

证券研究报告
电子/行业深度报告
2025年4月28日

突围“硅屏障”

—— 国产晶圆技术攻坚与供应链自主化

证券分析师：唐仁杰 S0370524080002

行业评级：增持



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。



首都机场集团
Capital Airport Group



金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

摘要

- 晶圆制造材料、后道封装材料分别占据半导体材料市场规模62.8%、37.2%；其中，硅片市场规模占据22.9%，主导前道硅片制造材料市场。根据SEMI数据，连续三年扩产导致一定库存压力，下游需求减弱，2023年全球半导体材料市场小幅萎缩至667亿美元；其中，2023年晶圆制造材料较2022年下降7%至415亿美元。硅片出货周期基本同步于半导体产业链景气周期，但领先于半导体设备资本开支。**2024年全球硅片出货面积约12,266MSI(百万平方英寸)，较23年下降3%。2024年Q3，全球硅片出货面积企稳回升，Q3、Q4同比增长6.24%、6.78%。**
- 硅片尺寸越大，单片硅片制造芯片数量越高，边缘损耗越小，单位芯片成本越低。同样工艺条件下，12英寸半导体硅片可适用面积超过8英寸硅片的2.25倍。**根据SUMCO预测，云计算及存储需求，预计2021-2025年，12英寸半导体晶圆在高性能计算及DRAM需求复合年增长率分别为14.7%、10%。**
- “贸易战”影响下，国产12英寸大硅片或加快渗透。当前全球12英寸硅片形成“寡头”竞争格局，且基本由日本企业主导。12英寸硅片产能CR5约达80%，出货量占比也高达80%。需求端：基于国内明确的晶圆厂（Fab）扩建计划，预计2026年中国大陆地区对12英寸硅片的需求将超过300万片/月，占届时全球12英寸硅片需求的1/3，其中以中芯国际、华虹集团、长江存储、长鑫存储为代表的全部内资晶圆厂12英寸硅片需求将超过250万片/月。
- 半导体制造领域，使用杂质含量较高的石英坩埚或高纯度石英组件会对半导体器件的生产和功能产生多种不利影响。铝、硼和磷等杂质，即使是极少量的杂质，也会成为无意的掺杂剂，改变硅晶片的电气特性。这些变化会导致掺杂浓度的不良变化，从而导致晶圆上半导体的电性能不一致。
- 电子级硅片对原材料纯度要求较高，电子级多晶硅的纯度要求在9N（99.9999999%），甚至11N纯度。通过化学还原生成多晶硅料再进行提纯，从而得到电子级多晶硅。根据中国地质科学郑州矿产综合利用研究所预测，预计到2025年我国4N5级及以上高纯石英用量将超过25万吨，年复合增长率约20%，国内高纯石英供需缺口将超过10万吨。
- 硅片加工工艺极其复杂，包括截断、滚磨、切片、倒角、双面研磨、抛光，后续仍需表面处理及清洁、测试。工艺生产中，裸晶圆主要考虑表面颗粒与杂质、表面粗糙度和平整度、厚度、翘曲度与弯曲度、电阻率及掺杂浓度均匀性等相关指标。
- 相关公司：300mm大硅片及重掺工艺生产商：高纯度石英制品供应商，半导体业务占比持续提升，凯德石英（835179.BJ）；12英寸外延片产能快速爬坡，立昂微（605358.SH）；CMP设备龙头华海清科（688120.SH）；CMP抛光液+抛光垫 鼎龙股份（3000054.SZ）；无图型检测设备，中科飞测（688361.SH）
- 风险提示：晶圆代工厂及IDM厂扩产不及预期、硅片厂规模化效应失效、半导体行业周期性下行、政治、政策不确定性因素及其他宏观因素



目录

一、半导体材料市场概览：硅片主导晶圆制造材料

二、半导体材料市场概览：2023年半导体材料市场小幅萎缩

三、半导体材料市场概览：24年三季度，全球硅片出货面积企稳

四、硅片市场：AI及高性能算力需求催化大尺寸硅片

五、大尺寸硅片仍由海外主导，国内需求持续扩张

六、电子级硅片对生产设备材料要求极为严格，我国相应原材料储备量较少

七、硅片加工工艺：工业硅→电子级多晶硅

八、硅片加工工艺：直拉法、区熔法制备硅锭

九、硅片加工工艺：截断、滚磨、切片、倒角、双面研磨、抛光

十、硅片的表面处理、清洗及检测

十一、硅片分类：退火片、外延片、SOI

十二：相关公司

风险提示：晶圆代工厂及IDM厂扩产不及预期、硅片厂规模化效应失效、半导体行业周期性下行、政治、政策不确定性因素及其他宏观因素



硅片产业链上下游

上游

原材料及设备

- 材料：IC级多晶硅、化学试剂、包装材料
- 设备：拉晶、切割、研磨、抛光、外延及量测设备

中游

硅片制造

- 抛光片
- 外延片
- 假(陪)片 (flow check 或测试用dummy wafer)
- SOI等特殊硅片

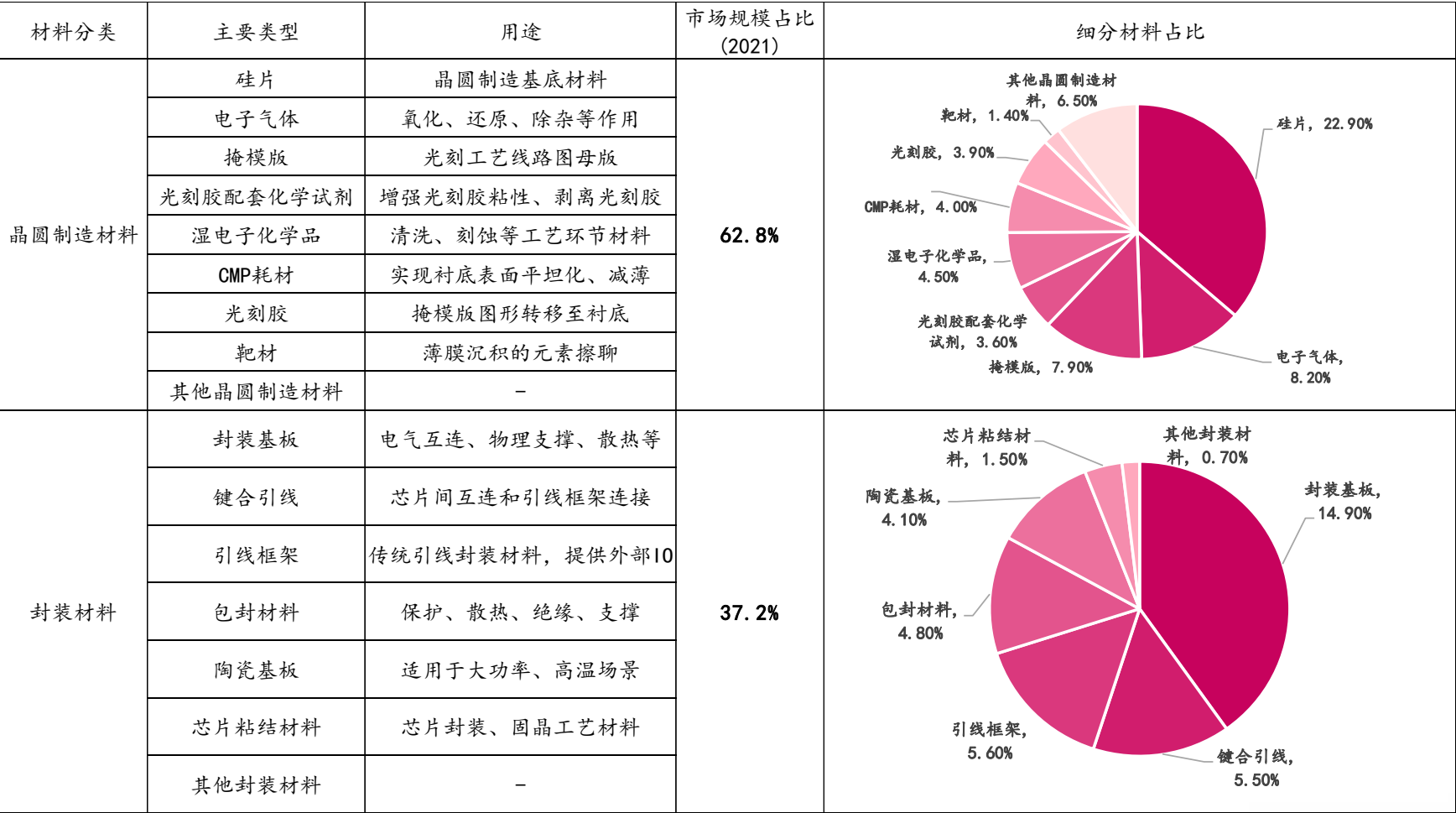
下游

终端

- 晶圆厂
 - Foundry, 如台积电、中芯国际
 - IDM, 如英特尔、SK海力士、长江存储等
- 应用
 - 逻辑芯片、模拟芯片、CIS芯片、功率等
- 终端
 - 智能手机、电脑、服务器、物联网、汽车电子、工业电子等

半导体材料市场概览：硅片主导晶圆制造材料

- 根据Semi数据，晶圆制造材料、后道封装材料分别占据半导体材料市场规模62.8%、37.2%；其中，硅片市场规模占据22.9%，主导前道硅片制造材料市场。



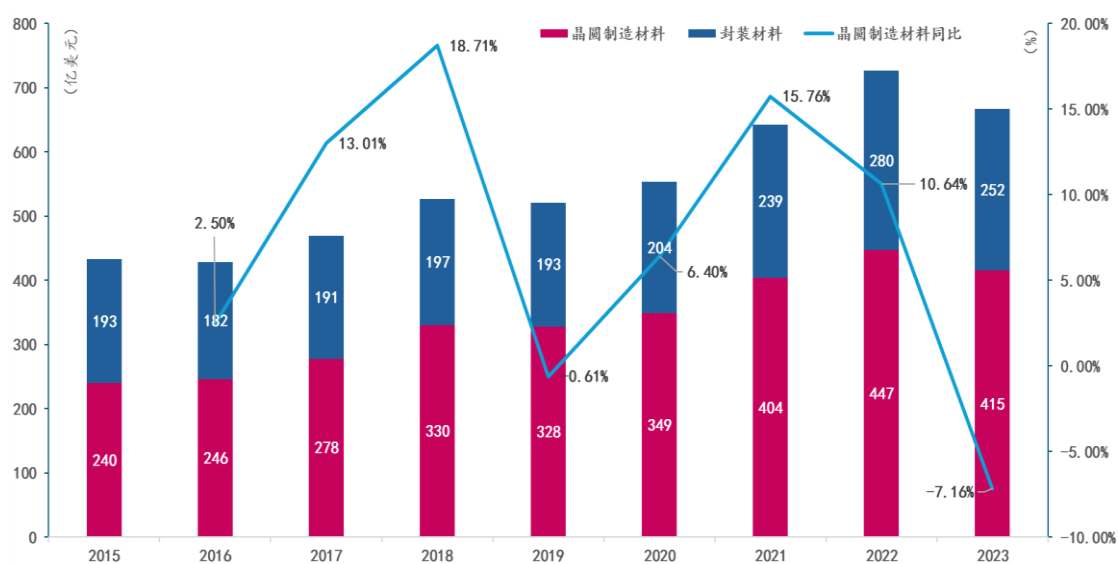
数据来源：Semi，金元证券研究所



半导体材料市场概览：2023年半导体材料市场小幅萎缩

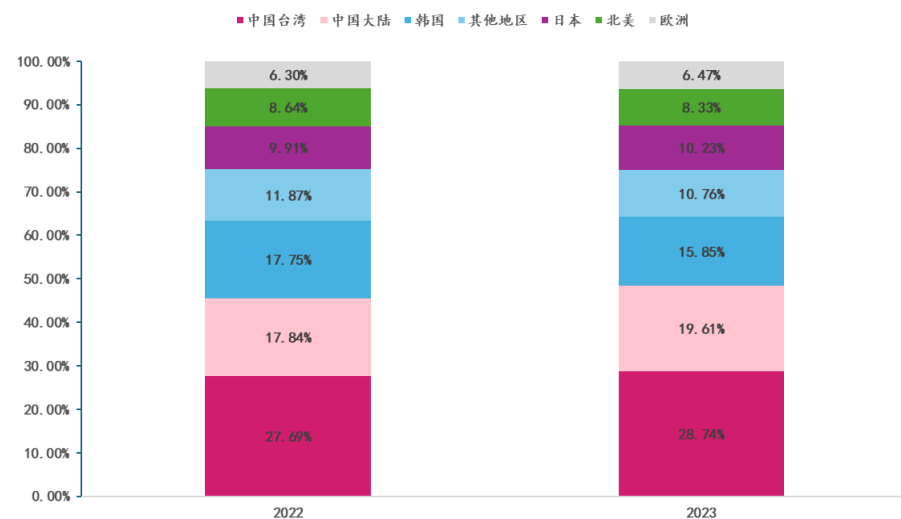
- 根据SEMI数据，连续三年扩产导致一定库存压力，下游需求减弱，2023年全球半导体材料市场小幅萎缩至667亿美元；其中，2023年晶圆制造材料较2022年下降7%至415亿美元。
- 分地区销售额来看，2023年中国台湾连续十四年位居全球第一，收入为192亿美元；中国大陆销售额占比提升至19.61%；除中国大陆地区，其他地区均呈现不同程度的下降（2022年中国大陆地区销售额为129亿美元，2023年为131亿美元）。

图：全球半导体材料市场规模



数据来源：SEMI，金元证券研究所

图：全球分地区销售额



数据来源：SEMI，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。



金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

半导体材料市场概览：24年三季度，全球硅片出货面积企稳

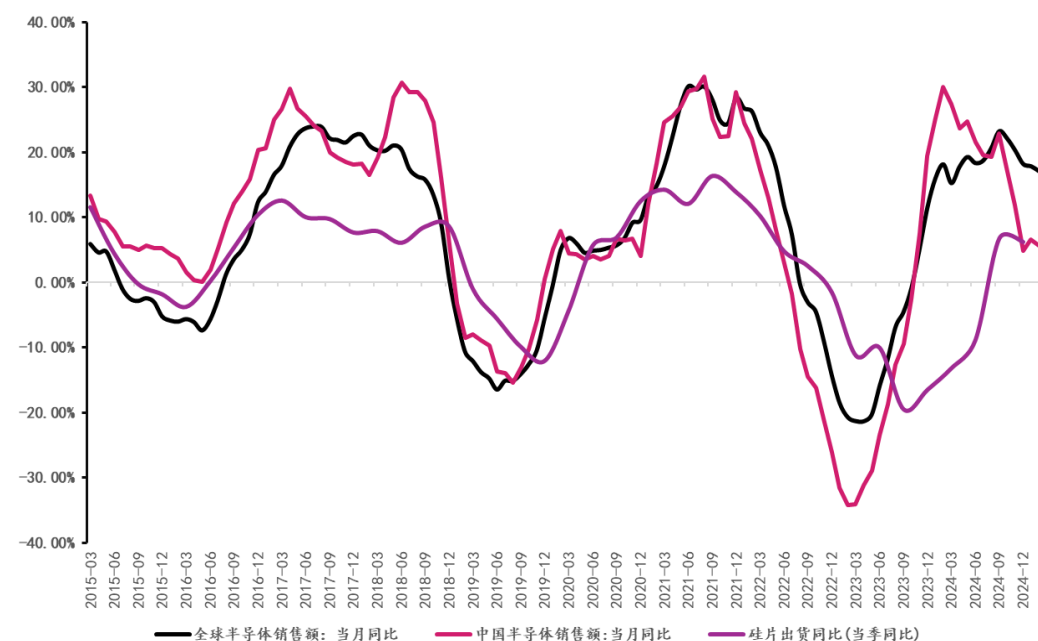
- 硅片出货周期基本同步于半导体产业链景气周期，但领先于半导体设备资本开支。2024年全球硅片出货面积约12,266MSI(百万平方英寸)，较23年下降3%。2024年Q3，全球硅片出货面积企稳回升，Q3、Q4同比增长6.24%、6.78%。

