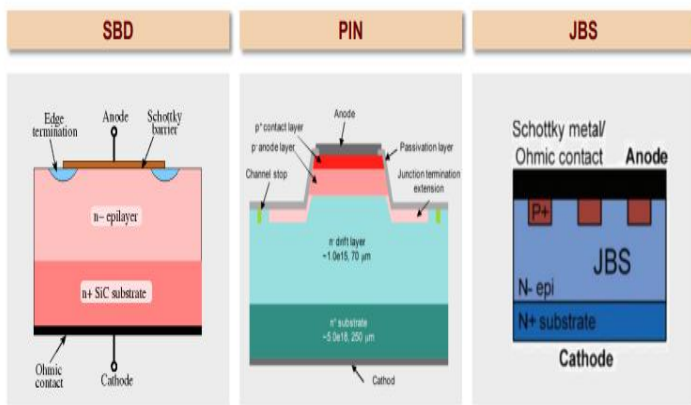
与硅基器件类似，碳化硅器件主要分为二极管类器件、晶体管类器件两大类。其中二极管及晶体管类的 MOSFET 器件应用较为广泛。

二极管方面：碳化硅二极管主要包括肖特基势垒二极管(SBD), 结势垒肖特基二极管(JBS), PiN 二极管 (PND 型) 等。器件结构来看碳化硅相比硅基器件并无创新，但材料的优异特性为碳化硅制造的产品带来了竞争优势。SiC SBD 耐压高且几乎无反向恢复时间，可大幅度降低开关损耗，提高开关频率，在高频、中等电压功率开关的应用上有替代硅基 PiN 二极管（相对耐压强但速度慢）的趋势，大大优化了 200V-1700V 电压段二极管的性能，并使 PiN 的应用甜区移动至 3300V 以上；2) 更高端的 JBS 器件方面，SiC JBS 具有大电流密度，高工作结温的优势，相比硅基器件有进一步性能提升。

晶体管方面：SiC MOSFET 结构与硅基 MOSFET 产品类似，主要分为平面型和沟槽型两类，并拥有高耐压、开关损耗低、导通损耗低、体二极管续流特性好、温度稳定性高等特点，其高电压下依然能保持高速度、高效率的特点使其向原有耐压较高，但频率特性较差的 Si-IGBT 产品发起竞争，并在未来有望对 Si IGBT 形成全面替代。目前，市场中相对成熟的仍然是在硅基领域较为落后的平面型 (DMOS) 结构，其主要原因是平面型器件工艺简单、单元一致性较好，而沟槽结构单元一致性差，且垂直型 SiC MOSFET 内部电场强度较大，容易发生局部击穿，可靠性不足的问题抑制了其短期内的大规模应用。但是，我们看到沟槽型 SiC MOSFET 在导通电阻、以及开关损耗上的优势明显（根据罗姆数据，其第三代沟槽型产品比第二代平面型产品导通电阻降低 50%，开关损耗降低 30%），英飞凌、罗姆等企业都在积极推进改进结构的沟槽型 SiC MOSFET 研发。我们认为 SiC 的材料优势有望在沟槽型结构大规模应用后得到进一步释放。

图 12：碳化硅二极管的主要结构主要包含 SBD、JBS 及 PiN 二极管三类

图 13：不同类型 SiC MOSFET 对比



资料来源：T. Ayalew 等人：《SiC 半导体器件技术、建模和仿真》，T. Yasunori 等人：《开发用于高压功率逆变器的 6kV 级 SiC-PiN 二极管》，华宝证券研究创新部

资料来源：WINSOK 微研官网，华宝证券研究创新部

目前上游获得近乎完美的高质量 SiC 衬底难度依然较大，且由于缺陷在晶圆中一般会均匀分布，因此面积越大的 SiC 器件的良率也就越低，即便是其单位面积导通电阻大幅低于 Si 基器件，目前单颗 SiC MOSFET 的电流输出能力依然有限。我们看到，为使更加系统稳定、可靠地达到更大的输出电流，多个 SiC MOSFET 器件并联后封装成模块（模组）的出货形式也非常普遍。Wolfspeed, Rohm, STMicro, On Semi, Infineon 及 Semikron 等海外知名厂

商均推出了不同种类的 SiC MOSFET 模块产品，从半桥模块到三相全桥模块均有涉及，以灵活满足不同应用的需求。

3. 下游新能源发展加速了碳化硅的产业化进程

由于碳化硅衬底分为半绝缘型和半导电型，对应制作碳化硅基氮化镓射频器件和碳化硅功率器件分别应用到不同的应用场景，因此我们分别对两种器件的市场空间进行讨论。根据 Yole 数据显示，2022 年碳化硅器件市场规模为 19.7 亿美元，其中半导电型碳化硅功率器件市场规模为 17.9 亿美元，半绝缘型碳化硅射频器件市场规模为 1.8 亿美元；预计到 2028 年，半导电型碳化硅功率器件市场规模有望达到 86.9 亿美元，年化增速达到 30.12%，半绝缘型碳化硅射频器件市场规模有望达到 22.9 亿美元，年化增速达到 52.79%。

图 14：碳化硅功率器件市场规模



资料来源：Yole，华宝证券研究创新部

图 15：氮化镓射频器件市场规模



资料来源：Yole，华宝证券研究创新部

3.1. 半绝缘型碳化硅主要用在射频器件，面向通信基站及雷达应用

射频器件在无线通讯中扮演信号转换的角色，是无线通信设备的基础性零部件。射频器件主要包括功率放大器、滤波器、开关、低噪声放大器、双工器等。目前主流的射频器件有硅基 LDMOS、砷化镓、碳化硅基氮化镓等不同类型。根据 Analog Dialogue，硅基 LDMOS 器件也已在通讯领域应用多年，但其主要应用于小于 4 GHz 的低频率领域；砷化镓器件已在功率放大器上得到广泛应用；碳化硅基氮化镓射频器件具有良好的导热性能、高频率、高功率等优势，有望开启其广泛应用。

半绝缘型碳化硅衬底制备的氮化镓射频器件主要为面向通信基站以及雷达应用（4G/5G 移动通讯系统、新一代有源相控阵雷达）的功率放大器。随着信息技术产业对数据流量、更高工作频率和带宽等需求的不断增长，氮化镓器件在基站中应用越来越广泛。无线通信基础设施方面，5G 具有大容量、低时延、低功耗、高可靠性等特点，要求射频器件拥有更高的线性和更高的效率，相比砷化镓和硅基 LDMOS 射频器件，以碳化硅为衬底的氮化镓射频器件同时具有碳化硅良好的导热性能和氮化镓在高频段下大功率射频输出的优势，能够提供下一代高频电信网络所需要的功率和效能，成为 5G 基站功率放大器的主流选择；在国防军工领域，碳化硅基氮化镓射频器件已经代替了大部分砷化镓和部分硅基 LDMOS 器件，占据了大部分市场，对于需要高频高输出的卫星通信应用，氮化镓器件也有望逐步取代砷化镓的解决方案。

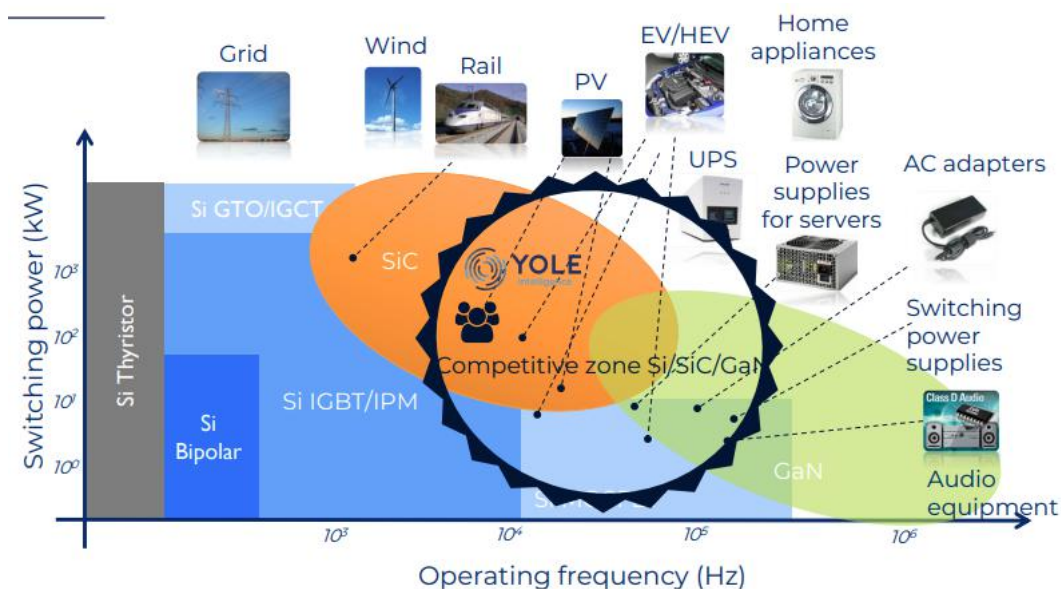
根据 Yole 预测，随着通信基础建设和军事应用的需求发展，全球氮化镓射频器件市场规模将持续增长，预计从 2022 年的 1.8 亿美元增长至 2028 年的 22.9 亿美元，期间年均复合

