

2024年01月12日

证券研究报告 | 产业专题报告

# 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

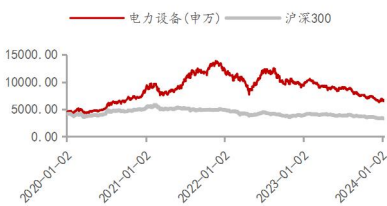
电话：021-20321074

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

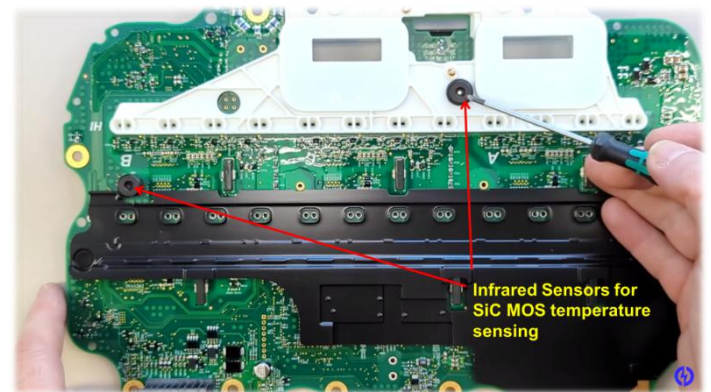
纵观半导体材料发展历史，碳化硅并不是新鲜概念。碳化硅作为材料已有百年历史，商业化也已超过 30 多年。1824 年，瑞典科学家（Berzelius）在人工合成金刚石的实验中意外发现了碳化硅这一物质，其硬度比钻石小但光彩更亮；1893 年，科学家亨利·莫桑在陨石中发现了天然的碳化硅，这种矿物被命名为莫桑石，并因此获得了 1904 年的诺贝尔化学奖；1955 年，LELY 提出生长高品质碳化硅的方法，从此将碳化硅作为重要的电子材料；1987 年，科锐第一个实现了碳化硅的商用，制造了出世界上第一块商用碳化硅衬底，并把它应用在 LED 领域；2001 年，英飞凌和科锐分别推出首款小型碳化硅肖特基二极管；2011 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: $\epsilon_s$	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	$\Delta$	是否可控制导电/半绝缘
热氧化层	O	O	X	X	