图：硅片及半导体销售具有一定周期性，24年年底硅片出货面积回升



数据来源：SEMI，金元证券研究所

图：半导体销售额略领先于硅片出货面积



数据来源：SEMI，金元证券研究所

硅片市场：AI及高性能算力需求催化大尺寸硅片

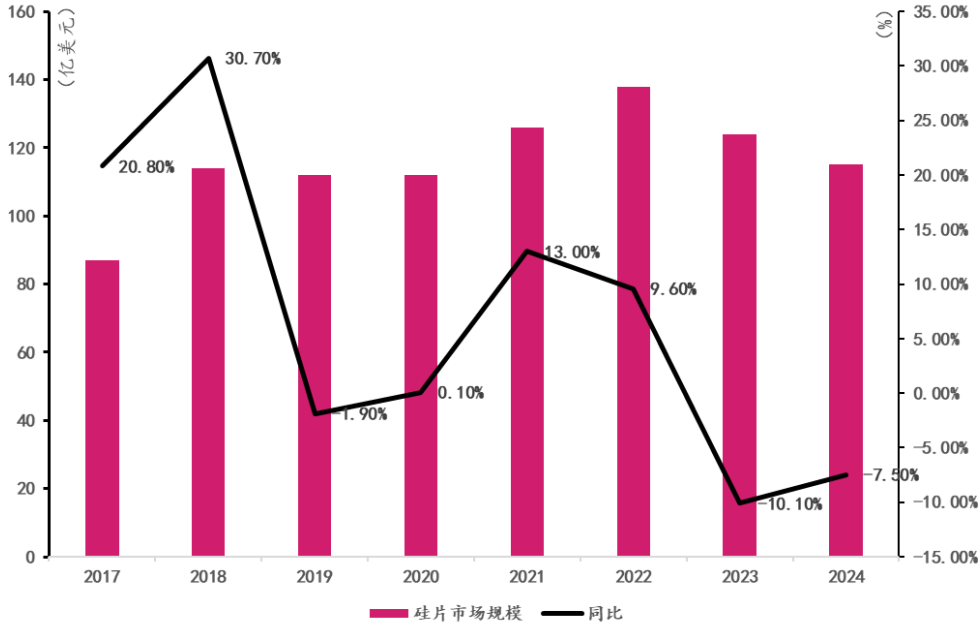
- 按照掺杂类型，半导体硅片可分为P型、N型，驱动自由载流子分别为空穴（正电荷）、电子（负电荷），当前存储、逻辑芯片多采用P型硅片。按照掺杂浓度可分为重掺杂、轻掺杂；根据工艺不同，可分类为硅抛光片、外延片及SOI等。
- 2024 年下半年随着下游复苏，半导体行业开始回暖，但电子级硅片属于半导体产业上游，前期库存仍需一定时间消化，导致电子级硅片市场回暖存在滞后性

图表：硅片分类

硅片类型			应用范围
P型	抛光片	轻掺	存储芯片（DRAM、NAND Flash、部分制程Nor Flash）、CIS芯片中逻辑晶圆、模拟芯片（部分制程显示驱动芯片、电源管理芯片等）
	外延片	轻掺	逻辑芯片、存储芯片（部分制程Nor Flash）、模拟芯片（部分制程显示驱动芯片等）
		重掺	CIS芯片中像素传感器晶圆等
N型	抛光片	轻掺	功率器件（IGBT）
		重掺	功率器件（MOSFET）
	外延片	重掺	

数据来源：西安奕材招股说明书、金元证券研究所

图：全球电子级硅片（不含 SOI）市场规模及增速



数据来源：SEMI，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。

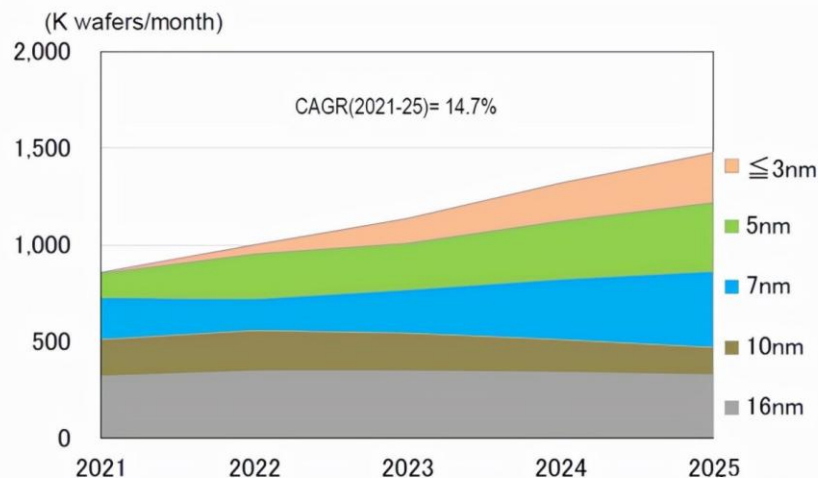


金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

硅片市场：AI及高性能算力需求催化大尺寸硅片

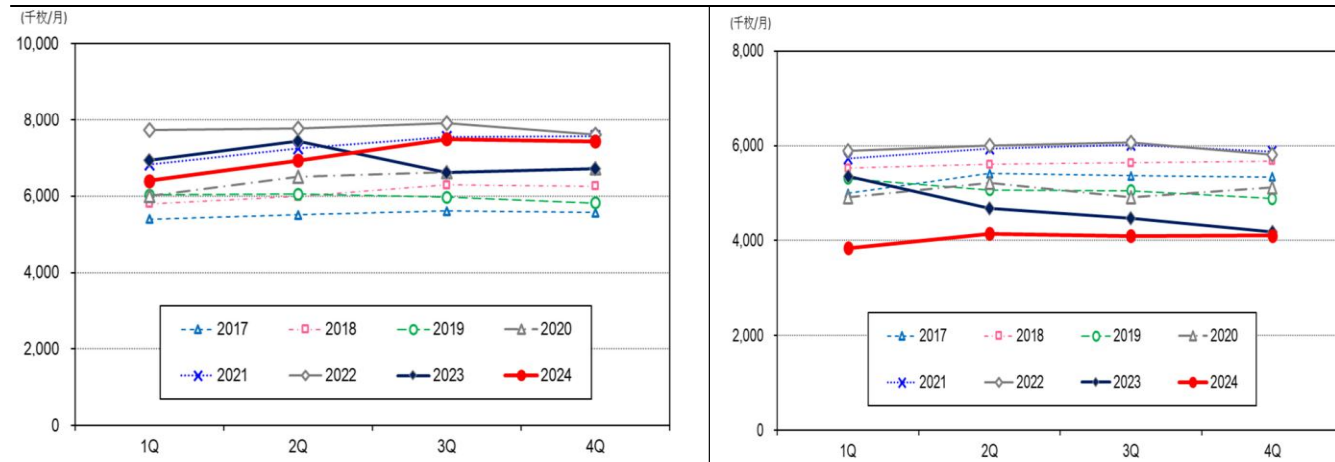
- 大尺寸硅片降本。根据尺寸（直径）大小，半导体硅片可分为4英寸、5英寸、6英寸、8英寸、12英寸。6英寸及以下尺寸主要用于MOSFET功率器件、IGBT、MEMES、分立器件等；8英寸主要应用于射频芯片、模拟芯片、面板驱动、CIS等；而12英寸主要应用于高端XPU逻辑芯片。硅片尺寸越大，单片硅片制造芯片数量越高，边缘损耗越小，单位芯片成本越低。同样工艺条件下，12英寸半导体硅片可适用面积超过8英寸硅片的2.25倍。根据SUMCO预测，云计算及存储需求，预计2021-2025年，12英寸半导体晶圆在高性能计算及DRAM需求复合年增长率分别为14.7%、10%。

图：高性能计算催化 12-inch 晶圆需求



数据来源：SUMCO，金元证券研究所

图：24 年 SUMCO 12 英寸硅片持续放量，8 英寸整体稳定



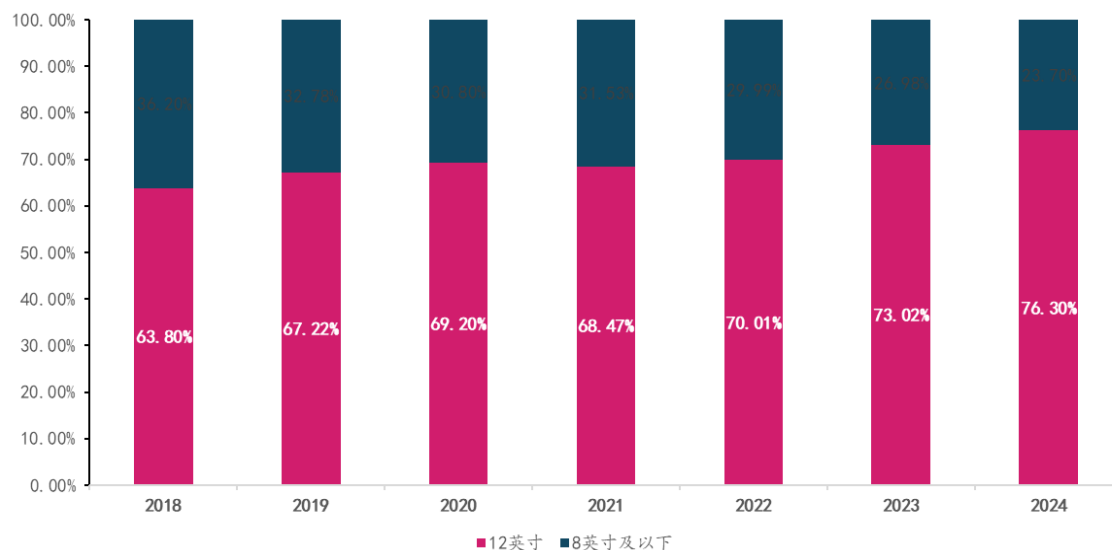
数据来源：SUMCO，金元证券研究所



硅片市场：AI及高性能算力需求催化大尺寸硅片

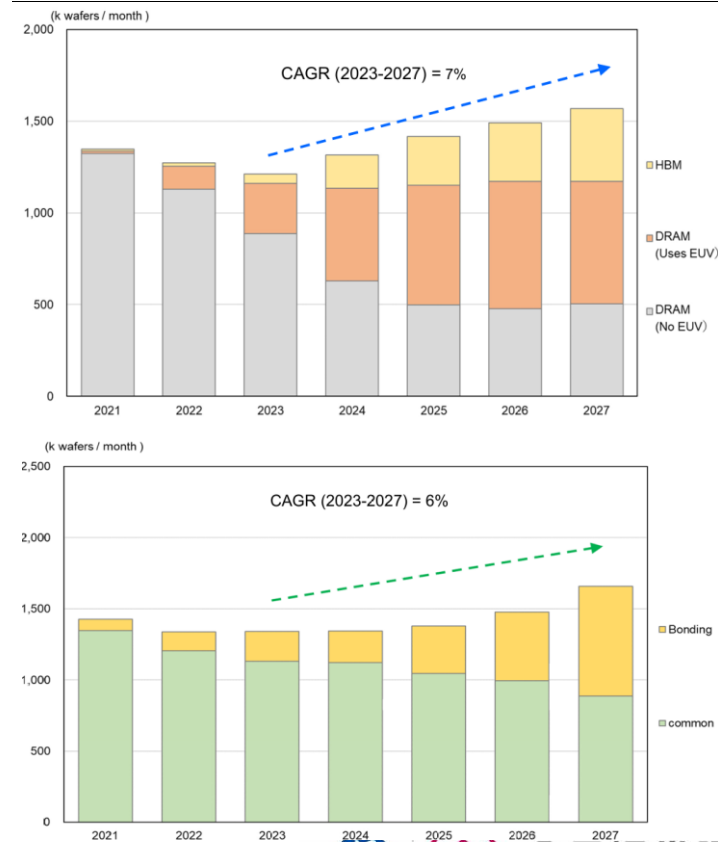
- 人工智能催化下，高性能算力、高IO、多层堆叠3D NAND等推动12英寸硅片需求。举例而言，随着 NAND Flash 堆叠层数提升至 200层、300 层，甚至 400 层，按目前业内技术路线共识，所有厂商均会切换至通过2片晶圆键合制作1个 NAND Flash 完整晶圆的工艺，相当于12英寸硅片需求翻倍。
- 根据SUMCO预测，2025年一季度，300mm晶圆出货量恢复，200mm晶圆出货量预计继续受到客户生产调整的影响；价格方面，300mm和200mm晶圆的长期合同价格保持稳定，但小直径晶圆的现货价格因地区和用途而异。

图：全球 12 英寸销售额占比持续提升



数据来源：SEMI，金元证券研究所

图：HBM 及 3D NAND 将成为 300mm 硅片的需求增长动力



数据来源：SUMCO，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。



金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

大尺寸硅片仍由海外主导，国内需求持续扩张

- “贸易战”影响下，国产12英寸大硅片或加快渗透。当前全球12英寸硅片形成“寡头”竞争格局，且基本由日本企业主导。12英寸硅片产能CR5约达80%，出货量占比也高达80%。
- 供给端：根据SEMI统计及公开数据统计，2024年全球12英寸硅片月均出货量约865万片/月，信越化学、SUMCO、环球晶圆、SK Siltron合计月均出货占比约79.08%。
- 需求端：基于国内明确的晶圆厂（Fab）扩建计划，预计2026年中国大陆地区对12英寸硅片的需求将超过300万片/月，占届时全球12英寸硅片需求的1/3，其中以中芯国际、华虹集团、长江存储、长鑫存储为代表的全部内资晶圆厂12英寸硅片需求将超过250万片/月。