增长率达到 52.79%。半绝缘型碳化硅衬底的需求量有望因此获益而持续增长。至 2025 年，功率在 3W 以上的射频器件市场中，砷化镓器件市场份额基本维持不变的情况下，氮化镓射频器件有望替代大部分硅基 LDMOS 份额，占据射频器件市场约 50% 的份额。

3.2. 半导体型碳化硅主要用在功率器件，新能源是主要市场

下游新能源发展对高频、大功率射频及电力电子需求的快速增长，极大推动了碳化硅的产业化进程。近年来，随着能源结构升级，发电端的光伏、风电，输电端的高压柔直，用电端的新能源车、充电桩、白电、工控，对电压和能源转换效率的要求不断提升，在成本和安全的约束下更关注系统的稳定性和经济性，因此更耐高温、更耐高压、更高热导率、更小体积、更轻体重、更高可靠性、性能更优越的碳化硅器件越来越受到下游的关注。尤其是在中压范围的光伏、风电、新能源车、充电桩、服务器 UPS 电源、工控电源、白电，近年来已陆续开始尝试使用碳化硅器件替代或部分替代原有的硅基 IGBT。以新能源车为例，2018 年，特斯拉开始在 Model 3 的主驱逆变器里，使用基于碳化硅材料的碳化硅 MOSFET，以替代传统的硅基 IGBT，而后车企纷纷效仿。正是下游终端的热潮加速了碳化硅的产业化进程。

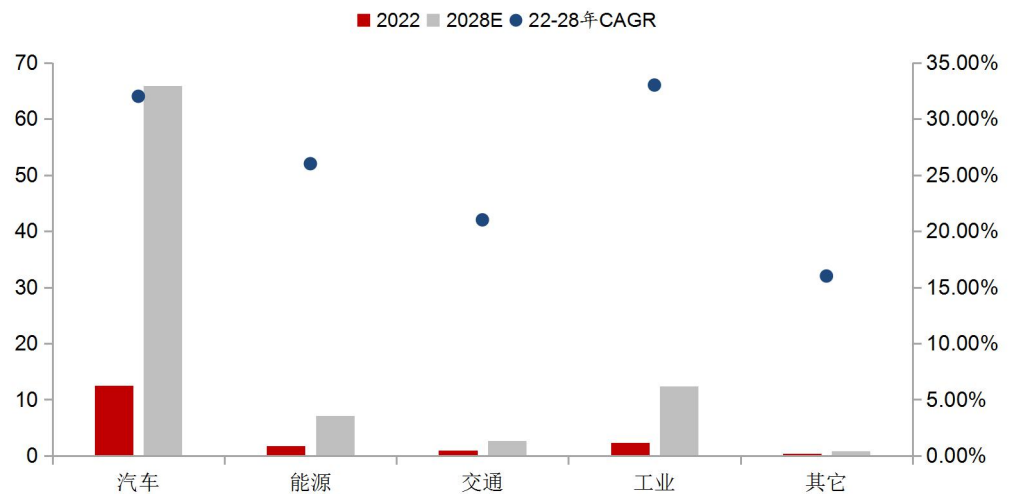
图 16：中压范围是碳化硅的重点发展方向



资料来源：Yole，华宝证券研究创新部

新能源汽车是未来碳化硅应用的主要驱动力，预计未来占据碳化硅需求的主要市场。根据 Yole 预测，2022 年碳化硅功率器件市场规模为 18 亿美元，2028 年有望达到 89 亿美元，22-28 年 CAGR 高达 31%。碳化硅功率器件可应用于汽车、能源、交通、工业等多个领域，其中汽车占据主导地位，市场规模占比超过七成，2022 年市场规模为 13 亿美元，2028 年有望达到 66 亿美元，22-28 年 CAGR 高达 32%。

图 17：碳化硅器件应用场景市场规模预测（单位：亿美元）



资料来源：Yole，华宝证券研究创新部

3.2.1. 新能源汽车是未来碳化硅应用的主要驱动力，尤其是高压快充趋势

新能源汽车是未来碳化硅应用的主要驱动力，预计未来占据碳化硅需求的主要市场。碳化硅器件在新能源汽车产业中主要应用在电机控制器（电驱）、车载充电机 OBC、DC/DC 变换器以及充电桩，碳化硅器件相比硅基器件有更优越的物理性能，体积小，性能优越，节能性强，还顺带缓解了续航问题，更适应新能源汽车增加续航里程、缩短充电时长、提高电池容量、降低车身自重的需求。

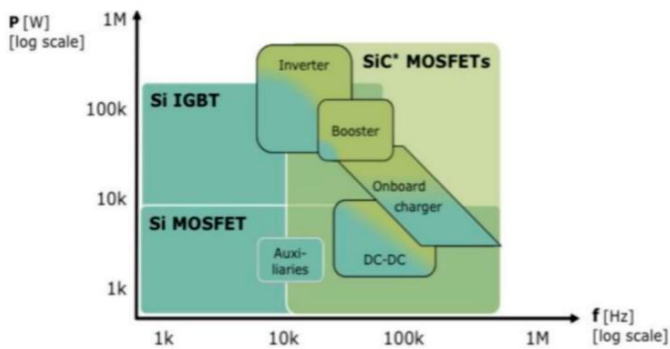
表 2：碳化硅器件相比硅基器件性能优越

	能量损耗降低	功率密度提升	系统成本节约	尺寸缩小	充电速度提升
动力总成	80%	80%		50%	
OBC	30%	50%	15%		
DC-DC	30%	50%	15%		
充电桩	30%	50%	10%		2X

资料来源：Wolfspeed，华宝证券研究创新部

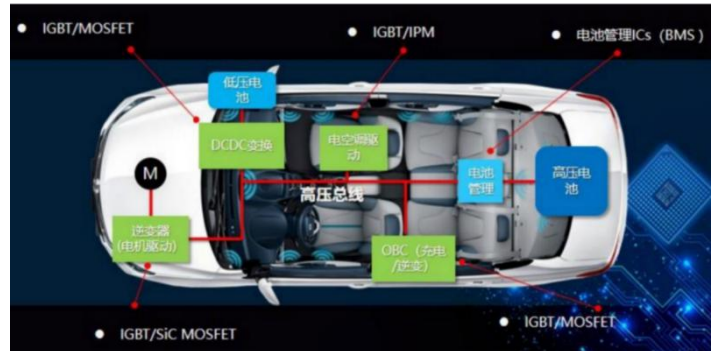
碳化硅在主驱、OBC、DC/DC 系统、充电桩中均已开启对硅基 IGBT 或超级结器件的替代。不同子系统的输出功率、工作频率需求有一定差别，主驱逆变器为大功率低频场景（功率 100KW 以上，工频 50KHz 以下）；车载充电机 OBC 和 DC/DC 系统为小功率高频场景（车载充电机 OBC：功率 3.3KW-22KW，工频 100KHz-300KHz）、DC/DC：功率 3KW，工频 100KHz 以上）；充电桩为中低功率中高频场景（功率 22KW-100KW，工频 50KHz-100KHz）。