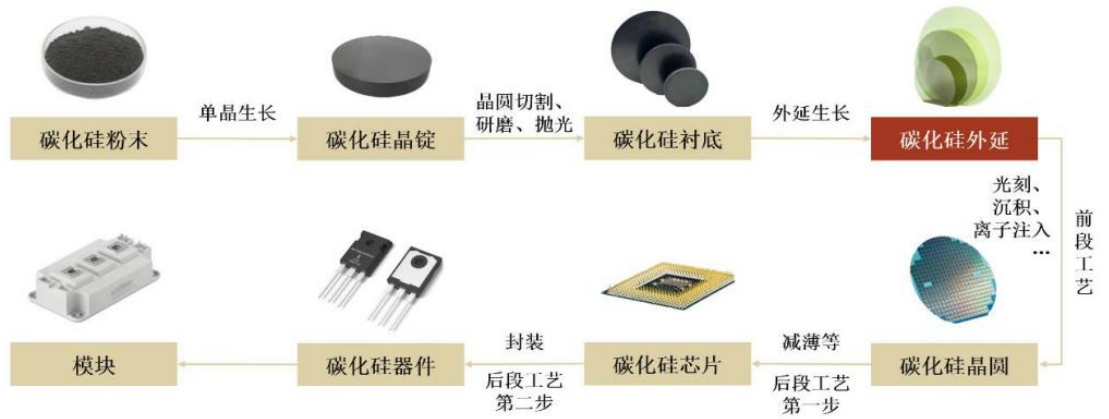
资料来源：Rohm，瀚天天成招股说明书，华宝证券研究创新部

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。

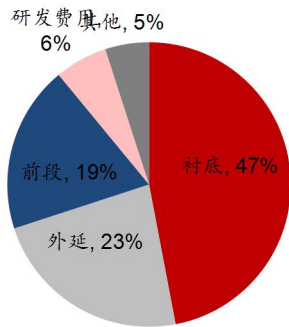
图 3：碳化硅产业链



资料来源：瀚天天成招股说明书，华宝证券研究创新部

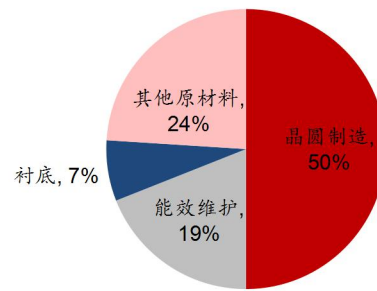
碳化硅产业链附加值向上游集中，衬底和外延的成本占比最高。根据 CASA 整理的数据，产业链中，碳化硅衬底和外延的成本分别占整个器件成本的 47% 和 23%，为产业链中价值量最大的两个环节，相比硅基器件、价值量显著倒挂。