图：2024年12寸硅片产能情况

公司	所属国家	截至2024年末投产 产能（万片/月）	截至2024年末全球 产能占比
信越化学	日本	约230	23.71%
SUMCO	日本	约210	21.65%
环球晶圆	中国台湾	三家合计约300	约31%
德国世创	德国		
SK Siltron	韩国		
西安奕材	中国大陆	约70	7.22%
上海新昇	中国大陆	65	6.70%
中环领先	中国大陆	35	3.61%
立昂微	中国大陆	30	3.09%
中欣晶圆	中国大陆	20	2.06%
山东有研艾斯	中国大陆	10	1.03%
上海超硅	中国大陆	未披露	未披露
合计	-	970	100%

数据来源：TECHCET、公司报表，西安奕材，金元证券研究所

图：2024年12寸硅片出货量

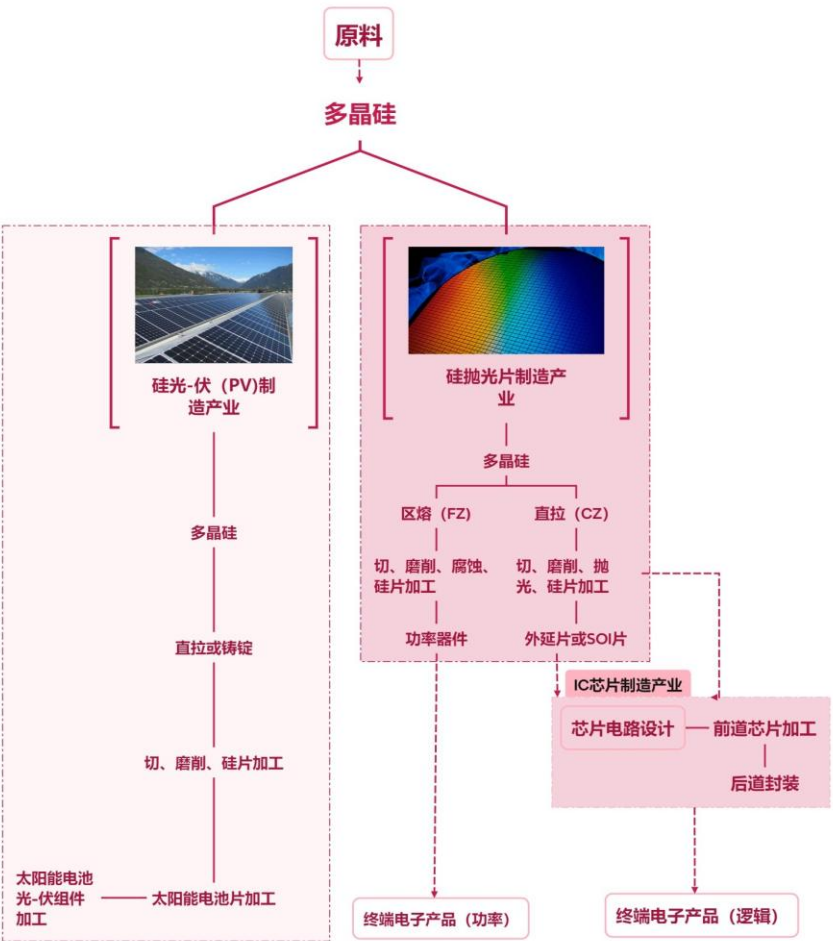
公司	所属国家	2024年月均出货量 （万片/月）	2024年月均出货量占比
信越化学	日本	684	79.08%
SUMCO	日本		
环球晶圆	中国台湾		
德国世创	德国		
SK Siltron	韩国		
其他		181	20.92%

数据来源：TECHCET、公司报表，西安奕材，金元证券研究所



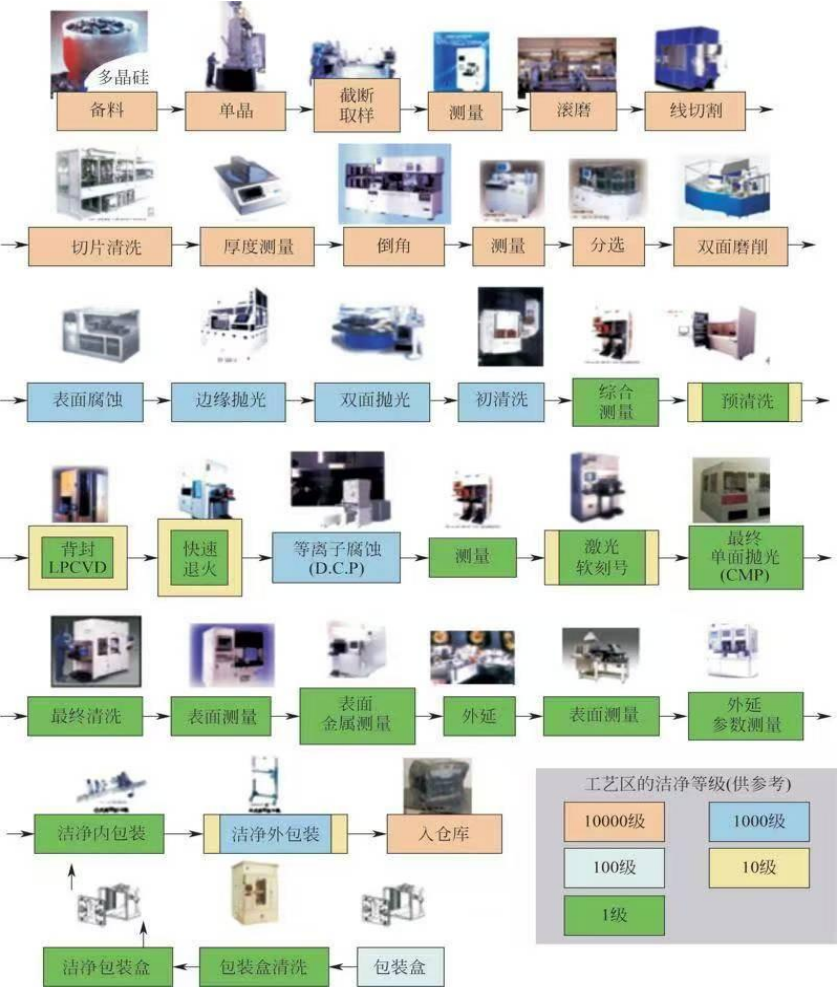
硅光-伏产业链及集成电路用硅抛光片产业链全景

图：硅光-伏产业链及集成电路用硅抛光片产业链



数据来源：金元证券研究所

图：直径 300mm 硅单晶抛光制备的主要工艺流程及设备



数据来源：《芯片用硅晶片的加工技术》，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。



金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

电子级硅片对生产设备材料要求极为严格，我国相应原材料储备量较少

- 在半导体制造领域，使用杂质含量较高的石英坩埚或高纯度石英组件会对半导体器件的生产和功能产生多种不利影响。铝、硼和磷等杂质，即使是极少量的杂质，也会成为无意的掺杂剂，改变硅晶片的电气特性。这些变化会导致掺杂浓度的不良变化，从而导致晶圆上半导体的电性能不一致。
- 半导体硅片对原材料纯度要求较高，电子级多晶硅的纯度要求在9N（99.9999999%），甚至11N纯度。通过化学还原生成多晶硅料再进行提纯，从而得到电子级多晶硅
- 电子级硅片生产工艺对原材料高纯度石英砂纯度要求在4N5（99.995%），甚至5N（99.999%，如SibelCo的IOTA-8，金属杂质含量不超过10mg/Kg）

图表：IOTA高纯度石英砂对金属杂质含量要求及中国光伏用石英砂各元素杂质（mg/Kg）

元素	IOTA-Std	IOTA-4	IOTA-6	IOTA-8	中国光伏石英砂标准
铝	14	8	8	8	<20
铁	0.3	0.3	0.2	<0.05	<0.5
钙	0.6	0.7	0.7	0.64	<1
钾	0.7	4	0.1	<0.05	<1
锂	0.5	0.2	0.2	<0.05	<1
钠	1	1	<0.1	<0.05	<1
硼	<0.1	<0.05	<0.05	<0.05	<0.1
镁	<0.05	0.07	0.07	<0.05	<0.5
锰	0.039	0.013	0.008	0.001	<0.2
钛	1.2	1.4	1.4	1.3	<1.5
镍	0.001	0.002	0.002	<0.001	<0.1
铬	0.006	0.007	0.003	0.001	<0.1
铜	0.028	0.004	0.001	<0.001	<0.1

数据来源：SibelCO，光伏用石英砂标准，金元证券研究所



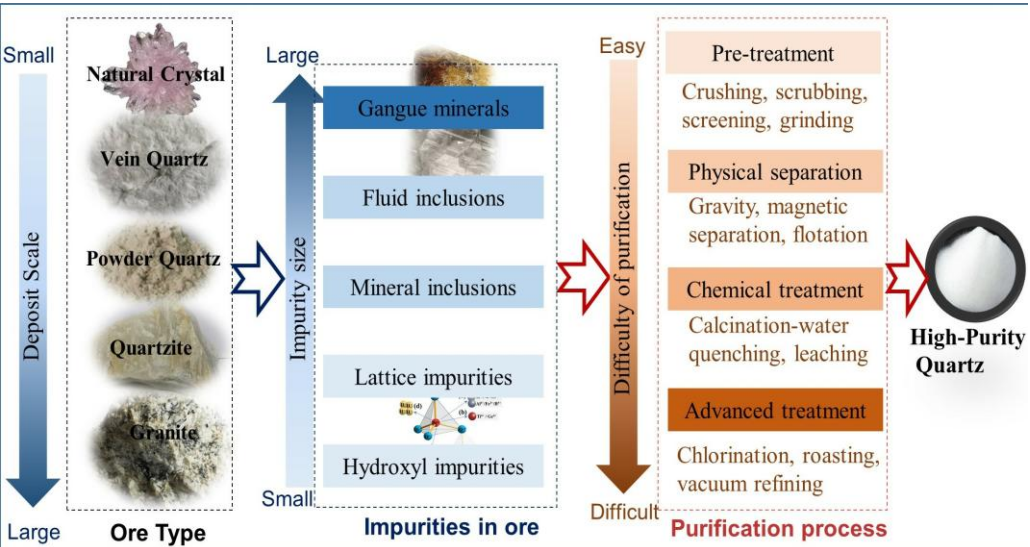
电子级硅片对生产设备材料要求极为严格，我国相应原材料储备量较少

- 目前，我国石英矿床主要有七种工业类型，即天然晶体、石英砂岩、石英岩、脉状石英、粉末石英、石英砂和花岗岩石英。截至2022年，石英岩和脉状石英的总储量分别达到13.6418亿吨和 8210 万吨。但是，能够用作高纯度石英原料的天然水晶、脉状石英、花纲伟岩较少。
- 根据中国地质科学郑州矿产综合利用研究所预测，预计到2025年我国4N5级及以上高纯石英用量将超过25万吨，年复合增长率约20%，国内高纯石英供需缺口将超过10万吨。

矿石类型	形成	规模	特征	应用领域	资源分布/提取难度
天然晶体	在水晶洞中生长缓慢	小	高纯度、高透明度	光学仪器、电子	资源储量低，难以开采
脉状石英	沿断层裂隙的热液填充	中/小	结晶良好	玻璃、冶金	采矿地点多，储量低
石英砂岩	唇液沉积	大/中	由复杂的固井材料组成	玻璃、陶瓷、建筑材料	集中在华南地区，容易开采
石英砂	冲积沉积	大/中	缺乏自然的纹理形状	玻璃、建筑、铸造模具	储量大，开采有利
粉末石英	风化残留物	大/中	极细的粒径	冶金、玻璃、水泥、陶瓷	发现于江西、贵州、湖南
石英岩	变质作用改变的沉积物沉积物	大/非常大	块状结构	耐火材料，硅合金制，玻璃制	储量大
花岗岩石英	深层岩浆中的缓慢结晶	大/非常大	大颗粒，高杂质	利用率不足	分布广泛

数据来源：《Research Status and Challenges of High-Purity Quartz Processing Technology from a Mineralogical Perspective in China》，金元证券研究所

图：不同石英矿床及杂质、提纯工艺



数据来源：《Research Status and Challenges of High-Purity Quartz Processing Technology from a Mineralogical Perspective in China》，金元证券研究所



硅片加工工艺：工业硅->电子级多晶硅

工业硅 → 电子级多晶硅：

- 通过石英砂与还原碳在电弧炉（SAF）反应得到冶金级硅（MG-Si）
 - 真空精炼（VLF）与定向凝固（DS）进行冶金预纯化
 - 氯化：把实心硅转化为可精馏的氯硅烷，使用镍基或内衬高纯石英的流化床反应器；高纯石英喷嘴能抑制 Fe、Ni 等金属污染。把难以在冶金环节去掉的 B、P 等元素转化为挥发性氯化物，为后续精馏做准备。
 - 精馏，利用沸点差“深度洗涤”氯硅烷
 - 化学气相沉积（CVD）：把高纯气体重新转回固态硅，可通过西门子法或流化床颗粒CVD
 - STC 闭环：四氯化硅的再氢化。CVD 副产的大量 STC 会被送入石英管式氢还原炉，在 1000-1100 °C 下重新变成 TCS，再回到第 4 步使用。
 - 酸洗与分级。Siemens 粗棒或 FBR 颗粒在切割、分级后，用 HF/HNO₃ 等对表面进行化学去污。酸槽和托盘可以是高纯 PVC 配合石英格篮，去除最后痕量金属和氧化皮。
 - 洁净包装
- 从氯化开始直到CVD结束，高温区与强氯氢混合气直接接触的所有内壁、喷嘴、钟罩、炉管几乎都必须用 4-5 N 以上石英制造。在 Siemens 反应器和 STC 氢化炉里，石英对金属杂质的“屏障”作用最为关键——如果局部纯度降到3N，蒸发出来的 Fe、Cr 便足以使最终硅纯度降一个数量级