图 18: SiC 有望在新能源车的多个子系统中得到应用



资料来源: 英飞凌官网, 华宝证券研究创新部

图 19: SiC MOSFET 与 Si IGBT 在新能源汽车上的应用



资料来源: 比亚迪, 华宝证券研究创新部

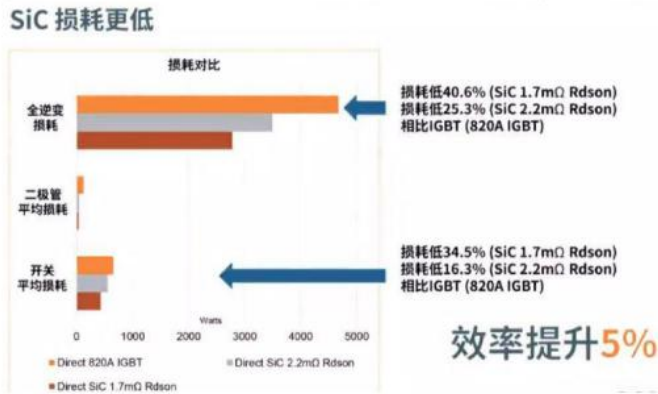
表 3: Si\Ga\SiC-MOSFET 以及 Si-IGBT 对应的工作环境

	电压 (V)	频率 (Hz)	功率 (kW)
Si-MOSFET	低压-中低压	中低-中高	低-中
Si-IGBT	中低压-高压	低-中	中低-高
GaN-MOSFET	低压、中低压	中-超高	中低-中
SiC-MOSFET	中压-超高压	中低-中高	中-超高

资料来源: 英飞凌, 罗姆半导体, 华宝证券研究创新部

1) 主驱: SiC MOSFET 有望替代 Si-IGBT。在同样的电压下, SiC MOSFET 与 Si-IGBT 相比有望助力逆变器输出更大的功率, 根据安森美的数据, 以 A 级车用电控为例, 以 1.7mohm/2.2mohm 内阻的 SiC 模块直接替换 820A 规格的 Si-IGBT 模块, 全逆变损耗有望降低 45.3%/25.3%, 开关平均损耗有望降低 34.5%/16.3%, 在不改变 450V 直流母线电压的情况下, 系统效率提升 5%; 根据英飞凌的测试, 若将电压提高到 800V 后, 使用 SiC MOSFET 替代 Si-IGBT 有望将系统效率提升 7.6%。SiC MOSFET 与 Si-IGBT 相比具有降低电机损耗、降低开关损耗, 提高系统能量转化效率, 带来更小的体积和更长电池续航时间, 可以使电驱系统在高温高压环境下保持高速稳定运行。特斯拉 Model 3 是市场上最早在主驱逆变器里, 使用基于碳化硅材料的碳化硅 MOSFET, 以替代传统的硅基 IGBT 的车型, 而后现代、起亚、通用等国际知名车企和国内的比亚迪、蔚小理、吉利等相关企业也相继推出相关车型。根据罗姆的预测, 2023 年开始, 电机控制器中的 SiC 比率将会迅速上升, 渗透率将会从 2022 年的 9% 增长到 25%。预计到 2025 年, SiC 在电机控制器中的渗透率将高达 40%。

图 20: 采用 SiC 器件替代 Si IGBT 配合 450V 直流母线电压, 逆变器效率有望提高 5%



资料来源: 安森美官网, 华宝证券研究创新部

图 21: 采用 SiC 的逆变器将带来被动元件体积的下降, 带来逆变器整体体积的明显降低



资料来源: 英飞凌官网, 华宝证券研究创新部

2) 车载充电机 OBC: SiC MOSFET 有望替代 Si MOSFET 或二极管。车载充电机 (OBC) 与车外固定直流快速充电桩相比, 由于安装于车内整体体积受限, 且使用频率更高, 直接影响客户补能体验, 因此 OBC 对于功率密度、整机效率的要求一般高于其他车载电源零部件。通过 SiC-MOSFET 进行替代, 可以减少散热器、被动元件尺寸、简化电路, 实现效率的提升。目前, OBC 供应商已经开始推广配备 SiC 器件的产品, 部分也采用了国产器件。根据电子发烧友网, 目前国内碳化硅芯片在 OBC 的渗透率已经达到 60-70%。

表 4: 配备 SiC MOSFET 的车载 OBC 有望助力系统实现更高效率

比较项目	Si IGBT+二极管	SiC MOSFET	OBC 终端用户价值
开关频率 (KHz)	25	100-150	减少被动元器件尺寸
体积 (cm ²)	4593	1986	提升汽车空间, 减少汽车重量
重量 (g)	7708	3074	
功率密度 (KW/L)	2.1	3.3	
效率 (%)	94	97.7	节能省钱

资料来源: Carbontech, 华宝证券研究创新部

3) 直流转换器 DC/DC 及充电桩: 碳化硅耐高压、高频的性能优势适配直流快充桩需求, 使用碳化硅器件还可降低拓扑复杂度, 减少驱动配套电路数量与功率器件用量, 从而降低充电桩体积及系统成本。此外, 对于运营商而言, 应用 SiC 器件还可以减少开关损耗, 提升转换效率, 提高营业利润。

表 5: 碳化硅在新能源汽车上的应用

模块	SiC 器件类型	可替换硅基器件	应用优势	代表车型
主驱	MOSFET	Si-IGBT	降低电机损耗、降低开关损耗, 提高系统能量转化效率, 带来更小的体积和更长电池续航时间	特斯拉 Model 3/Y、蔚来 ET5/ET7
OBC	MOSFET	Si-IGBT/Si-MOSFET	减少散热器、被动元件尺寸、简化电路, 实现效率的提升	比亚迪海豹、丰田 bZ4X
	SBD	PFC Si-SBD	减少散热器、被动元件尺寸、简化电路, 实现效率的提升	
DC/DC	MOSFET	Si-IGBT/Si-MOSFET	提升效率	

模块	SiC 器件类型	可替换硅基器件	应用优势	代表车型
	SBD	前后两级 Si-SBD	提升效率	

资料来源：Carbontech，华宝证券研究创新部

800V 快充趋势加速碳化硅上车，碳化硅装车逐渐向中端车型渗透。后续要跨越电动车渗透率鸿沟，获得主流消费者广泛的支持，推广快充是必然之路，提高充电功率可以实现快充，基于功率 $kW = \text{电流 } A \times \text{电压 } V$ ，快充可通过高电压或大电流实现，而充电电流加大意味着更粗更重的线束、更多的发热量以及更多附属设备瓶颈，而充电电压提升则有更大的设计自由度，这直接推动了 400V 电压平台向 800V 电压平台转换。800V 快充是目前最有可能改变电动车里程焦虑的新技术，我们预计 800V 是未来的发展趋势。碳化硅 MOSFET 在 800V 快充具有无可替代的优势，电压升高后硅基 IGBT 的导通损耗、开关损耗都有显著上升，增本降效使得 800V 的实际经济性大为降低，因此在 800V 电压平台中，企业更倾向选择高频低损耗的碳化硅 MOSFET 方案，因此目前 800V 电控乃至配套的 OBC 大部分已选用或规划采用碳化硅 MOSFET 器件。2023 年碳化硅装车向中端车型渗透趋势明显，根据汽车之家数据，23 年有小鹏 G6、极氪 X、智己 LS6 等多款 20-25 万元价格段的标配碳化硅车型上市。

表 6：应用碳化硅的新能源车型

车企	国家	车型	碳化硅应用	上市年份	价格区间
海外					
特斯拉	美国	Model 3	主驱	2018	25.99-29.74
		Model Y	主驱	2020	26.39-36.39
		Model X Plaid	主驱	2021	83.89
		Model S Plaid	主驱	2021	82.89
通用	美国	凯迪拉克 Lyriq	/	2022	43.97-47.97
福特	美国	Mach E	主驱	2021	26.50-37.99
Lucid Motors	美国	Lucid Air	主驱、OBC	2021	50.33-116.28
Rivian	美国	R1T	主驱	2021	54 起
		R1S	主驱	2021	55.8 起
大众	德国	保时捷 Taycan	OBC	2020	88.8 起
		奥迪 e-tron GT	主驱	2023	99.98
		保时捷 Macan EV	主驱	2024	未上市
路特斯	英国	ELETRE	主驱	2022	82.80-102.80
		EMEYA	主驱	2024	未上市
沃尔沃	瑞典	EM90	主驱	2023	81.8
现代	韩国	Ioniq 5	主驱	2021	33.24 起
		Ioniq 6	主驱	2023	29.95 起
		Genesis GV60	主驱	2023	28.58-35.18
		Genesis GV70	主驱	2023	38.58-43.98
		Genesis GV80	主驱	2023	40.68-47.58
		起亚 EV6	主驱	2023	28.3-44.2
		Ioniq 7	主驱	/	未上市
		Genesis X	主驱	/	未上市
丰田	日本	bZ4X	OBC、DC-DC	2022	19.98-28.48
		Mirai	主驱	2022	36.36 起

