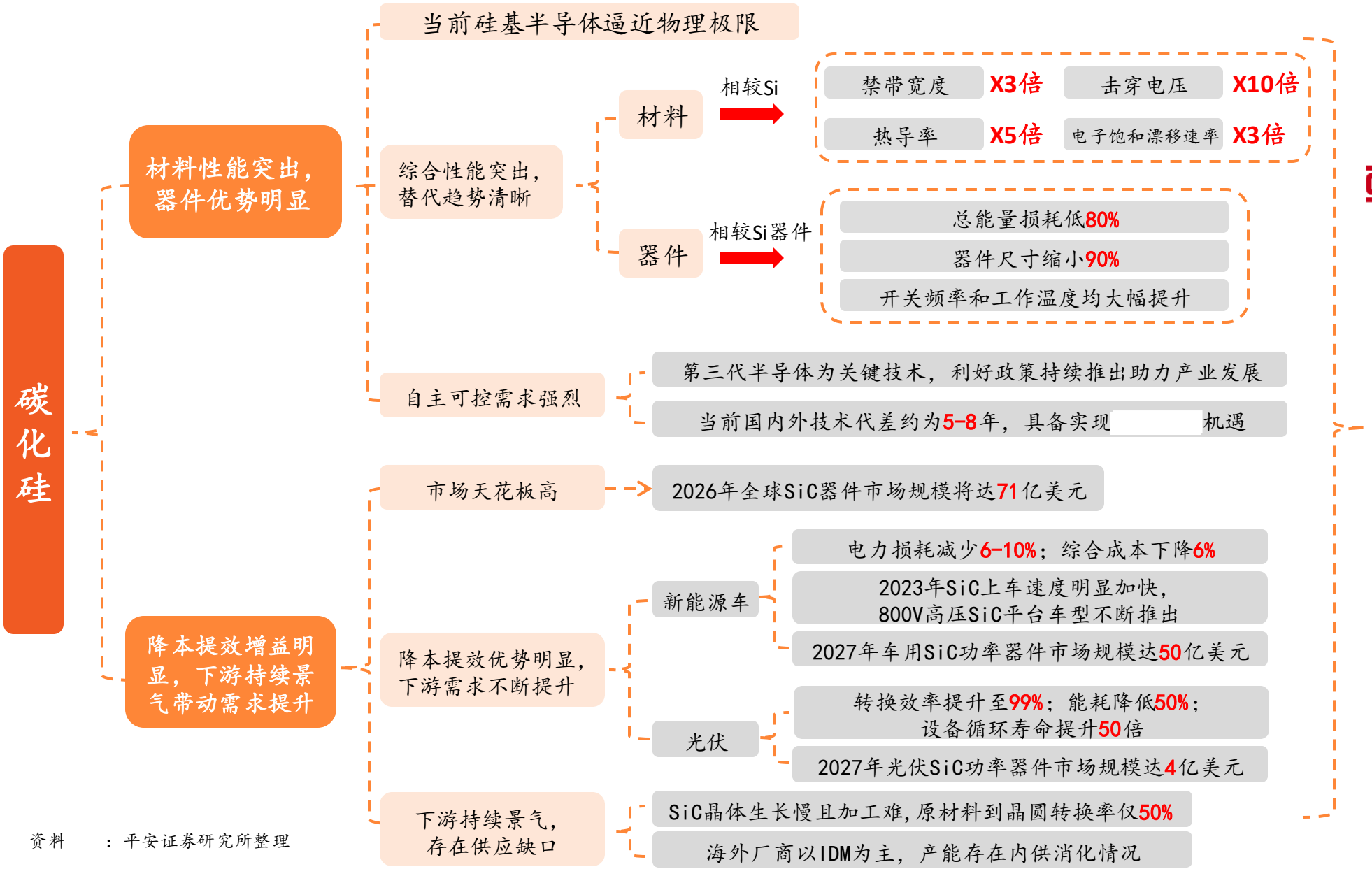
证券研究报告

半导体行业系列专题（二）之碳化硅：衬底产能持续扩充，关注渗透加速下的国产化机会

2024年1月10日

投资逻辑图



资料 ：平安证券研究所整理

投资要点

- **材料性能突出，器件优势明显。**当前Si半导体已逼近物理极限，以SiC为代表的第三代半导体成为后摩尔时代半导体行业发展的重点方向之一，SiC材料拥有高击穿电场、高导热率以及高饱和电子漂移速度等特性，制备的器件相较于Si产品能够降低80%损耗的同时将器件尺寸缩小90%，在新能源汽车、光伏以及轨道交通等领域具备广阔的替代空间。

- **SiC为半导体重要新材料，产业链自主可控需求强烈。**当前海外对华科技限制持续加码，产业链自主可控刻不容缓，SiC作为半导体领域的重要新材料，国内外SiC技术代差约为5-8年，相较硅基半导体，具备实现　　机遇，国家重视程度将不断上升，有望持续推出利好政策助力国内SiC行业发展，国内SiC产业链有望迎来快速发展良机。

- **SiC晶体生长慢且加工难，提升良率和产能是控制成本的关键。**SiC器件成本是Si器件的3倍左右，是制约SiC行业快速发展的核心因素之一，造成该问题的主要原因在于SiC长晶速度缓慢且加工难度大，从原材料到晶圆转换率仅为50%。未来在技术进步和规模经济共同作用下，产线将向8英寸转移，衬底尺寸扩径将助力产业链降本，预计衬底价格将以每年8%的速度下降，有望进一步加速SiC发展渗透。

- **降本提效增益明显，下游持续景气带动需求提升。**SiC器件能够为新能源汽车以及光伏等关键下游带来明显的效率提升以及综合成本优化，随着SiC渗透加速，Yole预计2026年全球SiC器件市场规模将达71亿美元，其中，新能源汽车作为SiC器件增长的主要驱动力，近些年整体销量呈现快速增长态势，将不断带动SiC器件需求，预计2027年全球车用SiC功率器件市场规模将达50亿美元。

- **投资建议：**在SiC头部厂商持续扩产背景下，SiC衬底、器件供应能力不断加强，规模效应带动价格持续下探，SiC渗透率持续提升，尤其是在新能源汽车领域，SiC上车速度明显加快，预计2024年市场将会推出更多搭载SiC器件的车型，将进一步带动SiC需求增长，叠加当前　　主旋律持续深化，国家对重点领域关键材料重视程度持续提升，国产SiC厂商有望迎来发展良机，建议关注技术底蕴扎实且产能扩充顺利的SiC产业链公司天岳先进、时代电气、斯达半导、新洁能、晶盛机电、晶升股份、三安光电。

- **风险提示：**1）碳化硅上车进度不及预期风险；2）产业链各环节　　进度不及预期风险；3）衬底价格下降不及预期风险；4）宏观经济下行风险。



CONTENT
目录

一、降本提效增益明显，下游景气带动需求提升

二、晶体生长慢且加工难，提高良率和产能是关键

三、行业重点公司

四、投资建议和风险提示

1.1 硅基半导体逼近物理极限，第三代半导体性能优势突出

- 第三代半导体是指化合物半导体，包括碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）、氧化锌（ZnO）、氧化铝（Al_2O_3）以及金刚石等宽禁带半导体材料（导带与禁带间能隙差Eg>2.3eV）。
- **第三代半导体综合性能优势突出。**当前硅基半导体在架构、可靠性、综合性能的提升方面都已经逼近物理极限，摩尔定律演进逐步放缓，相较第一代半导体，以碳化硅和氮化镓为代表的第三代半导体从材料端至器件端的性能优势突出，具备高频、高效、高功率、耐高压、耐高温等特点，是未来半导体产业发展的重要方向。

