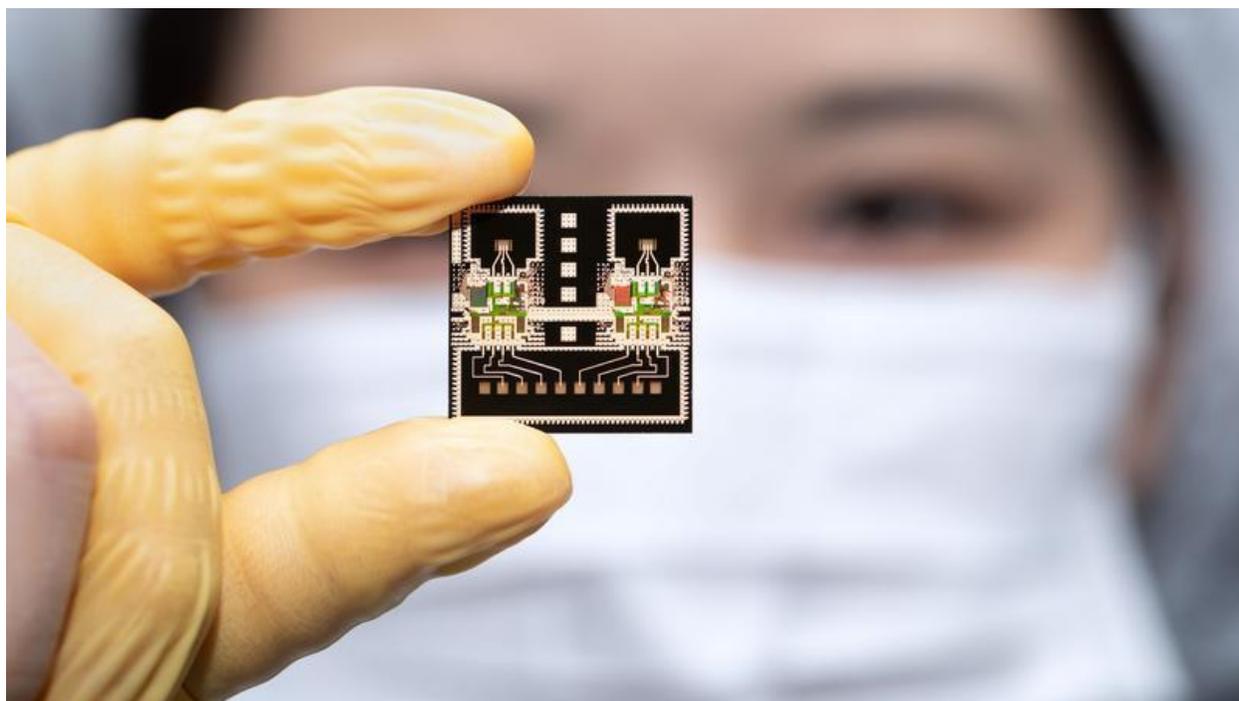


虎嗅 (China)

Understand in one article: the life of a chip – June 18, 2023



2023-06-19 13:03

一文看懂：芯片的一生



果壳硬科技



关注

本文来自微信公众号：果壳硬科技（ID：guokr233），作者：付斌，编辑：李拓，原文标题：《从砂到芯：芯片的一生》，题图来自：视觉中国

芯片承载着人类最先进的科技。如今中国已成为芯片设计强国，但在芯片制造上却处处被卡，芯片制造究竟难在哪里？

时至今日，芯片已形成一套非常成熟专精的制造流程^[1]，它并非简单地一步到位，而是分为存在一定时间间隔和空间次序的多个阶段^[2]。大体来说，芯片制造分为晶圆加工制造、前道工艺（芯片加工）及后道工艺（封装测试）三大环节，我国主要集中切入晶圆加工制造、后道封装测试两个环节，前道工艺大部分高端设备和材料基本均处于空白状态，所以高端芯片往往需要进口。^[3]

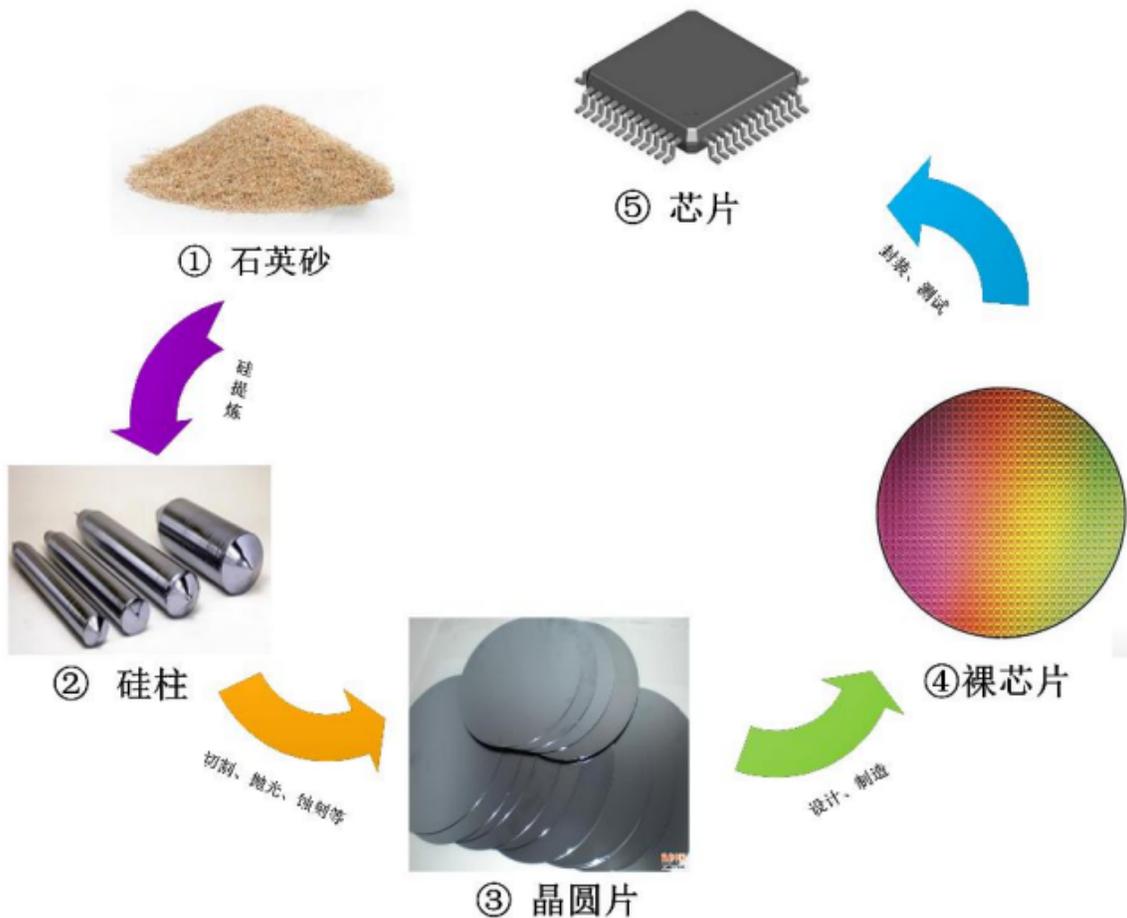
本文是“果壳硬科技”策划的“国产替代”系列第二十四篇文章，关注半导体制造全流程。在本文中，你将了解到：半导体制造全流程的技术细节，半导体制造全流程中涉及哪些设备和材料，半导体制造全流程中国内外的的发展情况。

一、晶圆制造：先有晶圆后有芯

若想获得一颗芯片，要先将石英砂做成薄薄的晶圆片（或者说衬底），再进行后续加工，最后切割为芯片。

因此，晶圆加工制造是半导体产业最上游、最基础的行业，又分为硅的初步纯化、单晶硅的制造以及晶圆制造三个子产业。

集成电路的生产过程：从石英砂到芯片

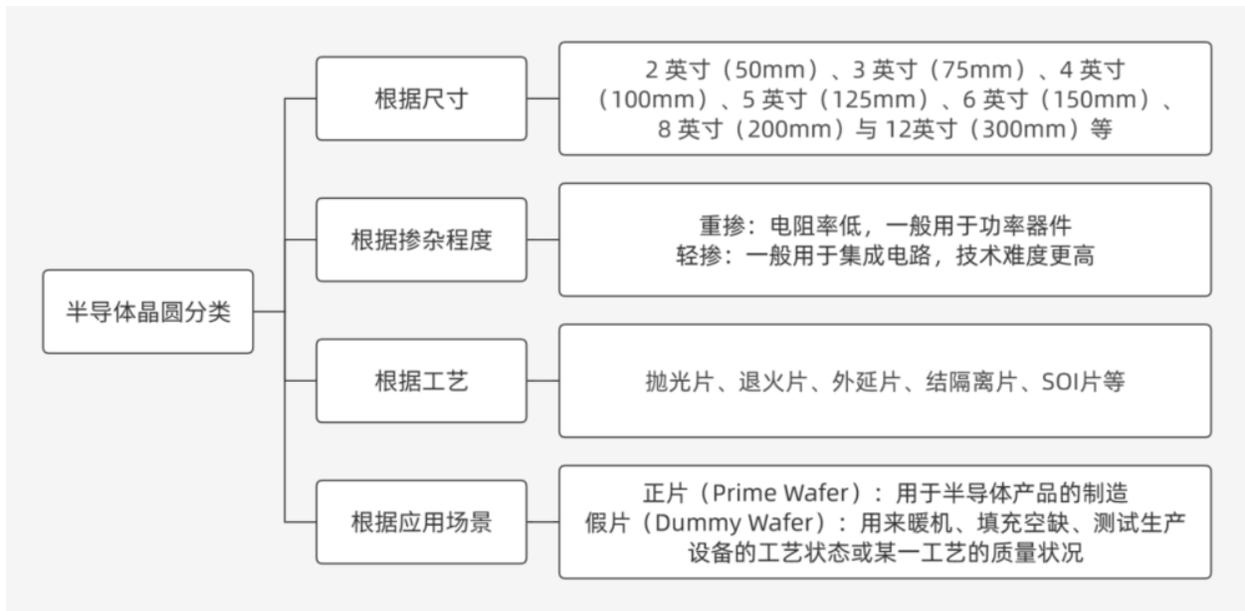


集成电路的生产过程：从石英砂到芯片^[4]

晶圆与威化饼干的英文都是wafer，这并非巧合，打个比方来说，生产晶圆就像生产薄脆饼干，将面粉过筛，再与调料和水混合，经过搅拌成面团后，辊印成型成饼胚，再切割而成。晶圆制造也是同理，只不过，晶圆制造对原材料和工艺的要求极为严苛和复杂。

由于硅在地壳中占比达到25.8%，储量丰富且易于获取，因此硅基半导体是产量最大、应用最广的半导体材料。但并非所有硅都能做芯片，芯片制程工艺的尺度已达到纳米级，任何细微的杂质都会影响芯片正常工作，因此芯片制造中使用的硅是纯度达到99.9999999%~99.99999999%（9~11个9）的高纯多晶硅。

不同芯片需要不同类型晶圆，就像是生产不同口味薄脆饼干，根据不同指标，晶圆分为多种类型。



半导体硅晶圆分类^[5]

根据工艺，晶圆可粗略地分为抛光片、外延片、SOI片三大类。无论做成什么样的晶圆，其原点都是抛光片，因为其它类型晶圆均是在抛光片基础上二次加工的产物，比如在抛光片基础上进行退火处理就变为退火片，可拥有非常繁杂的分支。

| 晶圆片类型 | 工艺特点 | 应用领域 |
|-------|--|---|
| 抛光片 | 抛光工艺可去除加工表面残留的损伤层，实现半导体晶圆表面平坦化，并进一步减小硅片的表面粗糙度以满足芯片制造工艺对晶圆平整度和表面颗粒度的要求 | 直接制造为存储芯片、功率器件等，也可作为外延片、SOI片的衬底材料 |
| 外延片 | 外延技术可以减少晶圆中因单晶生长产生的缺陷，具有更低的缺陷密度和氧含量，通常在低电阻率的衬底上外延生长一层高电阻率的外延层，可提高器件的击穿电压 | 常在CMOS电路中使用，如CPU、GPU等；也可应用于二极管、BJT、IGBT等功率器件制造 |
| SOI片 | 在顶层和支撑衬底间引入了一层氧化物绝缘埋层，通过绝缘埋层实现全介质隔离，大幅减少晶圆的寄生电容及漏电现象，并消除了闩锁效应。 | 适合高压、恶劣环境以及低功耗、集成度高的芯片上，如射频前端芯片、功率器件、汽车电子、传感器以及星载芯片 |

参考 | 上海硅产业招股书  果壳硬科技

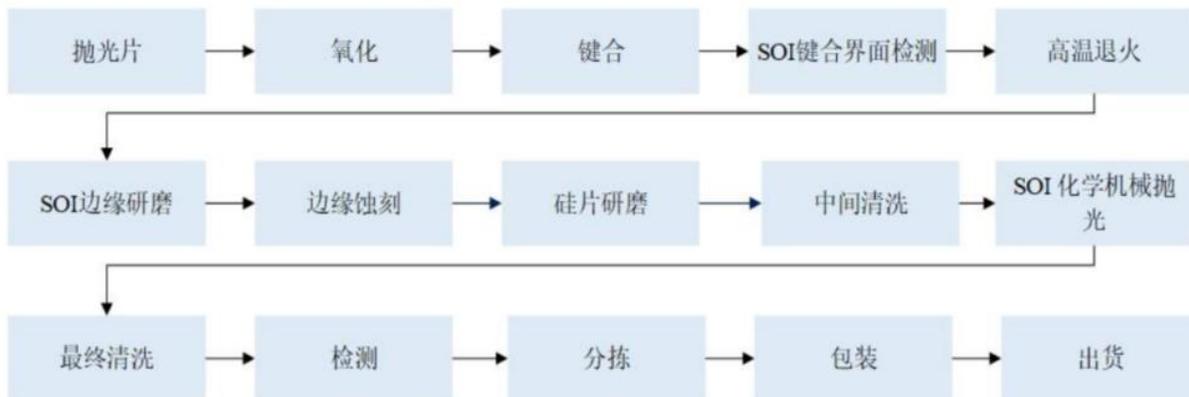
晶圆片主要类型及特点，制表 | 果壳硬科技
资料来源 | 上海硅产业招股书^[6]

不同类型晶圆片生产流程极为复杂：

- 抛光片生产环节包含拉晶、滚圆、切割、研磨、蚀刻、抛光、清洗等工艺；
- 相对于其他工艺过程，每片晶圆的每道工序只需1美元，外延生长每片晶圆大约需要20~100美元，所以外延工艺是集成电路制造中最昂贵的工艺过程之一^[7]，外延片主要为在抛光片的基础上进行外延生长；
- SOI片主要采用键合或离子注入等方式制作。^[6]



半导体抛光片、外延片工艺流程图^[6]



SOI片的工艺流程^[6]

根据直径，晶圆又分为2英寸（50mm）、3英寸（75mm）、4英寸（100mm）、5英寸（125mm）、6英寸（150mm）、8英寸（200mm）与12英寸（300mm）等规格。

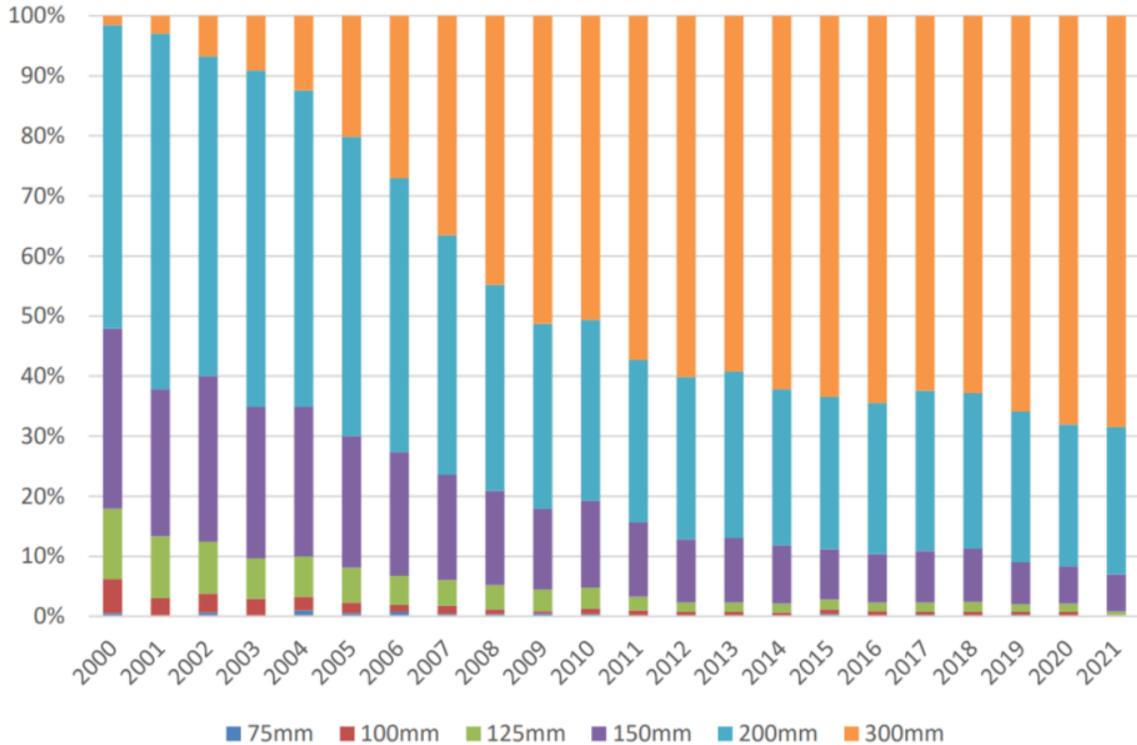
晶圆尺寸越大，每片晶圆可制造芯片数量就越多，单位芯片成本就越低。就像一张饼，饼越大，就能切出越来越多同样大小的小块。

此外，在晶圆上切割芯片，一些边缘区域无法利用，想象一下，在圆上切方，边缘不可能切出完整的方形。无论用哪种晶圆生产，芯片尺寸规格都已固定，因此晶圆尺寸越大，晶圆边缘损失也会越小，大尺寸晶圆可进一步降低芯片成本。

那么，既然圆形的晶圆边缘有这么多区域无法利用，为什么不做成“晶方”？其实科学家并不是没有想过这个问题，而是受制于技术限制，成为历史遗留问题。

首先，单晶生长的硅棒是圆柱形，切割为薄片后即为圆形；其次，圆柱形的单晶硅锭更便于运输，以免因磕碰导致材料损耗；另外，圆形物体便于后续步骤的操作；最后，即便制作成晶方，一些边缘仍然不可利用，计算表明，圆形边缘比方形浪费更少。^[8]