车企	国家	车型	碳化硅应用	上市年份	价格区间
		Prius	主驱、DC-DC	2023	23.5
		雷克萨斯 RZ	主驱	2023	37.5-46.5
国内					
比亚迪	中国	汉 EV	主驱	2020	18.98-33.18
		唐 EV(2021 新款)	主驱	2021	27.95-31.48
		海豹	主驱	2022	16.68-27.98
		仰望 U8	主驱	2023	109.8
		方程豹豹 5	主驱	2023	28.98-35.28
		仰望 U9	主驱	2024	未上市
蔚来	中国	ET7	主驱	2021	42.8-50.6
		ET5	主驱	2021	29.8-35.6
		ES7	主驱	2022	43.8-51.8
		EC7	主驱	2022	45.8-54.8
		ES8 (全新)	主驱	2023	49.6-65.6
		ES6 (全新)	主驱	2023	22.8-39.6
		EC6 (全新)	主驱	2023	35.8-55.4
		ET5T	主驱	2023	29.8-35.6
小鹏	中国	G9	主驱	2022	26.39-41.99
		G6	主驱	2023	20.99-27.69
理想	中国	MEGA	主驱	2024	未上市
华为	中国	智界 S7	主驱	2023	25.80-35.80
		阿维塔 12	/	2023	30.08-40.08
		问界 M9	/	2023	50-60
小米	中国	SU7	/	2024	未上市
吉利	中国	Smart 精灵#1	主驱	2022	17.9-28.49
		极氪 001	主驱	2021	26.9-34.9
		极氪 009	主驱	2022	49.9-58.8
		极氪 X	主驱	2023	18.98-22.98
		极氪 001FR	主驱	2023	76.9
		极越 01	主驱	2023	24.99-33.99
		极氪 CSIE	主驱	2023	未上市
		极氪 007	主驱	2023	22.99 起
上汽	中国	智己 LS6	主驱、OBC	2023	22.99-29.19
上汽通用五菱	中国	五菱凯捷混合动力版	主驱	2023	12.98-14.98
		战略型 SUV 五菱星辰混动版	主驱	2023	9.98-10.98
长城	中国	机甲龙	/	2022	48.8
东风	中国	岚图	主驱	2021	31.36-33.36
红旗新能源	中国	E001	主驱	/	未上市
		E202	主驱	2024	未上市
哪吒	中国	GT	主驱	2023	19.78-23.58
江铃汽车	中国	乐行 E 路达	主驱	2023	18.26-26.99

资料来源: Marketlines, Carbontech, 懂车帝, 汽车之家, 太平洋网络, 华宝证券研究创新部

注: 1) 13.25 万元以下车型标红, 2) 统计时向截至 2023/12/10

以现今量产车型搭载碳化硅的情况来看，特斯拉在中低端车型采用混用 SiC MOS 和 Si IGBT 外（从原来的 24 个 SiC MOS 变成 6 个 SiC MOS+18 个 Si IGBT 混用的方案），在高端车型（Model 3 以上的车型）仍采用纯 SiC MOS 的方案（24 个 SiC MOS），其他大部分厂商均采用 36-48 颗芯片。车用 OBC 和 DC/DC 对碳化硅的用量与主驱的比例大概是 1: 2。

我们基于以上分析和以下假设对新能源汽车市场碳化硅市场规模进行预测：

- 1) 假设一——单车用量：若一辆车主驱用 36 或 48 颗碳化硅 MoS 芯片，假设平均主驱用量为 42 颗碳化硅 MoS 芯片，按照车用 OBC 和 DC/DC 对碳化硅的用量与主驱的比例大概是 1: 2 计算，假设平均单车用量为 60 颗碳化硅 MoS 芯片；
- 2) 假设二——碳化硅搭载车型销量：假设 800V 高压快充新车全部搭载碳化硅；非 800V 搭载率随着碳化硅成本的不断下降从 2022-2026 年分别为 1%、3%、5%、10%、15%；
- 3) 假设三——衬底良率：根据“芯八哥”微信公众号，目前头部厂商晶圆良率和衬底良率在 50-60% 左右，假设随着技术和工艺水平的不断提升，晶圆和衬底良率从 2022-2026 年分别为 50%、55%、58%、60%、65%。

基于以上假设，我们预测 2023-2026 年全球碳化硅晶圆需求量为 18、36、73、112 万片；2023-2026 年全球碳化硅衬底需求量为 32、62、121、172 万片。

表 7：新能源汽车市场碳化硅市场规模预测

	2022	2023E	2024E	2025E	2026E
国内新能源车销量	628	833	999	1169	1345
全球新能源车销量	1020	1388	1782	2204	2645
国内 B/C 级新能源车销量	189	250	300	351	403
全球 B/C 级新能源车销量	306	416	535	661	794
800V 架构渗透率	3%	12%	20%	30%	40%
国内 800V 车型销量/国内 800V 车型搭载碳化硅销量 (万辆)	6	30	60	105	161
yoy		430%	100%	75%	53%
全球 800V 车型销量/全球 800V 车型搭载碳化硅销量 (万辆)	9	50	107	198	317
yoy		444%	114%	86%	60%
非 800V 车型搭载碳化硅比例	1%	3%	5%	10%	15%
国内非 800V 车型销量	623	803	939	1064	1183
全球非 801V 车型销量	1010	1338	1675	2006	2328
国内非 800V 车型搭载碳化硅销量 (万辆)	6	24	47	106	177
全球非 801V 车型搭载碳化硅销量 (万辆)	10	40	84	201	349
国内搭载碳化硅车型销量 (万辆)	12	54	107	212	339
全球搭载碳化硅车型销量 (万辆)	19	90	191	399	667
单车碳化硅芯片用量 (颗)	60	60	60	60	60
国内碳化硅芯片需求量 (万颗)	713	3,244	6,416	12,697	20,330
全球碳化硅芯片需求量 (万颗)	1,157	5,405	11,442	23,939	39,995
单片晶圆可以切出来的芯片数量	550	550	550	550	550
晶圆良率	50%	55%	58%	60%	65%
单片晶圆实际可以切出来的芯片数量	275	303	319	330	358

	2022	2023E	2024E	2025E	2026E
国内所需晶圆片数 (万片)	3	11	20	38	57
全球所需晶圆片数 (万片)	4	18	36	73	112
衬底良率	50%	55%	58%	60%	65%
所需衬底片数 (万片)	5	19	35	64	87
所需衬底片数 (万片)	8	32	62	121	172

资料来源：芯八哥，懂车帝，汽车之家，华宝证券研究创新部测算

3.2.2. 光伏市场逆变器的应用中也具有较大前景

碳化硅优良的物理性能，在光伏组串式逆变器的应用中也具有较大前景。光伏产业也向“大组件、大逆变器、大跨度支架、大组串”方向发展，光伏电站电压等级将从 1000V 提升至 1500V 及以上，对功率器件的物理性能提出了更高的要求。光伏逆变器作为碳化硅器件的另一大主要应用场景，也迎来新的发展机遇。未来更主流，装机贡献更大的组串式逆变器有望受益于 SiC 优良的物理特性，来实现系统的降本提效，并在“平价上网”的市场环境下有望为终端用户创造更大经济价值。根据 Simon Wall 等人在《High-efficiency PV inverter with SiC》的研究中，在 50KW 的组串式逆变器中，Si 二极管被 SiC 二极管替代后有望实现 0.3% 的系统效率提升。根据天科合达招股说明书，使用全 SiC MOSFET 或 SiC MOSFET 与 SiC SBD 结合的功率模块的光伏逆变器，转换效率可从 96% 提升至 99% 以上，能量损耗降低 50% 以上，设备循环寿命提升 50 倍。