化合物半导体与元素半导体比较

	元素半导体	化合物半导体	
	第一代半导体	第二代半导体	第三代半导体
主要材料	硅、锗	砷化镓、锑化铟	碳化硅、氮化镓
技术标志	大尺寸晶圆、小芯片制程	提升通信速度、存储密度	高击穿电场、高功率、高频
主要产品	大规模集成电路	光通信、光显示、光存储	高频高功率电子器件

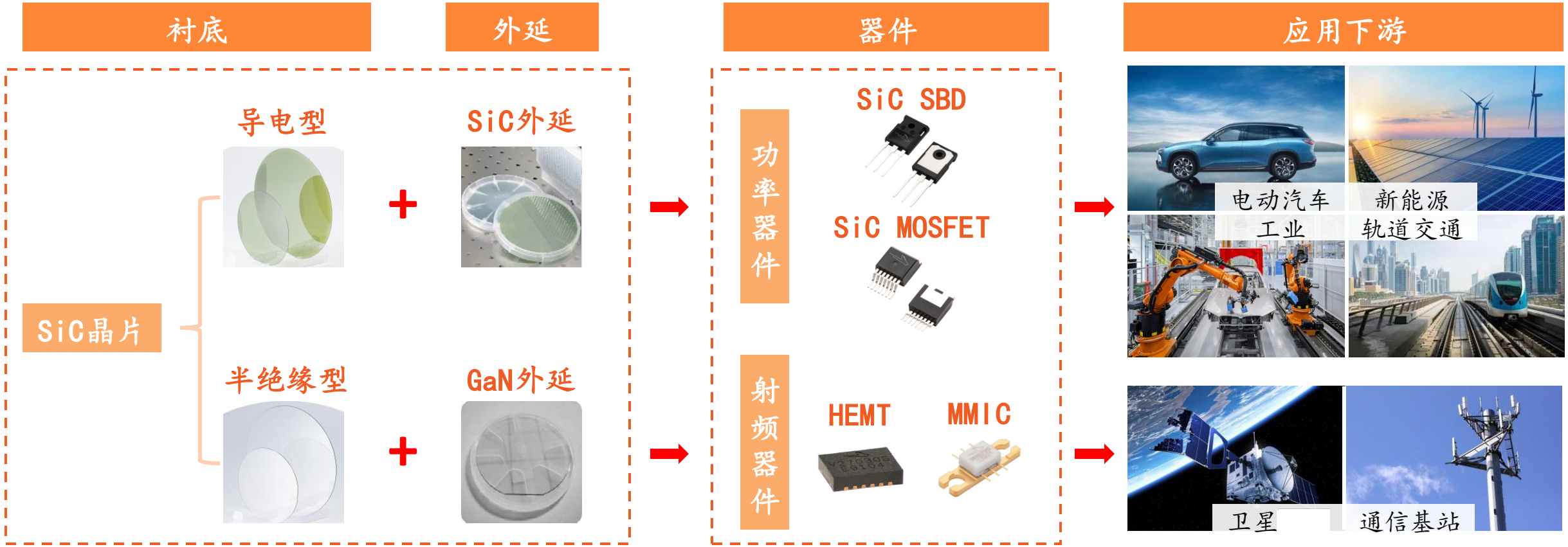
碳化硅（SiC）各项性能指标优势明显

	第一代半导体	第二代半导体	第三代半导体	
半导体材料	Si	GaAs	GaN	4H-SiC
禁带宽度（eV）	1.12	1.43	3.37	3.26
击穿场强（MV/cm）	0.3	0.06	5	3
电子迁移率（cm^2/Vs）	1350	8500	1250	800
空穴迁移率（cm^2/Vs）	480	400	<200	115
热导率（W/cm*K）	1.3	0.55	2	4.9

资料　：亿渡数据，平安证券研究所

1.2 碳化硅分类及应用下游

➢ **当前第三代半导体主要以碳化硅作为衬底材料，根据电阻率又可分为导电型和半绝缘型。**其中，通过在导电型衬底上生长同质碳化硅外延可制成功率器件，主要应用于新能源汽车、光伏发电等领域，在半绝缘型衬底生长异质氮化镓外延可制成射频器件，主要应用于通信、　　等领域。



资料　　：Wolfspeed官网，天科合达官网，广东天域官网，中电化合物官网，平安证券研究所

1.3 利好政策持续发布，助力碳化硅产业国产化

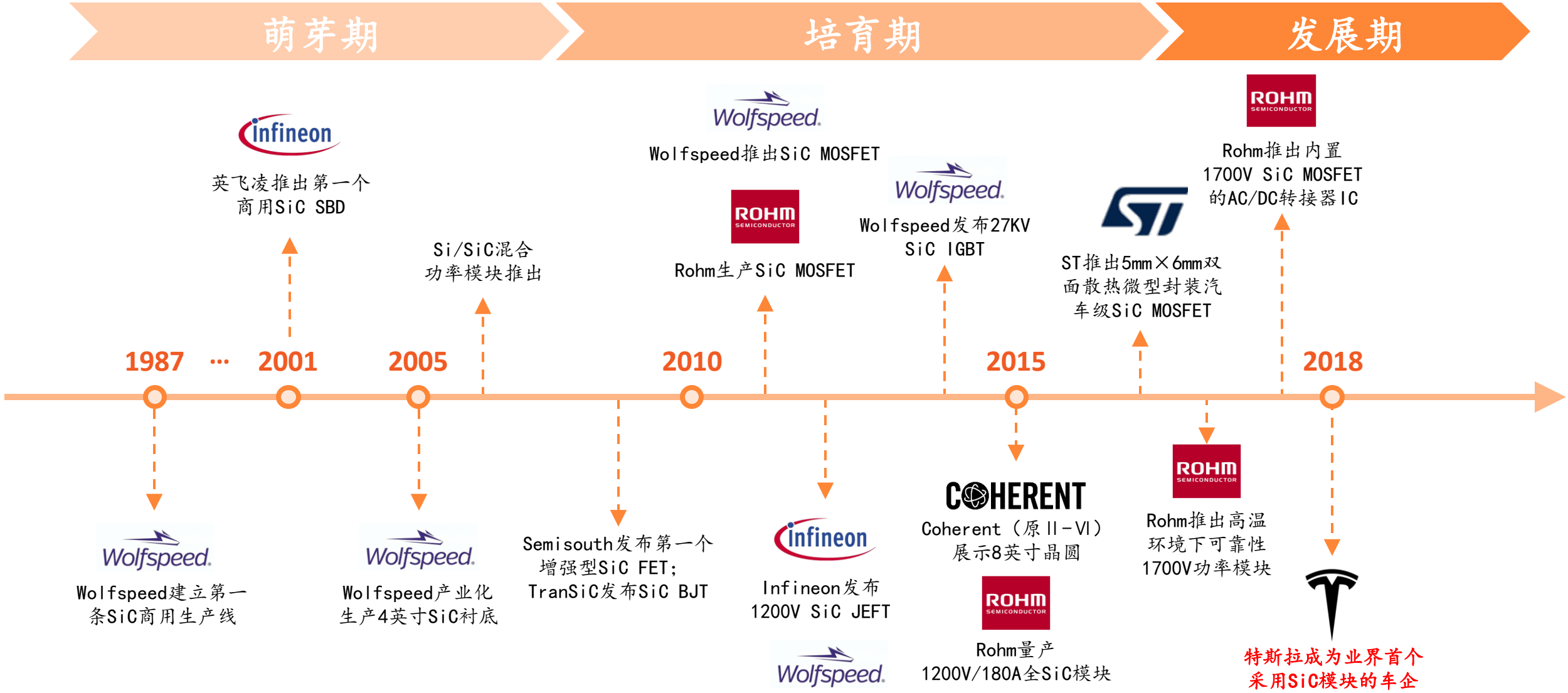
➢ **碳化硅为半导体重要新材料，国家重视程度持续加大。**作为支撑新一代信息技术、绿色节能减排的重要材料和核心电子器件，近年来政府陆续推出相关政策文件助力第三代半导体产业发展。