全球不同尺寸半导体硅片出货面积占比 (%)



资料来源：SEMI

全球不同尺寸晶圆出货面积占比^[6]

以8英寸与12英寸硅抛光片为例，在同样工艺条件下，12英寸晶圆可使用面积超过8英寸晶圆两倍以上，可使用率（衡量单位晶圆可生产芯片数量的指标）是8英寸硅片的2.5倍左右。^[6]

当然，晶圆尺寸越大，就越难造，对生产技术、设备、材料、工艺要求就越多。具体来说，关键技术指标包括局部平整度、边缘局部平整度、纳米形貌、氧含量、高度径向二阶导数等，而先进制程对晶圆翘曲度、弯曲度、电阻率、表面金属残余量等参数指标有更高要求。

| 比较类型 | 8 英寸硅抛光片 | 12 英寸硅抛光片 |
|--------|---|--|
| 关键技术指标 | 局部平整度：90nm~250nm 控制的最小颗粒尺寸：90nm~250nm 表面金属沾污：<1E10 个原子/平方厘米 氧含量：8-17.5ppma | 局部平整度：<70nm 边缘局部平整度：<100nm 高度径向二阶导数：-40~0nm/mm ² 纳米形貌（2mm*2mm）<=9nm 纳米形貌（4mm*4mm）<=24nm 控制的颗粒尺寸（90nm）：<5 个 控制的颗粒尺寸（26nm）：<50 个 表面金属沾污：<5E8 个原子/平方厘米 氧含量：5-8ppma |
| 核心技术 | 晶体生长热场模拟及设计技术、晶体生长掺杂及缺陷控制技术、硅片热处理及薄膜生长技术等 | 单晶缺陷的控制技术、单晶体金属控制技术、硅片表面机械损伤的控制技术、硅片边缘局部平整度控制技术、硅片倒角控制技术、硅片表面金属污染控制技术、硅片清洗及表面颗粒控制技术 |
| 生产设备 | 单晶炉、截断机、滚磨机、线切割机、倒角机、磨片机、腐蚀机、退火炉、背封炉、边缘抛光机、正面抛光机、清洗机、检测仪等 | 单晶炉、截断机、滚磨机、线切割机、倒角机、粗磨削机、激光刻字机、精磨削机、腐蚀机、双面抛光机、边缘抛光机、CMP 抛光机、清洗机、表面检测仪、几何参数检测仪等 |
| 投资规模 | 3.85 亿元/10 万片/月 | 约 16 亿元/10 万片/月 |

8英寸抛光片与12英寸抛光片对比^[6]

不只有硅能做成晶圆，目前，半导体材料已经发展到第四代。第一代半导体材料以Si（硅）、Ge（锗）为代表，第二代半导体材料以GaAs（砷化镓）、InP（磷化铟）为代表，第三代半导体材料以GaN（氮化镓）、SiC（碳化硅）为代表，第四代半导体材料以氮化铝（AlN）、氧化镓（Ga₂O₃）、金刚石（C）为代表。

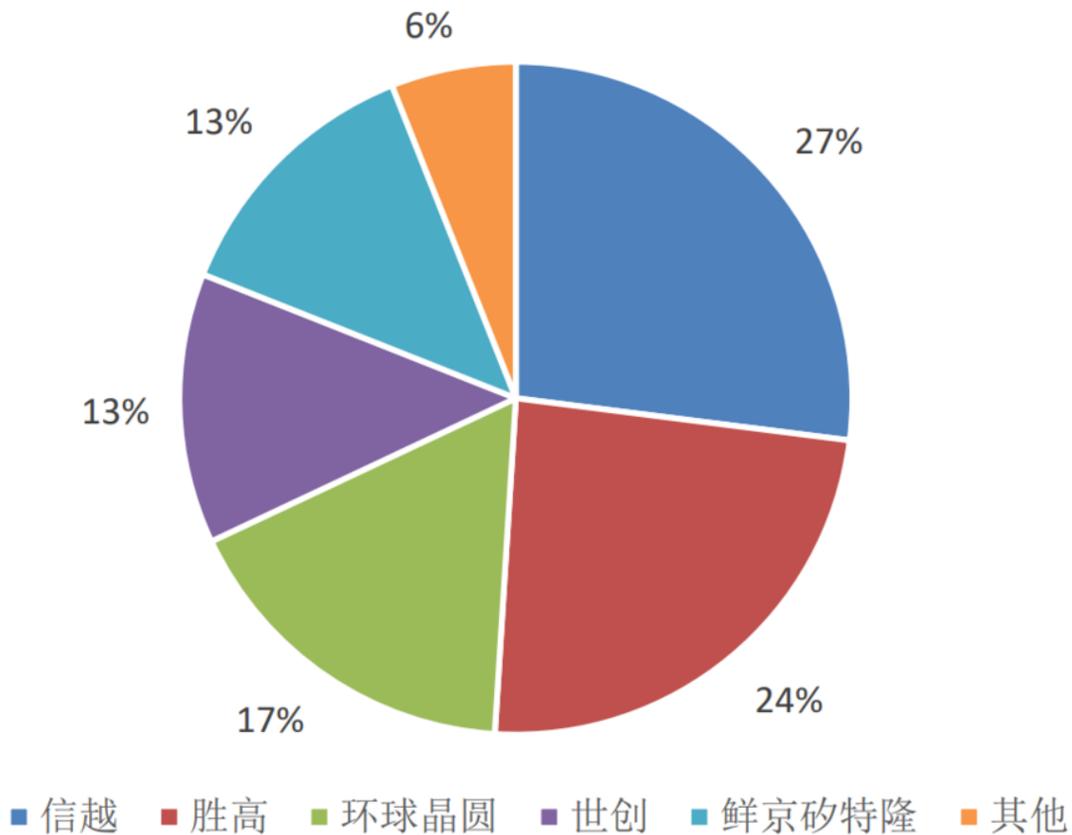
不过，目前仍有90%以上芯片需使用半导体硅片作为衬底片。

纵观全球硅片市场，主要由国际厂商占据，市场集中度高，2021年全球硅片市场CR5为94%，排名前五厂商分别为日本信越化学（Shin-Etsu）、日本胜高（SUMCO）、中国台湾环球晶圆（Global Wafers）、德国世创（Siltronic）、韩国鲜京矽特隆（SK Siltron）。^[9]

反观国内方面，技术薄弱、业务规模小、集中度较低，产品多以8英寸及以下为主，国内半导体硅片企业主要包括沪硅产业、中环股份、立昂微、中晶科技、有研硅、麦斯克等，单一厂商市场占有率均不超过10%，且以8英寸及以下尺寸硅片为主。12英寸晶圆是近两年中国产业重点：比如，粤芯半导体是专注于模拟芯片领域和进入全面量产的12英寸芯片制造企业，计划总投资370亿元^[10]；再如，增芯科技月加工2万片12英寸智能传感器晶圆量产线项目，共投资70亿元。^[11]

从数据上来看，国产硅片市场规模2019年~2021年连续超过10亿美元，2021年达16.56亿美元，同比增长24.04%，预计2022年可达19.22亿美元。^[12]

2021 年全球硅片市场格局



2021年全球硅片市场格局^[9]

从全球第二代半导体（GaAs、InP）衬底和第三代半导体（GaN、SiC）衬底情况来看，国内已拥有大量相关企业，但整体产能规模与国际存在差距。

| 衬底类型 | 全球市场情况 | 国内发展情况 |
|--------|---|---|
| GaAs衬底 | <p>GaAs抛光片：日本住友电工、德国弗莱贝格化合物材料、AXT三家公司占据约95%全球市场</p> <p>GaAs外延片：英国IQE、中国台湾全新光电（VPEC）、日本住友化学、美国英特磊为四大领导厂商</p> | <p>与国外有差距，主要企业包括大庆佳昌、中科晶电、云南鑫耀、廊坊国瑞、天津晶明、新乡神州、扬州中显、中科嫁英、海威华芯、有研新材等</p> |
| InP衬底 | <p>超80%InP衬底市场由日本住友电工和美国AXT两家公司占有</p> | <p>产能规模较小，大尺寸InP生产能力不足，主要企业包括鼎泰芯源、北京世纪金光、云南锗业、广东天鼎思科新材料、广东先导半导体材料、深圳泛美、南京金美镓业等</p> |
| GaN衬底 | <p>GaN体单晶材料：住友电工、日立电线、古河机械金属和三菱化学合计占据超过85%的全球市场</p> <p>GaN外延片：玩家包括美国科锐、雷声、道康宁、IR，英国IQE，日本罗姆、NTT-AT、Dowa，欧洲Azzurro、ST等</p> | <p>技术不断突破，GaN体单晶材料企业包括苏州纳维、东莞中镓、厦门中芯晶研，GaN外延片包括苏州精湛、镓芯光电、英诺赛科、江苏华功、大连芯冠、江苏能华、苏州能讯、海特高新、耐威科技、重庆聚力成、北京世纪金光等</p> |
| SiC衬底 | <p>美国、欧洲、日本三足鼎立，商业化公司包括美国科锐、Bandgap、Dow Dcorning、II-VI、Intrinsic，日本Rohm、NSC、Nippon、Sixon、Bridgestone、昭和电工、Denso，欧洲Okmetic、Sicrystal、英飞凌</p> | <p>与世界先进水平并行的地位，但批量生产能力较弱，主要企业包括天科合达、山东天岳、河北同光、北京世纪金光、中科钢研、扬州国扬电子、Norstel（三安光电）、瀚天天成、东莞天域等</p> |

参考 | SIMIT战略研究室  果壳 硬科技

第二代半导体、第三代半导体晶圆衬底全球市场及国内发展情况对比，制表 | 果壳硬科技

参考资料 | SIMIT战略研究室^[13]

二、前道工艺：设备堆出来工艺

“这里好像我想象中的天堂……只不过有更多的机器人。”这是一位专家对于半导体制造工厂的评价。

[14]

首先，有设备才能谈制造，在晶圆厂资本开支中，晶圆加工设备的资本开支也最大，占比为70%~80%。[15]

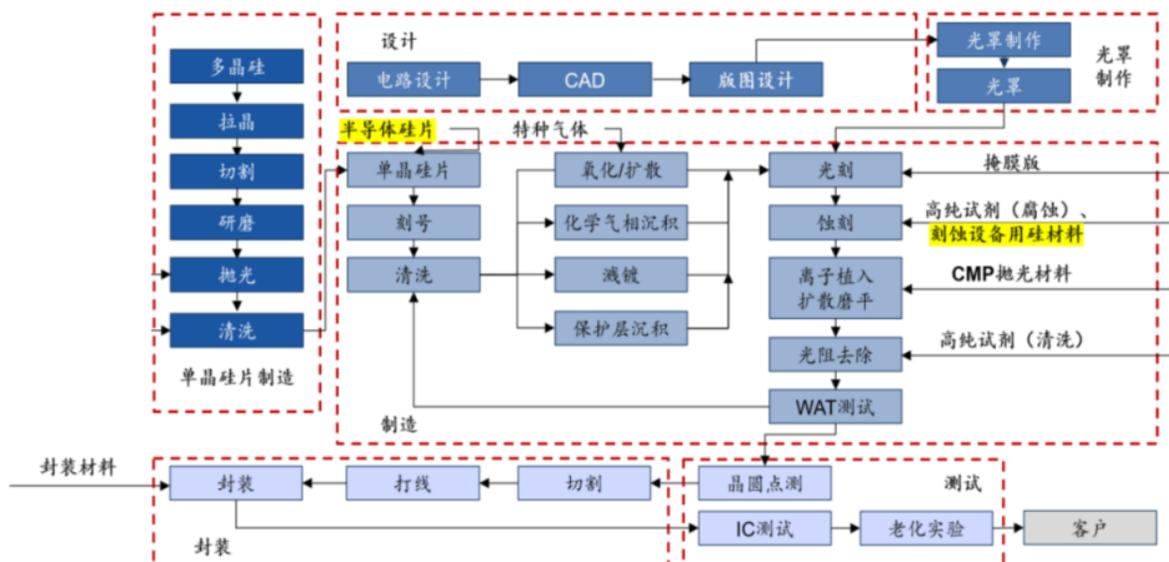
集成电路制造领域典型资本开支结构^[15]

芯片生产过程中，有成千上万台工艺设备在同时运行，可以说，造设备难，让这些设备有秩序地生产起来更难。

芯片前期工艺包括光刻、干蚀刻、湿蚀刻、化学气相沉积、物理气相沉积、等离子冲洗、湿洗、热处理、电镀处理、化学表面处理和机械表面处理等，其中多个工艺会重复使用，非常复杂。

每个前期工艺都对应着相应设备，包括光刻机、涂胶显影机、刻蚀机、薄膜沉积设备、离子注入设备、热处理设备（氧化退火设备）、化学机械平摊（CMP）设备、清洗设备、过程检测设备等。

半导体制造及半导体材料产业环节示意图



资料来源：《集成电路行业研究》，中信证券研究部

半导体制造及半导体材料产业环节示意图^[9]

前期加工中，设备主要围绕制程工艺选型，也就是时常被提起的28nm、14nm、10nm、7nm、4nm、3nm……制程越小，制造越困难，对设备要求也越高。目前，28nm是行业分水岭，比28nm更先进的是先进制程，反之则是成熟制程。

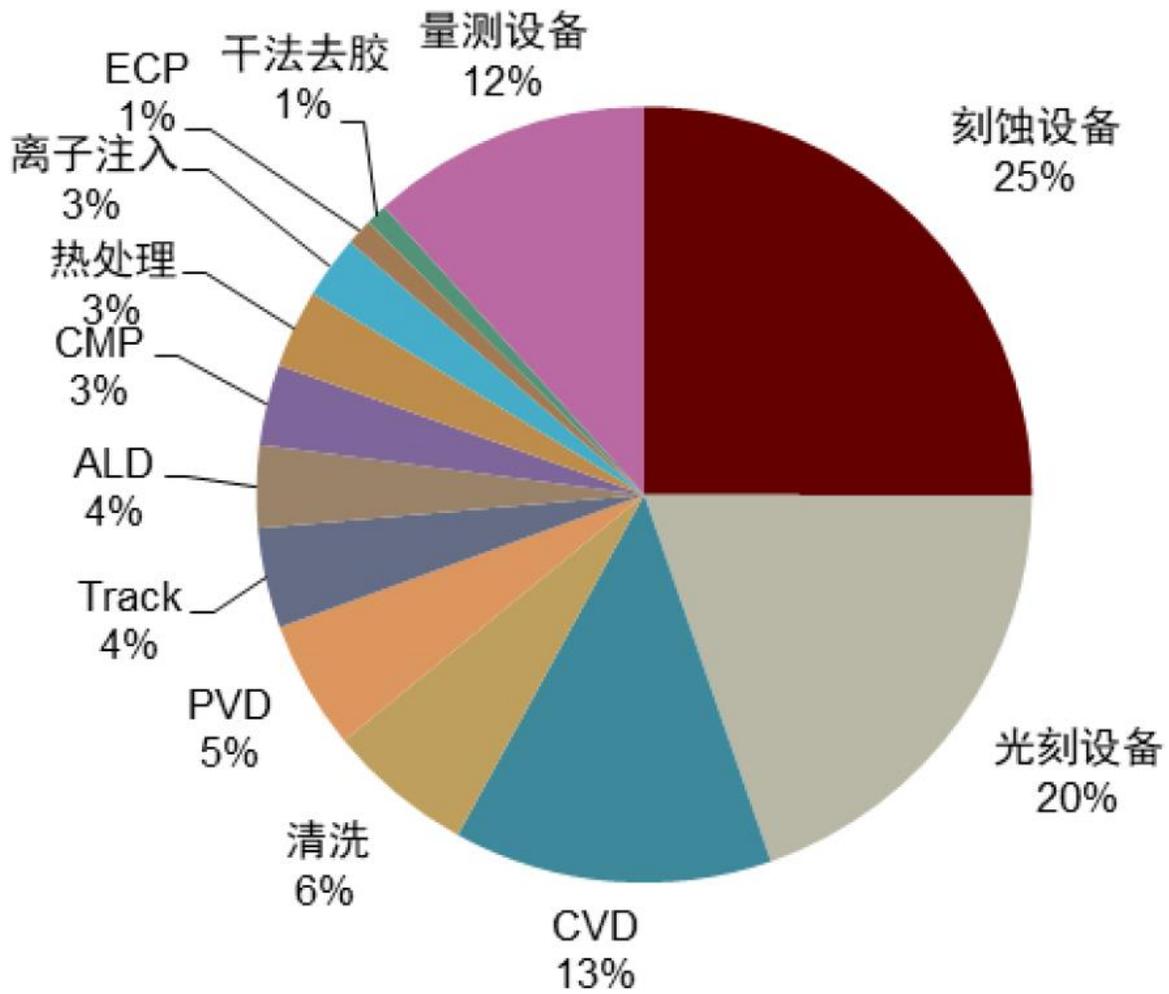
制程随摩尔定律迭代，即芯片上晶体管数量每隔18~24个月增加一倍，性能也将提升一倍。

在国际设备和系统路线图（IRDS）中，全面地反应了各制程节点所需系统级新技术，也就是说，未来几年内最先进制程需要用到什么设备也已被决定，而IRDS也会伴随制程升级而不断更新版本。

| YEAR OF PRODUCTION | 2021 | 2022 | 2025 | 2028 | 2031 | 2034 |
|--|---------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--|---|-------------------------------------|
| | G51M30 | G48M24 | G45M20 | G42M16 | G40M16/T2 | G38M16/T4 |
| Logic industry "Node Range" Labeling (nm) | "5" | "3" | "2.1" | "1.5" | "1.0 eq" | "0.7 eq" |
| IDM-Foundry node labeling | i7-f5 | i5-f3 | i3-f2.1 | i2.1-f1.5 | i1.5e-f1.0e | i1.0e-f0.7e |
| Logic device structure options | FinFET | finFET LGAA | LGAA | LGAA | LGAA-3D | LGAA-3D |
| Platform device for logic | finFET | finFET | LGAA | LGAA | LGAA-3D | LGAA-3D |
| Frequency scaling - node-to-node | - | 0.02 | 0.16 | 0.09 | -0.08 | -0.01 |
| CPU frequency at constant power density (GHz) | 3.13 | 2.83 | 3.53 | 2.50 | 1.48 | 0.86 |
| Power at iso frequency - node-to-node | - | -0.16 | -0.27 | -0.05 | -0.06 | -0.08 |
| Power density - relative | 1.00 | 1.12 | 1.04 | 1.59 | 2.51 | 4.27 |
| LOGIC TECHNOLOGY ANCHORS | | | | | | |
| Patterning technology inflection for Mx interconnect | 193i, EUV DP | 193i, EUV DP | 193i, EUV DP | 193i, High-NA EUV | 193i, High-NA EUV | 193i, High-NA EUV |
| Beyond-CMOS as complimentary to platform CMOS | - | - | - | 2D Device, FeFET | 2D Device, FeFET | 2D Device, FeFET |
| Channel material technology inflection | SiGe25% | SiGe50% | SiGe50% | Ge, 2D Mat | Ge, 2D Mat | Ge, 2D Mat |
| Process technology inflection | Conformal Doping, Contact | Channel, RMG | Lateral/Atomic Etch | Non-Cu Mx | 3DVLSI | 3DVLSI |
| Stacking generation inflection | 2D | 3D-stacking: W2W, D2W Mem-on-Logic | 3D-stacking: W2W, D2W Mem-on-Logic | 3D-stacking, Fine-pitch stacking, P-over-N, Mem-on-Logic | 3D-stacking, 3DVLSI: Mem-on-Logic with Interconnect | 3D-stacking, 3DVLSI: Logic-on-Logic |