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

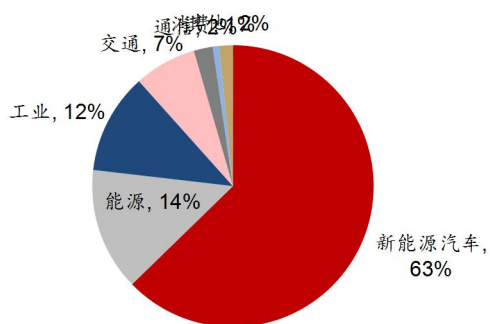


资料来源：CASA《第三代半导体产业发展报告 2021》，华宝证券研究创新部

图 6：衬底和外延是产业链价值量最大的两个环节

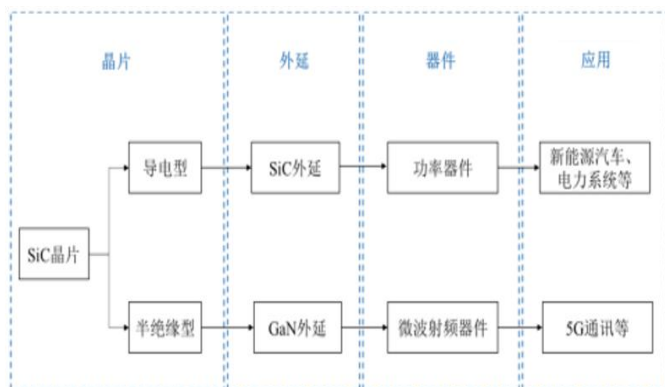


图 7：2021 年碳化硅下游市场应用构成



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%。

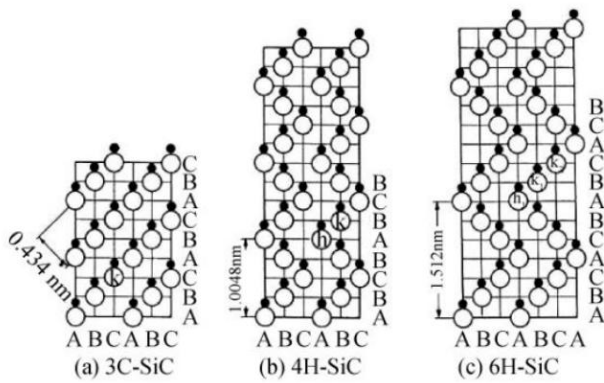
## 2.2. 碳化硅外延是碳化硅器件必不可少的环节，对器件性能影响极大

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

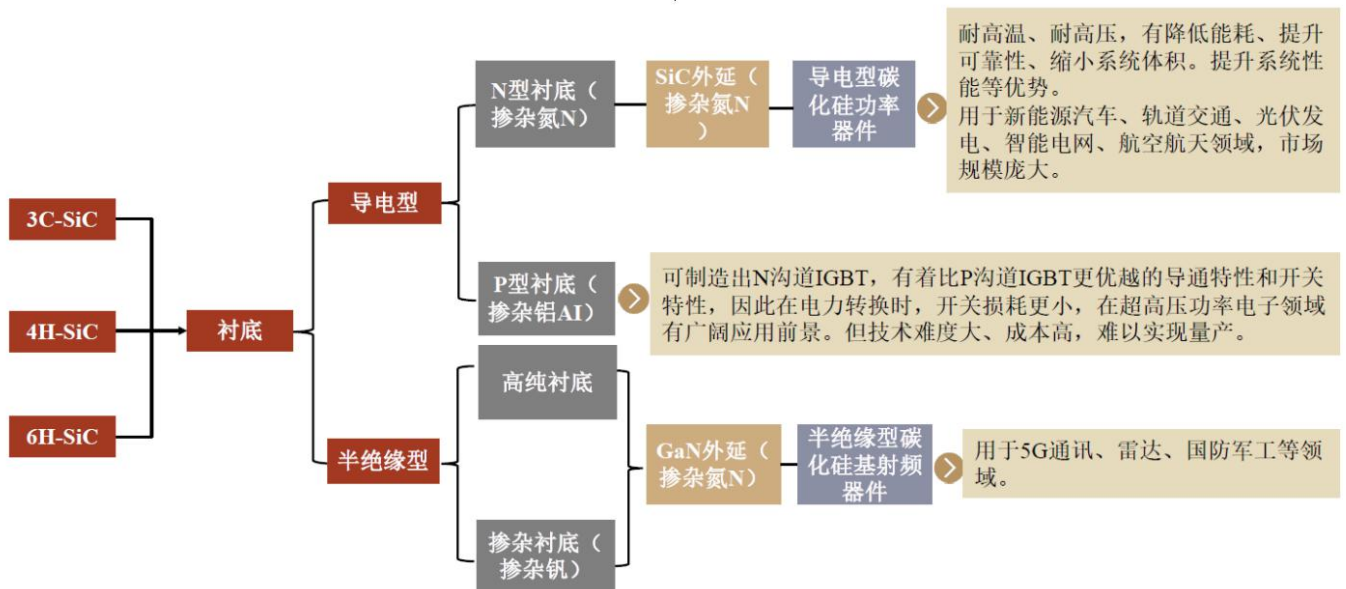
图 10：导电型碳化硅外延示意图



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

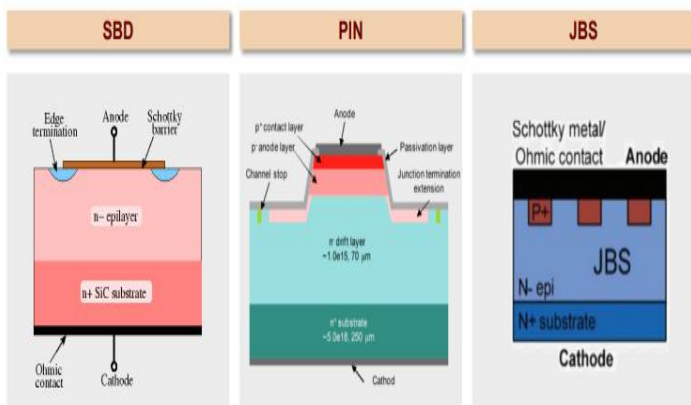
与硅基器件类似，碳化硅器件主要分为二极管类器件、晶体管类器件两大类。其中二极管及晶体管类的 MOSFET 器件应用较为广泛。