碳化硅行业相关政策与活动

日期	相关活动政策
2021.12	国家工信部发布《重点新材料首批次应用示范指导目录(2021年版)》，碳化硅同质外延片、碳化硅单晶衬底、8-12英寸硅单晶抛光片、8-12 英寸硅单晶外延片属于关键战略材料领域的先进半导体材料。
2021.08	8月14日，工信部宣布将SiC（SiC）复合材料、碳基复合材料等纳入“十四五”产业科技创新相关发展规划
2021.05	国家科技体制改革和创新体系建设领导小组第十八次会议召开，会上讨论了面向后摩尔时代的集成电路潜在颠覆性技术
2021.03	新华网刊登了《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》，其中“集成电路”领域，特别提出SiC、氮化镓等宽禁带半导体即第三代半导体要取得发展。
2020.07	国务院发文《新时期促进集成电路产业和软件产业高质量发展的若干政策》中指出，国家鼓励集成电路企业，自获利年度起，第一年至第二年免征企业所得税，第三年至第五年按照25%的法定税率或减半征收企业所得税
2019.12	国务院在《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》中明确要求加快培育布局第三代半导体产业，推动制造业高质量发展
2019.11	工信部印发《重点新材料首批次应用示范指导目录》，其中GaN单晶衬底、功率器件用GaN外延片、SiC外延片，SiC单晶衬底等第三代半导体产品进入目录
2019.06	商务部及 在鼓励外商投资名单中增加了支持引进SiC超细粉体外商企业
2016.07	国务院推出了《关于印发“十三五”国家科技创新规划的通知》，其中首次提到要加快第三代半导体芯片技术与器件的研发

资料　　：亿渡数据，瀚天天成招股书，平安证券研究所

1.4 碳化硅产品商业化发展历程

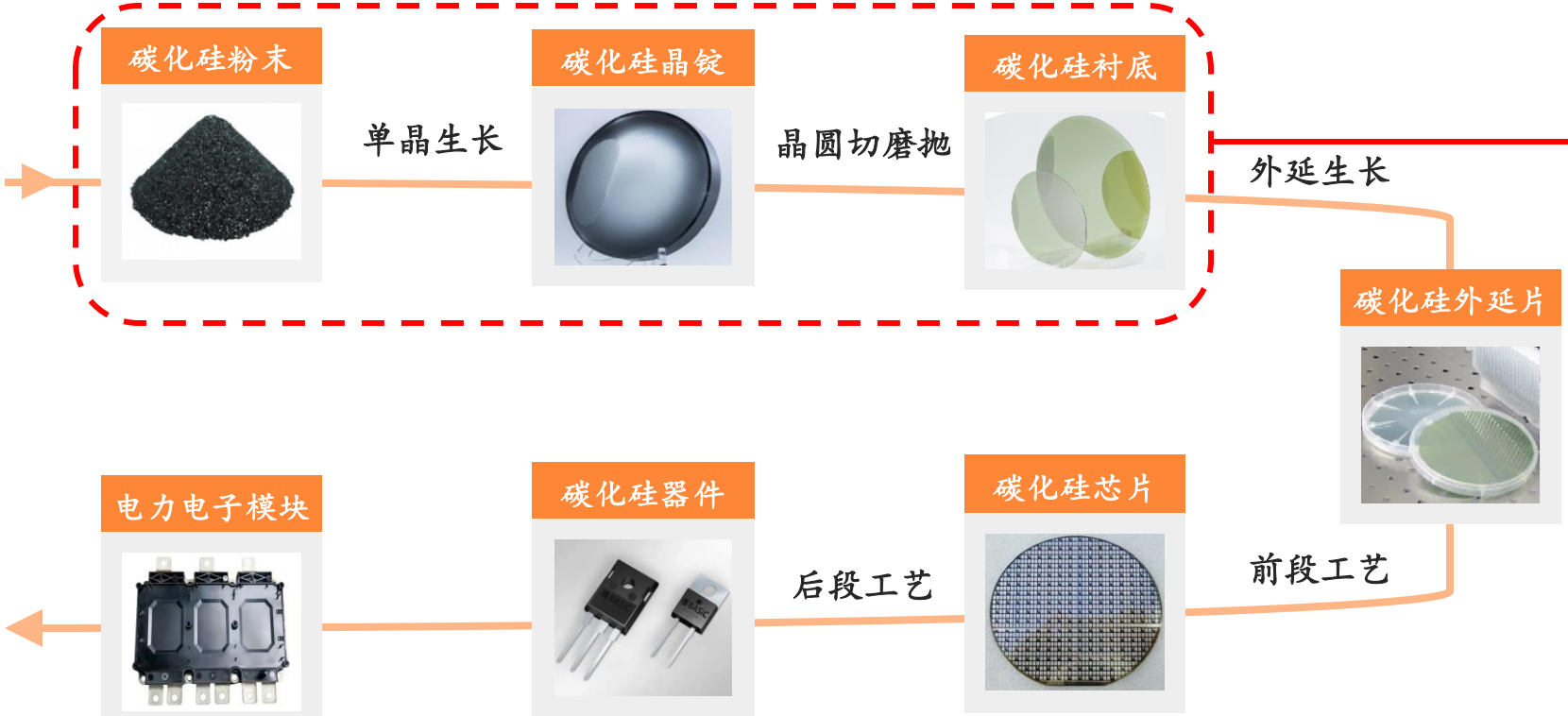


资料　：亿渡数据，平安证券研究所

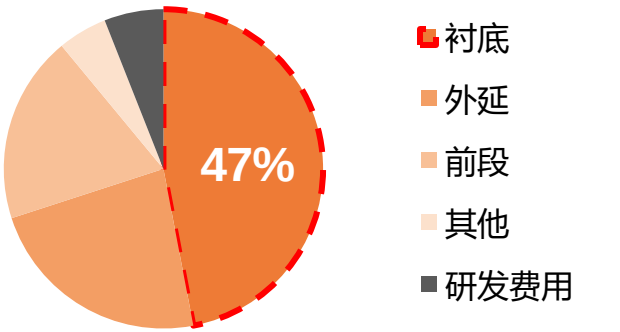
1.5 SiC衬底为核心价值环节，成本占比高达47%

➢ **碳化硅衬底技术壁垒高，为价值链条核心环节。**碳化硅器件的生产流程与硅基器件基本一致，包括衬底制备、外延生长、晶圆制造以及封装测试等环节，但碳化硅器件价值量存在倒挂，其成本主要集中在衬底和外延，根据CASA数据，两者占成本比例合计70%。其中，衬底制造技术壁垒最高，成本占比高达47%，是最核心环节。