图表：从工业硅至高纯度电子级多晶硅工艺流程及相关设备

流程	关键反应	主要设备
1. 石英砂 + C → 冶金级硅 (MG-Si) 约98% → 4 N	电弧炉 (SAF) 2000 °C、标准大气压; $\text{SiO}_2 + 2 \text{C} \rightarrow \text{Si} + 2 \text{CO} \uparrow$	水冷壳电弧炉、石墨电极、真空包铝包铜导杆
2. 物理/冶金精炼	• 真空熔炼	真空精炼炉或定向凝固炉、石英电阻炉
4 N → 5 - 6 N	• Slag 精炼 ($\text{CaO} - \text{CaF}_2$)	
	• 定向凝固 (DS)	
	• 酸洗 (HCl/HF)	
3. 直接/间接氯化 → 三氯氢硅 (TCS)	流化床氯化 (FBR)	镍基或石英内衬FBR反应器；尾气冷凝器
5 - 6N → 7 - 9N	$\text{MG-Si} + 3 \text{HCl} \rightarrow \text{SiHCl}_3 + \text{H}_2$ (≈ 300 °C, 1 - 3 bar, Cu 触媒)	
	副产 SiCl_4 (STC)	
4. 多塔精馏提纯 TCS	• 轻组分塔除 CH_3SiCl_3 等	不锈钢或镍基精馏塔；碟片式塔板
9 N → 11N	• 重组分塔除 SiCl_4 • 较高塔板数 (≥ 180)	
5-A. Siemens棒状CVD	石英钟罩反应器	• 5N石英钟罩 (Bell-jar)
11 N→11-12N	$\text{TCS} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Si} + 3\text{HCl}$ (1100 °C, 20 - 30 kPa)；电流加热 Ø 8 mm slim-rod 到 Ø 150 mm	• U-形导杆、石英阀门
5-B. FBR颗粒CVD(或)	600 - 900 °C、流化小种晶；沉积速率8 - 12μm h ⁻¹	石英或 SiC-涂层 FBR 反应器
6. 副产STC→再氢化	$\text{SiCl}_4 + \text{H}_2 \rightarrow \text{TCS} + \text{HCl}$ (1100 °C, MoSi ₂ 加热管)	石英管式氢化炉；Ni-Cr 催化床
7. 棒切 & 酸洗	热锯/线锯切块；HF+HNO ₃ 15 min	PVC 酸槽 + 石英托盘
8. 洁净包装	≥ ISO 5 洁净室	真空充氩袋、石英舟

数据来源：金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。

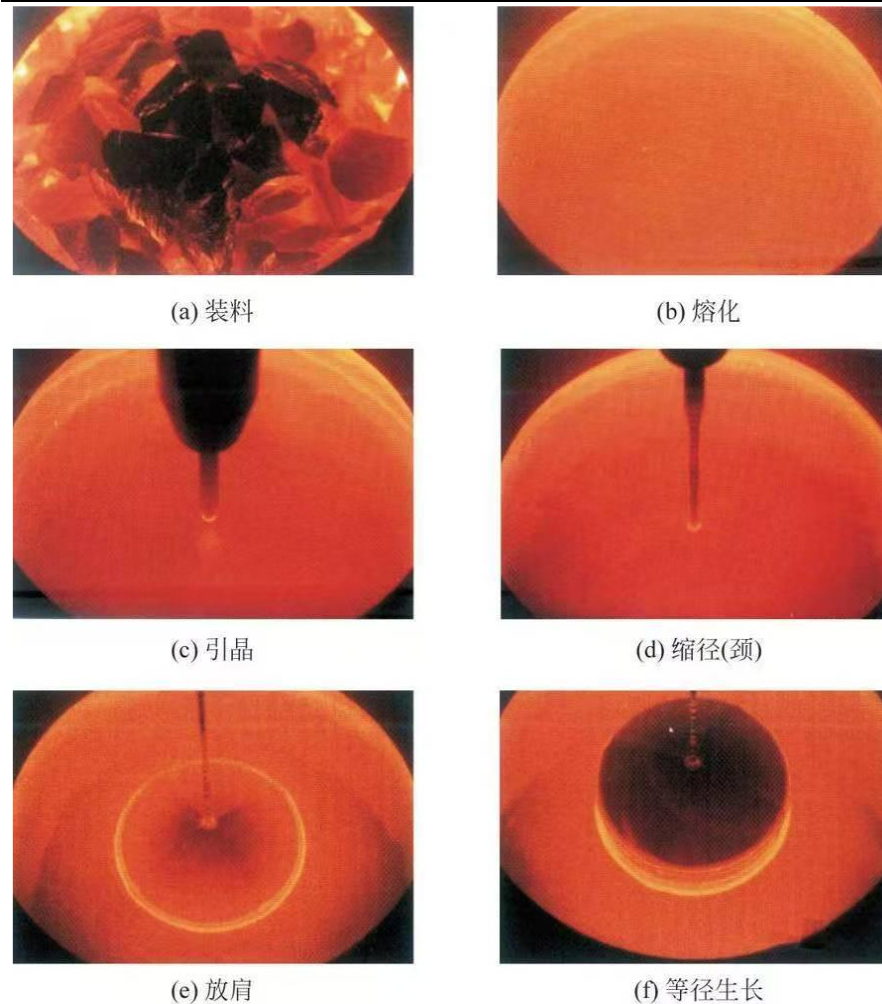


金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

硅片加工工艺：直拉法、区熔法制备硅锭

- **直拉法（CZ法）**：将高纯多晶硅料放入石英坩埚中加热至约 1410°C 融化，然后用一根小的单晶籽晶接触熔融硅液并缓慢提拉，使熔体在籽晶引导下凝固成长出大尺寸单晶硅锭。Dash（缩颈）以消除位错，然后放宽肩部、转为等径晶体坩埚和晶体同时旋转以均匀成分分布，最终长成圆柱状硅单晶棒（晶锭）。典型直拉生长包括引晶、缩颈、等径生长，最后收尾完成晶锭。通过精确控制提拉速度决定晶体直径，控制籽晶/坩埚转速和热场实现无位错单晶生长。
- **主要设备**：直拉单晶炉由加热炉腔、石英坩埚及其升降旋转机构、籽晶杆提拉系统和过程控制系统等组成，在真空或惰性气氛下运行。现代直拉炉可生长直径200 - 300mm的大晶锭（棒）
- **关键控制**：精确控制温度梯度和提拉速率以避免热应力和缺陷产生，同时通过坩埚和晶体旋转以及可选的磁场控制（MCZ技术）影响熔体对流和固液界面形状，从而调节晶体缺陷分布和氧杂质含量。由于直拉法在石英坩埚中生长，硅中会固溶一定浓度的氧；需通过控制冷却速率和后续热处理来管理氧沉淀。直拉工艺需全程严格控制热场和拉速，以获得高纯度、低缺陷的大尺寸单晶硅。

图：直拉法工艺流程



数据来源：《芯片用硅晶片的加工技术》，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。

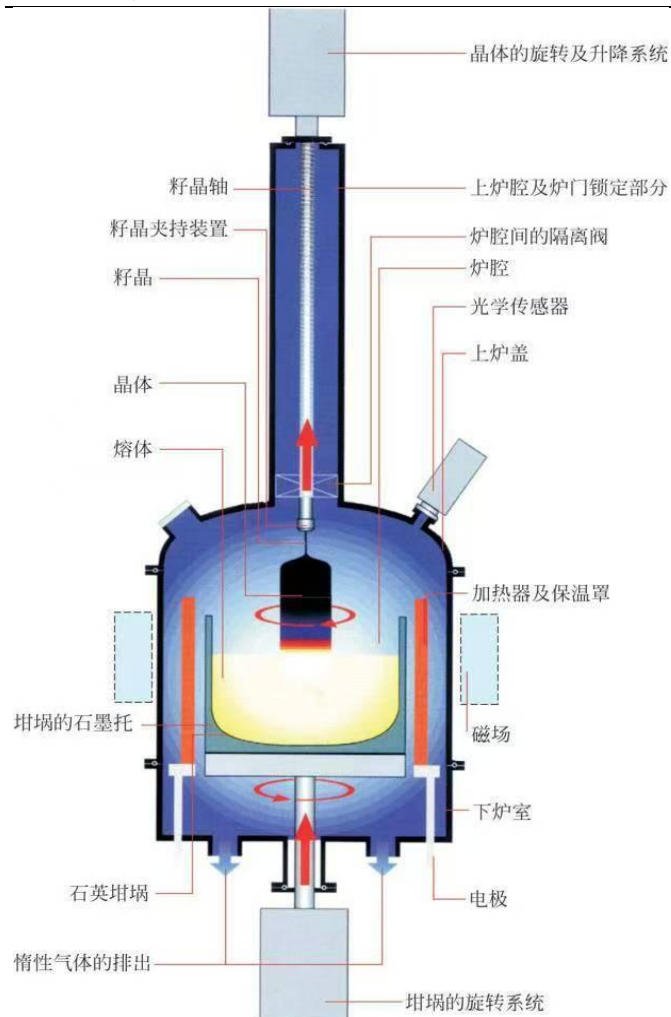


金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

硅片加工工艺：直拉法制单晶硅，坩埚为关键耗材

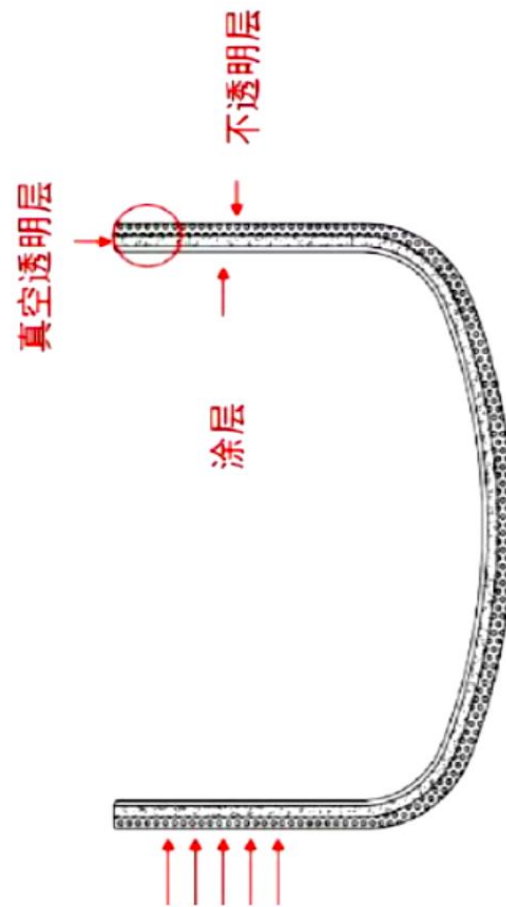
- 石英坩埚是单晶硅拉制工艺中的关键耗材，其作用是在高温下承载硅熔体。在直拉法(Czochralski)单晶炉中，石英坩埚直接影响晶体生长的成品率和晶棒品质，由于单晶硅对纯度要求极高，石英坩埚通常一次或仅少数几次拉晶后即报废更换
- 石英坩埚通常采用多层复合结构，一般具有双层或三层坩埚壁。其中内层为厚约3-5 mm的透明层（又称“气泡空乏层”），外层为含有大量气泡的不透明层（又称“气泡复合层”）
 - 内层（透明层）：气泡极少，晶体纯净。同质透明的内壁可避免大气泡在高温下膨胀破裂，减少石英微颗粒污染硅熔体。内层持续少量溶解提供适量氧杂质，有利于控制单晶中的氧含量，但不会过多引入其他杂质
 - 外层（气泡层）：机械强度与隔热支撑。外层中大量细小气泡使坩埚呈不透明或半透明状态
 - 石英坩埚目前已发展出具有透明层、气泡透明层、外层薄气泡层这样的三层结构，同时也有在最内层涂碱金属（如 Ba）离子溶液或增加超高纯合成石英的技术

图：CZ直拉法单晶炉构造



数据来源：《芯片用硅晶片的加工技术》，金元证券研究所

图：石英坩埚的多层结构



数据来源：国际太阳能光伏网，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。

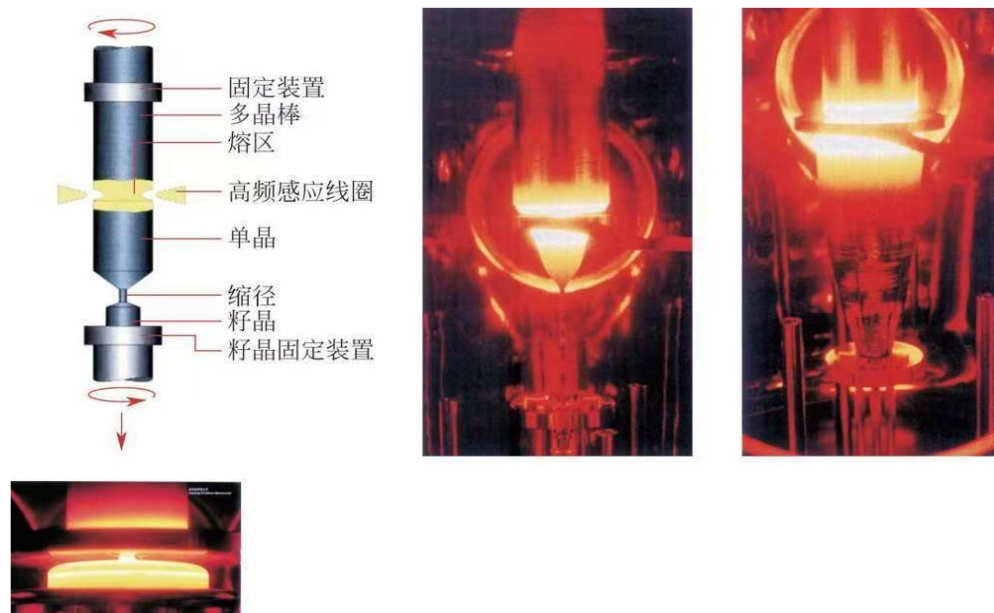


金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

硅片加工工艺：区熔法

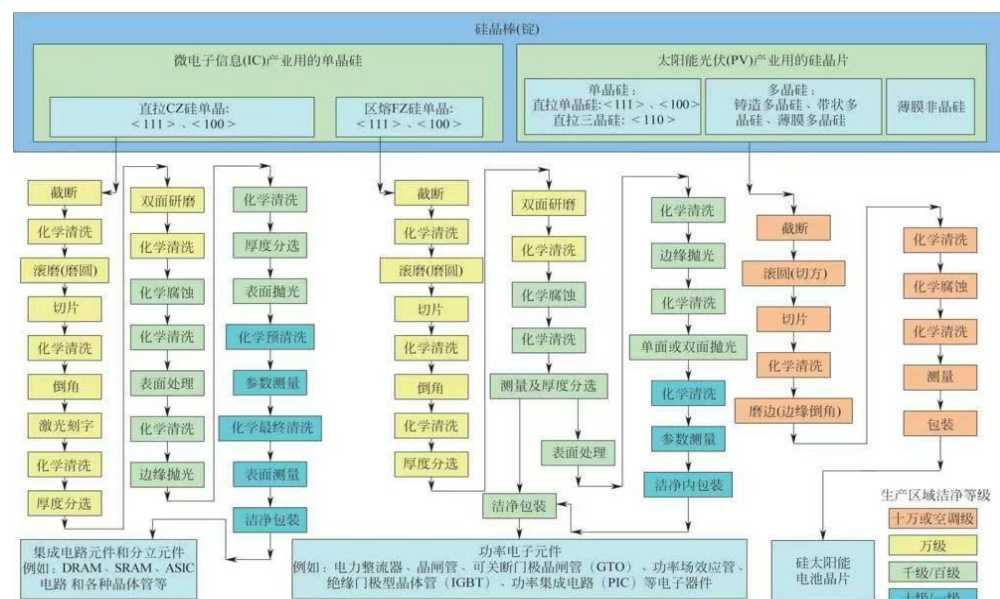
- 区熔法（FZ）：利用高频感应线圈在垂直悬挂的多晶硅棒中产生局部熔融区，**无需坩埚承装熔体**。通过在硅棒下端接触一枚定向籽晶并缓慢移动熔区沿硅棒上移，熔区前沿将杂质推挤至末端，从而在下部冷凝出高纯度的单晶硅棒。由于熔体悬浮不接触容器，**区熔硅杂质含量极低，电阻率可高达数千欧姆·厘米**。区熔单晶炉通常为垂直结构，设有真空或惰性气氛腔体和RF感应线圈。上部固定多晶硅料棒，下部为籽晶和接收单晶。高频线圈加热形成约2厘米高的熔融区。通过精密机制缓慢下移硅料棒或上移线圈位置，使熔融区自下而上扫过
- 工艺特点及控制：区熔法获得的单晶硅纯度和少子寿命极佳，适用于高功率器件（如高反压可控硅、探测器等）的衬底材料。但由于熔区悬浮稳定性要求高，设备和技术复杂，生长过程需精确控制感应功率和熔区形状以防止熔滴散落。此外，**通常区熔晶锭直径受限（ ≤ 200 mm较常见），生产成本高**。关键控制包括维持熔区稳定高度、均匀冷却以避免产生位错，以及在气氛中加入微量掺杂气体以控制电阻率分布。