IRDS中对于未来制程节点的技术规划^[16]

从价值分量上来看，光刻、刻蚀和薄膜沉积是前期加工中最主要三个环节，2021年光刻机、刻蚀机和薄膜沉积设备（含CVD、ALD、PVD）投资占比分别为20%、25%和22%，合计占比超设备总支出的60%。^[17]



2021年全球半导体设备价值量分布^[17]

纵观我国不同设备国产化率，虽然整体有上升趋势，但整体国产化率依然较低，上游生产能力极弱。

| 设备 | 国产化率 | | 国产化进展 | 龙头企业 | 国内企业 |
|--------|------|------|--|--|--|
| | 2016 | 2020 | | | |
| 光刻机 | <1% | <1% | 研发难度大，光源是重大问题，国产化短期仍将受限，目前以国家扶持占主导 | 阿斯麦、佳能、尼康 | 上海微电子 |
| 涂胶显影设备 | 6% | 8% | 国产化处于初期，芯源微是定位于涂胶显影设备的主要厂商 | 迪恩士、东京电子、苏斯微 | 芯源微 |
| 刻蚀机 | 2% | 7% | 主要设备中光刻机难度较大，刻蚀和薄膜沉积设备是率先国产替代的好方向，也是市场投资重点 | 东京电子、泛林半导体、应用材料 | 北方华创、中微公司、金盛微纳、亚电科技、屹唐半导体 |
| 薄膜沉积设备 | 5% | 8% | | 泛林半导体、东京电子、应用材料、日本Euvatec、日本Ulvac | 北方华创、沈阳拓荆、原磊纳米 |
| 过程检测设备 | <1% | 2% | 正在追逐海外龙头，能做的型号种类有限，差距较大 | 前道检测：科磊、日本日立、应用材料 后道测试：爱德万、东京电子、泰瑞达 | 前道检测：中科飞测、华海清科、上海精测、中安半导体 后道测试：华峰测控、长川科技、上海中艺 |
| 离子注入设备 | <1% | 3% | 研发难度仅次于光刻机，近期中国电科连续突破多项卡脖子技术，国产化率有望进一步提升 | 美国Axcelies、应用材料 | 博锐恒电子、凯世通、中科信 |
| CMP设备 | 2% | 10% | 追赶相对迅速，华海清科是国内主要12英寸CMP设备制造商 | 日本Euvatec、应用材料 | 中电科45所、华海清科 |
| 清洗设备 | 15% | 20% | 盛美、至纯弥补了国内的空白 | 东京电子、迪恩士、泛林半导体 | 北方华创、盛美股份、至纯科技、聚晶科技、苏州恒越 |

参考 | 国海证券



国产半导体制造设备情况概览，制表 | 果壳硬科技

参考资料 | 国海证券^[18]

以下，果壳硬科技将对光刻机、涂胶显影机、刻蚀机、薄膜沉积设备、热处理设备（氧化退火设备）、离子注入设备、化学机械平摊（CMP）设备、清洗设备、过程检测设备几类价值分量最高的九种设备进行详细剖析。

1. 光刻机

光刻机是芯片制造中最庞大、最精密复杂、难度最大、价格最昂贵的设备，光刻成本占芯片总制造成本的三分之一，耗费时间约占整个硅片生产时间的40%~60%，而它也决定了芯片上晶体管能做多小。

[19]

光刻设备是一种投影曝光系统，由紫外光源、光学镜片、对准系统等部件组装而成^[20]，其原理是将光掩模版（Mask）上设计好的集成电路图形（宏观）通过光线曝光印制到硅衬底光感材料（微观）上，实现图形转移。其中，光掩模相当于是相机底片，它要比芯片大上许多，也是通过光刻而来，不过通常采用无掩模直写光刻制造。

光刻的思想来源于印刷技术，不同的是，印刷通过墨水在纸上的光反射率变化记录信息，光刻则采用光与光敏物质的光化学反应实现对比度变化^[21]。打个比方来说，光刻机就是一种巨型单反相机，能够将光掩模版上图形缩小几百万倍，并通过光化学反应缩小转印到晶圆上。^[22]

光刻技术先后经历接触式光刻、接近式光刻、全硅片扫描投影式光刻、分步重复投影式光刻到目前的步进扫描投影式^[23]，而光源经历了五次波长迭代：从最初紫外波段的高压放电汞灯g-line（436 nm）到i-line（365 nm），发展到深紫外（DUV）波段的准分子激光器KrF（248 nm）以及 ArF（193 nm），再到最先进的13.5nm极紫外光（EUV）。^[24]

为什么光刻机那么难造，一个挑战是进一步提升紫外光刻机性能研制难度高、造价高昂，从第一代光刻机到最先进的第五代光刻机，光源波长已从436nm缩短至13.5nm，除了难以产生光源，光束传输中极紫外光的衰减和光学元件表面粗糙控制都是极大难题；**另一个挑战是芯片二维密度无限制提高必然会遇到量子极限**，芯片两条线上电子的运行规律的前提是不相互干扰，而当硅芯片密度在物理尺度上缩小至1nm以下时，将会受到干扰而不再按照经典电子学规律运动，这无疑遭受巨大挑战。^[25]

不止如此，在良率压力下，还要保证芯片足够便宜^[26]。比如说，英特尔一颗CPU设计文件普遍在10GB以上，而阿斯麦（ASML）的NXT：2050i每小时可曝光295片300mm（12英寸）晶圆^[24]，Intel Ice Lake系列CPU单12英寸晶圆能切割出大约485颗芯片，这样情况下每小时极限能够曝光14.3万颗芯片，这样的制造能力才能够将单颗CPU成本降至大众能承受的几十到上千美元。^[25]

此外，光刻系统涉及的技术极为细碎，还包括：

- **计算光刻**：实际生产中很难让每次光刻模式都完全正确，每一次光刻过程中都可能会发生颗粒干扰、折射或其它物理/化学缺陷，为了得到确切图案，就需要通过将算法模型与系统和测试晶圆数据相结合，这个过程被称作计算光刻；^[27]
- **对焦性能**：光刻机中核心部件就是镜头，这并非一般镜头，而是高至2m、直径1m的庞大镜头，这些镜头的对焦性能是成像质量和产品良率的关键，随着芯片线宽不断缩小，加之二次成像（DP）光刻工艺应用越来越多，对光刻机对焦性能要求越来越严苛；^[28]

- **工艺优化:** 制程节点每前进一步，都会伴随大量工艺优化，比如说，制程工艺从20nm/16nm/14nm开始，设计规则周期已小于光刻机分辨率极限，此时光刻机开始采用双重或多重曝光技术、光源掩模协同优化、负显影工艺等工艺；浸没式光刻技术虽然支持了45nm/40nm、32 nm/28nm、20nm/16nm/14nm、10nm和7nm五个主要技术节点^[29]，但从5nm开始，到3nm、2.1nm甚至1nm，大多数中后段层次和前段的鳍和栅极的剪切层次都开始采用极紫外光刻工艺实现。^[30]

| Node / nm | Gate pitch /nm | Gate layer litho process | Metal pitch /nm | Metal layer litho process | Via pitch /nm | Via layer litho process |
|--------------|-------------------|-----------------------------|--------------------|----------------------------------|------------------|-------------------------------|
| 250 | 500 | 248 nm | 640 | 248 nm | 640 | 248 nm |
| 180 | 430 | 248 nm | 460 | 248 nm | 460 | 248 nm |
| 130 | 310 | 248 nm | 340 | 248 nm | 340 | 248 nm |
| 90 | 240 | 193 nm Dry | 240 | 193 nm Dry | 240 | 193 nm Dry |
| 65 | 210 | 193 nm Dry | 180 | 193 nm Dry | 200 | 193 nm Dry |
| 45 | 180 | 193 nm Water immersion | 160 | 193 nm Water immersion | 180 | 193 nm Water immersion |
| 40 | 162 | 193 nm Water immersion | 100 | 193 nm Water immersion | 130 | 193 nm Water immersion |
| 32 | 130 | 193 nm Water immersion | 90 | 193 nm Water immersion | 110 | 193 nm Water immersion |
| 28 | 118 | 193 nm Water immersion | 90 | 193 nm Water immersion | 100 | 193 nm Water immersion |
| 22 | 90 | 193 nm Water immersion | 80 | 193 nm Water immersion | 100 | 193 nm Water immersion |
| 20 | 90 | 193 nm Water immersion | 64 | 193 nm Water immersion LELE | 64 | 193 nm Water immersion LE4 |
| 16/14 | 87 | 193 nm Water immersion SADP | 64 | 193 nm Water immersion LELE | 64 | 193 nm Water immersion LE4 |
| 10 | 66 | 193 nm Water immersion SADP | 44 | 193 nm Water immersion SALELE | 66 | 193 nm Water immersion LE4 |
| 7 | 54 | 193 nm Water immersion SADP | 40 | 193 nm Water immersion SALELE | 57 | 193 nm Water immersion LE4 |
| 5 | 50 | 193 nm Water immersion SADP | 30 | 0.33 NA EUV SALELE | 48 | 0.33 NA EUV |
| 3 | 42 | 193 nm Water immersion SADP | 22 | 0.33 NA EUV SALELE | 36 | 0.33 NA EUV LE2 |
| 2.1 | 32 | 193 nm Water immersion SAQP | 16 | 0.55 NA EUV SALELE | 25 | 0.55 NA EUV LE3 |
| 1.5 | 32 | 193 nm Water immersion SAQP | 14 | 0.55 NA EUV SALELE | 20 | 0.55 NA EUV LE4 |
| 1 | 32 | 193 nm Water immersion SAQP | 14 | 0.55 NA EUV SALELE | 20 | 0.55 NA EUV LE4 |

250nm到1nm 技术节点中关键光刻层次的设计规则总结^[30]

光刻机在半导体设备价值链中占比高达20%，目前，业界主要光刻机公司，分别是荷兰ASML（阿斯麦）、日本Nikon（尼康）、日本Canon（佳能）。^[22]

市场方面，ASML、Nikon、Canon三家基本垄断市场，2022年ASML出货量占据全球出货量的82%，Canon占10%，Nikon占8%。其中，ASML光刻机种类齐全，是全球唯一能够生产EUV光刻机的公司，目前最小制程达到3nm；Nikon集中于DUV光刻机，也可生产浸没式光刻机；Canon的产品则集中在中低端。^[31]

从具体数据来看，2022年，ASML、Nikon、Canon三家集成电路用光刻机总出货量为551台，较2021年的478台增长15%，EUV、ArFi、ArF三个高端机型共出货157台，较2021年的152台增长约3%。此外，EUV光刻机ASML市占率达100%，ArFi光刻机ASML市占率达95%以上，ArF光刻机ASML市占率达87%以上，KrF光刻机ASML市占率达72%以上，i线光刻机ASML市占率达23%以上。^[32]

| | 类型 | ASML | Nikon | Canon |
|-------|---------|------|-------|-------|
| 超高端 | EUV | 40 | | |
| 高端 | ArFi | 81 | 4 | |
| | ArF dry | 28 | 4 | |
| 中端/低端 | KrF | 151 | 7 | 51 |
| | i-line | 45 | 15 | 125 |
| | 合计 | 345 | 30 | 176 |

2022年全球半导体光刻机TOP3厂商出货情况^[31]

2. 涂胶显影机

涂胶显影（或涂覆显影）设备虽在结构上比不上光刻机的复杂程度，但也不可或缺，它是光刻过程中必要的设备。^[21]

对光刻工艺来说，晶圆上光刻胶涂覆的厚度和均匀性至关重要，直接影响着后续光刻工艺质量，从而影响芯片成品的性能、良率和可靠性^[33]。所以，怎么涂好光刻胶是一门学问，负责涂覆光刻胶的设备便是涂胶显影设备。

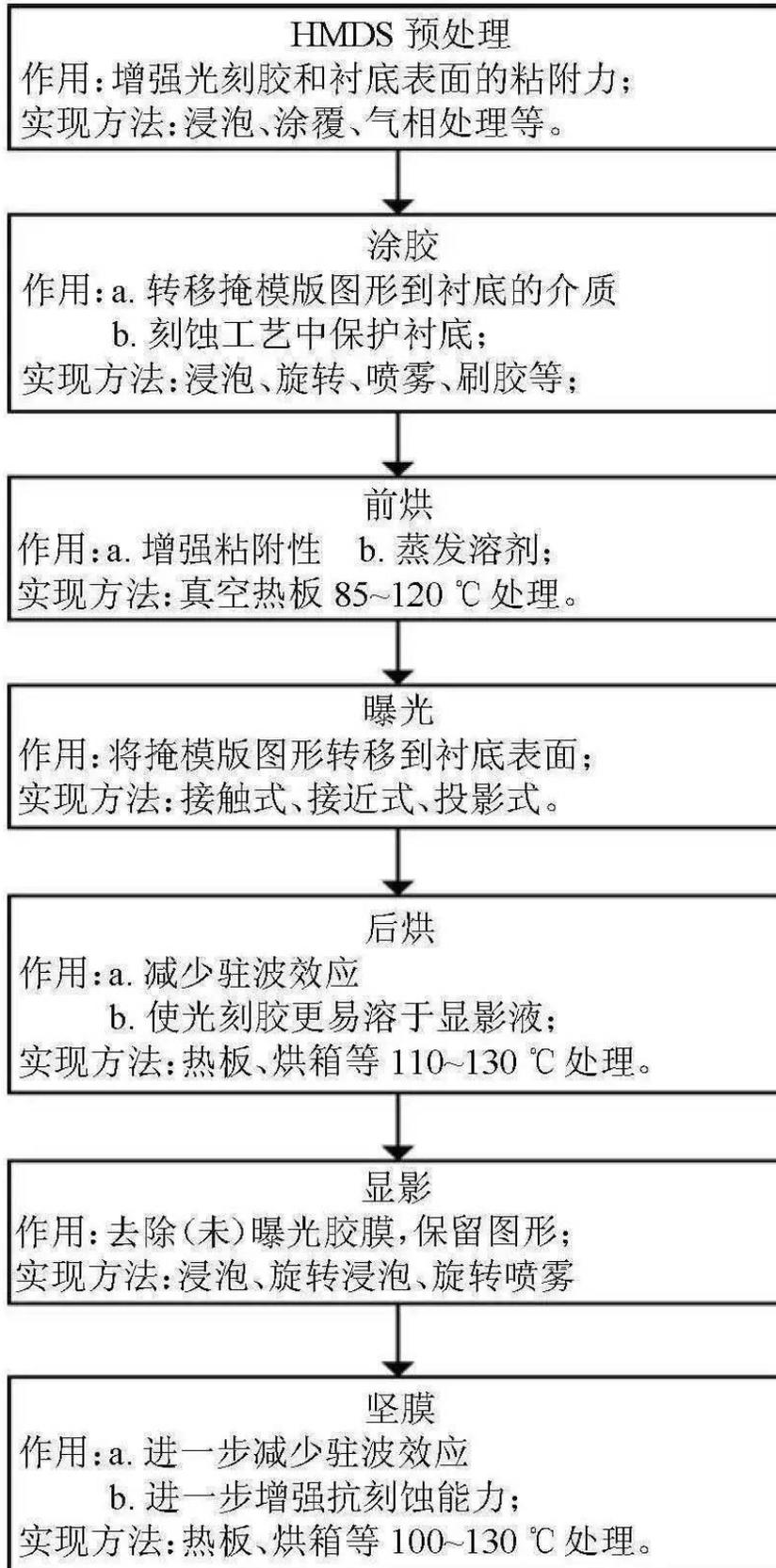
不同光源对涂胶显影设备需求不同，早期低端芯片制造往往单独使用涂胶显影设备（Off Line），随着200mm（8英寸）及以上大型产线投入应用，现代半导体生产中，多数涂胶显影设备与光刻系统联线生产（In Line）^[34]，而它则与光刻技术共进退，正伴随光刻精度提升而增加技术难度。



涂胶显影设备随光刻工艺迭代，技术难度提升^[35]

涂胶显影设备并非一种设备，而是一类设备的称呼，光刻工艺中涂胶显影流程包括HMDS（六甲基二硅氮烷，增粘剂）预处理、涂胶、前烘、曝光、后烘、显影和坚膜，其中用到主要设备有涂胶、曝光和显影3种设备。

涂胶显影设备结构复杂，实现难度高，不同厂商对设备结构及形式均有自己的理解，但基本均由单元模块组成，且功能类似，包含数十个功能模块组及配套机器人、数百个功能单元、数万个零部件，如盒站单元CS、盒站机械手臂CSR、工艺机器人手臂PSR、涂胶单元COT、显影单元DEV、热烘/冷却OVEN单元、对中单元CA、边部曝光单元WEE等，此外，还涵盖机械运动、温湿度及内环境控制、系统调度及控制、化学反应及化学品管控等多学科技术。^[21]

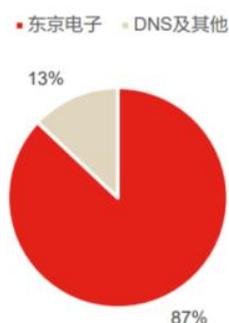


光刻工艺流程图^[21]

涂胶显影机在半导体设备价值链中占比约为5%，从全球来看，日本TEL（东京电子）、德国SUSS（休斯微技术）、奥地利EVG及国内沈阳芯源等公司均有成熟方案，不过TEL基本处于垄断地位。

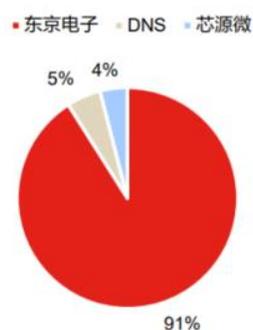
从数据上来看，2019年TEL占据全球涂胶显影设备近87%市场份额，DNS（迪恩士）和其它企业则占其余13%市场份额；2019年TEL占据国内涂胶显影设备近91%市场份额，DNS则占5%，国产芯源微产品仅占4%。^[35]