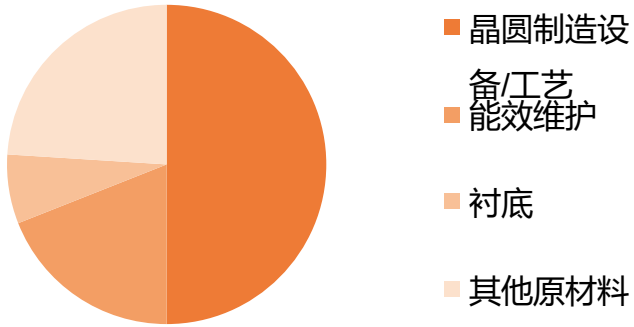
碳化硅器件制造工艺流程



碳化硅器件成本结构



硅基器件成本结构

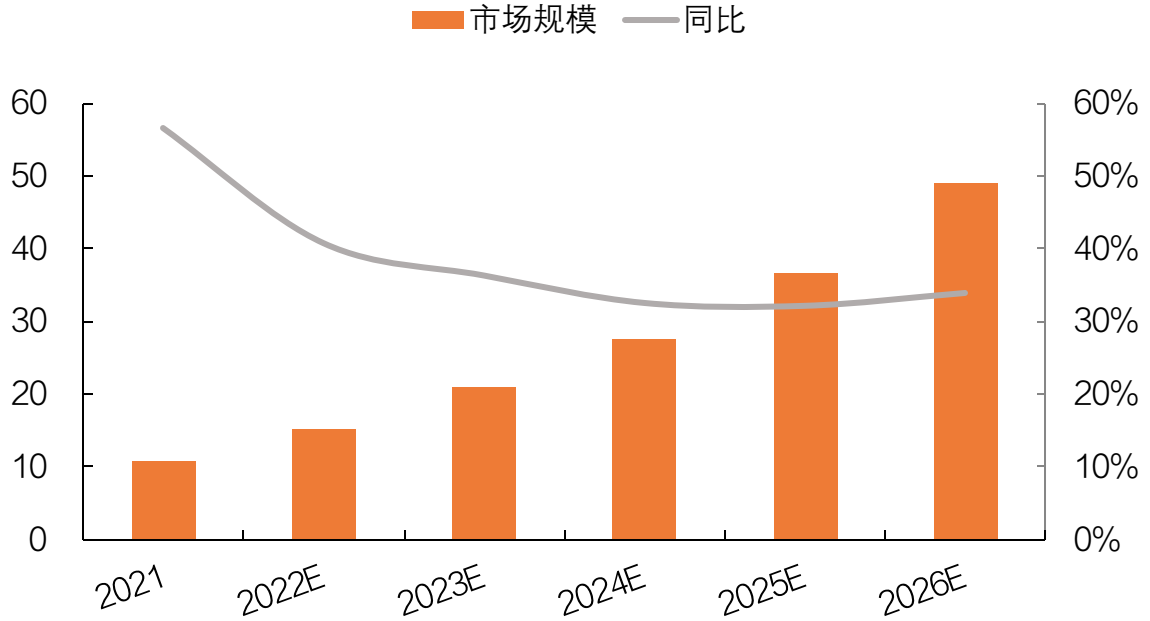


资料　：亿渡数据，CASA，平安证券研究所

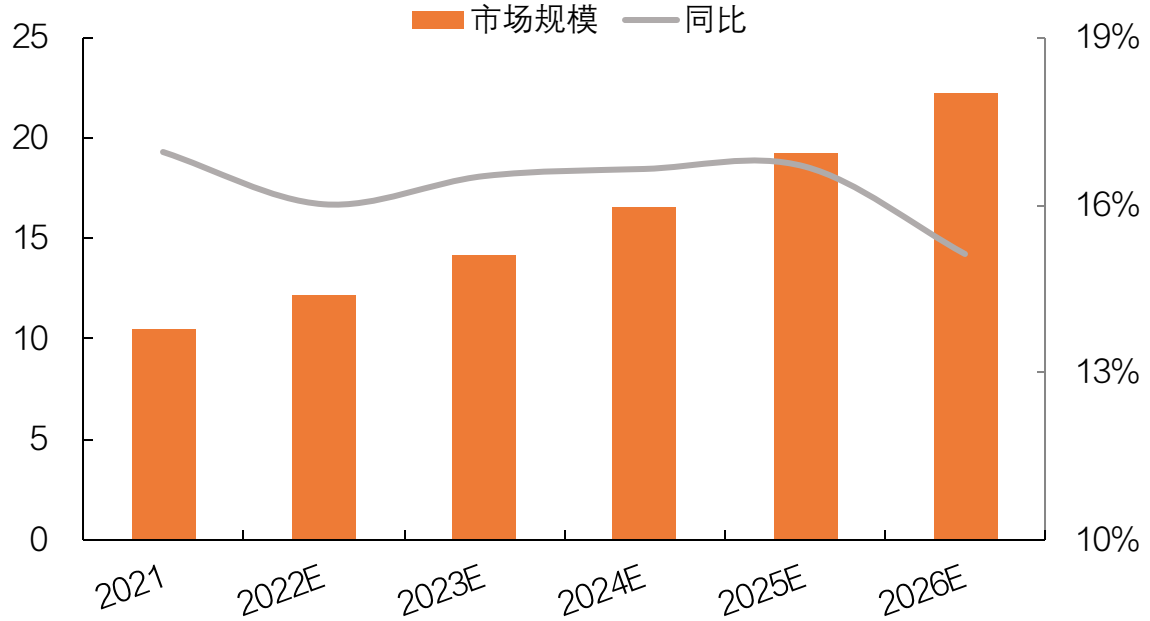
1.6 2026年全球SiC器件市场规模将达71亿美元

- **2026年全球SiC功率器件市场规模将达49亿美元。**受益于SiC功率器件在新能源汽车以及光伏储能等领域带来的效率提升，碳化硅功率器件需求持续提升，Yole预计全球SiC功率器件市场规模将由2021年的11亿美元增加至2026年的49亿美元，2021-2026年年复合增长率达35%。根据TrendForce数据，以营收作为统计口径，2022年意法半导体以37%市占率排名全球第一，其次为英飞凌和Wolfspeed，市占率分别为18%和16%。
- **2026年全球半绝缘型SiC射频器件市场规模将达22亿美元。**随着5G渗透率不断提升以及MassiveMIMO技术推广，将进一步带动GaN-on-SiC射频器件需求，Yole预计2026年全球GaN-on-SiC射频器件市场规模将增加至22亿美元，2021-2026年年复合增速达16%。