图：区熔法制备单晶



数据来源：《芯片用硅晶片的加工技术》，金元证券研究所

图：微电子用单晶硅及太阳能光伏产业用硅晶片的 CZ、FZ 法对比



数据来源：《芯片用硅晶片的加工技术》，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。



金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

硅片加工工艺：直拉法 vs 区熔法

- 区熔法含氧量低，电阻率范围广且稳定，晶体完美度高，主要应用于高端功率，但产量及成本不敌直拉法（CZ）

指标	区熔法（FZ）	直拉法（CZ）
杂质含量（氧、碳、金属等）	极高纯度：采用无坩埚的区熔生长，硅液不接触石英容器，避免外源污染。典型轻质杂质浓度极低：氧和碳含量均 <0.4 ppma（<10 ⁻¹⁶ 每立方厘米）。金属杂质亦更少，FZ晶体硅被视为“最高纯度”的材料	有少量坩埚引入杂质：硅液与石英坩埚接触，导致熔融过程中溶入较多氧、碳等杂质。典型直拉硅氧含量约20ppma，碳约0.4-2 ppma，（氧浓度约10 ⁻¹⁸ cm ³ 每立方厘米，碳约10 ⁻¹⁷ 每立方厘米）。金属杂质也可能由坩埚/器壁引入，但经先进工艺控制后含量已非常低。
电阻率范围（及稳定性）	超高电阻率可及稳定：可生长出均匀极低掺杂的本征硅，电阻率可高达 1,000 - 10,000 Ω·cm（远高于CZ硅）。轴向掺杂均匀性佳，晶体电阻率沿长度变化很小。因氧含量极低，避免了热氧形成施主（热施主）导致的掺杂变化，晶片在高温工艺中电阻率更稳定，不易发生电阻率漂移。	电阻率受限且热稳定性差：直拉法由于掺杂在晶体内分布不均匀，难以获得均匀超高阻（>100 Ω·cm）晶体。典型CZ硅电阻率范围从低至中等（几Ω·cm到数十Ω·cm）；通过磁场控制（MCZ）等可提升掺杂均匀度，勉强实现近kΩ·cm级高阻硅。然而，高氧含量的CZ硅在约450℃退火时容易生成热氧施主缺陷，导致电阻率下降或漂移，需通过预处理/退火来稳定电阻率。
氧含量	极低氧：FZ硅片中氧杂质接近零，典型浓度 <1×10 ⁻¹⁶ 每立方厘米（相比CZ低2-3个数量级）。无氧保证晶体中不产生氧沉淀相关缺陷，也无氧热施主效应问题。需要时可通入气相掺杂氮提高机械强度，而无需依赖氧杂质。	高氧：CZ硅中溶解了大量氧，典型浓度在10 ⁻¹⁷ - 10 ⁻¹⁸ cm ³ 每立方厘米范围。拉晶时氧处于过饱和，可在晶体内析出氧化硅沉淀。高氧一方面可在后续热处理形成氧沉淀用于内部吸杂（提高器件工艺良率），但另一方面会引入氧沉淀诱发缺陷（如氧沉淀引起的堆垛缺陷OSF）和热施主效应，需要严格控制氧含量和热过程。
可生长晶圆尺寸（常见直径/最大直径）	尺寸较小：受工艺和物理限制，FZ晶圆直径相对较小。常见商用品直径为4~6英寸部分可达8英寸（200 mm）。8英寸已接近区熔法极限：受熔融区表面张力限制，难以稳定支撑更大熔区。目前市面上极少数厂商能够生产8英寸FZ硅片，再大直径基本无法实现。	尺寸最大：CZ法易于拉制大直径晶体，是现代主流技术。当前主流晶圆尺寸为8英寸（200 mm）、12英寸（300mm）；工业上已成熟应用300mm晶圆。CZ法理论和实验上可达18英寸（450 mm）左右（已实现试生产），但450mm尚未大规模商业化。相比之下，CZ法在晶圆尺寸方面具有明显优势，可供应大尺寸硅片需求。
缺陷密度（位错、COP等）	晶体完美度高，缺陷极少：区熔晶体通常采用细颈技术确保零位错生长，整体上为无位错单晶。由于不含氧，FZ硅中未发现直拉硅中常见的先天缺陷，如晶体原生微粒缺陷COP（晶源微孔）等在氧为零的FZ硅中并不存在。区熔晶体中空位/间隙原子缺陷密度极低，微缺陷水准远低于CZ硅，因而硅片缺陷密度更小，品质更高。	需控制缺陷，高品质晶体更难：CZ晶体通过“缩颈”技术滤除初生位错，实现零位错晶体，但在大尺寸拉晶中仍有发生滑移位错的风险。因含氧较高和冷却条件影响，CZ晶体中易产生氧相关的原生缺陷，例如空隙型的COP缺陷（直拉硅中常见的直径0.1 - 0.3 μm八面体微孔洞，以及氧化诱发的堆垛缺陷（OSF）等。厂家需通过优化拉速热场、掺杂、退火等工艺来抑制缺陷密度，部分高端CZ硅片可实现低COP或无COP，但总体而言CZ晶体原生缺陷密度高于FZ，需要严格质量控制
成本与产能（制造成本、设备成本、设备成本、量产效率等）	成本高，产量低：区熔法工艺复杂、晶锭直径小且良品率较低，单片硅片制造成本往往是CZ法的3-4倍。设备投资也高，单位时间产出硅料少。由于难以大直径和高速拉晶，FZ方法难以规模化量产，全球产量仅占单晶硅很小份额（用于小众高端领域）。因此FZ硅片价格昂贵，通常仅在需要其特殊高纯特性的应用中采用。	成本低，产能高：CZ法占据>95%以上单晶硅市场产能，是半导体工业的主力工艺。其拉晶速度较快，可生长长大晶锭，每根晶锭可切割大量晶圆，摊薄了成本。CZ生产线设备成熟且单片成本低廉。尤其在大尺寸晶圆制造中具有显著经济性优势，适合大规模量产，满足成本敏感型应用的需求。
典型应用领域	高端功率与特殊应用：利用其高纯高阻特性，FZ硅主要用于高压/大功率半导体器件（如IGBT、GTO晶闸管等功率器件）、射频及微波器件、高性能传感探测器（粒子射线探测器等）、以及太赫兹光学元件等需要极低杂质的领域。此外，因少子寿命长，FZ硅用于制造高效率太阳能电池（主要限于航天卫星太阳能电池阵列等成本敏感度低的场合）。某些航天级电子器件和特殊传感器也偏好FZ硅，以获取更高可靠性。	主流集成电路与大众市场：CZ硅片因成本和尺寸优势，几乎覆盖了半导体产业的大部分应用。例如各类逻辑和存储器件的大规模集成电路（如CPU、DRAM）、一般低压功率和模拟器件、大部分MEMS器件和常规传感器皆采用CZ硅片。光伏领域中，大众化的硅太阳能电池基板也主要使用低成本的直拉单晶硅或铸锭多晶硅。总体而言，对于不要求极高晶体纯度的应用（“性价比”更看重），CZ硅片是首选

数据来源：公开资料整理，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。

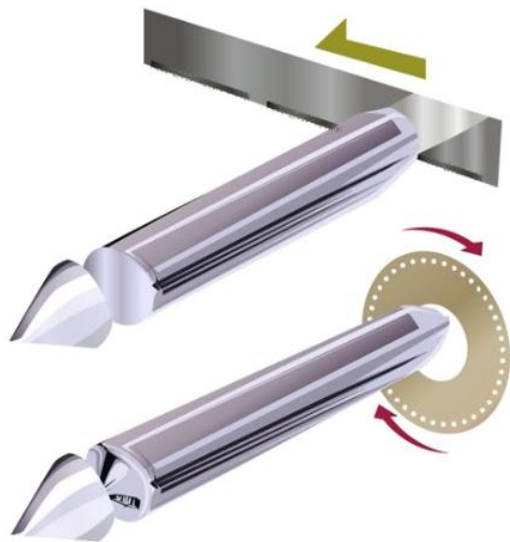


金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

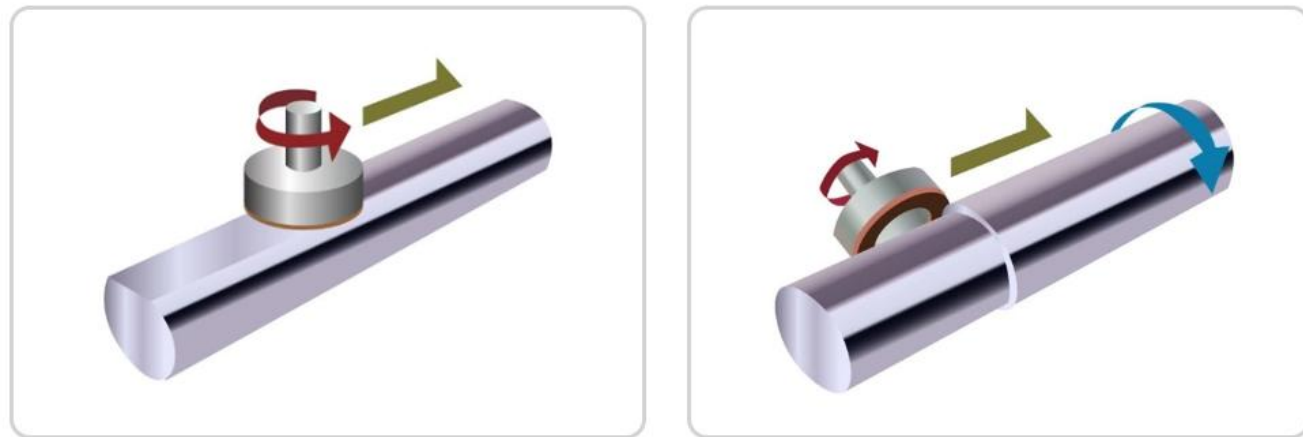
硅片加工工艺：截断、滚磨、切片、倒角、双面研磨、抛光

- 无论是采用的直拉还是区熔方法生长的硅单晶棒，其硅单晶一般是按<100>或<111>晶向生长的，由于晶体生长时的热力势作用，使得晶体外形表面还不够平整，其直径有一定的偏差，外形直径也不符合最终抛光片所规定的尺寸要求，故单晶棒在切片加工前必须在X射线定向仪上，根据集成电路技术要求参照SEMI标准对硅单晶棒的外圆表面进行定向、磨削（滚磨）加工。通过对单晶棒的滚磨加工，使其表面整形达到基本的直径及公差的要求，并确定其定位面的位置及基本尺寸。
- 主要设备：主要使用金刚石线切割机或内径金刚石锯（ID saw）进行截断；切割耗材包括金刚石线、金刚石锯片及冷却液、抛光液等，旨在提高清洁切割度和减少材料损耗
- 海外代表有日本DISCO、Okamoto等公司提供高精度线锯和切割设备；国内厂商如晶盛机电、江苏长晶等近年也开始开发裁切设备，自主化水平逐步提升。

图：硅锭截断工艺（金刚石线切割及内径金刚石锯）



图：外源滚磨及定向平面



数据来源：UKAM Industrial Superhard Tools, 金元证券研究所

硅片加工工艺：截断、滚磨、切片、倒角、双面研磨、抛光

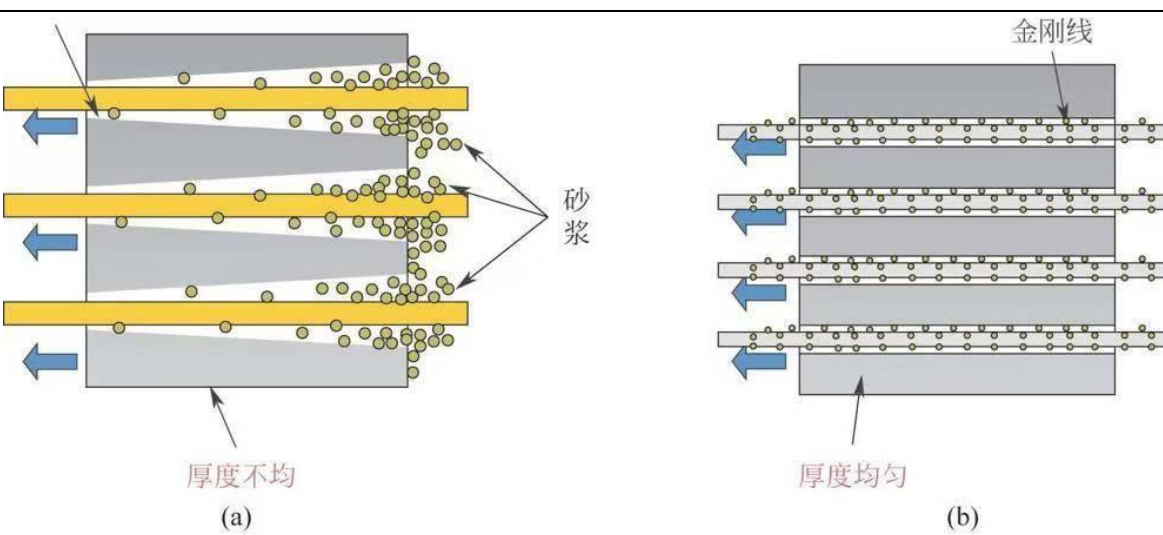
- 硅切片（slicing）加工的目的在于将硅单晶棒（锭）切成一定厚度的薄晶片，这就是硅切片。确定硅切片表面质量的主要参数有晶向偏离度、TTV、warp、bow。这些参数的精度对后道工序的加工（如硅片研磨、硅片腐蚀和硅片抛光等）起着决定作用。由于金刚石在硬度、抗压强度、热导率、摩擦系数等方面均比较合适，故以此粉末加上合适的切削液作摩擦剂，使用切片机将硅单晶棒切成一定厚度的薄晶片（即硅切片）
- 目前，在直径大于100mm的硅切片加工中，尤其是在对直径大于200mm以上的硅单晶棒切片加工中，已广泛采用线切割系统来加工硅切片。以加工直径200mm硅单晶为例，切片厚度为800 μm ，每千克单晶出片约为13.4片，其切割成本每片约为1.51美元，线切割机的产量约是内圆切割机的5倍以上，线切割机的切割运行成本低于内圆切割机运行成本的20%以上。金刚线切割工艺与用砂浆的线切割，在切割速度、成本和单片耗材等方面有明显的优势，且由于切片的厚度均匀性比较好，故可使切片的合格率大幅提高