图 22: 2019 年全球涂胶显影行业市场占有率



数据来源：华经产业研究院、东方证券研究所

图 23: 2019 年中国大陆涂胶显影行业市场占有率



数据来源：华经产业研究院、东方证券研究所

2019 年全球和中国大陆涂胶显影行业市场情况^[35]

对国产来说，涂胶显影设备销售难点在于下游客户端工艺验证，由于涂胶显影设备与光刻机高度联动，因此设备商需在不影响下游晶圆正常生产情况下，提供光刻机、掩模版、检测设备及程序等资源配合，验证流程复杂且冗长，加大厂商应用难度。^[36]

3. 刻蚀机

刻蚀机与光刻机是一对好基友，二者都决定着芯片成品的性能，比如说，想要制造 5nm 芯片，光刻机和刻蚀机都要具有 5nm 工艺能力。

光刻机的原理是用光将掩模版电路结构复制到晶圆上，刻蚀机则按光刻机复制的结构在晶圆上微观雕刻出沟槽或接触孔。打个比方，光刻机就像工匠在木板上划线，刻蚀机则按照木板上划线进行雕花。

刻蚀过程中，晶圆会被烘烤和显影，一些抗蚀剂会被冲走，从而露出开放通道的3D图案。迄今为止，纳米尺度的芯片已由数十层甚至上百层结构组成，在这一过程中，如何保证精确地形成完整稳定的芯片结构是难点，避免在刻蚀过程中破坏多层微芯片底层结构或在结构中创建出空腔。^[27]

刻蚀分为湿法刻蚀和干法刻蚀两种，湿法刻蚀使用化学制剂清洗晶圆，干法刻蚀基于气体暴露晶圆上图案。自80年代芯片不断微缩，湿法刻蚀局限性逐渐凸显，包括不能运用在3微米以下图形、容易导致刻蚀图形变形、液体潜在毒性和污染、需额外清洗和干燥步骤等，因此在特定环节逐渐被干法刻蚀所取代，目前两种刻蚀机在各自领域发挥重要作用。^[37]

干法刻蚀又分为等离子体刻蚀、反应离子刻蚀、离子束刻蚀三种方法，依据其不同特性，应用在工艺步骤中，其中，电容性等离子体刻蚀和电感性等离子体刻蚀两种设备涵盖了主要刻蚀应用。

刻蚀机制造技术难度极大，就拿等离子体刻蚀机来讲，便需用到电感耦合等离子体源，为保证等离子体质量，需超高的真空度。

表2.三种干法刻蚀方法比较

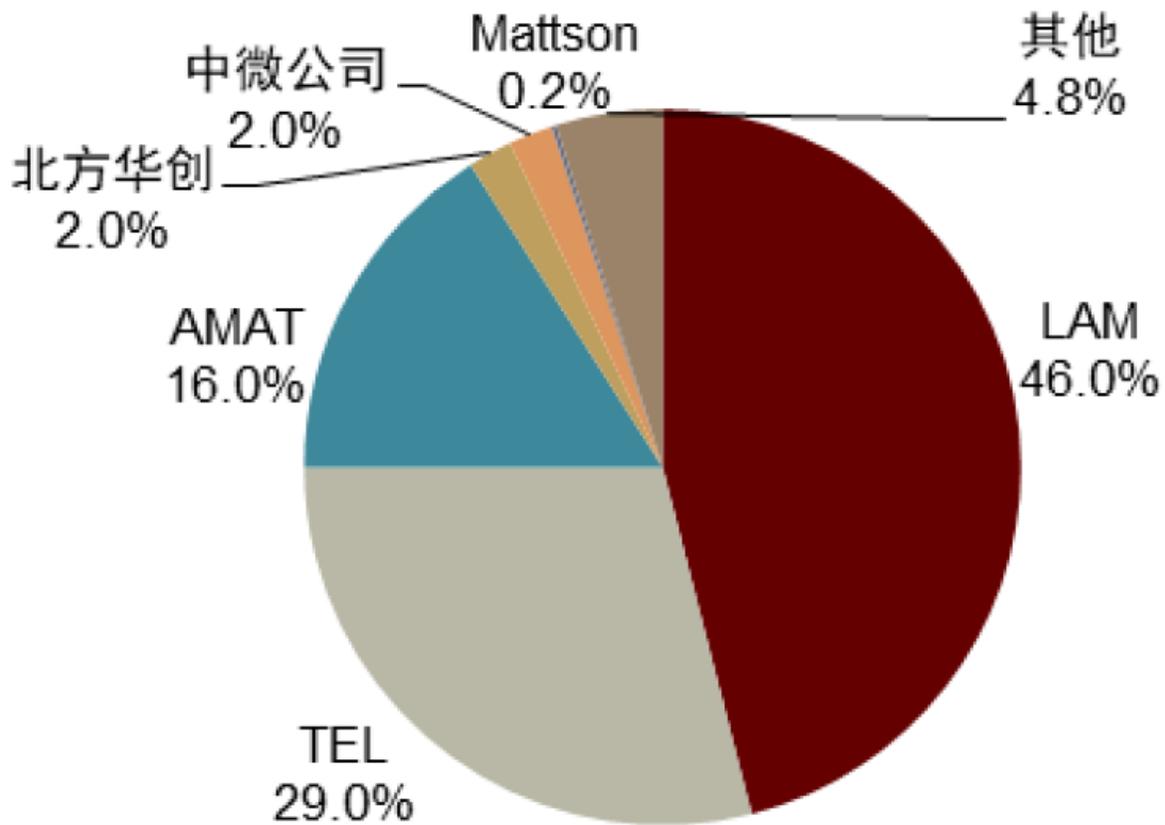
| 特点 | 等离子体刻蚀 | 反应离子刻蚀 | 离子束刻蚀 |
|--------|-------------|--------------|--------------|
| 衬底放置方法 | 放在等离子体接地电极上 | 放在等离子体加功率电极上 | 离子束中，有等离子体遥控 |
| 离子能量 | 1~100 | 100~1000 | 100~1000 |
| 活性基种类 | 原子，原子团，反应离子 | 原子团，反应离子 | 反应离子 |
| 生成物 | 挥发性 | 挥发性 | 非挥发性 |
| 机理 | 化学/化学-物理 | 化学/物理 | 物理 |
| 刻蚀方向 | 各向同性/各向异性 | 通常各向异性 | 各向异性 |
| 选择性 | 10:1~5:1 | 30:1~5:1 | 1:1 |
| 胶的相容性 | 极好 | 好 | 差 |
| 对器件的损害 | 小 | 有可能 | 很可能 |

数据来源：财通证券研究所

三种干法刻蚀方法比较^[37]

刻蚀机在半导体设备价值链中占比高达25%，市场增速也非常明显。Transparency Market Research数据显示，2022年全球半导体刻蚀设备市场约为113亿美元，预计从2023年到2031年将以7.6%的复合年增长率增长，到2031年达到217亿美元，增长主要驱动力在于刻蚀机在逻辑/存储领域的重要性越来越强。^[38]

刻蚀机被国际巨头所垄断，Gartner数据显示，2021年全球刻蚀设备行业前三名为Lam Research（泛林半导体）、Tokyo Electron（东京电子）、Applied Materials（应用材料），三者总共占据90%以上市场份额，其中LAM市场占有率达46%，处于领先地位。^[17]



2021年全球刻蚀设备竞争格局^[17]

国内刻蚀机供应多数为国际品牌，而国外刻蚀机在中国售价一般可达每台几百万人民币，之所以占据这样的统治地位，是因为早在多年以前，它们就已开始不断整合兼并，谋取垄断溢价。比如说，应用材料公司曾与东京电子合并，泛林半导体曾与科磊也谋求合并，试图强强联合打造联合体。^[39]

| 排名 | 企业 | 综述 |
|----|---------------------|--|
| 1 | 应用材料公司 | 1967年在美国加州成立。主要产品有Centris刻蚀系统与Mariana刻蚀系统等。该公司是全球排名第一的半导体设备公司。在纳斯达克上市，股票代码AMAT。 |
| 2 | 泛林半导体(Lam Research) | 1980年在美国成立，创始人是越南华裔David Lam先生。该公司是全球排名第二的半导体设备公司。泛林曾提出与科磊合并方案，类似于应用材料公司与东京电子的合并，但这个方案没有被审批通过。 |
| 3 | 东京电子 | 2013年9月24日，东京电子和应用材料公司合并。东京电子依然独立在东京证券交易所上市。主要供应Telius刻蚀系统等。 |
| 4 | 科磊(KLA-Tencor) | 1976年在美国加州硅谷成立，是全球领先的半导体检测设备供应商，该公司在上海设有研发中心。 |
| 5 | 牛津仪器 | 1959年创建于英国牛津，是在伦敦证交所上市的公司，生产分析仪器、半导体设备、超导磁体、超低温设备等高技术产品。 |
| 6 | 诺迪科(Nordiko) | 1972年在英国成立，其离子束技术产品被用于蚀刻和沉积等应用上。 |
| 7 | 日立(Hitach) | 1910年在日本成立，主要产品有UA5200等刻蚀系统。 |

国外刻蚀机主要厂商情况^[39]

当然，刻蚀机领域，国产不可能一蹴而就。刻蚀机对加工精度要求极高，比如说，16nm等离子体刻蚀机的加工尺度只有头发丝的五千分之一，而其对加工精度和重复性的要求更要达到头发丝的五万分之一。这并非单独刻蚀机领域的问题，而是与国内精密加工机床等设备发展相关联^[39]。目前，国内中微半导体、北方微电子、金盛微纳科技等公司已逐渐实现主流制程设备出货，不断追赶国外巨头。

| 排名 | 企业 | 综述 |
|----|--------|---|
| 1 | 中微半导体 | 总部位于上海。中微第一代刻蚀设备用于加工直径为300毫米、65–45纳米的晶圆片。中微的最新一代产品已经可以实现22纳米芯片刻蚀加工。 |
| 2 | 北方微电子 | 北方微电子公司成立于2001年，是北京电控集团下属的一家高科技国有企业。主要代表性产业有ELEDE 330 ICP刻蚀机。 |
| 3 | 金盛微纳科技 | 总部位于北京，公司的主要产品有：匀胶机（SP）、烘胶台（BP）、曝光机、刻蚀机（RIE、ICP、IBE）、等离子体淀积台（PECVD）、磁控溅射台（Sputtering）、去胶机、溅射/刻蚀/淀积一体机、键合炉等。 |

国内刻蚀机主要厂商情况^[39]

4. 薄膜沉积设备

薄膜沉积（Thinfilm Deposition）是将1 μm （微米）或更小分子/原子材料的薄膜覆盖到晶圆表面的技术，这一层薄膜可以让原本非导电的晶圆具备导电性。

打个比方来说，就像利用物理或化学的方法，将电子气体变成固体，从空中均匀地撒下，最终形成一层薄如白膜的膜，随后精细的电路都会绘制在这张白纸上。^[40]

薄膜沉积可以分为物理气相沉积（Physical Vapor Deposition, PVD）和化学气相沉积（Chemical Vapor Deposition, CVD）两种。

PVD是通过物理方法如真空蒸发、溅射镀膜等方式形成薄膜，主要用于沉积金属及金属化合物薄膜，已广泛应用于集成电路领域的Ti、TiN、Al等金属工艺，先进封装领域的Fan-out、Ti/Cu-Copper Pillar、TiW/Au-Gold Bump，功率半导体领域的Si基、SiC基IGBT和GCT等器件，微机电系统领域的Ti、Ni、NiV、Ag、Al、Cr、TiW、SiO₂、ITO等薄膜工艺。

CVD是通过混合化学气体发生反应，从而向衬底表面沉积薄膜的工艺，主要用于沉积介质薄膜，已广泛应用于制备SiO₂、Si₃N₄、SiCN、SiON、磷硅玻璃、硼硅玻璃、硼磷硅玻璃等介质薄膜材料，Si

、PolySi、Ge、SiGe、GaAs、InP、GaN、SiC等半导体薄膜材料以及W、Al、Cu、Ti、TiN、金属硅化物等金属化薄膜材料。^[41]

薄膜沉积制备技术类型极多，PVD包括蒸发（蒸镀）、溅射、离子束工艺设备，CVD则包括热化学气相沉积（APCVD、LPCVD、MOCVD）、金属气相沉积（MCVD）、等离子体气相沉积（PECVD）、原子层沉积（ALD）等，根据薄膜所需材料不同，生产所用工艺设备也不同，大致来说：

- **PVD**：150mm硅片时期多以单片单腔室形式为主，而后溅射设备逐渐取代了真空蒸镀设备，随IC技术发展，更多技术引入到磁控溅射设备中，射频PVD设备和离子化PVD设备也同步得到发展；
- **CVD**：微米时代，多采用常压化学气相沉积设备（Atmospheric Pressure CVD，APCVD），亚微米技术主流设备则是低压化学气相沉积设备（Low Pressure CVD，LPCVD），90nm以后等离子体增强化学气相沉积设备（Plasma Enhanced CVD，PECVD）扮演主要角色，65nm以后原子层沉积（Atomic Layer Deposition，ALD）需求量不断提升。^[41]

| PVD | 基本原理 | 性能特点 |
|-------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 蒸发 | 在真空腔室通过电流或电子来加热原料，生成原料蒸汽，沉积在冷却的晶片表面 | 结构简单，主要用于低熔点的金属膜，缺点是沉积的膜与基体附着不平 |
| 溅射 | 将腔室惰性气体电离，离子加速后将原料原子轰击出来，溅射在晶片表面 | 不需要高温条件，有较好的致密度和性能，缺点是对晶片造成轰击损伤 |
| 离子束 | 在蒸发或溅射原料的同时，再用某种离子束对原料进行轰击反应，生成合成薄膜 | 沉积的膜与基体粘附较好，缺点是结构复杂，有强的射线和辐射损伤 |
| CVD | 基本原理 | 性能特点 |
| LPCVD | 在较低的工作气压中，气体加热产生化学反应或高温分解沉积形成薄膜 | 过程副产物少，纯度较高，缺点是高温产生形变，从而降低薄膜的附着力 |
| MOCVD | 在低压下用金属化合物作源，以热分解方式在晶片上生长薄层单晶材料 | 结构复杂，功能强大，能做多种材料的膜制作，设备安全防护成本较高 |
| PECVD | 在真空腔室施加直流或射频电压，等离子体活化源气体，在晶片上沉积固态薄膜 | 结构简单，温度低、速率快，薄膜高纯度、高致密、应力小，附着力 |

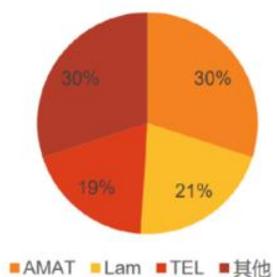
资料来源：设备管理与维修，中港证券研究所

主要薄膜沉积方法^[42]

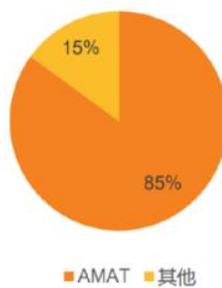
薄膜沉积在制造设备中价值比重很高，其中CVD约为17%（ALD为4%），PVD约为5%，与此同时，薄膜沉积设备行业依然是垄断度较高的产业。

全球市场方面，CVD领域美国应用材料（AMAT）、泛林半导体（Lam Research）、东京电子（TEL）三家合计包揽全球70%市场份额，其中先进制程所必需的ALD设备由东京电子（TEL）、先晶半导体（ASM）两家公司包揽全球近50%市场份额；PVD领域主要被美国应用材料（AMAT）、瑞士Evatec、日本爱发科（Ulvac）所垄断，其中应用材料占比近85%。^[42]

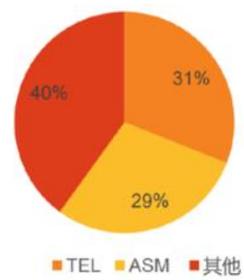
图：CVD全球市场格局



图：PVD全球市场格局



图：ALD全球市场格局



CVD、PVD、ALD全球市场格局^[41]

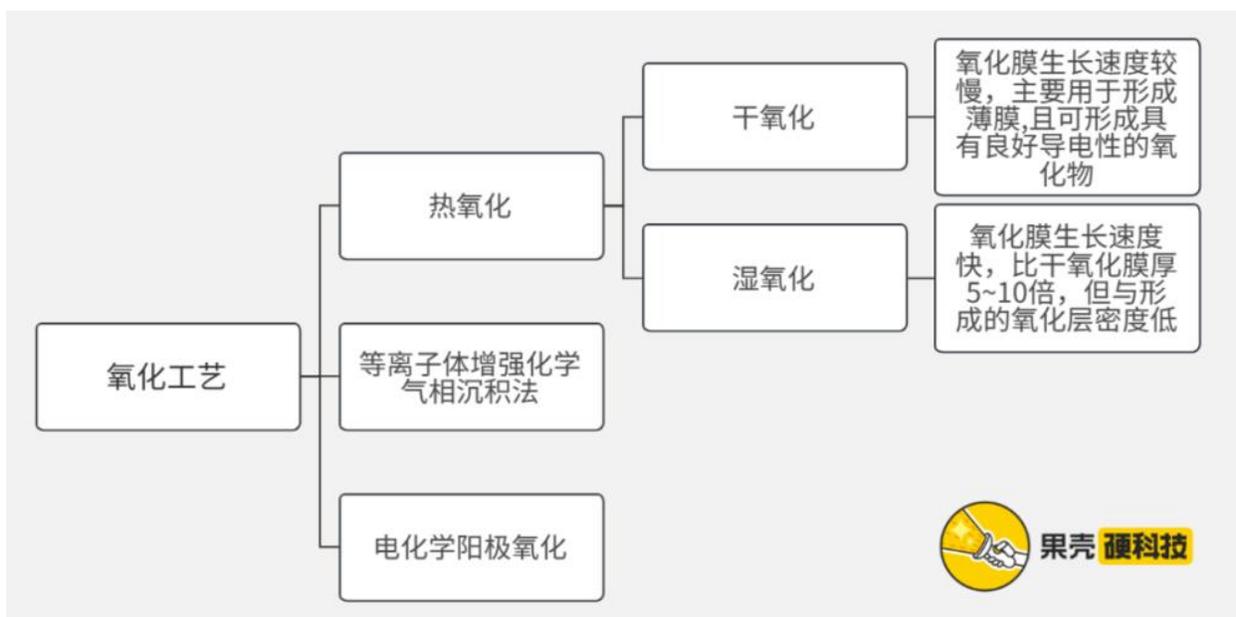
国内在薄膜沉积领域的竞争方式与国外巨头不同，国外巨头产品丰富，技术覆盖面广，而国内则主要在细分领域进行差异化竞争，如拓荆科技、中微主要产品为CVD，北方华创主要产品是PVD，微导纳米主要产品是ALD，盛美半导体主要产品是电镀产品。^[41]