全球碳化硅功率器件市场规模（亿美元）



全球半绝缘型碳化硅基射频器件市场规模（亿美元）



资料　：Yole，亿渡数据，平安证券研究所

1.7 SiC功率器件在高效能源转换领域具有明显优势

凭借SiC材料的耐高压、耐高频、耐高温等特性，SiC功率器件相较于Si器件具有明显优势，具体包括：

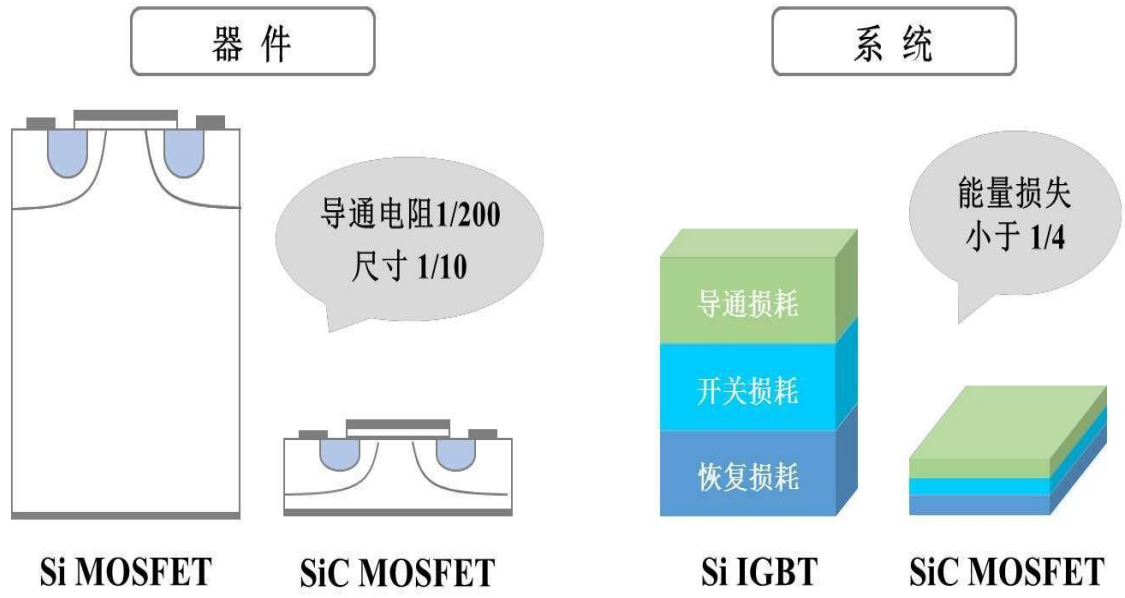
- 1）能量损耗低：SiC具有极低的导通电阻，同规格SiC-MOS相较Si-IGBT总能量损失可降低约**80%**。
- 2）器件尺寸小：SiC损耗低且电流密度高，同规格SiC-MOS仅为Si-MOS原尺寸的**1/10**。
- 3）开关频率高：SiC不存在电流拖尾现象，开关损耗低，能大幅提高实际用的开关频率。
- 4）工作温度高：SiC拥有更高的热导率，器件散热更加容易，能够降低对散热系统的需求，利于终端轻量化和小型化。

SiC功率器件综合性能突出

	Si MOSFET	Si IGBT	SiC MOSFET
击穿电压	12V-500V	400V-12KV	>600V
电流密度	中等	高	非常高
导通电阻	中等	中等	低
高频开关特征	高	低	非常高
成本	低	中等	高
热导率	低	低	高
运行温度	125℃	125℃	175-200℃
供应商	多	多	仅少数几家老牌供应商，但新供应商数量增长迅速
可靠性标准	√	√	尚在摸索建设中
技术成熟度	高	高	中等

资料　：Yole，ROHM官网，平安证券研究所

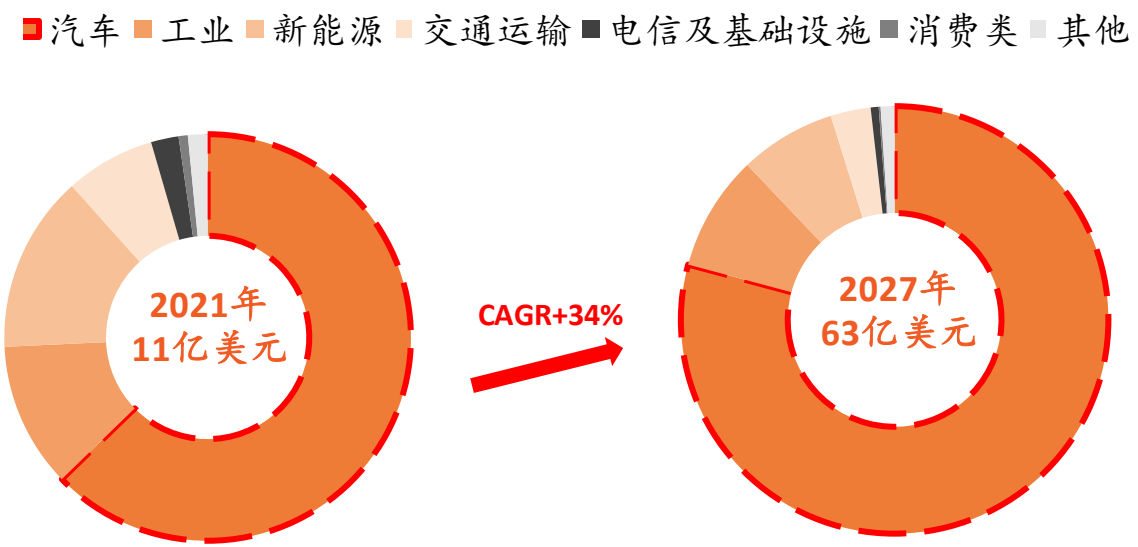
同规格SiC器件与硅基器件对比



1.8 车用SiC功率器件主导市场，市场占比逐年提升

➢ **电动汽车为SiC功率器件核心应用下游，市场占比逐年提升。**由于SiC功率器件在能源转换效率方面具有明显优势，因此广泛应用于电动汽车、光伏新能源、轨道交通和智慧电网等领域。其中，汽车应用为SiC功率器件最核心应用下游，且市场占比呈现逐年增加态势，Yole预计2027年车用SiC功率器件占总市场比例将由2021年的63%增加至79%，其次为工业和新能源领域，占比分别为9%和7%。

全球碳化硅功率器件市场规模（亿美元）



碳化硅功率器件应用领域



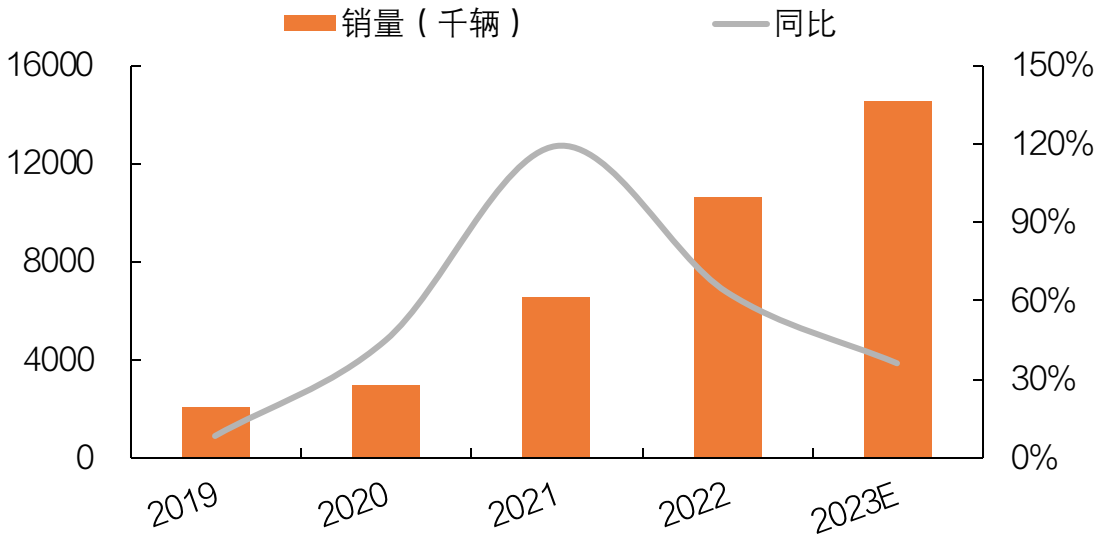
资料　：Yole，天科合达招股书，平安证券研究所

1.9 新能源汽车：SiC加速上车，800V平台车型持续推出

- **新能源汽车销量持续提升，中国为全球第一大市场。**根据TrendForce数据，2022年全球新能源汽车销量达1065万辆，同比+64%，其中纯电汽车销量达789万辆，同比+69%，混动汽车销量达274万辆，同比+51%，从地区来看，2022年中国地区占全球市场比例达63%，为全球第一大市场。