图 22：采用 SiC 二极管替代 Si 二极管有望使效率提升 0.3%

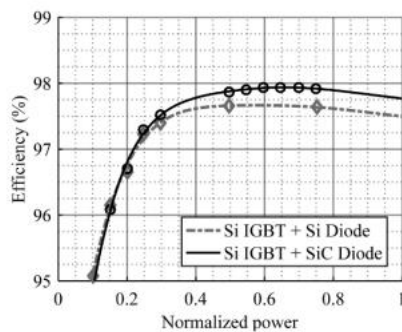
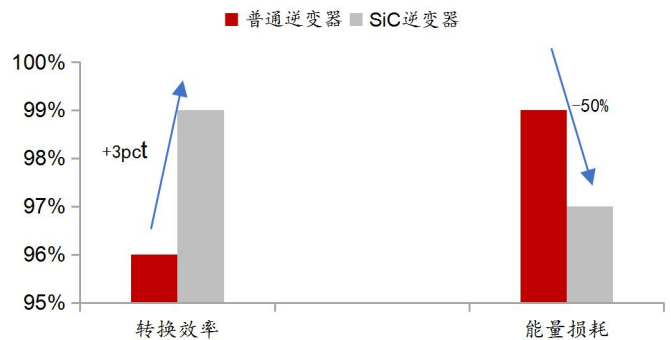


Fig. 8 50 kW unit efficiency, 600 V input, Si versus SiC diode

资料来源：《High-efficiency PV inverter with SiC》（Simon Wall 等），华宝证券研究创新部

图 23：SiC MOSFET 可以改善光伏逆变器性能

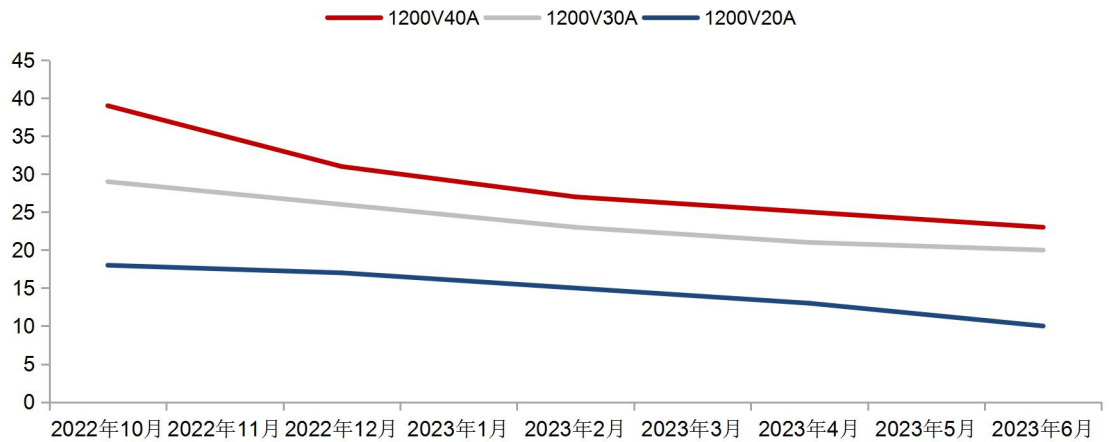


资料来源：天科合达招股说明书，华宝证券研究创新部

碳化硅器件在光储逆变器中应用比例持续增加，光储市场的竞争相比车规产品更为激烈。从 2010 年以来，光伏逆变器厂商就已经采用碳化硅二极管替代硅基器件使用，随着国产二极管价格的下降，越来越多的企业开始大批量使用碳化硅，2023 年 5 月上海 SNEC2023 展上，英威腾 XG PLUS、上能电气 320kW 组串逆变器、迈格瑞能 G2 混合逆变器等众多参展产品都采用了碳化硅技术，光伏企业与碳化硅芯片企业合作案例也在增加，如上能电气与安森美达成战略合作、科士达与意法半导体深化合作等。比车规产品光伏市场的竞争相对更为激烈，一方面，光伏市场产品验证周期相比车规产品更短，进入门槛更低，竞争对手更多；另一方面，由于 2023 年下游逆变器企业处于产能出清周期，受到海外需求增速下滑和库存的影响，下游竞争加剧，价格竞争也同样传导到上游。根据 InSmei 调研，国内工业碳化硅二级管的价格今年

以来跌幅明显，截止到 2023 年 6 月，国内碳化硅二级管的价格已接近 0.5 元/A，跌幅超 30%。未来，碳化硅二极管价格的下降也有望进一步提升对 Si IGBT 的替代。

图 24：工业级 1200V20A-40A 碳化硅二极管价格变化（单位：元/A）



资料来源：InSmei，华宝证券研究创新部

3.2.3. 工业电源、轨道交通及其他应用

除新能源车及光伏逆变器之外，在通信及服务器电源、轨道交通牵引变流器等电力电子应用领域，均需要实现整流、逆变等基本功能，而采用 SiC 器件有望提高电能转换效率，从不同程度上降低系统成本，或为终端客户带来更大收益及良好使用体验。

以轨道交通牵引变流器为例，碳化硅功率器件相较传统硅基 IGBT 能够有效提升开关频率，降低开关损耗，其高频化可以进一步降低无源器件的噪声、温度、体积与重量，提升装置应用的机动性、灵活性，是新一代牵引逆变器技术的主流发展方向。目前 SiC 器件已在城市轨道交通系统中得以应用，苏州轨交 3 号线 0312 号列车是国内首个基于 SiC 变流技术的永磁直驱牵引系统项目，实现了牵引节能 20% 的目标。2012 年东京地铁银座线进行了世界首次 SiC 器件装车运营试验。自 2015 年起，日本开始在铁路车辆上大量采用 SiC 器件，到 2021 年，已进入普及应用阶段。

4. 成本提高与性能提升之间的平衡关系是碳化硅产业化的核心

4.1. 成本是当下制约碳化硅加速产业化的关键因素

上文中我们判断了高压快充有效解决里程焦虑问题，是电车产业趋势，大量 800V 车型的推出上市导入也印证了这一点，这进一步促进了 SiC 的需求爆发。尽管碳化硅器件相比硅基产品具有明显优势，但现阶段 SiC 仍然存在一些问题限制了大规模产业化推广和应用。

一方面，受 SiC 材料缺陷密度高、SiC 器件设计和工艺成熟度、产品良率和可靠性较低等问题限制，单芯片 SiC MOSFET 的额定电流远小于单芯片 Si IGBT 的额定电流，这限制了 SiC MOSFET 向更高功率等级发展。目前，罗姆半导体集团的商用 1200V SiC MOSFET (SCT3022KLHR) 分立器件的最大载流能力为 95A，商用 650V SiC MOSFET (SCT3017AL) 分立器件的最大载流能力为 118A；科锐公司的商用 1200V SiC MOSFET (C3M0016120D)

分立器件的最大载流能力为 115A，商用 650V SiC MOSFET (C3M0015065D) 分立器件的最大载流能力为 120A；英飞凌公司的商用 1200V Si IGBT (IKY75N120CH3) 分立器件的最大载流能力可达 150A，650V Si IGBT (IGZ100N65H5) 分立器件的最大载流能力可达 161A。实际上，两种类型功率模块的载流能力差距更大，Si IGBT 模块载流能力超过 SiC MOSFET 模块载流能力的 5 倍以上。

另一方面，SiC MOSFET 长时间运行的可靠性仍要差于 Si IGBT，这限制了该功率器件在高可靠电能变换领域中的应用。相比 Si IGBT，SiC MOSFET 主要体现在短路能力和栅氧在高温强电场下的可靠性不足。

此外，SiC MOSFET 的开关速度更快，这意味着该功率器件将在开关过程中产生更高的 dv/dt 和 di/dt ，从而产生更严重的传导 EMI 噪声而威胁变换器性能及可靠性。因此，采用 SiC MOSFET 将对变换器 EMI 噪声的抑制提出更高要求。