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。

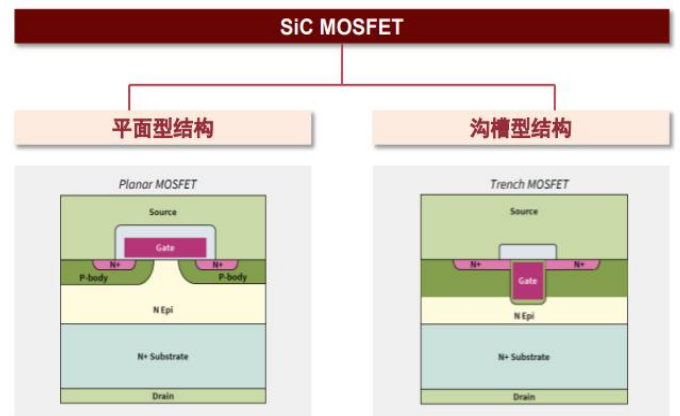
晶体管方面：SiC MOSFET 结构与硅基 MOSFET 产品类似，主要分为平面型和沟槽型两类，并拥有高耐压、开关损耗低、导通损耗低、体二极管续流特性好、温度稳定性高等特点，其高电压下依然能保持高速度、高效率的特点使其向原有耐压较高，但频率特性较差的 Si-IGBT 产品发起竞争，并在未来有望对 Si IGBT 形成全面替代。目前，市场中相对成熟的仍然是在硅基领域较为落后的平面型 (DMOS) 结构，其主要原因是平面型器件工艺简单、单元一致性较好，而沟槽结构单元一致性差，且垂直型 SiC MOSFET 内部电场强度较大，容易发生局部击穿，可靠性不足的问题抑制了其短期内的大规模应用。但是，我们看到沟槽型 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 微硕官网，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。

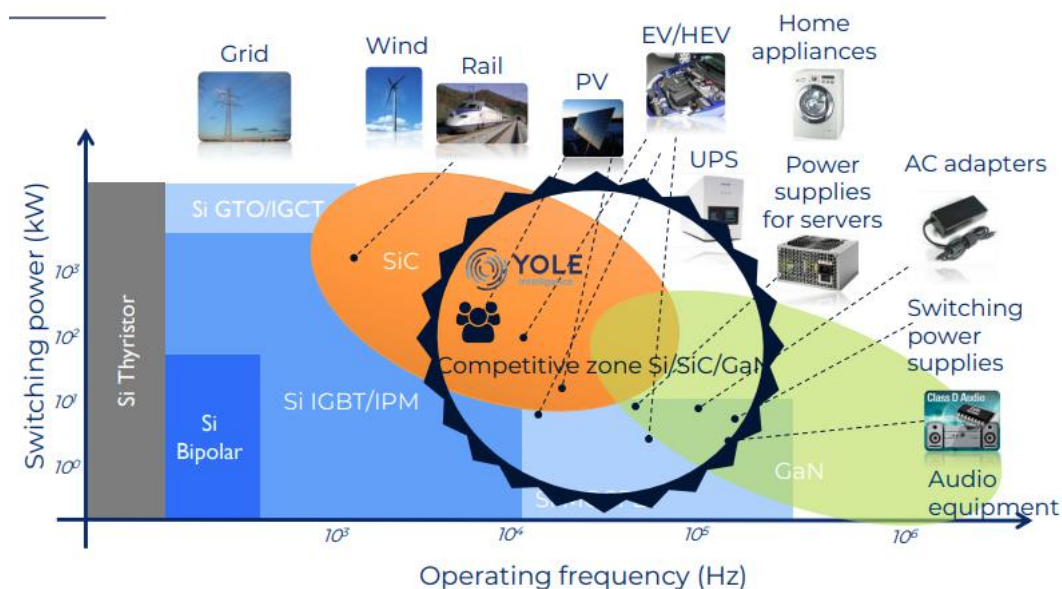
根据 Yole 预测，随着通信基础建设和军事应用的需求发展，全球氮化镓射频器件市场规模将持续增长，预计从 2022 年的 1.8 亿美元增长至 2028 年的 22.9 亿美元，期间年均复合

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. 半导电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。