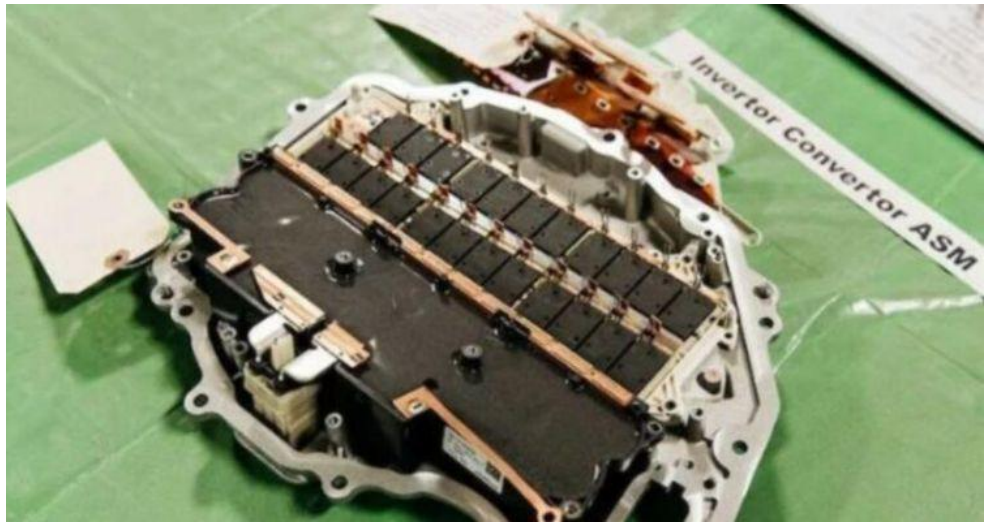
- **2023年搭载800V高压平台车型明显增多。**2018年，特斯拉率先在Model3上采用SiC主驱逆变器模块，成为业界首个大规模搭载SiC模块的车企，伴随SiC衬底产能提升和工艺进步，搭载SiC器件车型逐步增多，尤其是在2023年下半年，以小鹏G6、智界S7、问界M9为代表的800V高压平台车型纷纷发售，SiC上车速度明显加快。

全球新能源汽车销量



资料　：TrendForce，电子发烧友，平安证券研究所

Model 3主逆变器采用了24颗SiC MOSFET

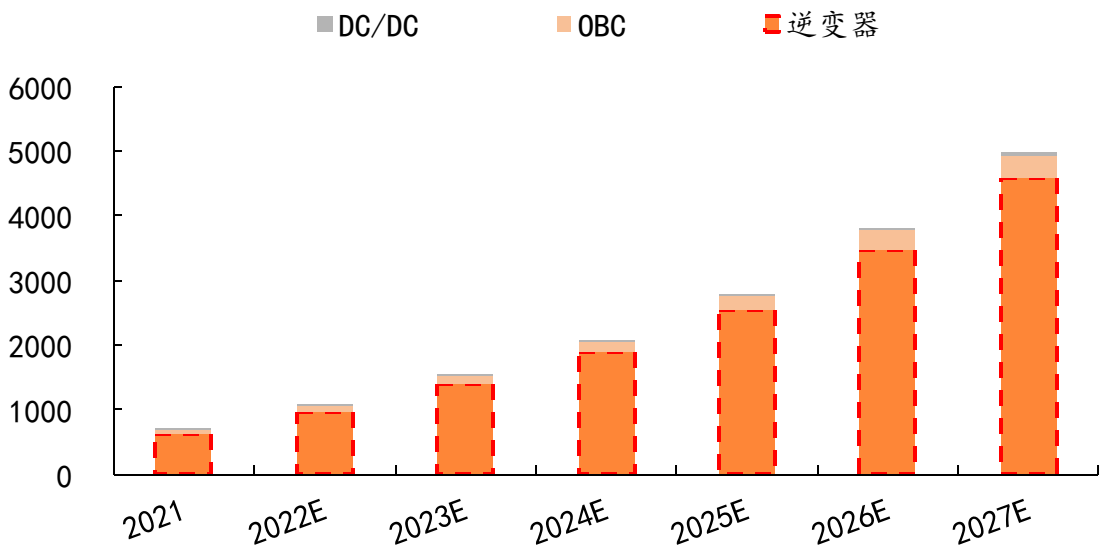


1.10 新能源汽车：新能源汽车为SiC功率器件实现增长的核心推手

- **SiC功率器件在车用领域主要涉及逆变器、OBC以及DC/DC。**新能源车通过搭载SiC功率器件，将带来逆变器效率提升、系统尺寸小型化、综合成本降低以及行驶里程增加等好处，将取代Si器件成为未来新能源车升级功率器件的主要趋势。尽管当前SiC-MOS成本约为Si-IGBT的3倍，但是根据英飞凌测算，SiC-MOS可以减少6-10%电力损耗，电池成本节省将超过SiC器件增加的成本，最高可以节省6%的综合系统成本。同时，SiC优势在800V平台中将进一步放大，以小鹏G9为例，其800V高压SiC平台相较400V平台续航提升5%，可实现充电5分钟续航超过200Km。

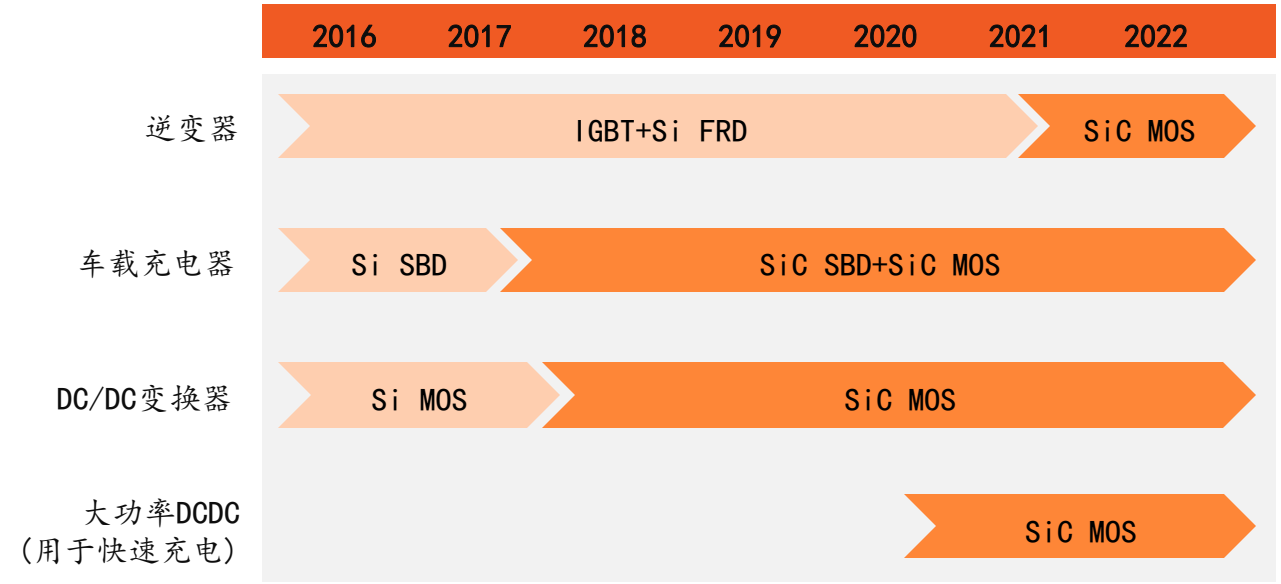
- **2027年全球车用SiC功率器件市场规模有望达50亿美元。**考虑到未来新能源汽车存在续航里程以及充电效率提升的需求，SiC功率器件渗透率将进一步提升，市场规模也有望从2021年的7亿美元增加至2027年的50亿美元，2021-2027年年复合增长率达39%，其中，逆变器为主要应用领域，2027年全球市场规模将达46亿美元，OBC和DC/DC分别为3.4亿美元和0.6亿美元。