而最重要的原因在于成本问题，受高昂 SiC 材料成本、复杂器件制作工艺以及较低产品良品率等因素的影响，SiC MOSFET 的成本与同类 Si IGBT 分立器件相比仍然有较大差距，这阻碍了 SiC 器件大规模的产业化推广。碳化硅商业化的关键在于下游对碳化硅器件成本和碳化硅器件优越性能带来的综合成本下降间的平衡。虽然碳化硅衬底和器件工艺逐渐成熟，衬底和器件的价格呈一定下降趋势，但是目前碳化硅功率器件的价格仍数倍于硅基器件，SiC MOSFET 分立器件的单价是 Si IGBT 分立器件成本的 3~15 倍，且随着载流能力的提升，价格差距也越来越大，下游应用领域仍需平衡碳化硅器件的高价格与碳化硅器件优越性能带来的综合成本下降间的关系，短期内一定程度上限制了碳化硅器件在功率器件领域的渗透率，使得碳化硅材料即使在部分相对优势领域的大规模应用仍存较大挑战。但是，在 SiC 器件成本难以对 Si 实现平价化的前提下，我们认为碳化硅依然存在商业价值，其核心原因在于以半导体成本的提升换取系统效率的提升，最终可以带来系统成本降低，或帮助下游客户在产品的全生命周期内实现更大的经济利益，在碳化硅成本逐步下降的同时，下游市场也有望迎来较大规模成长。

表 8: SiC MOSFET 和 Si IGBT 成本对比

型号	器件类型	额定电压	额定电流 (25°C)	单价 (元)
C2M0080120D	SiC MOSFET	1200V	31.6A	132.42
C3M0032120K	SiC MOSFET	1200V	63A	415.30
C3M0016120K	SiC MOSFET	1200V	115A	560.76
SCT3060AL	SiC MOSFET	650V	39A	89.45
SCT3030ALHR	SiC MOSFET	650V	70A	106.21
SCT3017ALHR	SiC MOSFET	650V	118A	854.13
IKW15N120BH6	Si IGBT	1200V	30A	39.32
IKW40T120	Si IGBT	1200V	75A	72.44
IKQ75N120CS6	Si IGBT	1200V	150A	119.39
IKP28N65ES5	Si IGBT	650V	38A	26.30
AIGW40N65H5	Si IGBT	650V	74A	48.13
IGZ75N65H5	Si IGBT	650V	119A	52.43

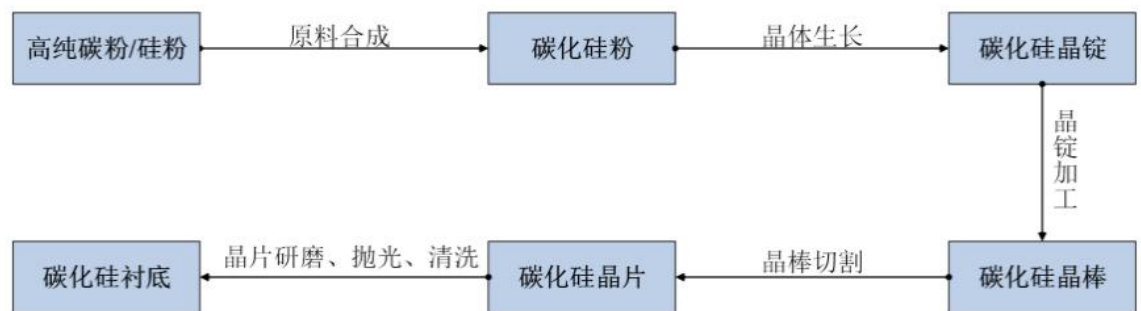
资料来源：《Si IGBT/SiC MOSFET 混合器件的开关控制策略及其应用研究》（彭子舜），华宝证券研究创新部

4.2. 关注产业降本节奏，衬底降本快于器件

从产业链成本构成来看，衬底降本快于器件。碳化硅的成本直接决定了渗透率，影响市场规模，因此需要密切关注产业降本节奏。衬底占碳化硅成本的比例高达 47%，其次是外延，再其次是后道等环节，我们判断衬底降本快于器件。衬底的降本面对诸多技术难点，包括衬底生长“慢”、加工“难”、缺陷密度去除工艺壁垒“高”。碳化硅器件降本的技术路径，从市场上的动态来看，主要包括扩大晶圆尺寸、改进碳化硅长晶及加工工艺以提高良率。

碳化硅衬底制造工艺复杂技术壁垒高，生长速度“慢”。碳化硅衬底的制造对温度和压力的控制要求极高，碳化硅衬底的生长过程在 2300°C 以上高温和接近真空的低压密闭高温石墨坩埚中进行（硅材料只需要 1600 摄氏度），无法即使观察晶体的生长状况，随着尺寸扩大，其生长难度呈几何式增长，温度和压力的控制稍有失误，就有可能导致碳化硅材料的微管密度、错位密度、电阻率、翘曲度、表面粗糙度等一系列参数出现差错，产生异质晶型，影响良率；长晶速度非常慢，传统的硅材料只需 3 天就可以长成一根晶棒，而碳化硅晶棒需要 7 天，这就导致碳化硅生产效率天然地更低，产出非常受限；此外，晶型要求高、良率低，只有少数几种晶体结构的单晶型碳化硅才可作为半导体材料。

图 25：碳化硅衬底生产流程



资料来源：天岳先进招股说明书，华宝证券研究创新部

此外，碳化硅衬底加工“难”，晶棒切割、研磨抛光等后端工艺也面临较大困难。碳化硅性质偏硬、脆，断裂韧性较低，切割、研磨、抛光技术难度大，工艺水平的提高需要长期的研发积累，也需要上游设备商特殊设备的配套开发。目前碳化硅切片加工技术主要包括固结、游离磨料切片、激光切割、冷分离和电火花切片；研磨抛光时容易开裂或留下损伤，这要求在切割衬底的时候需要预留更多的研磨抛损耗，这进一步降低了晶锭的出片率，同时也影响了整体的生产良率。全球碳化硅制造加工技术和产业尚未成熟，在一定程度上限制了碳化硅器件市场的发展，要充分实现碳化硅衬底的优异性能，开发提高碳化硅晶片加工技术是关键所在。

表 9：不同切割工艺的差异

切割工艺	磨料切片	激光切割	冷分离	电火花
材料去除原理	磨料研磨	脉冲激光改性	激光改性	脉冲火花放电蚀除
切缝宽度/um	180-250	<10	<10	<100
总厚度变化/um	<30	<25	<1	<25

资料来源：《碳化硅单晶衬底加工技术现状及发展趋势》（张玺等，2021），华宝证券研究创新部

碳化硅缺陷密度去除工艺壁垒“高”。碳化硅单晶生长热场存在温度梯度，导致晶体生长

过程中存在原生内应力及由此诱生的位错、层错等缺陷，其可靠性备受关注。在密闭高温腔体内进行原子有序排列并完成晶体生长、同时控制微管密度、位错密度、电阻率、翘曲度、表面粗糙度等参数指标是复杂的系统工程，涉及一系列高难度工艺调控，工艺壁垒高。

正是因为这些技术难点造成了成本问题，成为碳化硅器件规模化应用的难题。目前，降本的主要途径包括扩大晶圆尺寸、改进碳化硅长晶及加工工艺以提高良率等。

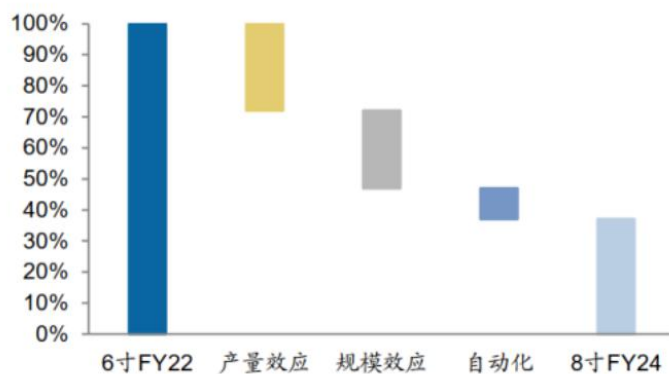
扩大晶圆尺寸是降低成本的有效手段，6英寸是目前主流，8英寸是未来方向。衬底尺寸越大，单位衬底可制造的芯片数量越多，单位芯片成本越低；衬底的尺寸越大，边缘的浪费就越小，有利于进一步降低芯片的成本。根据 Wolfspeed，从6寸转向8寸晶圆，碳化硅芯片数量（32mm²）有望从448颗增加到845颗，在良率为80%、60%水平下，有效产出颗数分别为358、507颗，若假设单车使用同样规格的芯片54颗（48颗主逆+6颗OBC），则一片晶圆理论可供6.6、9.5台车，效率得到显著提升。根据GTAT公司的预估，相对于6寸晶圆平台，预计8寸衬底的引入将使整体碳化硅器件成本降低20-35%。而且，6寸SiC晶体厚度为350微米，而最初投放市场的8寸SiC衬底厚度为500微米。尽管晶体成本会略微上涨，但是由于更厚的晶体可以切出更多的衬底片，预计也有望进一步降低器件生产成本。目前导电型碳化硅衬底以6英寸为主，8英寸衬底开始发展；半绝缘碳化硅衬底以4英寸为主，目前逐渐向6英寸衬底发展。随着尺寸的增大，碳化硅单晶扩径技术的要求越来越高。扩径技术需要综合考虑热场设计、扩径结构设计、晶体制备工艺设计等多方面的技术控制要素，最终实现晶体迭代扩径生长，从而获得直径达标的高质量籽晶，继而实现后续大尺寸籽晶的连续生长。这也是国产厂商需要着重突破的技术难点。