5. 热处理设备

芯片制造过程中，有许多涉及700°C~1200°C的高温热处理步骤，这些工艺通常在高温炉中进行，包括氧化、扩散、退火等主要工艺。^[43]

芯片制造过程通常由氧化工艺开始，也是最重要的加热过程之一。当晶圆暴露在大气时，其中物质会与氧气形成氧化膜，就像铁暴露在大气中会氧化生锈一样。因此，氧化的作用就是在晶圆表面形成一层保护膜，保护晶圆不受化学杂质影响、避免漏电流进入电路、预防离子植入过程中的扩散、防止晶圆在刻蚀时滑脱。^[44]

氧化工艺包括热氧化（Thermal Oxidation）、等离子体增强化学气相沉积法（Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD）和电化学阳极氧化等，其中热氧化是最常用的方法。根据氧化反应使用气体，热氧化法又分为干氧化（Dry Oxidation）和湿氧化（Wet Oxidation）。^[45]



氧化工艺分类及特性，制图 | 果壳硬科技

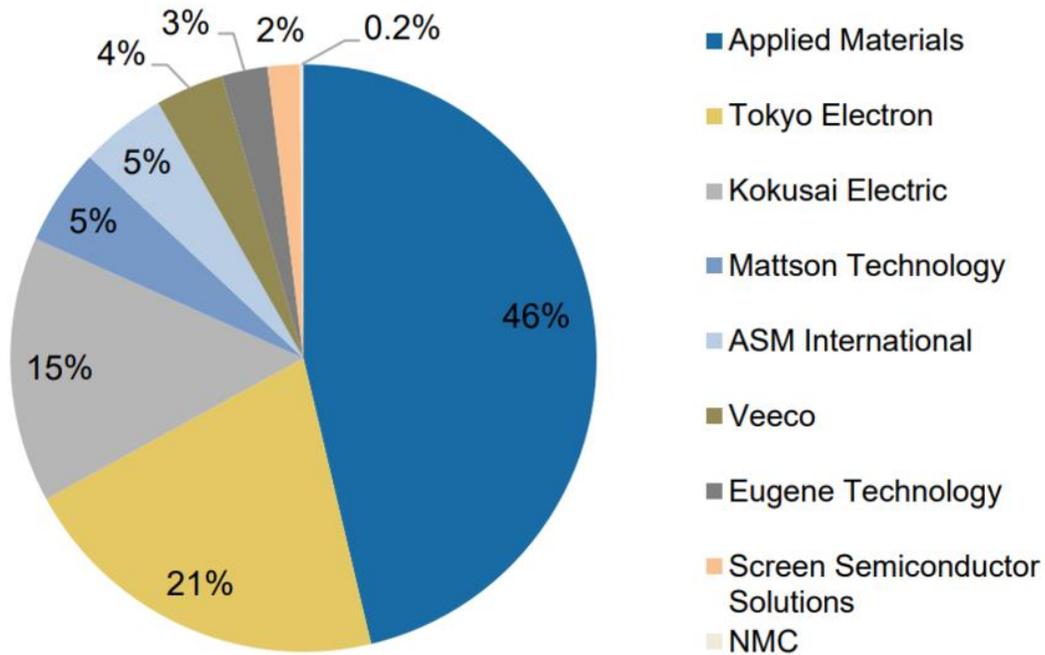
参考资料 | 三星^[45]

扩散工艺主要作用是在高温条件下对晶圆掺杂，不过这主要存在于20世纪70年代前的早期工艺，彼时芯片图形特征尺寸大多为10 μm 数量级，而现在先进的芯片生产中，除了特定情况已很少使用扩散掺杂工艺。

退火工艺则是将硅片放于高温环境一段时间，使其表面或内部微观结构发生变化，它通常与离子注入、薄膜沉积、金属硅化物形成等工艺结合。

用于氧化、扩散、退火等加热工艺的基本设备有卧式炉、立式炉和快速升温炉（RTP）三种。

热处理设备在半导体设备价值链中占比约3%，全球热处理设备市场则被寡头垄断，美国应用材料（Applied Materials）、东京电子（Tokyo Electron）、日本同业国际电气（Kokusai Electric）三家合计市场份额超过80%，而国内非激光退火类设备屹唐半导体市占率5%，北方华创市占率0.2%。^[46]



2018年全球热工艺设备竞争格局[47]

6. 离子注入设备

让不导电的纯硅成为半导体，就必然需要向硅内加入诸如氮、磷等物质，使之形成PN结（PN junction，一种半导体结构），再以此创建晶体管，形成各种半导体器件。其中，人为向硅内加入元素的过程就是掺杂（Doping）。

掺杂工艺十分重要，只有掺杂之后，晶圆才会具有导电性能，才能称之为半导体。不仅如此，掺杂也决定了半导体能够实现哪些功能或性能，通过改变半导体的电导率、载流子类型和浓度、能带结构等电学性质，人们就可以自由自在地控制半导体。

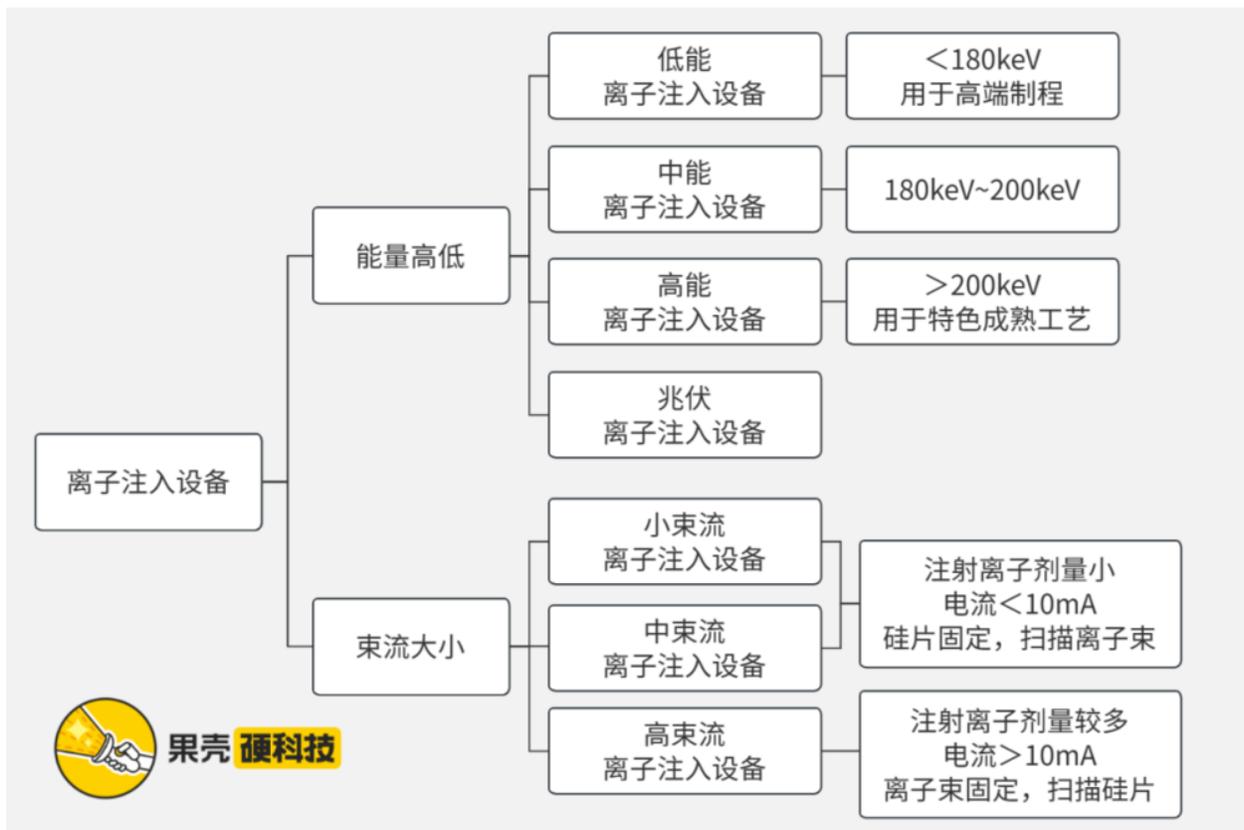
就比如说，向硅材料内掺入五价元素磷或砷，就可以得到N型半导体，掺入三价元素硼，就可以得到P型半导体。

芯片制造中，可在前期单晶生长阶段掺入杂质，如在CVD法生长过程中掺入特定施主或受主元素，使薄膜部分原子替换为对应元素。

对于已经制造出来的晶圆，则主要使用热扩散（Diffusion）和离子注入（Implant）两种工艺进行掺杂，在本文热处理设备部分已提到，热扩散工艺因其难以实现选择性扩散，所以除特定工艺外，基本被离子注入所取代。

离子注入的原理非常简单易懂，就是利用高能量电场加速杂质离子，直接轰击到半导体表面，最终挤入晶体内部。离子注入设备就像神枪手一样，把各种元素精准均匀地射击至圆片内部，而这也正是离子注入设备的技术难点，即在不损伤微小结构的前提下精准控制掺杂剂量和掺杂深度（粒子射程）。

根据离子束能量范围和束流大小，离子注入设备拥有低能、中能、高能、兆伏、小束流、中束流、高束流之分。不过实际应用中，60%以上情况使用低能大束流离子注入设备，用来制造逻辑芯片、DRAM、3D NAND和CIS芯片等；18%使用高能离子注入设备，用于制造功率器件、IGBT、5G射频、CIS等；20%使用中束流离子注入设备。^[48]

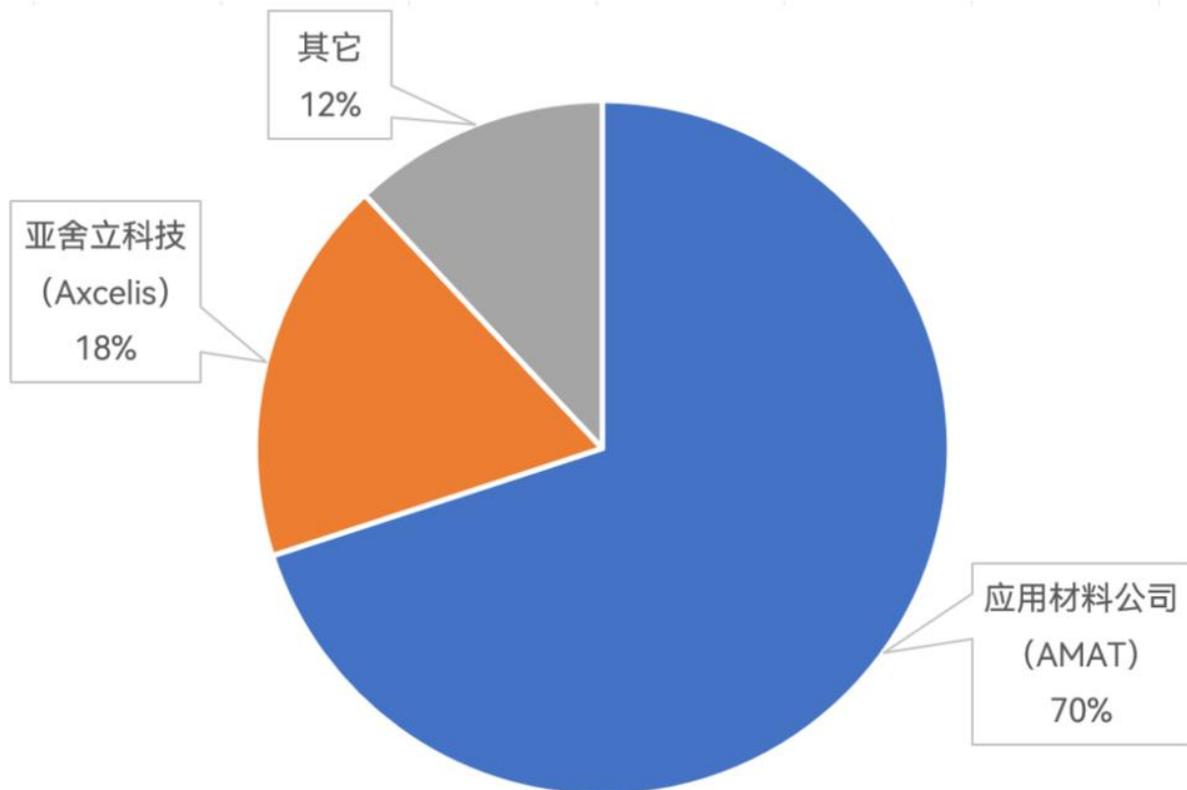


离子注入设备分类及说明，制图 | 果壳硬科技

参考资料 | 头豹^[49]

离子注入设备在制造设备中价值比重并不大，约为3%，2021全球离子注入设备市场约为24亿~26亿美元，长期估计2030年市场可成长至42亿美元。^[50]

全球离子注入设备商仅有9家（包含半导体、光伏、面板），具体到半导体领域则被美国应用材料公司（AMAT）和美国亚舍立科技（Axcelis）所垄断，两家公司合计全球市场占有率将近88%。^[49]



全球离子注入设备市场情况，制图 | 果壳硬科技

参考资料 | 中银证券^[50]

国内市场方面，仅有凯世通和中科信两家可生产离子注入机，此外，美国应用材料公司（AMAT）、美国亚舍立科技（Axcelis）、美国AIBT、日本住友（Sumitomo）等供应商包揽了国内大多数晶圆厂的市场份额，部分代表性晶圆厂国产化率仅1%~3%。^[50]

7. CMP设备

随着制程不断缩小，衡量晶体管的尺度越来越小，所以晶圆对平坦度要求也变得越来越高，这种情况下，就需要化学机械平坦（Chemical Mechanical Polishing, CMP）工艺，实现晶圆表面平坦化。

顾名思义，CMP就是协同化学腐蚀和机械研磨的一种工艺，与传统纯机械与纯化学不同，CMP能够有效避免纯机械的表面损伤和纯化学的抛光速度慢、表面平整度和抛光一致性差等缺点^[51]，这项工艺会在芯片制造中多次重复使用，包括光刻前、薄膜沉积后或先进封装中。

可以说，制程节点越小，需求CMP次数越多。如从180nm到14nm，CMP工艺步骤数将从10次增加至20次以上，而7nm工艺中CMP步骤数甚至超过30次。^[52]

CMP设备分为金属和非金属两种机台，非金属机台主要包括金属间介平坦化（IMD CMP）、层间介质平坦化（ILD CMP）和浅沟槽隔离平坦化（STI CMP）等，金属机台主要包括铜、钨、铝等。

CMP设备由抛光、清洗、传送三大模块构成，并其作业过程中，抛光头将晶圆待抛光面压抵在粗糙抛光垫上，借助抛光液腐蚀、微粒摩擦、抛光垫摩擦等实现全局平坦化，因此抛光液和抛光垫是工艺过程中两大耗材。^[53]

CMP技术是从0.35 μm 制程节点才开始大规模应用的新工艺，曾经，它也只是一个不被看好的丑小鸭

。

20世纪90年代初期，由于光刻对于平坦度的追求愈发强烈，CMP应运而生并被用于后端（BEOL）金属连线层间介质的平整，此时这项技术并没有引起行业的关注。20世纪90年代中期，0.35 μm 制程工艺时期，浅槽隔离抛光（STI CMP）取代了LOCOS，钨抛光（W CMP）则取代了反刻蚀（etch back）。21世纪初，铜抛光（Cu CMP）的出现，使得0.13 μm 后端铜制程变为现实，而后Cu CMP一直被延续使用到90/65/45/32/28/22nm。近年，随着制程节点不断缩小，对于CMP要求更高，新的CMP应用层出不穷。^[54]

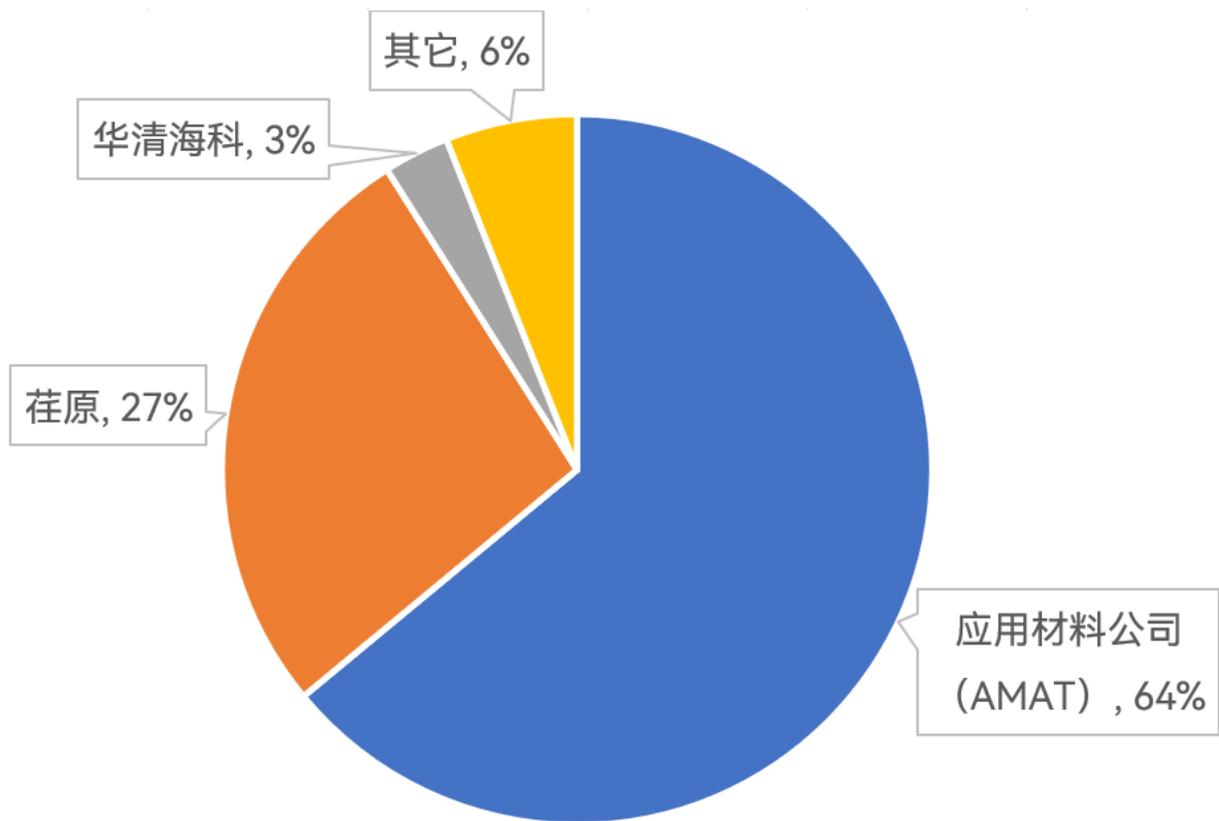
| 时间节点 | 制程节点 | 主要引入CMP技术 | 引入原因 |
|--------|--------------|------------------|----------------|
| 1990年 | 0.8 μ m | ILD CMP | 多层金属连线 |
| 1995年 | 0.35 μ m | STI CMP W CMP | 更小的隔离更高良率，更少缺陷 |
| 2001年 | 0.13 μ m | Cu CMP | 减小RC延迟 |
| 2007年 | 45nm/32nm | RMG CMP | 高k金属栅 |
| 2010年后 | <32nm | ????? | 更小尺度，新器件，新结构 |