电动汽车碳化硅功率器件市场规模（百万美元）



资料　：Yole，ROHM官网，平安证券研究所

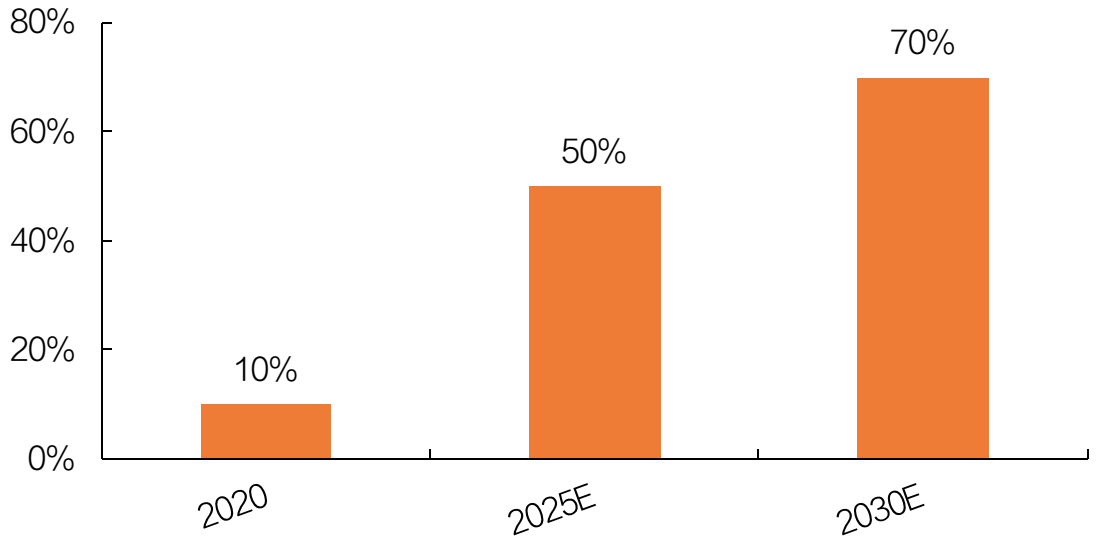
车用功率器件类型演进历程



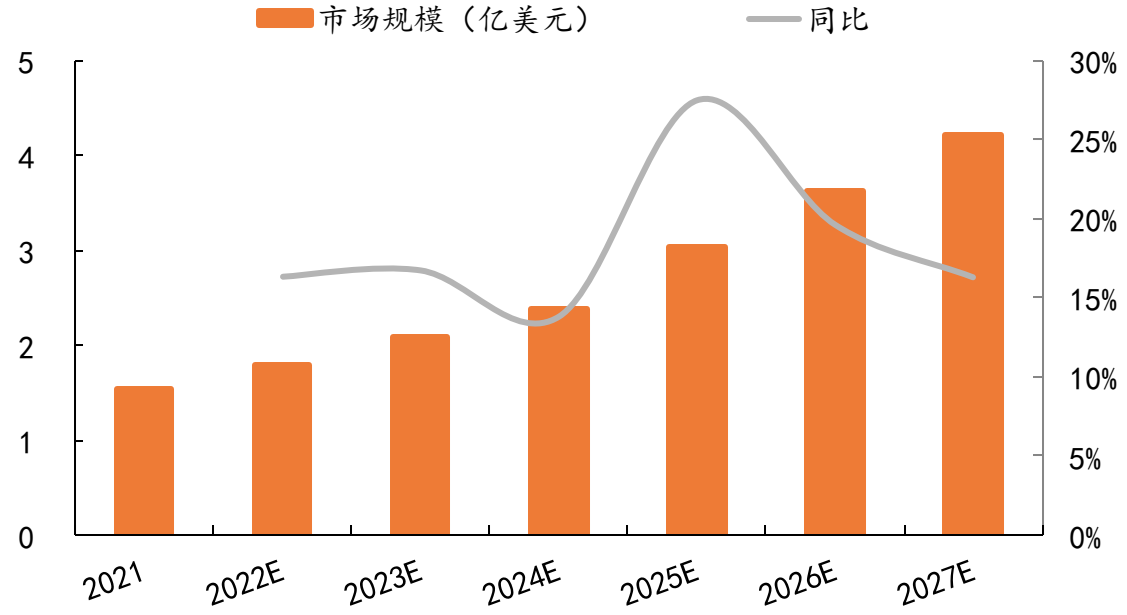
1.10 光伏：降本增效成为SiC功率器件在光伏领域的主要驱动力

- **降本增效成为SiC功率器件在光伏领域的主要驱动力。**在光伏发电应用中，使用SiC材料可将转换效率可从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。得益于SiC功率器件带来的降本增效优势，根据CASA预测，在2025年碳化硅功率器件占比将达到50%，未来将继续保持稳定增长态势。
- **2027年全球光伏SiC功率器件市场规模将达4.2亿美元。**2021年全球光伏碳化硅功率器件市场规模为1.54亿美元，随着SiC器件渗透率持续提升，预计2027年全球光伏SiC功率器件市场规模将增加至4.23亿美元，2021-2027年年复合增长率为18%

光伏逆变器中导电型碳化硅功率器件占比预测



全球光伏碳化硅功率器件市场规模



资料　：CASA，Yole，平安证券研究所



CONTENT
目录

一、降本提效增益明显，下游景气带动需求提升

二、晶体生长慢且加工难，提高良率和产能是关键

三、行业重点公司

四、投资建议和风险提示

2.1 碳化硅产业链全景图

	辅助产业	上游原材料		中游器件制造			下游终端应用
	设备	衬底	外延	设计	制造	封测	应用
国内	北方华创	三安光电					泰科天润
	中微公司	天岳先进	世纪金光、中电科55所、中电科13所、民德电子				比亚迪
	天科合达	露笑科技	广东天域	APS	积塔	长电科技	北京科诺伟业
	晶盛机电	东尼电子	瀚天天成	瀚薪	长飞先进	通富微电	中车时代电气
	芯源微	烁科晶体	普兴电子	派恩杰	宽能	华天科技	国家电网
		天科合达、中电化合物		泰科天润、时代电气、华润微、士兰微、闻泰科技、扬杰科技			
海外	GTAT	Wolfspeed、ROHM、ST、Infineon、Coherent					博世
	RevoDeve	KISAB	Microchip				特斯拉
	DISCO	Resonac、住友电气、SK		Littelfuse	Fraunhofer	Danfoss	三菱