图：线切割vs内圆切割机

对比指标	线切割机	内圆切割机
切割方法	自由研磨剂加工	固定研磨剂加工
切割的表面特征	线锯的印痕迹	刀片的印痕迹
损伤层深度（ μm ）	5-15	20-30
生产效率（ cm^2/h ）	110-200	10-30
每次切割的硅片数量（片/次）	200~400	1
切缝的损耗（ μm ）	150~210	300-500（直径越大损耗越多）
最小可切硅片厚度（ μm ）	约 200	约 350
最大可切硅晶棒直径（mm）	300	200
硅片总厚度偏差（TTV， μm ）	≤ 15.0	< 25.0
硅片翘曲度（warp， μm ）	非常轻微 $< 5-10.0$	严重 > 50.0

数据来源：《芯片用硅晶片的加工技术》，金元证券研究所

图：砂浆线切割(a)工艺与金刚线切割 (b) 工艺对比



数据来源：《芯片用硅晶片的加工技术》，金元证券研究所



硅片加工工艺：截断、滚磨、切片、倒角、双面研磨、抛光

- 硅片倒角 (edge grinding) 加工的目的是要消除硅片边缘表面经切割加工后所产生的棱角、毛刺、崩边、裂缝或其他缺陷以及各种边缘表面污染，从而降低硅片边缘表面的粗糙度，增加硅片边缘表面的机械强度、减少颗粒的表面沾污
- 经硅片倒角加工后，其边缘表面（截面）一般呈圆弧形（R-type）或梯形（T-type）。倒角加工中为使硅片具有较高的直径尺寸公差，同时边缘表面又具有较小的粗糙度Ra和不留有较深的表面机械应力损伤，如何选择金刚石倒角轮、采用何种倒角磨削工艺是至关重要的。在对大直径硅片的倒角磨削加工过程中，往往先用较粗的金刚石倒角磨轮（粒度常用800#）进行粗倒角磨削，然后再用较细的金刚石倒角磨轮（粒度常用3000#）进行精倒角磨削。

图：粗倒角及细磨轮倒角后的轮廓形貌



(a) 具有参考平面硅片用800#粗的磨轮进行边缘倒角磨削加工



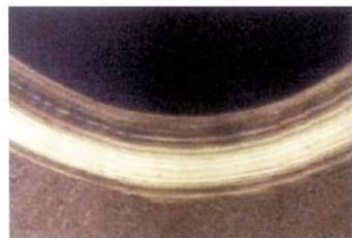
(b) 具有参考平面硅片用3000#细的磨轮进行边缘倒角磨削加工



(c) 具有参考平面硅片用3000#细的磨轮进行最终边缘倒角精细磨削加工



(d) 具有V型槽的硅片用800#粗的磨轮进行边缘倒角磨削加工



(e) 具有V型槽的硅片用4000#细的磨轮进行边缘倒角磨削加工



(f) 具有V型槽的硅片用4000#细的磨轮进行边缘倒角磨削加工

数据来源：《芯片用硅晶片的加工技术》，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。

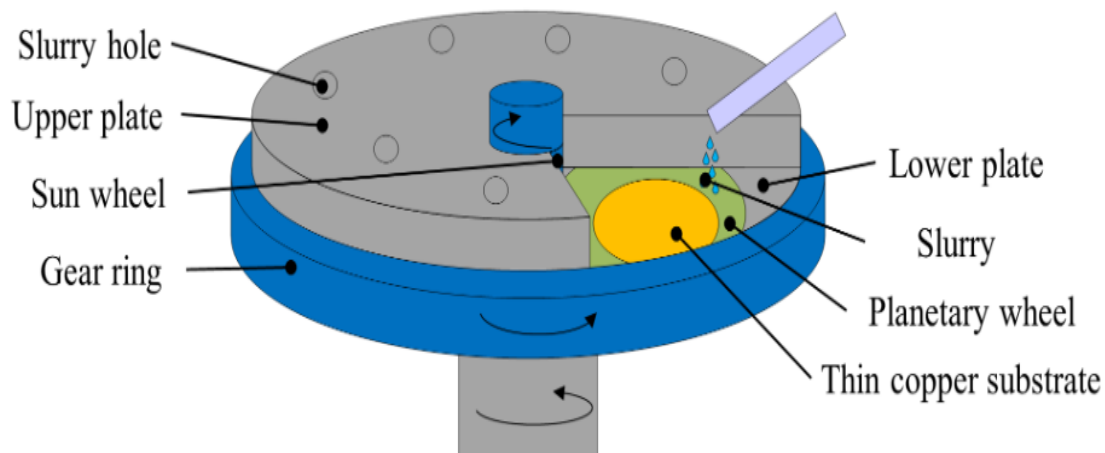


金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

硅片加工工艺：截断、滚磨、切片、倒角、双面研磨、抛光

- 双面研磨（lapping）或磨削（grinding）为了去除在切片加工工序中，硅片表面因切割产生的、深度约20~50 μm的表面机械应力损伤层（damage layer）和表面的各种金属离子等杂质污染，并使硅片具有一定的几何尺寸精度的平坦表面
- 双面研磨系统对硅片进行双面研磨加工时，利用游轮片（carrier）将硅片置于双面研磨机中的上下磨盘（磨板）之间，加入相宜的液体研磨料（slurry），使硅片随着磨盘作相对的行星运动，并对硅片进行分段加压双面研磨加工。双面研磨虽具有较大的磨削速率，但其表面产生的应力损伤也较大、表面损伤层较深，表面损伤层的深度大约是磨砂粒度的1.5~2.5倍。目前对直径小于200mm的硅片常采用双面研磨技术对硅片进行双面研磨加工。

图：双面研磨工艺

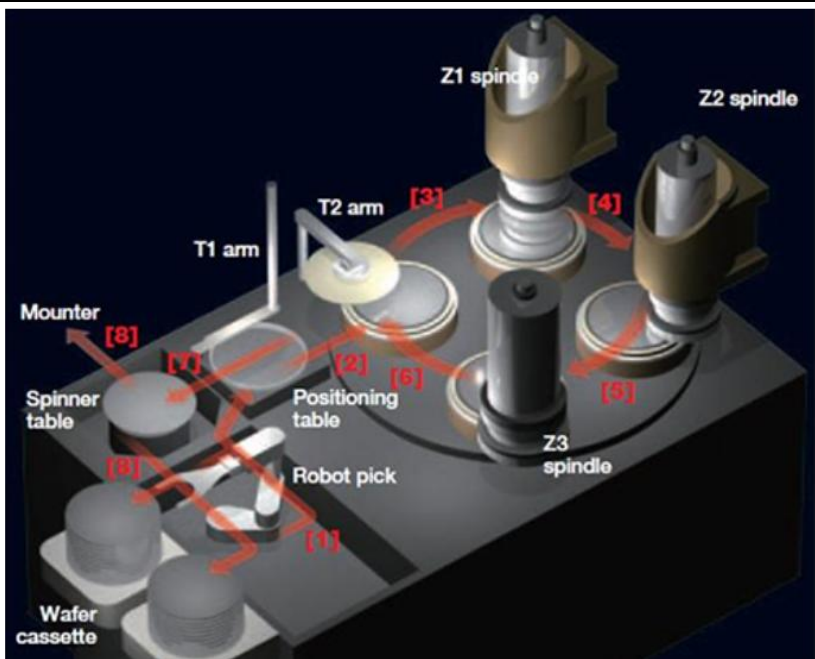


数据来源：MDPI，金元证券研究所

硅片加工工艺：截断、滚磨、切片、倒角、双面研磨、抛光

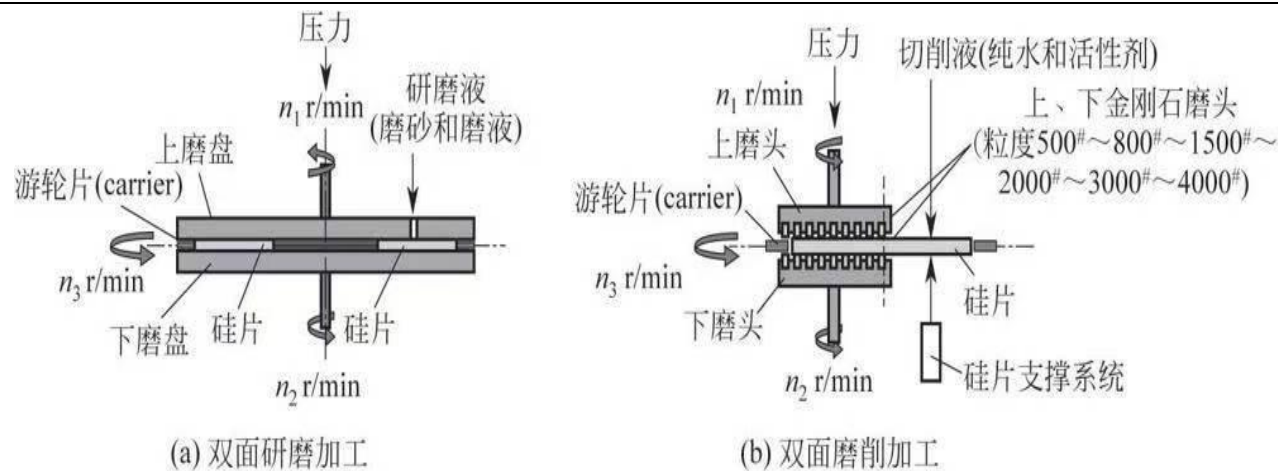
- 表面磨削技术具有加工效率高、加工后表面平整度好、成本低、产生的表面应力损伤小等优点，故在直径300mm抛光片制备工艺中，现已广泛采用表面磨削技术来替代传统的双面研磨工艺。
- 双面磨削与一般常用的双面研磨是两种完全不同形式的加工技术，目前，实现对直径300mm硅片的双面磨削主要有两种加工形式。一种仍然是先对硅片的一个表面进行单面的磨削加工，然后再将硅片翻转（手动翻转或自动翻转）后再进行另一个表面的单面磨削加工。另外一种则是对硅片的正、反表面同时进行

图：表面磨削(粗磨削 T1→细磨削 T2)



数据来源：DISCO，金元证券研究所

图：双面研磨工艺



数据来源：《芯片用硅晶片的加工技术》，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。

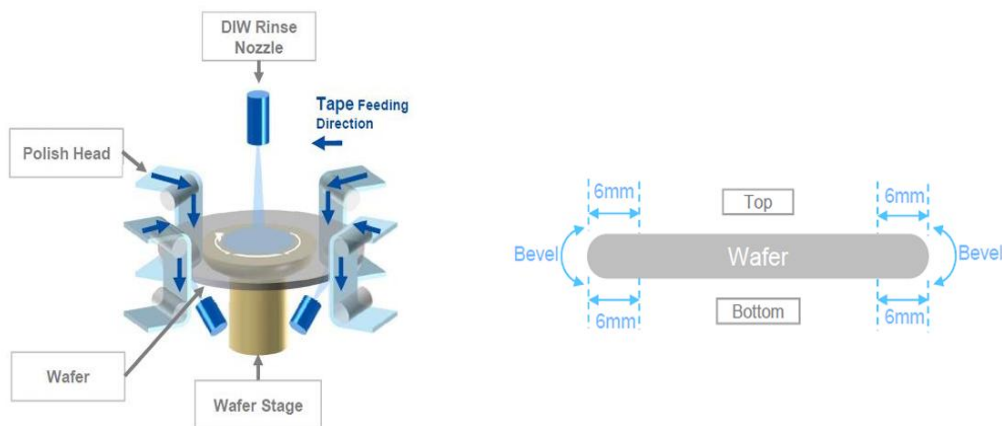


金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

硅片加工工艺：截断、滚磨、切片、倒角、双面研磨、抛光

- 硅片抛光主要包括边缘抛光（edge polishing）及表面抛光（polishing）。采用边缘抛光加工的目的是去除硅片边缘表面由前工序（倒角、研磨）加工所产生的机械应力损伤层、减小表面的机械应力和去除边缘表面的各种金属离子等杂质污染，以降低因在加工过程中碰撞而产生碎、裂的机会，从而可增加硅片边缘的表面机械强度、获得表面粗糙度较低的光亮“镜面”表面，降低微粒对硅片边缘表面的附着沾污，以满足IC工艺要求。
- 根据工艺（或用户）的要求，可对硅片边缘表面先进行机械的带式边缘粗抛光（带式边抛），然后再对其边缘表面进行碱性胶体二氧化硅化学机械抛光的精加工（化学边抛）

图：边缘带式抛光



数据来源：《WAFER BEVEL EDGE ENGINEERING: EDGE CLEANING AND BONDING APPLICATIONS》，金元证券研究所

图：边缘抛光后边缘平整度更好，且边缘形状未有变化



数据来源：Nano System Solution，金元证券研究所

硅片加工工艺：截断、滚磨、切片、倒角、双面研磨、抛光

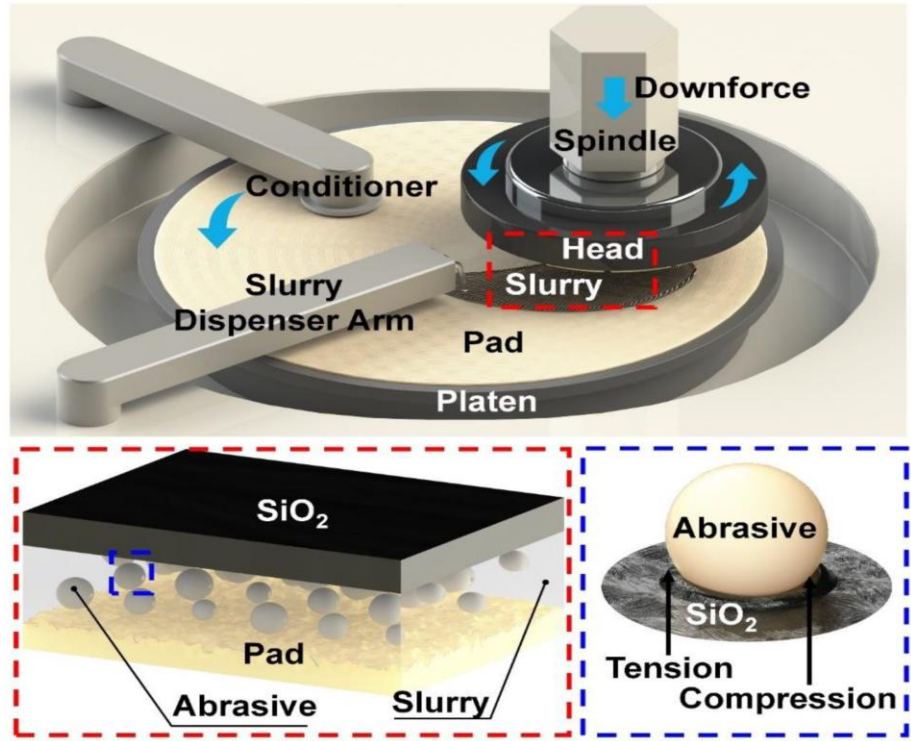
- 硅片表面抛光的目的在于去除其表面由前工序（切片、研磨等）所残留下的微缺陷及表面的应力损伤层和去除表面的各种金属离子等杂质污染，以求获得硅片表面局部平整度、表面粗糙度极低的洁净、光亮“镜面”，满足制备各种微电子（IC）器件对硅片的技术要求
- 为了确保硅片表面的抛光加工精度，根据工艺要求可对硅片进行两步（粗抛光、精抛光）或三步（粗抛光、细抛光、精抛光）或四步（粗抛光、细抛光、精抛光、最终抛光）碱性胶体二氧化硅抛光液的化学、机械抛光（chemical mechanical polishing-CMP）的单面或双面的多段加压抛光工艺。