参考资料 | 《纳米级称电路制造工艺》  果壳硬科技

CMP技术发展历史，参考资料 | 《纳米级称电路制造工艺》^[54]，果壳硬科技重置

目前，最先进的5/3nm制程也仍然在采用CMP技术，同时12英寸晶圆是仍是最先进制程所采取的尺寸标准，因此CMP设备未来较长时间内不存在技术迭代周期，但设备中核心模块技术和控制系统会不断升级。^[55]

CMP设备在半导体设备价值链中占比约为3%，而美国应用材料和日本荏原合计包揽全球CMP设备超90%市场份额，两家公司CMP设备均已达到5nm制程工艺水平，我国绝大部分的高端CMP设备也由美国应用材料和日本荏原提供。^[55]



CMP设备全球市场情况，制表 | 果壳硬科技
参考资料 | 国金证券^[56]

国内方面，目前主要为中低端产品，12英寸高端CMP设备处在产品验证阶段，其中，华海清科CMP设备已正式进入集成电路生产线，盛美半导体CMP设备主要用于后段封装的65~45nm铜互联工艺，由中电科45所CMP技术专家创业建立的杭州众德公司也正逐渐迈向新一步。^[51]

8. 清洗设备

半导体中的清洗技术是指在氧化、光刻、外延、扩散和引线蒸发等半导体制造工序前，采用物理或化学方法，清除污染物和自身氧化物的过程。

芯片有着严重的洁癖，这是因为沾污带来的缺陷引起的芯片电学失效，比例高达80%^[57]。假若在晶圆制造环节中有污染物未能完全清除，轻则影响晶圆良率，重则导致一整片乃至成批晶圆报废。

清洗能够贯穿了芯片制造的全产业链，占据30%以上的半导体制造工序步骤。SEMI数据显示，在80nm~60nm制程中清洗工艺共有约100个步骤，而到了20nm~10nm 制程中清洗工艺增加到200个步骤以上^[58]。也是重复次数最多的工序，包括三类工序：

- **在硅片制造过程**：清洗抛光后的硅片，保证表面平整度和性能，提高后续工艺良品率；
- **在晶圆制造过程**：在光刻、刻蚀、沉积、离子注入、去胶等关键工序前后清洗，减小缺陷率；
- **在芯片封装过程**：根据封装工艺进行TSV清洗、UBM/RDL清洗、键合清洗等。

根据清洗介质的不同，半导体清洗分为湿法清洗和干法清洗，前者采用去离子水和化学溶剂，辅以超声波、加热、真空等物理方法，对晶圆表面进行清洗，后者不使用化学溶剂的清洗技术。其中，90%的清洗步骤使用的都是湿法清洗技术，不过二者缺一不可，各自发挥不同作用。

清洗设备在半导体设备价值链中占比约为6%，从国际和国内清洗设备现状来看，马太效应显著。全球半导体清洗设备市场呈现高度集中的态势。Gartner数据显示，DNS（迪恩士）、TEL（东京电子）、SEMES与LAM（泛林半导体）分别占据2020年全球半导体清洗设备市场份额的45.1%、25.3%、14.8%和12.5%。^[59]

国内能提供半导体清洗设备的企业非常少，主要包括盛美半导体、北方华创、芯源微及至纯科技四家公司，目前四家国产企业均已具备130nm~28nm主流制程清洗设备技术，其中盛美半导体已在研7/5nm清洗设备技术。

相比其它种类半导体设备，清洗设备国产增速明显，国产化率从2015年的15%提升到了2020年的20%^[60]。国内短板主要在于先进湿法清洗设备，DNS（迪恩士）、TEL（东京电子）、LAM（泛林半导体）与SEMES四家公司就包揽了单片清洗设备市占率的90%。

9. 检测和量测设备

集成电路生产工艺复杂，仅前道制程就存在数百道工序，量变引发质变，每道工序的缺陷都会随时间推移而被放大到数倍甚至数十倍，所以只有保证每道工序都不存在缺陷，才能保证最终成品的性能。

换句话说，生产每走一步，就要用查看一次生产情况。就像医疗领域的CT、彩超、生化分析仪等辅助检测身体状况的设备一样，这些给芯片前道工艺“体检”的工具就是检测和量测设备。

几纳米的误差、尺寸变化、颗粒或图像错误，都会导致芯片无法正常工作，假若前道工艺每道工序良率损失0.1%，最终良率就会降低到36.8%^[61]。检测和量测设备作为前道检测两大设备，能够有效控制制造过程，提高产量。

- **检测设备：**用于检测晶圆表面缺陷（包括异物缺陷、气泡缺陷、颗粒缺陷等），分为明/暗场光学图形图片缺陷检测设备、无图形表面检测设备、宏观缺陷检测设备；
- **量测设备：**用于测量透明/不透明薄膜厚度、膜应力、掺杂浓度、关键尺寸、光刻套准精度等指标，对应设备分为椭偏仪、四探针、原子力显微镜、CD-SEM、OCD-SEM、薄膜量测等。

[62]

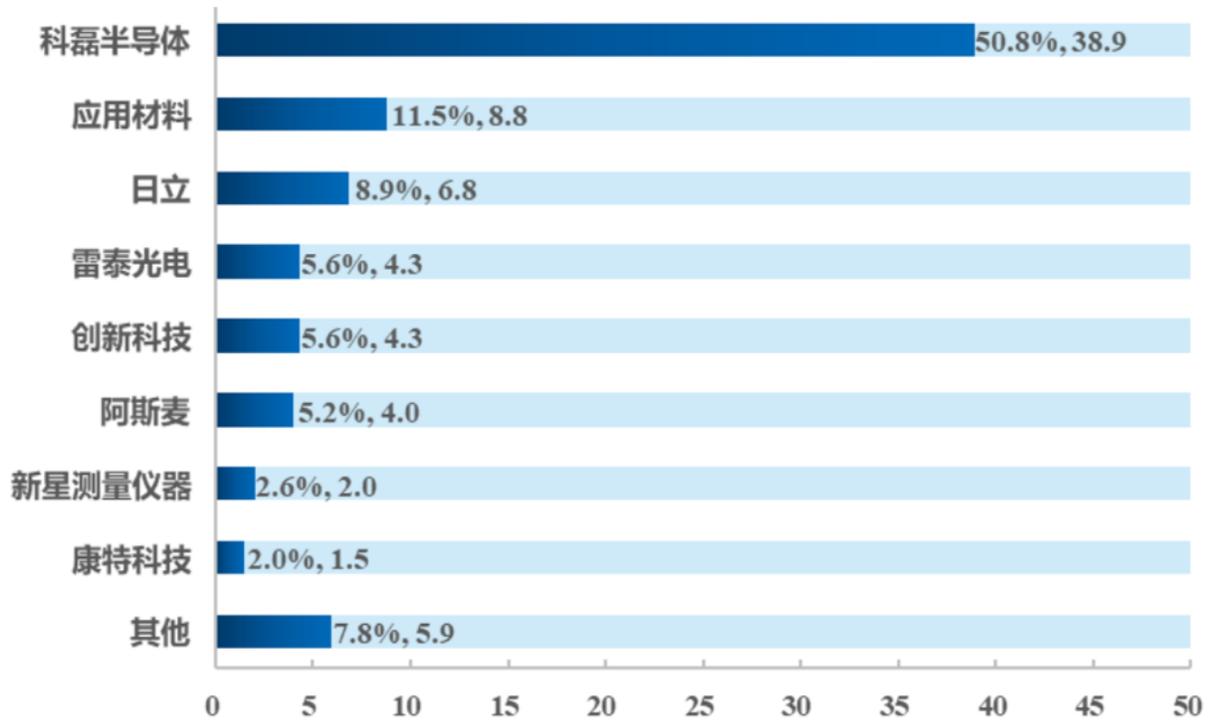
半导体检测和量测设备研发难度高，投入大，但市场空间不如中下游集成电路或芯片那般大，且增速较为平稳。不过，它在制造设备中价值比重约为12%，相对占比较大。

数据显示，全球半导体量测设备将从2021年的73亿美元提升至2031年的133亿美元，年复合增长率6.2%，同时这一领域全球集中度极高，科磊半导体（KLA）、应用材料（Applied Materials）、日立（Hitachi）三家全球市场占比分别为50.8%、11.5%、8.9%。^[63]

我国半导体检测与量测设备国产化率极低，2020年我国半导体检测和量测设备国产化率约为2%，科磊半导体、应用材料、日立三家公司分别占据我国检测和量测设备市场的54.8%、9.0%、7.1%。而我国整体市场占全球市场约27.4%，根据推算，2023年我国检测和量测设备市场规模能够达到326亿元。^{[64][65]}

2020 年全球半导体检测和量测设备市场格局情况

单位：亿美元



2020年全球半导体检测和量测设备市场格局^[62]

三、前道工艺：材料消耗大户

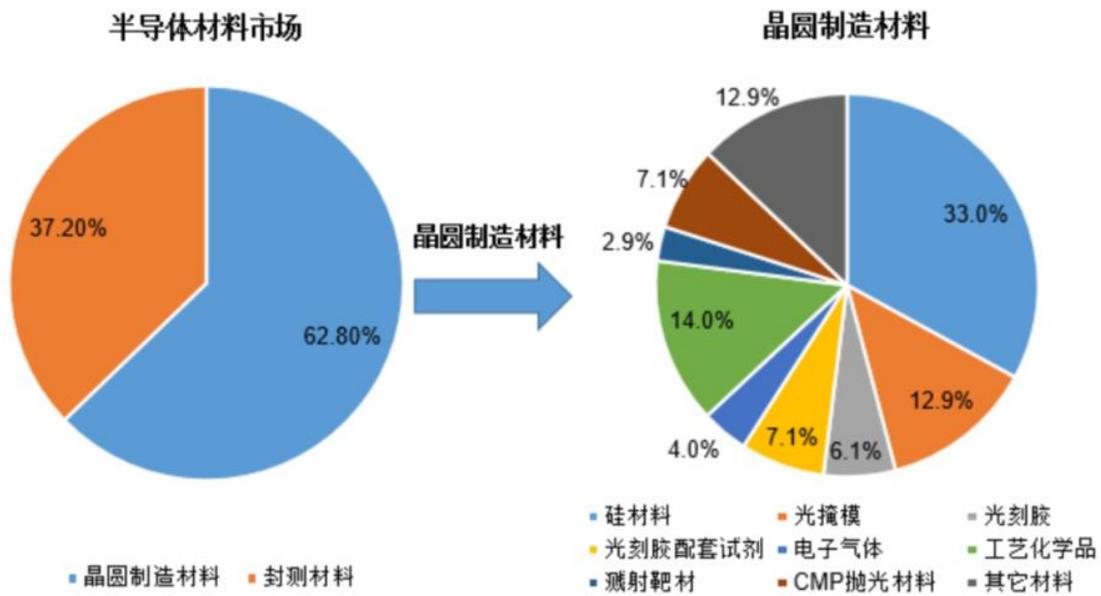
材料是生产芯片的基石，从古至今，历史的发展与材料密切相关，各个时代都以相应的材料名称作为其标志，如石器时代、陶器时代、青铜器时代、铁器时代、瓷器时代^[66]，而放眼当下，卡脖子的35项技术几乎都与材料有关。^[67]

半导体行业无疑是把材料玩出花的行业，涉及的材料品类和需求量都非常大，而这些材料也会是前期加工至关重要的一环。

半导体材料分为晶圆制造材料和封装材料两种，前期加工消耗的材料主要包括硅材料、靶材、CMP抛光材料、光刻胶、湿电子化学品、电子特种气体、光掩膜等。^[9]

SEMI数据显示，全球半导体材料占整体行业市场规模从2015至2021年呈先降后升的趋势，2021年全球半导体材料市场约占全球半导体产业总规模的11.56%^[9]。2022年全球半导体材料市场销售额达727亿美元，相比2021年的668亿美元增长8.9%，其中晶圆制造材料和封装材料销售额分别为447亿美元和280亿美元，分别占全球材料市场销售额的61.5%和38.5%。此外，2022年中国大陆材料销售额为129.7亿美元，占全球市场约17.8%。^[68]

2021 年全球半导体材料分类规模占比

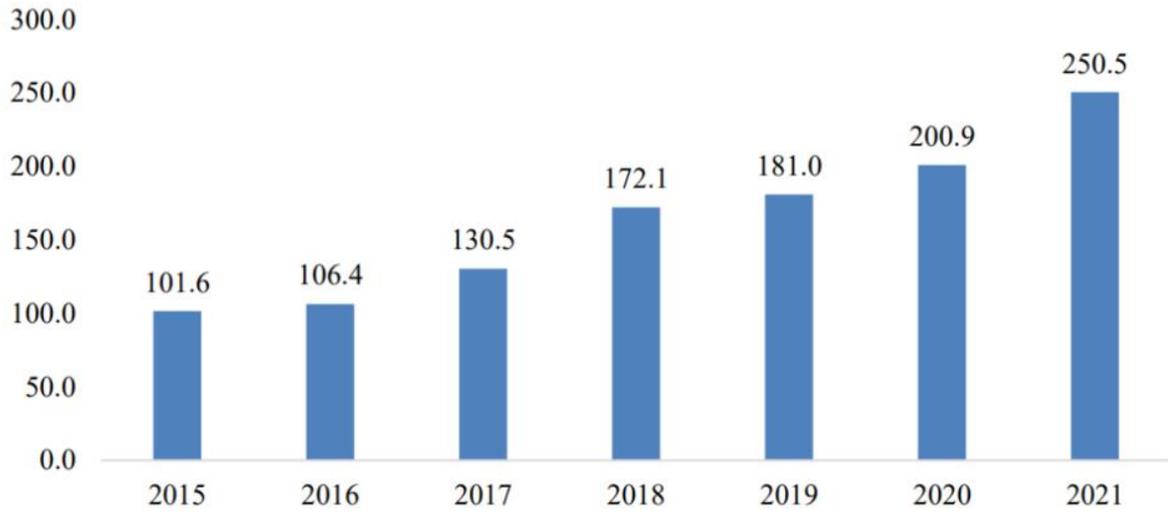


2021年全球半导体材料分类规模占比^[9]

1. 硅材料

半导体行业的硅料消耗量极大。统计显示，2015年~2021年国内半导体硅料市场规模从101.6亿元升至250.5亿元，复合增长率达16.2%，目前，国内半导体硅料生产企业技术水平进步明显，且能够在国内市场维持较高占比。^[9]

2015-2021 年中国硅材料市场规模柱状图（单位：亿元）



资料来源：SEMI

2015年~2021年中国硅材料市场规模柱状图^[9]

半导体硅料价格与半导体硅片行业景气度挂钩，SEMI数据显示，硅料价格从2016年0.67美元/平方英寸增长至2021年价格0.98美元/平方英寸。^[9]

全球半导体硅片平均售价情况（美元/平方英寸）



数据来源：SEMI

全球半导体硅片平均售价情况^[9]

2. 掩模版

光掩模是光刻工艺中重要材料，用于选择性阻挡曝光、辐照或物质穿透的掩蔽模版。简单解释来说，掩模版是光刻过程中的底片，能将上面的图案复制到晶圆上。按用途，掩模版分为主掩模、中间掩模、工作掩模、移相掩模等。

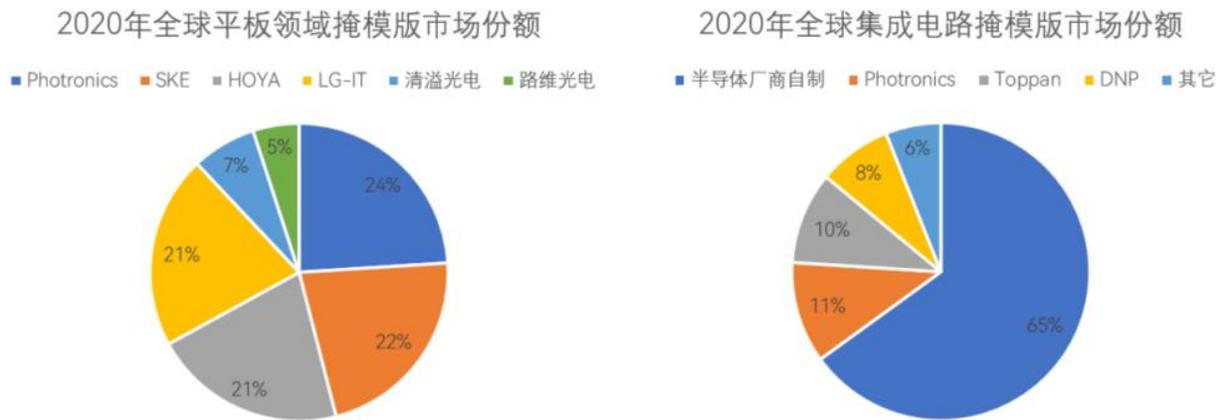
如今媒体甚至正式刊物中，经常出现错误的写法，如“掩膜版”或者“掩模板”，实际上，它的规范写法是“掩蔽模具”的“模”，不应该写成“薄膜”的“膜”，同时掩模版的“版”是“出版的版”，而非“板材”的“板”。

[26]

掩模版自身，也是由光刻工艺而来，但与芯片不同，掩模版本身要比芯片大得多，所以通常不会使用DUV、EUV光刻那样又难又贵的光刻技术，而是采用光学图形发生器、激光图形发生器和电子束图形发生器进行掩膜图形曝光。^[26]

掩模版约占12%全球半导体材料市场，据推算，2021年全球掩模版市场规模为77.16亿美元，其中24%为显示面板用掩模版，65%为集成电路用掩模版。^[69]

平板显示方面，Photronics（福尼克斯）、SKE、HOYA（豪雅）、LG-IT、清溢光电、路维光电分别占据2020年全球市场份额的24%、22%、21%、21%、7%、5%；集成电路方面，全球65%的市场是由半导体厂商自行生产（如英特尔、三星等），第三方公司Photronics（福尼克斯）、Toppan（凸版印刷）、DNP（大日本印刷）分别占据2020年全球市场份额的11%、10%、8%。^[70]