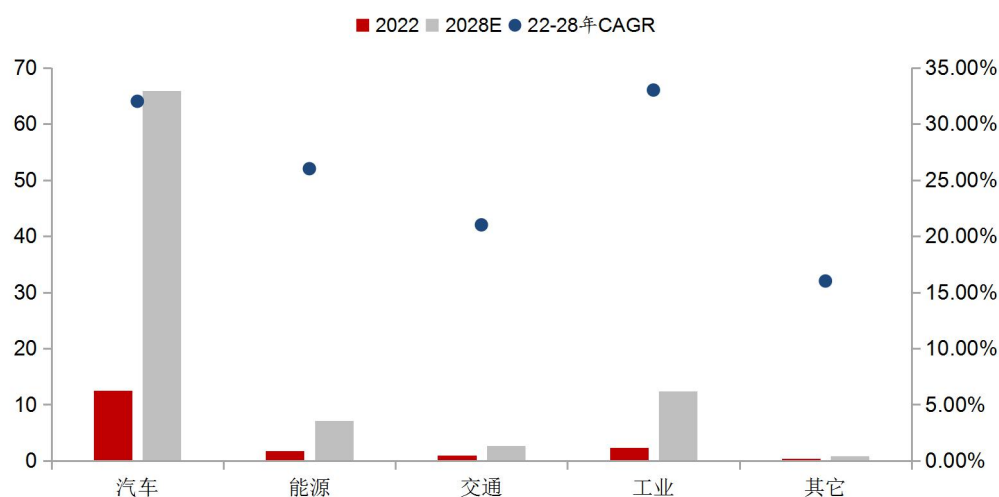
图 16：中压范围是碳化硅的重点发展方向



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。

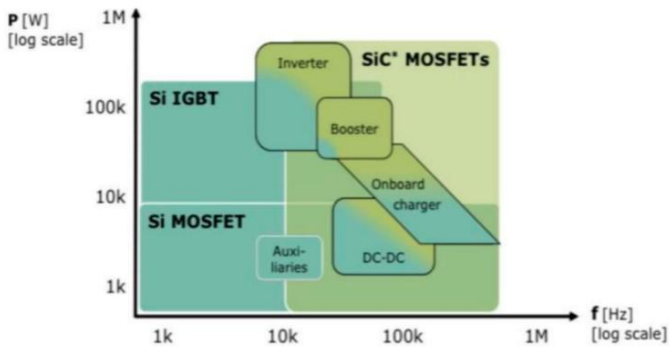
表 2：碳化硅器件相比硅基器件性能优越

	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

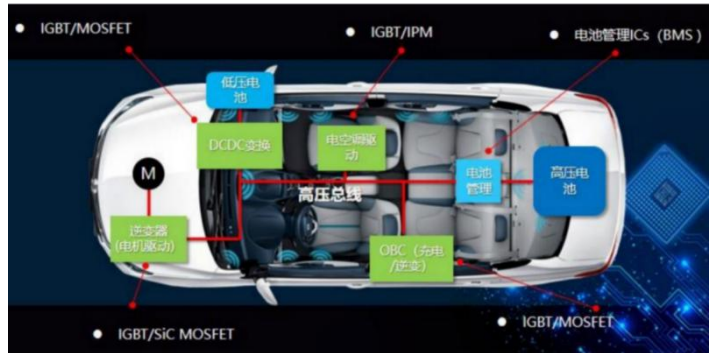
碳化硅在主驱、OBC、DC/DC 系统、充电桩中均已开启对硅基 IGBT 或超级结器件的替代。不同子系统的输出功率、工作频率需求有一定差别，主驱逆变器为大功率低频场景（功率 100KW 以上，工频 50KHz 以下）；车载充电机 OBC 和 DC/DC 系统为小功率高频场景（车载充电机 OBC：功率 3.3KW-22KW，工频 100KHz-300KHz）、DC/DC：功率 3KW，工频 100KHz 以上）；充电桩为中低功率中高频场景（功率 22KW-100KW，工频 50KHz-100KHz）。

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%。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/565212041222011041>