图 26：8 英寸衬底将提高晶圆利用率



资料来源：Wolfspeed，华宝证券研究创新部

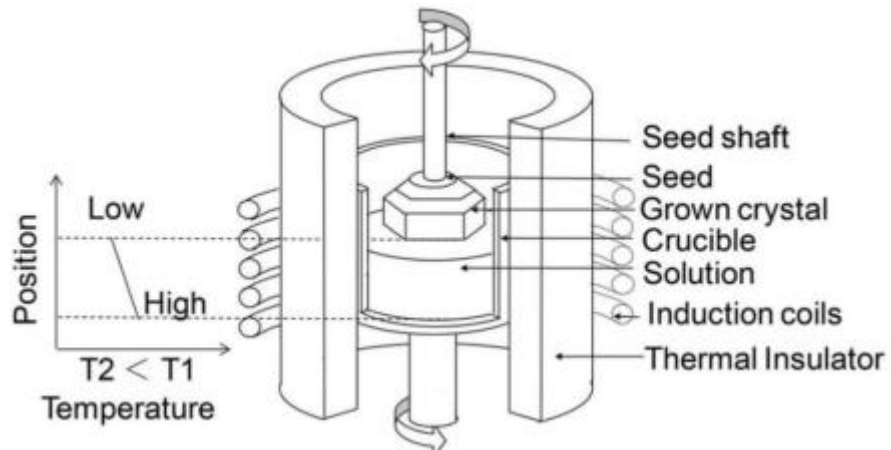
图 27：8 英寸衬底成本将会显著降低



资料来源：Wolfspeed，华宝证券研究创新部

改进碳化硅长晶及加工工艺以提高良率等也是降低成本的有效方式。目前国内6英寸良率约40-50%，海外约60-70%，较低的良率使得有效产能减少从而成本增加。长晶慢、质量低、大尺寸难度大、加工工艺不足带来的损耗等方面都是造成良率降低的因素，目前头部厂商正积极通过技术改进来提升良率，如2021年8月5日，住友官网提到了他们利用一种所谓的MPZ技术，生长了高质量、低成本的SiC衬底和SiC外延片，消除了表面缺陷和基面位错(BPD)，无缺陷区(DFA)达到99%，相比PVT法，SiC长晶速度提高了5倍左右，相比普通的LPE法速度提升了200倍。但目前国内厂商的良率水平与海外厂商还存在一定差距。

图 28：住友 MPZ（多参数和区域控制）溶液生长技术



资料来源：住友官网，华宝证券研究创新部

4.3. 2023 年国内碳化硅产业回顾：繁荣与挑战并存

2023 年，国内碳化硅产业经历了快速发展的一年。

从需求情况来看，汽车与光伏应用增长，市场供不应求。从 2021 年-2022 年起，碳化硅器件便进入供应短缺状态，至今依然没有得到完全缓解。其中，汽车对碳化硅器件应用量的提升，成为拉动行业增长的主要因素。根据 EV 芯闻，截至 2023 年上半年，全球已有 40 款碳化硅车型进入量产交付，上半年全球碳化硅车型销量超过 120 万辆。从 Yole Intelligence 发布的 2023 年版《功率碳化硅报告》来看，碳化硅行业近年实现了创纪录的增长，预计到 2028 年，全球功率碳化硅器件市场将增长至近 90 亿美元。其中，新能源汽车可以称得上当前碳化硅的杀手级应用。在上文（见 3.2.1 章节）中我们也对碳化硅未来在电车上的市场需求进行了展望。碳化硅器在光伏市场应用值得关注，随着碳化硅在光伏领域应用逐渐成熟，碳化硅器件可有效提高光伏发电转换效率，光伏逆变器的转换效率可从硅基的 96% 提升至 SiC MOSFET 的 99% 以上，能量损耗降低 50%，设备循环寿命提升 50 倍。这使得光伏逆变器拥有更大替换碳化硅的动力。伴随渗透率的进一步提升，未来的碳化硅有望逐渐替代硅基 IGBT 在光伏逆变器上的应用。

从供给情况来看，大厂纷纷扩产，国内差距正在缩短。随着需求的增长，碳化硅大厂纷纷加速产业布局，三菱、博世、意法半导体、安森美等国际巨头纷纷扩产。国内企业也在积极研发和探索碳化硅器件的产业化，已经形成相对完整的碳化硅产业链，部分产业节点有所突破。碳化硅衬底方面，天岳先进在半绝缘碳化硅衬底的市场占有率连续多年保持全球前三；天科合达在国内率先成功研制 6 英寸碳化硅衬底，并已实现规模化生产和器件销售。碳化硅外延片方面，厦门瀚天天成与东莞天域可生产 6 英寸碳化硅外延片。碳化硅器件方面，泰科天润、瀚薪、扬杰科技、中电 55 所、中电 13 所、科能芯、中车时代电气等形成一定实力，正在缩短与国外差距。值得一提的是，三安光电和天岳先进、天科合达等获得海外芯片巨头的认可，签下碳化硅衬底长期供货协议；意法半导体还与三安合资建设碳化硅器件工厂，并由三安配套供应碳化硅衬底。行业产能快速扩张，2024 年以来国内碳化硅衬底产能逐步落地，多家厂商的扩产项目都在 2023 年实现量产或是在产能爬坡过程中。

表 10：国内碳化硅企业扩产进展

公司	产业布局	工厂分布	现有产能（截至 2023 年 12 月）	截至 2022 年 12 月产能	2023 年产能进展与规划
----	------	------	----------------------	------------------	---------------