2020年全球掩模板市场，制表 | 果壳硬科技
参考资料 | 安信证券^[70]

3. 光刻胶

光刻胶，又称“光致抗蚀剂”，是光刻成像的承载介质，可利用光化学反应将光刻系统中经过衍射、滤波后的光信息转化为化学能量，从而把微细图形从掩模版转移到待加工基片上。其被广泛应用于光电信息产业的微细图形线路的加工制作，是微细加工技术的关键性材料。

一言以蔽之，光刻胶是光刻工艺最重要的耗材，其性能决定了加工成品的精密程度和良品率。

从用量上来说，溶剂（主要为丙二醇甲醚醋酸酯，简称PMA）是用量最大的材料，含量最高可达90%，但在成本上并不突出，且不起关键作用；作为光化学反应的核心部分，光引发剂的用量仅有约1%~6%；树脂则在不同光刻胶产品中的用量区别很大。^[71]

从成本看，在半导体光刻胶领域，越先进的工艺，树脂成本占比越高：以 KrF（氟化氪）光刻胶为例，树脂成本占比高达约75%，感光剂约为23%，溶剂约为2%。^[72]

根据曝光波长不同，半导体光刻胶可进一步分为普通宽普光刻胶、g线（436nm）、i线（365nm）、KrF（248nm）、ArF（193nm）、以及最先进的 EUV（<13.5nm）光刻胶。

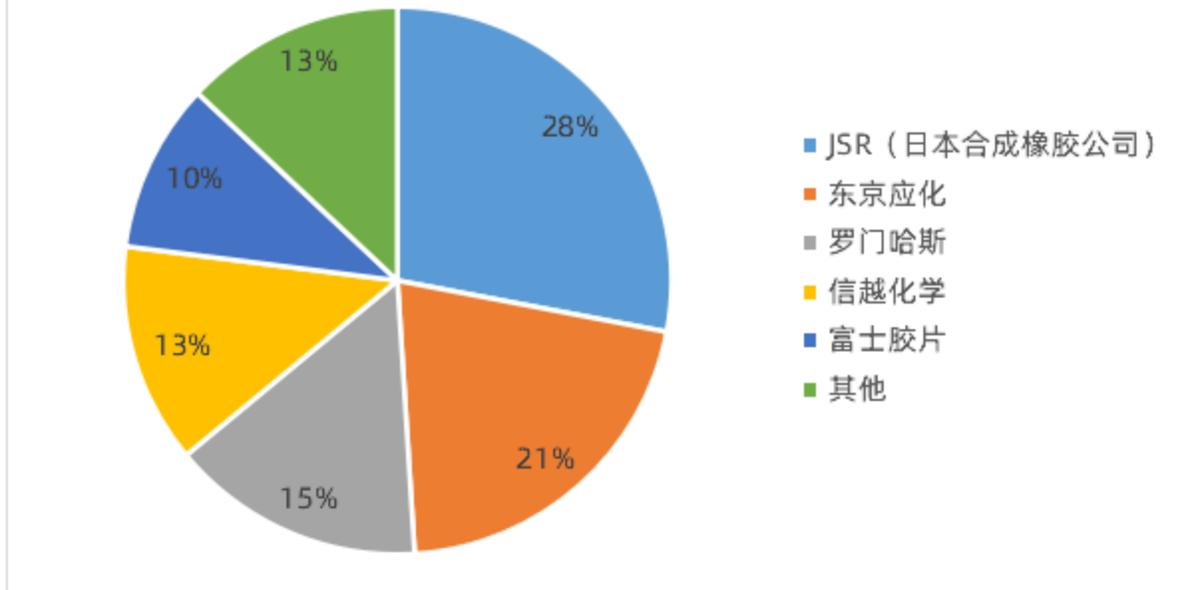
其中，ArF光刻机涉及干法和浸没式两种工艺（区别在于镜头和光刻胶之间的介质是空气还是液体），ArF光刻胶也对应分为干法和浸没式两类。EUV光刻胶则是制造难度最高的产品，也是7nm及以下制程芯片加工过程中的核心原材料。

2019年全球光刻胶市场规模预计约91亿美元，自2010年至2019年年复合增长率约为5.4%，推算2021年数据为百亿左右；同期中国本土光刻胶市场规模约在88亿人民币左右^[73]。而其中，全球的半导体光刻胶市场规模约为17.5亿美元。^[74]

细分市场方面，ArFi光刻胶（即浸没式ArF光刻胶）和KrF光刻胶市场份额最大，均在30%以上，其次是g/i光刻胶，市场份额约为17%，EUV及其它类型半导体光刻胶合计仅有1%左右。但从未来发展看，作为代表着先进集成电路发展趋势的EUV光刻的关键耗材，EUV光刻胶对将芯片制程推进至5nm以下起关键作用，成长性无疑是最好的。^[75]

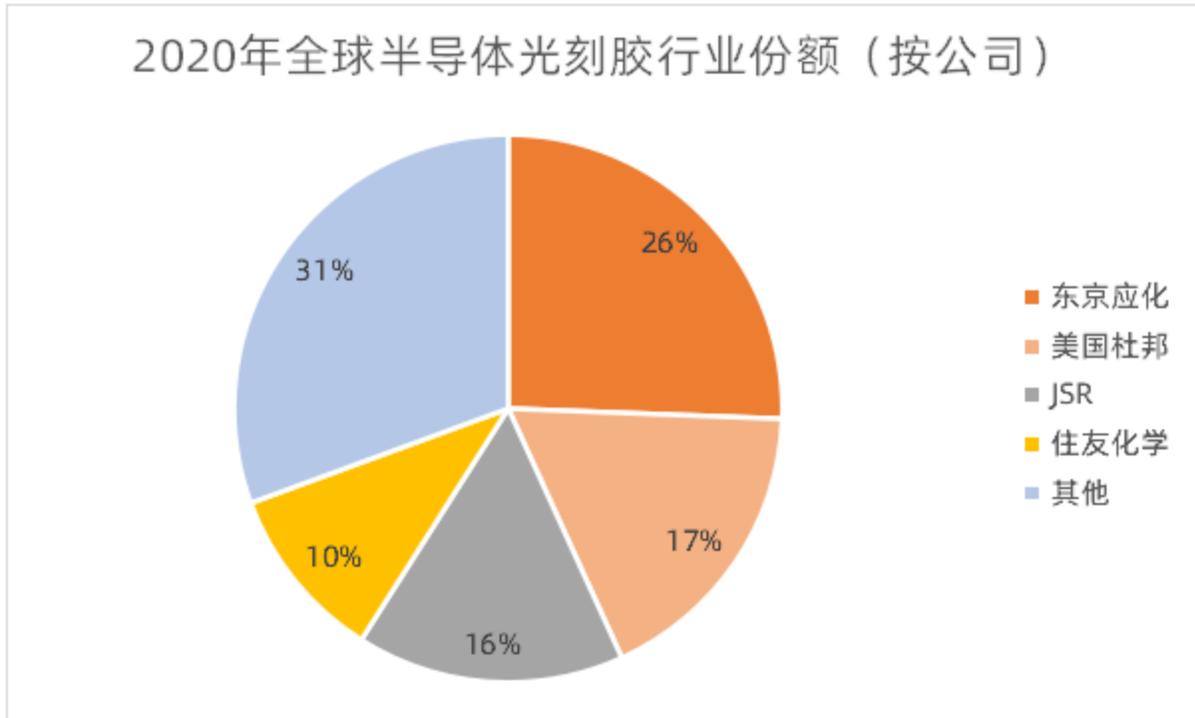
整体业态方面，全球光刻胶市场高度集中，日美把控着绝大部分市场份额。日本的JSR、东京应化、信越化学及富士胶片四家企业占据了全球70%以上的市场份额，整体垄断地位稳固。^[75]

全球光刻胶市场份额（按公司划分）



全球光刻胶市场份额^[75]

全球半导体光刻胶市场中，日本企业稳居垄断地位。2020年，日本企业在全全球半导体光刻胶市场中占据的份额至少在60%以上，其中东京应化以25.6%的市场份额占据龙头地位；美国杜邦位列第二，市场份额为17.6%。细分市场中，2020年，日本东京应化在g/i线、KrF和EUV光刻胶市场的份额位列全球第一；JSR则以24.9%的市场份额把持着ArF光刻胶市场。^[74]



2020年全球半导体光刻胶行业份额^[74]

国内方面，相对低端的PCB光刻胶仍然占国内94%左右供应，而高端面板光刻胶与半导体光刻胶则非常之少^[76]。具体到半导体，目前适用于6英寸硅片的g线、i线光刻胶的自给率约为10%，适用于8英寸硅片的KrF光刻胶自给率不足5%，而适用于12寸硅片的ArF光刻胶基本依赖进口，更先进的EUV则连研发都处于相当早期的阶段^[77]。产能上，国内企业的产品，仅g/i线光刻胶实现批量应用，KrF仅少数研发进度领先企业实现小批量应用。

4. 电子气体

任何电子产品都逃不开电子气体，它是重要的基础性原材料，被喻为工业制造的“血液”或“粮食”。电子气体仅占芯片总成本的5%~6%^[78]，但下游厂商对电子气体的需求具有刚性和稳定性，导致对价格的敏感度较低，从而使电子气体拥有较强的成本转嫁能力。

电子气体分为电子特种气体和电子大宗气体两大类^[79]，二者对制造都极为重要。电子大宗气体与特种气体应用广泛，涉及集成电路制造、光伏制造、显示面板制造等领域，不同领域间所用气体存在一定交集。其中，三氟化氮（NF₃）、硅烷（SiH₄）和氨气（NH₃）是集成电路制造、光伏制造、显示面板制造领域的三大主要气体。

电子产品都是大胃王，一款产品需要几十甚至上百种电子气体。以集成电路为例，涉及电子气体约100多种，核心工段约40~50种^[80]。虽然每种气体用量并没有很大，但种类繁多，整体用量就变大了。从全球市场占比来看，硅烷约为22%，三氟化氮为13%，离子注入气为10%，氟碳类为6%，六氟化钨为4%，笑气为4%，锗烷为3%，高纯氨为3%以及大量其它气体。^[81]

| 行业 | 分类 | 主要气体 |
|--------|------|--|
| 集成电路制造 | 大宗气体 | 氩气、二氧化碳、氦气、氢气、氧气、氮气 |
| | 特种气体 | 锗烷混氢、硅烷、乙硅烷、六氯乙硅烷、二氯氢硅、三氯氢硅、氧化亚氮、氨气、氯化氢、溴化氢、一氧化碳、高纯二氧化碳、六氟化硫、氟碳化合物、氟气/氮气 |
| 光伏制造 | 大宗气体 | 氩气、氦气、氢气、氮气、氧气 |
| | 特种气体 | 氨气、砷烷/乙硼烷/磷烷混合物、四氟化碳、氯气、氟气、一氧化二氮、硅烷、六氟化硫 |
| 显示面板制造 | 大宗气体 | 氩气、二氧化碳、氦气、氢气、氧气、氮气 |
| | 特种气体 | 氨气、四氟化碳、激光气、三氟化氮、氧化亚氮、磷烷/氢气混合物、硅烷、六氟化硫 |

参考 | 公开资料  果壳硬科技

各制造领域所需气体情况，制表 | 果壳硬科技

目前，美国空气化工、德国林德集团、法国液化空气、日本大阳日酸四家海外巨头占据了全球约九成市场^[82]。我国所用电子气体以外资为主，虽然国内部分企业已具备生产高纯电子气体的能力，却很难进入集成电路领域^[83]，集成电路所用的电子特气我国仅能生产约20%品种^[84]，国产化率不足15%^[85]。与此同时，国内高端电子特气几乎全部依赖进口。^[86]

迄今为止，国内电子气体玩家分为三类：

- 第一类是以工业气体为主营业务，产品覆盖到部分品种电子气体，代表公司有华特气体、金宏气体；
- 第二类是专注深耕电子特气的公司，代表公司有派瑞特气、昊华科技、华宇同方；
- 第三类是电子材料平台型公司，除电子气体外，业务还涉及其它电子材料，代表公司有雅克科技、南大光电。^[87]

我国电子大宗气体2020年市场规模为1632亿元，同比增长10.49%，预计2023年有望突破2000亿元，达到2172.2亿元，由于细分行业壁垒高，目前国产化率较低^[88]；2021年中国特种气体市场规模预计达342亿元，其中电子特气预计达216亿元，电子特气占特种气体接近6成。^[82]

对比国内外发展情况，国际厂商供应客户均为尖端制造厂商，产品品种覆盖面更广，供气模式也更丰富，大部分可提供TGM供气模式。国内则缺乏高端气体技术，同时仅少部分公司拥有TGM模式。从技术角度来看，虽然我国已在气体提纯技术、容器处理技术、气体充装技术和检测技术上达到国际通行标准^[89]，但整体水平仍与国际存在差距。

5. 工艺化学品

工艺化学品（Process Chemicals）是国际的一种统称，在美国、欧洲和中国台湾地区又被称为**湿化学品**，而在中国大陆则用“**电子级试剂**”“**超净高纯化学试剂**”等更精准的表达方式。本文主要使用湿电子化学品这种行业通用的称呼。

湿电子化学品极为重要，SEMI（国际半导体设备与材料协会）也将其单门划分为一类进行统计，它影响着集成电路的成品率、电性能及可靠性^[90]。此外，从28nm到5nm总工艺步骤将由400次增加至1200以上，其中清洗工艺占总工艺25~30%，进一步带动高端湿电子化学品需求量。^[91]

顾名思义，湿电子化学品是用于光刻、刻蚀、离子注入、CMP、清洗等制造工艺中的各种液体，可划分为通用湿电子化学品和功能湿电子化学品两类：

- 通用湿电子化学品是制造中被大量使用的液体化学品，一般为单成份、单功能化学品，如氢氟酸、硫酸、氢氧化钠、氢氧化钾等；
- 功能湿电子化学品是满足制造特殊工艺需求的复配类化学品，如显影液、剥离液、蚀刻液、稀释液、清洗液等。^[92]

| 大类 | 小类 | 具体产品 |
|----------|--------|----------------------|
| 功能湿电子化学品 | 复配类化学品 | 显影液、剥离液、清洗液、蚀刻液、稀释液等 |
| 通用湿电子化学品 | 酸类 | 氢氟酸，硫酸，磷酸，硝酸，乙酸，乙二酸等 |
| | 碱类 | 氢氧化铵，氢氧化钾，氢氧化钠等 |
| | 有机溶剂类 | 甲醇，乙醇，丙酮，丁酮，乙酸乙酯，甲苯等 |
| | 其他类 | 过氧化氢等 |

湿电子化学品的分类与具体产品^[92]

与电子气体类似，湿电子化学品也追求高纯度。目前，全球均执行SEMI国际标准，根据金属杂质、控制粒径、颗粒数、IC线宽分级，不同分级适用应用不同。

| SEMI | G1 | G2 | G3 | G4 | G5 |
|-----------|------------|---------|-----------------------------|------------------------------|-------|
| 金属杂质/ppb | ≤1000 | ≤10 | ≤1.0 | ≤0.1 | ≤0.01 |
| 控制粒径/μm | ≤1.0 | ≤0.5 | ≤0.5 | ≤0.2 | 需双方协商 |
| 颗粒/(个/ml) | ≤25 | ≤25 | ≤5 | 需双方协商 | 需双方协商 |
| IC 线宽/μm | >1.2 | 0.8~1.2 | 0.2~0.6 | 0.09~0.2 | <0.09 |
| 应用 | 分立器件、太阳能电池 | 显示面板 | 大规模集成电路(IC)、超高清LCD、OLED显示面板 | 超大规模集成电路(IC)、超高清LCD、OLED显示面板 | - |

湿电子化学品SEMI国际标准等级^[92]

目前，国际大规模湿电子化学品生产企业包括德国巴斯夫（BASF）、美国亚什兰（Ashland）、美国Arch化学、美国霍尼韦尔（Honeywell）、美国Mallinckrodt Baker、日本关东化学、日本三菱化学、日本京都化工、日本住友化学、日本和光纯药工业（Wako）、日本stella-chemifa、韩国东进等。我国主要企业则包括多氟多材料、江阴江化微、江阴润玛、苏州晶瑞、浙江凯盛氟、沧州信联、无锡三开、镇江润晶等。^[93]