图：硅片的抛光工艺

抛光工艺	步骤	去除率 ($\mu\text{m}/\text{min}$)	典型压力 (kPa)	抛光垫类型	抛光液特点	作用
两步抛光	粗抛光 / 精抛光	高 / 低	$\sim 30 - 70$ / ~ 30	硬浸渍毡 / 软垫	粗 / 细硅胶浆 + 碱性蚀剂	粗抛：去除损伤、平整；精抛：去除微痕、提高光洁
三步抛光	粗抛 + 细抛 + 精抛	高 / 中 / 低	$\sim 30 - 70$ / $\sim 40 - 60$ / ~ 30	硬毡 / 中垫 / 软垫	硅胶浆 + 碱性蚀剂	增设细抛阶段，提高均匀性，削弱粗抛尖峰
四步抛光	粗 + 细 + 精 + 终抛	高 / 中 / 低 / 极低	$\sim 30 - 70$ / $\sim 40 - 60$ / ~ 30 / ~ 10	硬毡 / 中垫 / 软垫 / 极软垫	硅胶浆 + 缓冲溶液	加最终抛进一步消除亚纳米缺陷，获得镜面效果

数据来源：公开数据整理，金元证券研究所

图：CMP 工艺图



数据来源：MDPI，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。



金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

硅片的表面处理、清洗及检测

- **CMP抛光后**需立即进行系统化清洗，以去除抛光液和微粒残留。典型流程包括 预清洗→主清洗→后处理/干燥。预清洗阶段主要以DI水冲洗和/或使用表面活性剂或碱性清洗液，初步去除大颗粒和有机污染物。主清洗阶段一般采用RCA清洗流程：首先进行SC-1（氨水+过氧化氢）清洗，然后过水冲洗，再进行SC-2（盐酸+过氧化氢）清洗，或视情况在中间加入稀释HF（DHF，稀释氢氟酸）去除化学氧化层，最后再用DI水冲洗。清洗结束后可进行臭氧水或过氧化氢处理，生长化学氧化层保护硅表面，并进行最终冲洗与烘干。
- **高温热处理（退火/氧化）**：抛光后可在窑炉中进行热氧化和退火。生长一层几十纳米的牺牲氧化层可以“削”去近表面抛光损伤（氧化后用HF去除），同时在表面形成高质量SiO₂保护层。进一步的氢气或氩气退火（如1000℃以上）会去除表层过剩氧，提高晶片晶体质量
- **背面损伤增强**：在热处理之后，背面通常进行“损伤层”制备，以实现外部吸杂。常用方法包括机械喷砂（采用氧化铝颗粒或硅砂喷射）、化学腐蚀（例如KOH刻蚀产生粗糙多孔层）或激光照射打入局部损伤等
- **背面CVD涂层处理**：另一类外部吸杂技术是在背面沉积多晶硅或硅基膜。常见工艺是在低压化学气相沉积（LPCVD）设备中，在背面原子层或微小过剩氧化前沿沉积一层多晶硅膜。多晶硅膜具有粗糙的晶粒结构，其晶界可作为杂质的富集位点，因此对杂质有良好的吸附作用。沉积完成后对硅片进行高温退火（例如1000℃左右），促进金属杂质从硅基材中迁移到多晶硅层中；退火后再用KOH或其他选择性刻蚀液去除多晶硅，恢复背面光洁。



硅片的表面处理、清洗及检测

半导体晶圆在制造过程中需经过多道检测步骤，以保证后续工艺良率与器件性能。主要检测内容包括：

- **外观与洁净度检查：**对裸晶圆进行目视或显微镜观察，检测划痕、颗粒污染、缺陷等宏观情况。无图形晶圆检测常采用暗场显微或激光散射技术，将激光束照射在旋转晶圆上，通过散射光定位表面颗粒/缺陷。
- **薄膜厚度与材料测量：**在各沉积、退火或CMP工艺后，对膜厚及物性进行检测。常用方法包括光学椭偏（Ellipsometry）、干涉测量、棱镜耦合法，以及四探针和涡流等电学方法。椭偏仪可在一定入射角下测量偏振光变化，直接得到薄膜厚度和光学常数；四探针法和涡流法则通过测量膜电阻或线圈阻抗推算厚度
- **关键尺寸（CD）测量：**对光刻显影、刻蚀后形成的线路宽度、侧壁角度等进行在线量测。通常采用非成像光学散射（OCD）技术，通过测量光散射谱反演刻蚀后沟槽/线宽的三维形貌。伴随工艺节点缩小，散射测量逐步从可见光扩展至深紫外甚至X射线波段，以提高灵敏度
- **晶圆形貌与翘曲（Bow/Warp）测量：**对整体晶圆平整度和应力进行评估，如通过激光干涉等方法测量翘曲度和应力分布。
- **晶格缺陷检测：**硅片内部的晶格缺陷（点缺陷、位错、层错等）可通过X射线衍射（XRD）等无损技术识别。XRD利用X射线与晶体结构相互作用揭示内部缺陷和内应力分布，无需特殊制备且可探测硅片体内位错、堆垛层错等缺陷。
- **金属污染检测：**采用全反射X射线荧光（TXRF）和感应耦合等离子体质谱（ICP-MS）等技术定量检测晶圆表面微量金属污染物。TXRF以极小入射角激发晶圆表面，仅检测顶层3 - 8nm范围内的元素，可灵敏扫描Cu、Fe等金属含量并实现污染映射。
- **缺陷复检与分类：**对自动检测扫描出的缺陷，使用光学显微镜或扫描电子显微镜（SEM）进行复测确认和详细分类。SEM还可用于3D堆栈或晶圆背面探针测试前的缺陷分析。



硅片的表面处理、清洗及检测

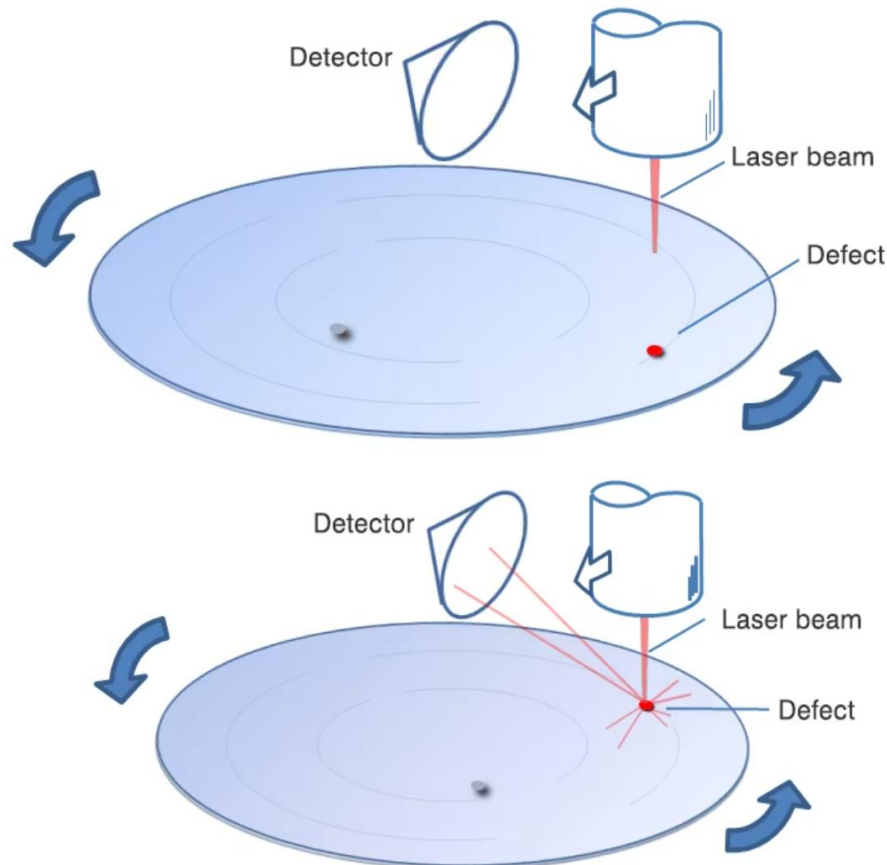
• 裸晶圆检测通常包括以下关键项目：

- 表面颗粒与杂质检测：检测晶圆表面的微粒、污染物（如灰尘、金属离子）等；
- 表面粗糙度和平整度检测：包括表面的粗糙度（Ra）、纳米级平整度；
- 厚度、翘曲度与弯曲度检测：评估晶圆的厚度变化（TTV）、翘曲（warp）、弯曲（bow）等参数；
- 电阻率及掺杂浓度均匀性检测：评估硅片掺杂的电阻率均匀性；内部晶体缺陷检测：检查内部隐裂、位错、空洞、气泡等缺陷

• 光学检测使用可见光或激光，通过收集和分析反射或散射光信号识别表面颗粒与杂质。

- 暗场检测（Dark Field）：激光束以一定角度照射晶圆，通过分析表面颗粒散射的光信号，具有高灵敏度，尤其适合快速大面积扫描。
 - 亮场检测（Bright Field）：光束垂直入射晶圆表面，分析表面的反射光变化，适合检测表面的轻微划痕和表面粗糙度。
- 红外透射成像（Infrared Inspection）硅材料在红外波段具有一定透过性，可用红外透射成像检测晶圆内部的隐裂、气泡等缺陷。通过监测红外光的透过率变化，快速定位和识别晶圆内部异常区域。
 - 超声波共振检测（RUV）超声波共振检测通过向晶圆施加超声波信号，分析晶圆在不同频率下的共振模式。当存在内部裂纹或缺陷时，共振频率会发生明显变化，从而检测出内部缺陷的位置。
 - 四探针法（Four-Point Probe）利用四根探针分别施加电流和测量电压，测量晶圆电阻率。可精确评估掺杂浓度分布是否均匀。
 - 晶圆几何形貌测量采用激光干涉或非接触式光学测量技术，精确测量晶圆的厚度、弯曲度和翘曲度，以确保晶圆的机械平整度满足生产需求。

图：无图型光学检测



数据来源：Hitachi，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。

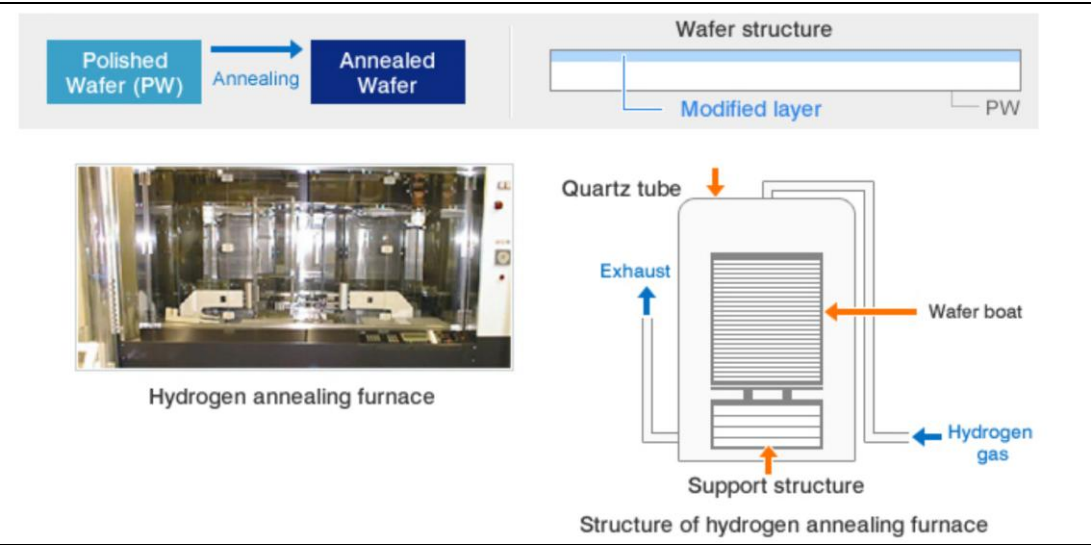


金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

硅片分类：退火硅片，高温退火改善晶体质量

- 退火硅片是指将抛光硅片再经高温退火处理以改善晶体质量的硅片。将硅片置于高温炉中，在氢气或惰性气氛中加热到接近1100 - 1200° C并保温一段时间，然后缓慢冷却。高温氢/惰性退火会使硅片表面附近的氧从晶格中析出并向表面扩散排出，从而形成表层无氧或低氧的“改良层”。同时，在晶圆体内部富集的氧有可能形成微氧化物沉淀，能够捕获金属杂质。
- 退火后的硅片表层晶格更完美、缺陷密度更低，表面区域形成无氧缺陷区，有利于提高器件良率。同时硅片内部形成的氧沉淀能充当内部捕获中心，提高对重金属污染的吸附能力，实现内部自洁净（Intrinsic gettering）
- 退火片把表层“无缺陷区”与深层“金属陷阱”结合，解决了90nm以后微栅氧、深结漏电与金属交叉污染三大痛点。随着高-k 金属栅、FinFET、3D-IC 的普及，以及芯片返修-回流温度不断上升，退火片已成为抛光片和外延片之间的“主流过渡形态”，并在功率与图像传感器等高可靠场景里继续扩大份额。