资料　：亿渡数据，Yole，平安证券研究所

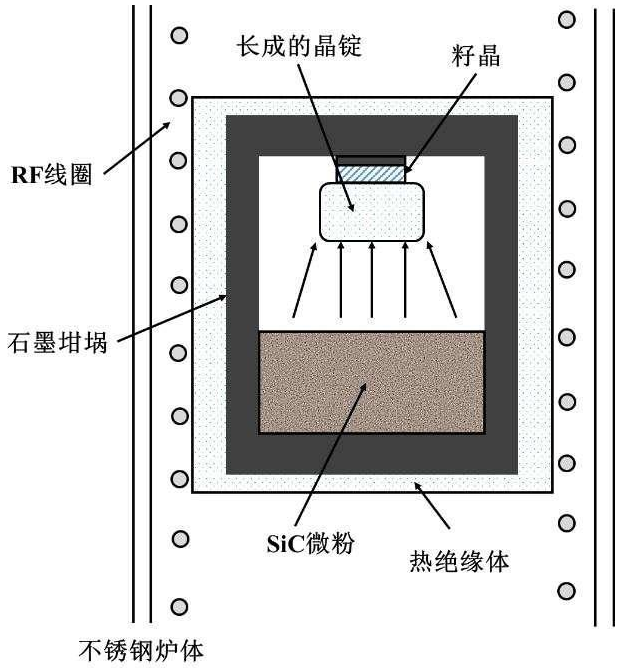
2.2 晶体生长效率缓慢是造成供应缺口的重要原因

- **碳化硅晶体生长存在三大难点：1）长晶速度慢：**以主流物理气相传输法（PVT）为例，碳化硅晶棒生长速度为0.2-0.4mm/h，硅晶棒可达1-10mm/h；**2）黑盒操作良率低：**在封闭的石墨坩埚中无法即时控制晶体生长状况，容易产生如微管、位错等缺陷问题，十分依赖工艺经验；**3）扩径难度大：**随着尺寸扩大，碳化硅晶体生长难度工艺呈几何级增长。
- **PVT为当前晶体生长主流工艺，温度控制是关键。**碳化硅在常压高温下不熔化，但在1800℃以上的高温时，会发生分解升华成多种气相组分，PVT法主要是将高纯碳化硅微粉和籽晶分别置于单晶生长炉内的底部和顶部，通过电磁感应将坩埚加热至2000℃以上，碳化硅微粉升华且分解产生气态物质，在温度梯度驱动下到达温度较低的籽晶处形成碳化硅晶体。

碳化硅晶体生长主流工艺比较

生长工艺	生长温度（℃）	生长速度（mm/h）	优点	缺点	主要厂商
物理气相传输/PVT	2200-2500	0.2-0.4	最成熟最常用	半绝缘制造困难、生长厚度受限、没有一体化设备	Wolfspeed、Coherent、SiCrystal、天岳、天科
高温化学气相沉积/HTPVD	2200	0.3-1.0	可持续的原料、可调整的参数、一体化的设备	速率和缺陷控制	Norstel、日本电装
液相外延/LPE	1460-1800	0.5-2.0	类似提拉法	金属杂质、硅溶液碳的溶解度有限	住友等

物理气相传输法生长碳化硅晶体示意图



资料　：亿渡数据，天科合达招股书，平安证券研究所

2.3 碳化硅晶片加工过程难，推动工艺进步具有关键意义

➢ **碳化硅单晶的加工过程主要分为切片、薄化和抛光。**除了晶体生长慢，由于碳化硅硬度与金刚石接近，导致后续加工难度大，成为限制SiC器件市场发展的另外一个重要因素，推动加工工艺发展成为提高SiC产量及成本控制的重要举措。

切片难

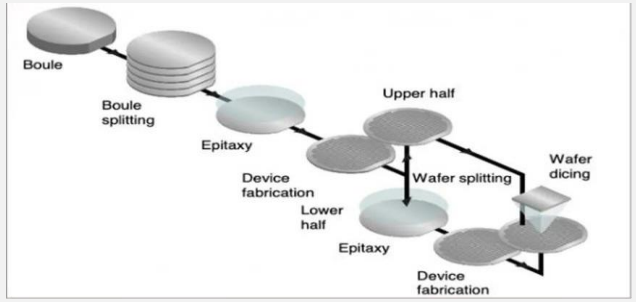
切片作为SiC单晶加工过程的第一道工序，切片的效果和质量直接决定了后续薄化、抛光的加工水平。当前常用的SiC切割工艺主要是往复式金刚石固结磨料多线切割，常规切缝宽度在180-250μm，该切割工艺损耗较大，造成晶锭出片数量低。

不同切割工艺的性能对比

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/μm	180-250	<10	<10	<100
总厚度变化/μm	<30	<25	<1	<25

2018年英飞凌于以 1.24亿欧元收购Siltectra，后者开发了冷裂创新切割工艺。相比传统的多线切割工艺，冷裂工艺只损失1/8的碳化硅材料，可大幅降低单晶在切割过程中的材料损耗。

冷裂切割工艺可大幅降低材料损耗



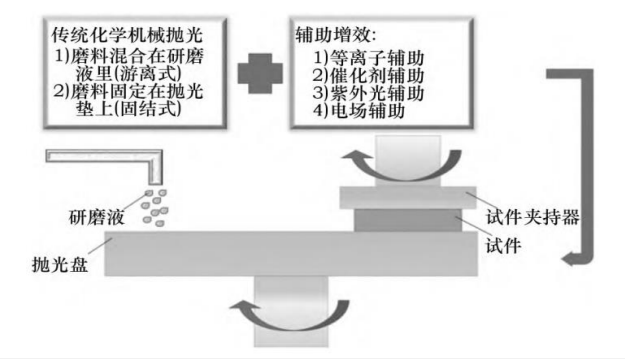
磨抛难

由于SiC材料较为硬、脆，在薄化过程中容易造成SiC晶片开裂，导致减薄过程非常困难，为了提高加工精度和效率，目前主要的薄化技术包括超声振动辅助磨削和在线电解修整辅助磨削。

SiC晶片的抛光工艺可以分为粗抛和精抛，粗抛为机械抛光，主要为了提高抛光加工效率。精抛为单面抛光，为晶片加工的最后一道工序，当前应用最广泛的抛光技术是化学机械抛光，通过化学腐蚀和机械磨损协同作用，实现材料表面去除及平坦化。

采用化学机械抛光移除材料1-2μm深度需要数十小时才能完成，对产能及成本均有所影响，为了提高精抛效率，可以利用辅助增效技术来控制SiC表面较软氧化层的形成并从力学上改善SiC氧化层材料的去除。台湾工研院便是在传统化学机械抛光法中搭配了大面积大气电浆，使得抛光速率提升了5倍以上，有望降低30-50%加工成本。

SiC化学机械抛光辅助增效方法



资料　：亿渡数据，英飞凌官网，行家说三代半，平安证券研究所

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/717035040015006030