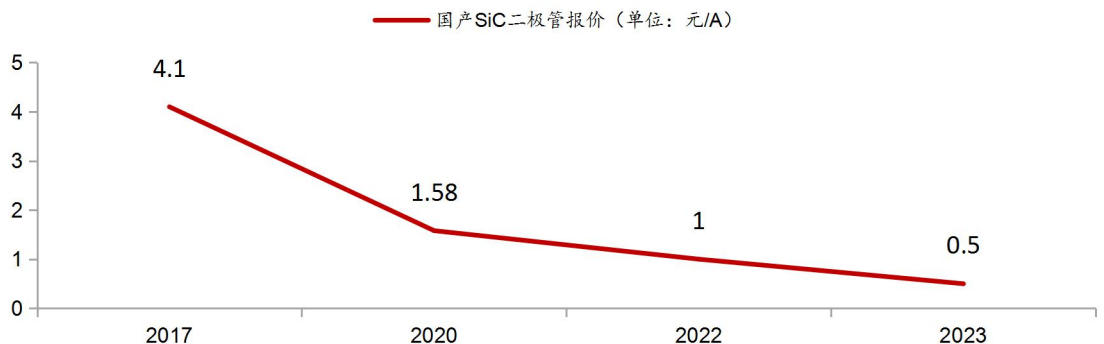
公司	产业布局	工厂分布	现有产能（截至2023年12月）	截至2022年12月产能	2023年产能进展与规划
天岳先进	衬底、外延	山东济南、山东济宁、上海临港	估算约25万片/年，6英寸导电型为主	约6.7万片/年，4-6英寸半绝缘型为主	济南工厂主要产能成功从半绝缘型调整为导电型产品，2023年营收增长主要来源于导电型衬底。上海临港工厂投产进入产能爬坡阶段，第一阶段年30万片导电型衬底的产能产量将提前实现（此前计划为2026年）。
天科合达	单晶炉制造、衬底、外延	北京大兴、江苏徐州、新疆石河子、深圳	估算约29万片/年，6英寸导电型为主	约12-15万片/年，6英寸占比2/3，导电型为主	徐州工厂二期扩产开工，预计2024年8月投产实现年产23万片碳化硅衬底晶片，三期100万片外延片项目布局中。北京工厂二期同在规划中。预计2025年底，公司6英寸有效年产能达到90万片。
晶盛机电	单晶炉制造、衬底、外延设备	宁夏、内蒙古	1万片/月，6英寸	仍在试验线阶段，产品通过部分客户验证	启动年产25万片6英寸、5万片8英寸碳化硅衬底片项目；宁夏银川项目设计产能为年产40万片6英寸及以上尺寸的导电型和半绝缘型碳化硅衬底晶片；8英寸实现批量生产
三安光电	衬底、外延、芯片、封装	湖南	1.8万片-2万片/月，6英寸	月产能6000片（2022年半年报）	与意法半导体成立合资公司，规划达产后碳化硅功率品圆周产能1万片，成立配套全资子公司生产8英寸衬底，规划产能48万片/年；公司碳化硅垂直整合业务平台配套产能规划36万片/年
烁科晶体	单晶炉制造、衬底	山西	30万片/年，其中25万片导电型、5万片高纯半绝缘型	月产8000片，4英寸半绝缘为主；6英寸小批量供应、8英寸导电型小批量生产	扩产项目开工建设，达产后形成年产150万片N型碳化硅单晶晶片，10万片高纯半绝缘型碳化硅单晶晶片的产能。
露笑科技	衬底、外延	合肥	预估月产1万-1.5万片，6英寸导电型	月产能5000片（2022年年底）6英寸导电型	一期项目规划年产24万片6英寸导电型碳化硅衬底。2023年内没有详细的碳化硅业务进展披露。
东尼电子	衬底	浙江湖州	预估年产能小于10万片	月产能约4000-6000（6英寸）	公司预计2024年交付30万片、2025年交付50万片。按照订单合同测算，2023年5-12月公司至少产出13.5万片碳化硅衬底，但半年报

公司	产业布局	工厂分布	现有产能（截至2023年12月）	截至2022年12月产能	2023年产能进展与规划
					中透露产能爬坡存在不确定性，有可能无法如期交付；公司8英寸衬底已有小批量订单。
河北同光	衬底	河北保定	约15万片/年	约10万片/年	公司最新内部规划2024年产能30万片2025年实现50万-60万片；8英寸导电型碳化硅晶体样品已经出炉，2023年底小批量生产

资料来源：电子发烧友，华宝证券研究创新部

从降本进展来看，下游二极管价格下降倒逼衬底降本节奏加快。目前，国产碳化硅二极管已经能够稳定交付，整体产业链也较为完善。根据碳化硅芯观察调研，国内 SiC SBD 产品 2017 年的价格在 4.1 元/A 左右，2020 年下降到了 1.58 元/A，2023 年上半年国内厂家普遍报价在 0.5-0.6 元/A。同时二极管的主要市场在光伏、储能、直流充电桩模块、氢燃料电池 DC-DC 模块和 UPS 电源等行业，对成本十分敏感，目前，在光伏 MPPT 电路中，1200V SiC 二极管（20A、30A）已经得到了广泛应用，随着组件电流的不断提升，40A、50A 等更大电流的 SiC 二极管需求也会越来越多，对降本的要求会进一步提高。

图 29：国产 SiC 二极管报价（单位：元/A）



资料来源：碳化硅芯观察，华宝证券研究创新部

从产业情况来看，随着碳化硅产业热潮的发展，领域内并购案也在增加。2023 年 11 月，罗姆宣布完成对 Solar Frontier 原国富工厂的收购；安森美在 2021 年以 4.15 亿收购 GTAT；SK 在 2020 年以 4.5 亿美元收购杜邦碳化硅晶圆事业部；ST 在 2019 年以 1.375 亿美元收购 Norstel AB。相较之下，国内的碳化硅产业起步较晚，就并购角度而言，目前国内大规模碳化硅并购案还不多。

4.4. 2024 年碳化硅产业化展望：高压快充与降本加速的双重驱动

2024 年，我们认为碳化硅产业化进展会随着高压快充趋势及碳化硅产业链降本而加速。结合上文中的分析，高压快充是电车的大势所趋，未来会逐渐下沉到更低区间的价格带，高压

快充背景下，电车对碳化硅需求的迫切性预计对应进一步提高。另一方面，随着产能的逐步释放、8英寸量产的不断成熟、碳化硅长晶及加工工艺的不断改进、进而碳化硅行业良率的提升，尤其是在国产厂商纷纷入局后，可能会进一步加速碳化硅的降本。我们认为2024年碳化硅产业化进展会随着高压快充趋势及碳化硅产业链降本而加速，关注碳化硅产业链降本进展、800V新车放量进展、国内上游材料衬底/外延厂商出货情况、国内下游器件/模块厂商上车验证进展。

在下篇碳化硅报告中，我们将会基于本文对产业趋势的判断，深入分析产业链各个环节的国内外企业发展进展、竞争格局及未来演进趋势。

5. 风险提示

高压快充渗透率不及预期；碳化硅在车端、桩端渗透不及预期；国产化进度不及预期；扩产进程不及预期；价格战风险；此外文中提及的上市公司旨在说明行业发展情况，不构成推荐覆盖。

分析师承诺

本人承诺，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告，本报告清晰准确地反映本人的研究观点，结论不受任何第三方的授意或影响。本人不曾因，不因，也将不会因本报告中的具体建议或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

公司和行业评级标准

★ 公司评级

报告发布日后的 6-12 个月内，公司股价相对同期市场基准（沪深 300 指数）的表现为基准：

买入：	相对超出市场表现 15% 以上；
增持：	相对超出市场表现 5% 至 15%；
中性：	相对市场表现在 -5% 至 5% 之间；
卖出：	相对弱于市场表现 5% 以上。

★ 行业评级

报告发布日后的 6-12 个月内，行业指数相对同期市场基准（沪深 300 指数）的表现为基准：

推荐：	行业基本面向好，行业指数将跑赢基准指数；
中性：	行业基本面稳定，行业指数跟随基准指数；
回避：	行业基本面向淡，行业指数将跑输基准指数。

风险提示及免责声明

- ★ 华宝证券股份有限公司具有证券投资咨询业务资格。
- ★ 市场有风险，投资须谨慎。
- ★ 本报告所载的信息均来源于已公开信息，但本公司对这些信息的准确性及完整性不作任何保证。
- ★ 本报告所载的任何建议、意见及推测仅反映本公司于本报告发布当日的独立判断。本公司不保证本报告所载的信息于本报告发布后不会发生任何更新，也不保证本公司做出的任何建议、意见及推测不会发生变化。
- ★ 在任何情况下，本报告所载的信息或所做出的任何建议、意见及推测并不构成所述证券买卖的出价或询价，也不构成对所述金融产品、产品发行或管理人作出任何形式的保证。在任何情况下，本公司不就本报告中的任何内容对任何投资做出任何形式的承诺或担保。投资者应自行决策，自担投资风险。
- ★ 本公司秉承公平原则对待投资者，但不排除本报告被他人非法转载、不当宣传、片面解读的可能，请投资者审慎识别、谨防上当受骗。
- ★ 本报告版权归本公司所有。未经本公司事先书面授权，任何组织或个人不得对本报告进行任何形式的发布、转载、复制。如合法引用、刊发，须注明本公司出处，且不得对本报告进行有悖原意的删节和修改。
- ★ 本报告对基金产品的研究分析不应被视为对所述基金产品的评价结果，本报告对所述基金产品的客观数据展示不应被视为对其排名打分的依据。任何个人或机构不得将我方基金产品研究成果作为基金产品评价结果予以公开宣传或不当引用。

适当性申明

- ★ 根据证券投资者适当性管理有关法规，该研究报告仅适合专业机构投资者及与我司签订咨询服务协议的普通投资者，若您为非专业投资者及未与我司签订咨询服务协议的投资者，请勿阅读、转载本报告。