图：退火硅片



数据来源：SUMCO，金元证券研究所

图：普通抛光片及退火片对比

关键参数	抛光片	退火片（DZ + IG）	影响
近表面氧含量	24 - 38 ppma（典型CZ）	<1-5ppma，可低至<1 ppma	低氧可避免 COP 及微空洞在沟道区形成
Denuded-Zone（“超洁净层”）深度	无系统 DZ；表层残氧	20 - 40 μm 为主流（可拓展到 ≥70 μm）	为器件区提供“无沉淀、无位错”区域
内部吸杂（IG）沉淀密度	基本无连续沉淀网络	5×10 ¹¹ - 1×10 ¹² 平方厘米氧沉淀/位错环	深层捕捉 Fe/Cu/Ni 等金属离子
COP 缺陷密度	0.5 - 2平方厘米、（取决于长晶）	≤0.1 平方厘米（目标“Zero-COP”）	直接关联栅氧可靠性
表面粗糙度	≤ 0.5 nm（CMP 限制）	同抛光片；退火对表面粗糙度影响极小	维持极薄栅介质的一致性
外延可用性	需额外清洗/轻蚀	“Epi-ready”——外延界面缺陷少	节省一次 RCA/轻刻，减少位错
主要场景	通用逻辑、模拟	FinFET/DRAM、高可靠 BCD、CIS、功率 IC	-

数据来源：公开信息整理，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。

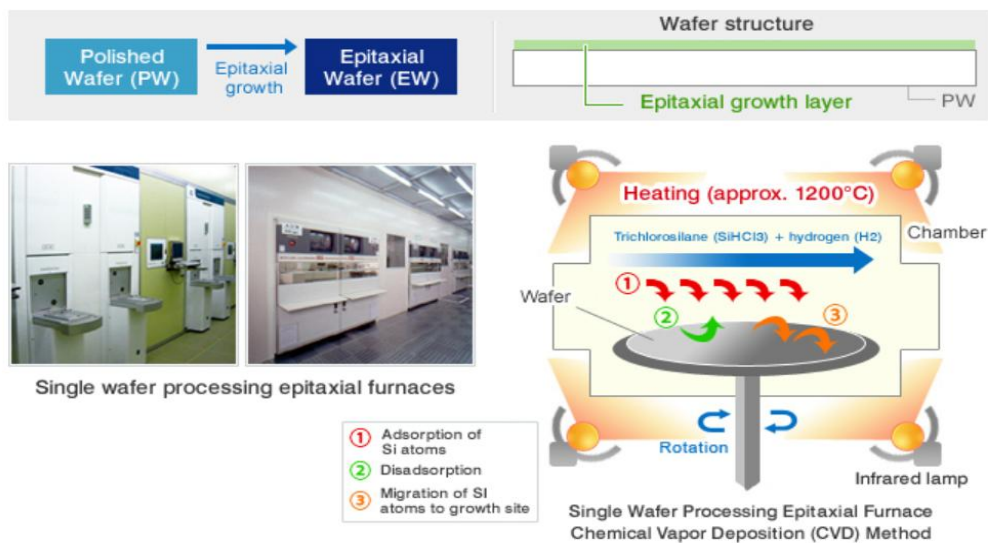


金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

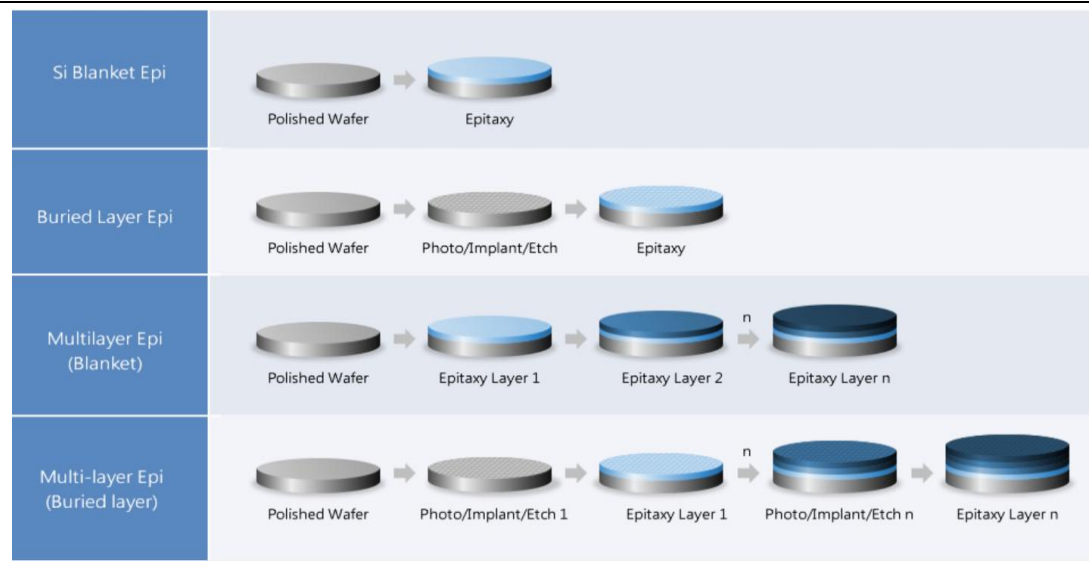
硅片分类：外延硅片，精确控制掺杂及参数

- 外延硅片是在抛光硅片表面再生长一层高纯度单晶硅薄层。通过在专用外延炉中将硅片加热至约 1200°C ，同时通入硅烷（ SiH_4 ）、三氯氢硅（ SiHCl_3 ）等含硅气体和氢气，使硅在晶片表面发生化学气相沉积生长单晶层。外延层沿基底晶格外延生长，保持与基片相同的晶向。可根据需要掺入特定掺杂气体控制外延层电阻率和厚度。外延生长通常在密闭的CVD外延炉中进行，可分为批量炉管式（可同时处理多片晶圆）和单片式（单晶圆反应腔）两类设备。
- 通过外延可以得到比基片更高纯度、更低缺陷密度的硅层，适合制造高性能器件或需要不同阻值层结构的器件。外延层厚度和掺杂均匀性（需精确控制反应时间和气体流量比例），界面质量（在沉积前进行表面洁净处理，去除天然氧化膜），以及避免滑移缺陷（要求升温降温速率平缓以防晶圆热应力）。高端外延片生产还会监控沉积过程中生成的少量缺陷（如穿刺位错），通过调整工艺参数将缺陷密度降至极低。
- Si Blanket Epi 是最传统、成本最低的整片外延；Buried-layer Epi 则在表面以下嵌入高掺杂或应力层，为功率与高速器件降阻 / 调场。将“多层”与“埋层”结合，可在一颗芯片内部做复杂的纵向掺杂/应变工程，但对外延炉的温度控制、层界面洁净度和 CMP 平整度提出最高级别要求。

图：外延片生长工艺



图：添加埋层、多层的外延片



数据来源：SUMCO，金元证券研究所



www.jyzq.cn



全国统一客服电话：95372

此文件版权归金元证券股份有限公司所有，未经许可任何单位或个人不得复制、翻印。

数据来源：嘉晶电子，金元证券研究所

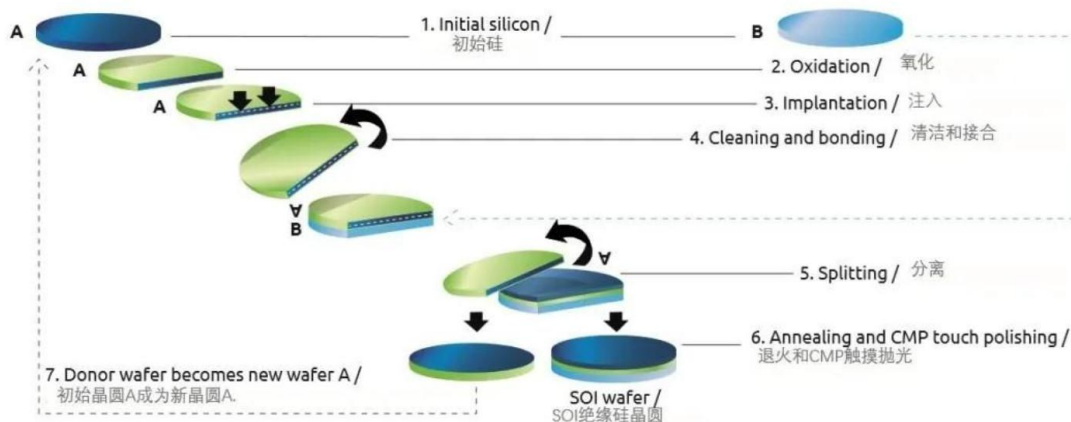


金元证券股份有限公司
GOLDSTATE SECURITIES CO., LTD.

硅片分类：SOI

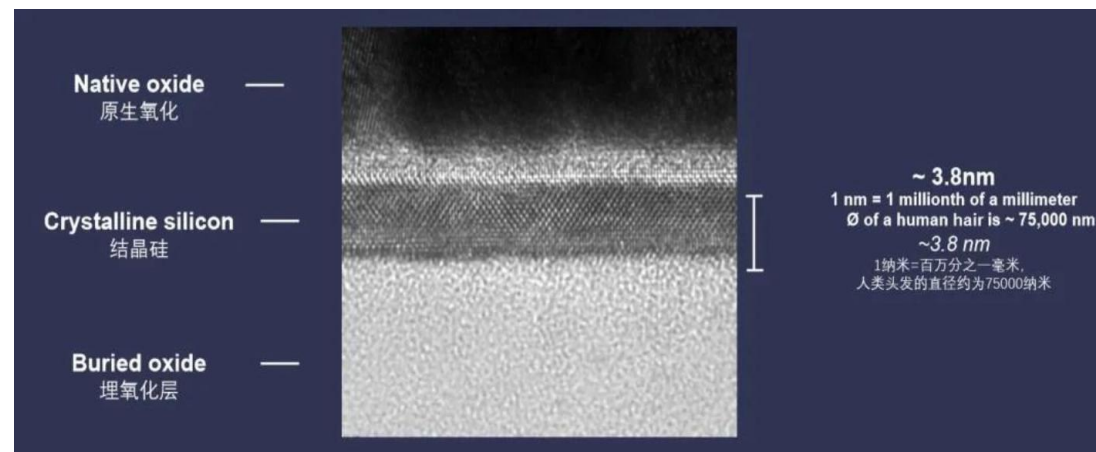
- SOI硅片是在硅片表面下形成一层埋氧绝缘层（BOX）的结构，其制备可通过晶圆键合实现。典型工艺是先两片抛光硅片中至少一片表面生长一层热氧化硅作为绝缘层，然后将两片硅片表面进行超洁净处理后直接对准接触，在室温下依靠范德华力实现键合。接着对键合后的其中一片硅进行机械研磨和化学腐蚀，直至只剩下所需厚度的硅薄层，形成SOI结构。这种“键合加磨削/腐蚀”方法（BESOI）能够获得数十微米以上厚度的硅膜。
- “Smart Cut”工艺是目前工业上制造薄膜SOI的主流技术，由法国Soitec公司开发。流程为：在供体硅片表面先热氧化形成氧化层，然后进行高剂量氢离子注入，使硅片表面下形成一层微裂隙“损伤层”。将注入后的供体片与另一处理过表面（可带氧化层）的衬底硅片对齐键合。随后对键合体加热或施加外力，使得供体片在先前注入的损伤层处劈裂，将其表层薄硅膜转移到目标衬底上。最后对分离出的表面进行CMP抛光，得到表面平坦的SOI晶圆。Smart Cut结合了离子注入和键合，实现了 $<1\mu\text{m}$ 甚至更薄硅膜的高效转移

图：“SMART CUT”技术制造 SOI



数据来源：SOITEC，金元证券研究所

图：原生氧化层及埋层之间的 14 个 SOI 原子平面



数据来源：SOITEC，金元证券研究所

相关公司

- 受制于光伏产业链影响，部分上游原材料及公司业绩整体承压。我们认为，受益于国产晶圆代工厂产能爬坡需求，当前应聚焦于300mm大硅片国产替代生产商及相关工艺设备、耗材：
 - 高纯度石英制品供应商：
 - 半导体业务占比持续提升：凯德石英（835179.BJ）
 - 300mm大硅片及重掺工艺生产商：
 - 12英寸外延片产能快速爬坡：立昂微（605358.SH）
 - 抛光设备及耗材：
 - CMP设备龙头华海清科（688120.SH）
 - CMP抛光液+抛光垫 鼎龙股份（3000054.SZ）
 - 无图型检测设备：
 - 中科飞测（688361.SH）

风险提示

- 晶圆代工厂及IDM厂扩产不及预期
- 硅片厂规模化效应失效
- 半导体行业周期性下行
- 政治、政策不确定性因素及其他宏观因素



投资评级说明

金元证券行业投资评级标准：

增持：行业股票指数在未来6 个月内超越大盘；

中性：行业股票指数在未来6 个月内基本与大盘持平；

减持：行业股票指数在未来6 个月内明显弱于大盘。

金元证券股票投资评级标准：

买入：股票价格在未来6个月内超越大盘15%以上；

增持：股票价格在未来6个月内相对大盘变动幅度为5%~15%；

中性：股票价格在未来6个月内相对大盘变动幅度为-5%~+5%；

减持：股票价格在未来6 个月内相对大盘变动幅度为-5%~-15%； 。



免责声明

本报告由金元证券股份有限公司（已具备中国证监会批复的证券投资咨询业务资格）制作。本报告所载资料的来源及观点的出处皆被金元证券认为可靠，但金元证券不保证其准确性或完整性。该等信息、意见并未考虑到获取本报告人员的具体投资目的、财务状况以及特定需求，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。投资者应当对本报告中的信息和意见进行独立评估，并应同时考量各自的投资目的、财务状况和特定需求，必要时就法律、商业、财务、税收等方面咨询专业财务顾问的意见。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，金元证券及/或其关联人员均不承担任何法律责任。投资者需自主作出投资决策并自行承担投资风险，任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

本报告所载的信息、材料或分析工具仅提供给阁下作参考用，不是也不应被视为出售、购买或认购证券或其他金融工具的要约或要约邀请。该等信息、材料及预测无需通知即可随时更改。过往的表现亦不应作为日后表现的预示和担保。在不同时期，金元证券可能会发出与本报告所载意见、评估及预测不一致的研究报告。

金元证券的销售人员、交易人员以及其他专业人士可能会依据不同假设和标准、采用不同的分析方法而口头或书面发表与本报告意见及建议不一致的市场评论和/或交易观点。金元证券没有将此意见及建议向报告所有接收者进行更新的义务。金元证券的自营部门以及其他投资业务部门可能独立做出与本报告中的意见或建议不一致的投资决策。

在法律许可的情况下，金元证券可能会持有本报告中提及公司所发行的证券头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或争取提供投资银行业务服务。因此，投资者应当考虑到金元证券及/或其相关人员可能存在影响本报告观点客观性的潜在利益冲突。投资者请勿将本报告视为投资或其他决定的唯一信赖依据。

本报告的版权仅为金元证券所有，未经书面许可任何机构和个人不得以任何形式转发、翻版、复制、刊登、发表或引用。