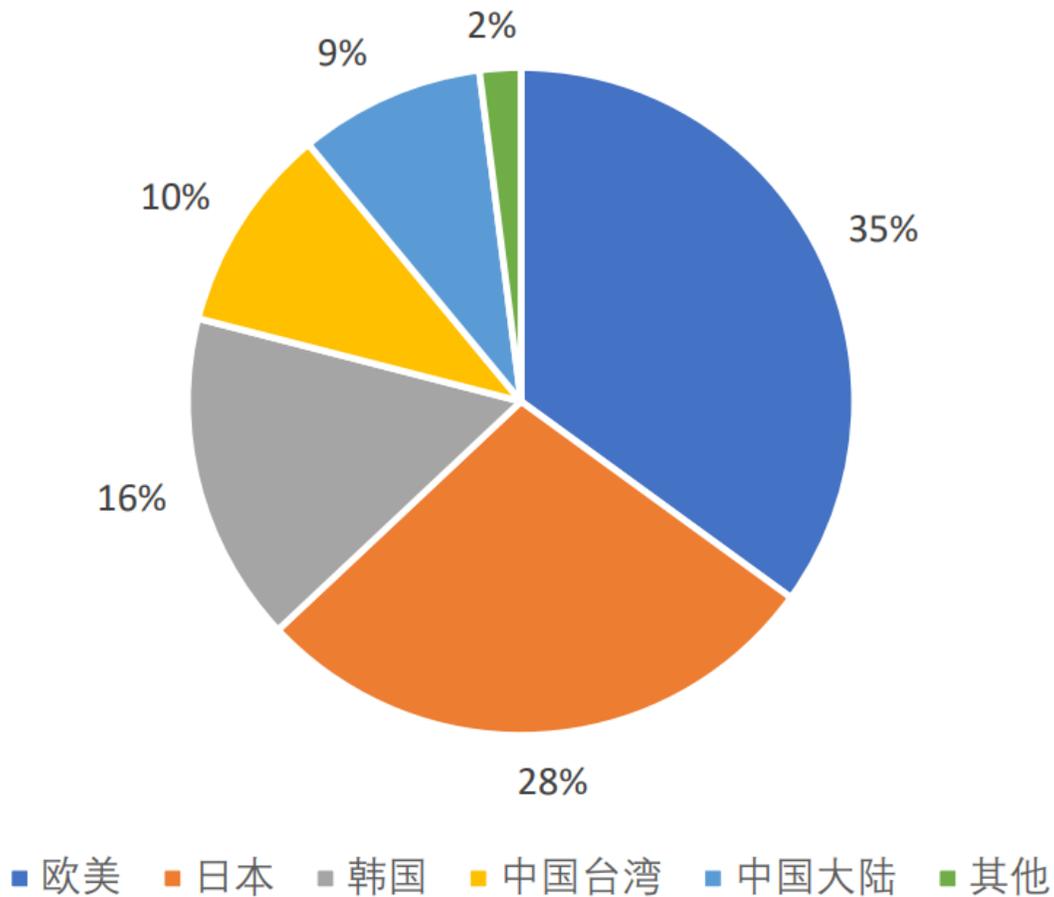
| 地区 | 企业名称 | 湿电子化学品事业情况 |
|----|--------------------------|---|
| 欧美 | 德国巴斯夫 (BASF) | 收购德国伊默克公司，成为电子行业的领先企业 |
| | 美国亚什兰集团 (Ashland) | 在高雄与UPC (联合石化公司) 建有超纯化学品生产基地合资企业 |
| | 霍尼韦尔公司 (Honeywell) | 可为全球半导体行业供应杂质在100ppt以下的高纯度湿电子化学品，如氢氟酸、氢氧化铵、过氧化氢和盐酸等产品 |
| | 美国ATMI公司 | 是目前世界知名半导体用聚合物剥离液生产供应商 |
| | 美国AirProducts | 在半导体中使用的显影液、清洗液有一定的市场地位 |
| | 德国汉高 (Henkel) | LCD清洗液、剥离液及显影液在全球液晶面板商中具有一定规模的使用 |
| 日本 | 关东化学公司 (Kanto) | 主要生产半导体用酸碱类超纯高净化学试剂，在世界有较高声誉 |
| | 三菱化学 (Mitsubishi) | 主要生产高纯湿化学品，如硫酸、硝酸、盐酸、草酸、双氧水、氨水 |
| | 住友化学 (Sumitomo) | 超净高纯化学试剂有一定市场份额，特别是大尺寸晶圆制造 |
| | 宇部兴产 (UBE) | 主要生产半导体、显示面板等湿电子化学品，品种较多 |
| | StellaChemifa公司 | 世界最大的高纯氢氟酸企业 |
| 韩国 | 东友精细化工 东进世美肯 | 两厂主要生产显示面板用湿电子化学品，在我国有一定规模市场份额 |
| 中国 | 中国台湾东应化 | 主要生产半导体、TFT_LCD用剥离液、显影液等产品 |
| | 中国台湾联仕电子化学 | 拥有3~4万吨湿电子化学品年产能，在我国半导体领域有一定市场份额 |
| | 鑫林科技 | 与日本关东化学技术合作，近年在显示面板的市场方面发展明显 |
| | 理盛精密科技 | 合资企业，由日本Rasa公司控股，主要生产液晶面板蚀刻液高纯度磷酸 |
| | 多氟多新材料 | 国内首批突破G5级电子级氢氟酸企业，产品已通过台积电认证 |
| | 江阴江化微电子材料 | 主要生产超净高纯试剂、光刻胶配套试剂等，主要产品为氢氟酸、剥离液 |
| | 江阴润玛电子材料 | 主要生产超净高纯试剂，主要产品有氢氟酸、硝酸、蚀刻液等 |
| | 苏州晶瑞化学 | 主要生产氢氟酸、过氧化氢 (双氧水)、氨水、盐酸、硫酸、硝酸等 |
| | 浙江凯圣氟 | 主要产品为氢氟酸、BOE蚀刻液、氟化氢等 |
| | 沧州信联化工 | 电子化学品主要为TMAH显影液 |
| | 无锡三开高纯化工 | 外资控股企业，主要产品为TMAH显影液等 |
| | 镇江润晶高纯化工 | 主营业务是电子级TMAH显影液、工业级TMAH催化剂等精细化学品 |
| | 合肥东进世美肯科技 东进电子材料 (启东) | 韩国东进中国子公司，主要产品有显示面板用显影液、剥离液、蚀刻液、清洗液等 |



全球湿电子化学品主要企业及情况，制表 | 果壳硬科技
参考资料 | 格林达招股书^[92]

数据显示，2022年全球集成电路用湿化学品市场规模为56.90亿美元，2025年则可增长至63.81亿美元，其中中国总体市场规模将在2025年增长至10.27亿美元。^[91]

虽然我国湿电子化学品已在太阳能电池领域已实现国产替代，但在半导体和平板显示领域市占率仅有23%和35%，此外，2019年中国大陆企业在超净高纯化学品市场供应上仅占中国市场的9%，超净高纯试剂无论是在质量上，还是数量上都难以满足电子工业需求。^[94]



2019年中国超净高纯化学品市场供应格局^[94]

6. 溅射靶材

溅射靶材是沉积薄膜的原材料，而溅射（Sputtering）工艺则属于物理气相沉积（PVD）技术的一种。

溅射靶材由靶坯、背板等部分构成，其中靶坯属核心部分，是高速离子束流轰击的目标材料。

| 序号 | 分类标准 | 产品类别 |
|----|---------|--|
| 1 | 按形状分类 | 长靶、方靶、圆靶 |
| 2 | 按化学成份分类 | 金属靶材（纯金属铝、钛、铜、钽等）、合金靶材（镍铬合金、镍钴合金等）、陶瓷化合物靶材（氧化物、硅化物、碳化物、硫化物等） |
| 3 | 按应用领域分类 | 半导体芯片靶材、平面显示器靶材、太阳能电池靶材、信息存储靶材、工具改性靶材、电子器件靶材、其他靶材 |

溅射靶材的分类^[95]

溅射靶材应用广泛，包括半导体芯片、平板显示、太阳能电池等。针对不同领域，也对金属材料提出了不同性能要求。

一般来说，半导体芯片对溅射靶材要求最高，其对金属材料纯度、内部微观结构等方面设定了严苛标准，包括铝靶、钛靶、铜靶、钽靶、钨钛靶等，纯度要求一般在5N（99.999%）以上。

- 超高纯铝及其合金是目前使用最广泛的半导体芯片配线薄膜材料之一；
- 超高纯钛主要作为阻挡层薄膜材料之一，钛靶材及环件与超高纯钛靶材配套应用于130nm~5nm工艺；
- 超高纯钽是阻挡层薄膜材料，钽靶材及环件应用于90nm~3nm等最尖端工艺中；
- 超高纯铜及铜锰、铜铝合金靶材是目前使用最广泛的先端半导体导电层薄膜材料之一，铜及铜合金作为导电层通常用于90nm~3nm技术节点的先端芯片中。^[96]

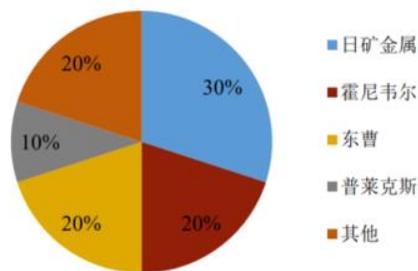
| 应用领域 | 金属材料 | 主要用途 | 性能要求 |
|-------|----------------------|--------------|--------------------------|
| 半导体芯片 | 超高纯度铝、钛、铜、钼等 | 制备集成电路的关键原材料 | 技术要求最高、超高纯度金属、高精度尺寸、高集成度 |
| 平面显示器 | 高纯度铝、铜、钼等，掺锡氧化铟（ITO） | 高清晰电视、笔记本电脑等 | 技术要求高、高纯度材料、材料面积大、均匀性程度高 |
| 太阳能电池 | 高纯度铝、铜、钼、铬等，ITO | 薄膜太阳能电池 | 技术要求高、应用范围大 |
| 信息存储 | 铬基、钴基合金等 | 光驱、光盘等 | 高储存密度、高传输速度 |
| 工具改性 | 纯金属铬、铬铝合金等 | 工具、模具等表面强化 | 性能要求较高、使用寿命延长 |
| 电子器件 | 镍铬合金、铬硅合金等 | 薄膜电阻、薄膜电容 | 要求电子器件尺寸小、稳定性好、电阻温度系数小 |
| 其他领域 | 纯金属铬、钛、镍等 | 装饰镀膜、玻璃镀膜等 | 技术要求一般，主要用于装饰、节能等 |

溅射靶材对金属材料选择和性能要求^[95]

溅射靶材产业各环节参与企业数量基本呈金字塔型分布，最高端应用的高纯溅射靶材难度极高，仅日矿金属、霍尼韦尔、东曹、普莱克斯等少数几个美日企业能够生产^[95]，四家公司合计占据80%以上全球市场。^[97]

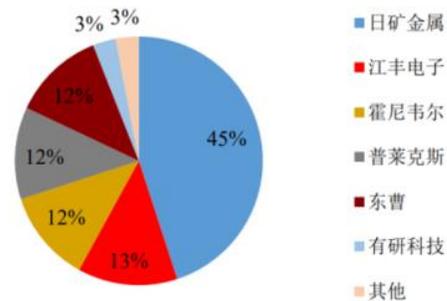
此外，溅射靶材各国发展也不同。美日企业拥有最完整的溅射靶材产业链，韩国、新加坡则在磁记录及光学薄膜领域有所特长，我国则起步较晚，主要拥有江丰电子、有研新材、阿石创、隆华科技四家企业，目前已有部分企业初步实现高端应用溅射靶材。

图 11 2019 年全球半导体靶材市场份额



资料来源：SEMI，前瞻产业研究院，首创证券

图 12 2017 年全球超高纯溅射靶材市场份额



资料来源：CMC，首创证券

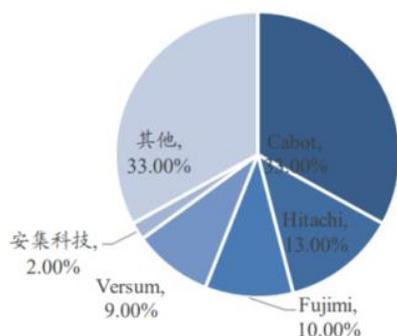
7. CMP抛光材料

CMP抛光液是CMP过程重要耗材，约占CMP成本的50%，主要由磨料、去离子水、PH值调节剂、氧化剂及分散剂等添加剂组成，其中纳米磨料是决定性原料，多为硅溶胶、SiO₂、CeO₂、纳米级Al₂O₃颗粒等。^[90]

2022年全球晶圆制造用抛光液市场预计超20亿美元，2026年可达到26亿美元。国内方面，增速有望高于全球市场，2025年国内抛光液市场有望占全球市场的25%，达40亿元人民币，2021年~2025年复合增长率达15%。^[91]

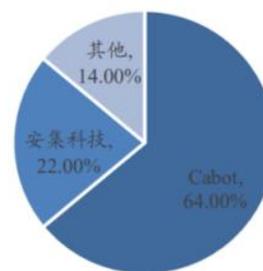
目前，全球仅有少数几家化学机械抛光浆料供应商，包括Cabot、Versum、Hitachi、Fujimi和Dow五家美日厂商，五家厂商合计占据2018年全球CMP抛光液近八成市场份额，而国内仅安集科技仅占全球2.44%市场份额^[98]。国内市场Cabot也占据了大部分市场，而其磨料直径可达15~20nm。

图 18：2018 年 CMP 抛光液全球市场竞争格局



资料来源：前瞻产业研究院，国海证券研究所

图 19：2018 年 CMP 抛光液中国市场竞争格局



资料来源：观研天下，国海证券研究所

2018年CMP抛光液全球及中国市场竞争格局^[98]

反观国内，CMP抛光液国产化率约5%，主要企业包括安集微电子、上海新安纳电子、北京国瑞升科技。其中，安集微电子部分产品成功进入国内外8英寸和12英寸芯片生产线，上海新安纳电子作为二氧化硅纳米磨料供应商，产品已成功应用于8英寸和12英寸晶圆抛光，海新安纳则在存储抛光液上取得进展。^[13]

四、后道工艺：让加工品成为芯片

当前期加工完毕，离芯片就只差一步，此时刚刚从晶圆上切下来的芯片只是裸芯片（die），需要进一步封装，才能称之为芯片，最后经过测试的芯片才能出厂到我们手里。

在行业中，封装和测试多被划入一个领域，即封测（Semiconductor assembly and test manufacturing, ATM），工艺流程包括划片、装片、键合、塑封、去飞边、电镀、打印、切筋和成型、外观检查、成品测试、包装出货等。^[99]

简单来说，就是在一颗颗芯片从刻好电路的晶圆上切割下来前，测试一遍各种参数，通过测试后，再像装香肠一样，封装成芯片，之后再测试一遍芯片的性能。

按国际主流思想，芯片制造成本中，设计约占三分之一，芯片制造约占三分之一，而封装和测试也约占三分之一，是芯片制造中重要一环^[100]。而其中，封装环节的价值占半导体封测比例约80%~85%，测试环节占15%~20%。^[101]

半导体封测是我国最早转型的制造环节，迄今为止，它已成为我国集成电路产业链中相对成熟的环节。早在2010年，我国就已在封装测试环节实现632亿元的销售额，其产值一度占据我国集成电路产业总产值的70%以上。^[99]

与前道工艺相同，封装和测试也需要设备和材料。根据SIA分类，后道工艺主要包括封装设备和测试设备两类，耗材则主要是封装材料。^[60]

1. 封装设备

芯片又小又薄，若不施加保护，很容易便会刮伤损坏。封装就相当于给芯片做了一层保护壳，并预留好各种接线引脚，方便后期连接使用。^[102]

封装的方式多种多样，传统封装会耗费相当大体积，此外，当不同功能集成电路都整合在一起时，电路的间距越小，性能才会越好，所以行业不断探索更为先进的封装方式。通俗来讲，就是把这层壳做得越来越轻薄，越来越紧凑。

从上世纪70年代起到现在，诞生了大量封装方式，呈现出百花齐放的态势。

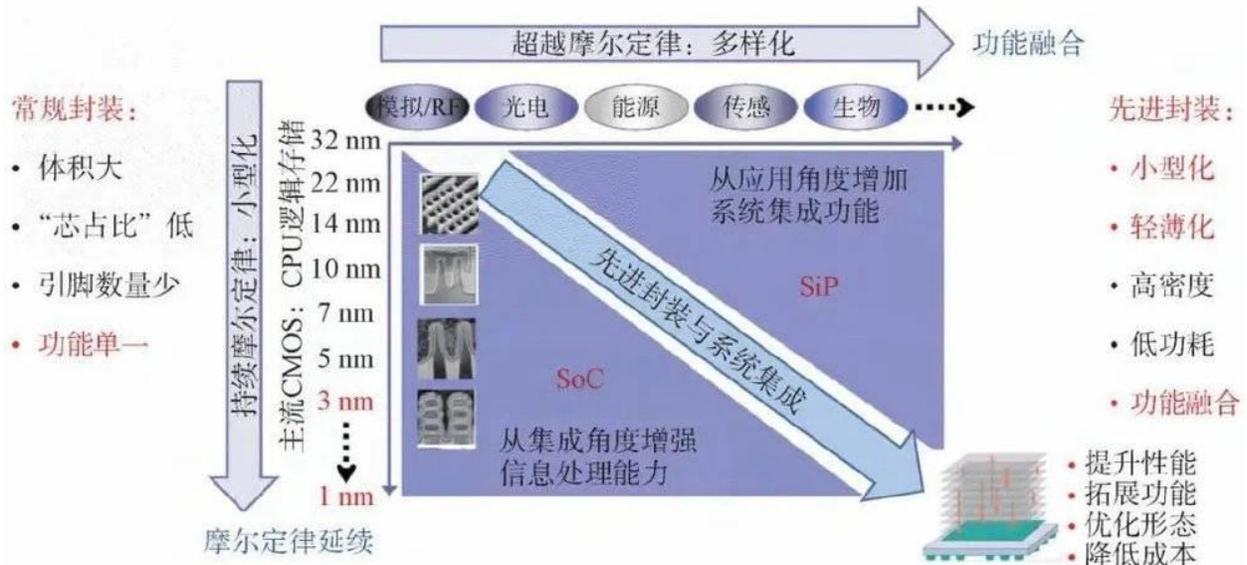
从创新角度看，封装分为传统封装和先进封装。传统封装包括最初的直插型封装DIP、小外形封装SOP、方型扁平式封装QFP、球栅阵列封装WB BGA等；先进封装相比传统封装，效率更高、性能更好、成本更低，同时以小型化、轻薄化、窄间距、高集成为特点，包括倒装FLIP-CHIP、晶圆级封装WLCSP、扇外型封装INFO以及2.5D/3D等。^[103]

| 阶段 | 起始时间 | 封装形式 | 具体典型的封装形式 |
|------|------------|--|--|
| 第一阶段 | 20世纪70年代以前 | 通孔插装型封装 | 晶体管封装（TO）、陶瓷双列直插封装（CDIP）、塑料双列直插封装（PDIP）、单列直插式封装 |
| 第二阶段 | 20世纪80年代以后 | 表面贴装型封装 | 塑料有引线片式载体封装（PLCC）、塑料四边引线扁平封装（PQFP）、小外形表面封装（SOP）、无引线四边扁平封装（PQFN）、小外形晶体管封装（SOT）、双边扁平无引脚封装（DFN） |
| 第三阶段 | 20世纪90年代以后 | 球栅阵列封装（BGA） | 塑料焊球阵列封装（PBGA）、陶瓷焊球阵列封装（CBGA）、带散热器焊球阵列封装（EBGA）、倒装芯片焊球阵列封装（FC-BGA） |
| | | 晶圆级封装（WLP） | |
| | | 芯片级封装（CSP） | 引线框架型 CSP 封装、柔性插入板 CSP 封装、刚性插入板 CSP 封装、圆片级 CSP 封装 |
| 第四阶段 | 20世纪末开始 | 多芯片组封装（MCM） | 多层陶瓷基板（MCM-C）、多层薄膜基板（MCM-D）、多层印制板（MCM-L） |
| | | 系统级封装（SiP）、三维立体封装（3D）、芯片上制作凸点（Bumping） | |
| 第五阶段 | 21世纪前十年开始 | 晶圆级系统封装-硅通孔（TSV）、倒装焊封装（FC）、扇外型集成电路封装（Fan-Out）、扇入型集成电路封装（Fan-in）等 | |

全球半导体封装技术发展五大阶段^[101]

相比传统封装，先进封装无疑才是未来发展的重点，它是突破“存储墙”“面积墙”“功耗墙”“功能墙”这“四堵墙”的关键。早在2012年就有研究预言，采用2.5D和3D封装技术的集成电路将从2012年约6000万颗发展到2016年超5亿颗。^[100]

此外，先进封装也与Chiplet（小芯片，又称芯粒）息息相关。Chiplet指的是将单颗片上系统级芯片（SoC）的特定功能分散成一个个小芯片，再利用封装技术整合在一起，构成多功能异构系统级封装（SiP），就像搭积木一样，可以有效缩短产品开发周期，降低整体成本，提高器件算力，提升产品良率。^[104]



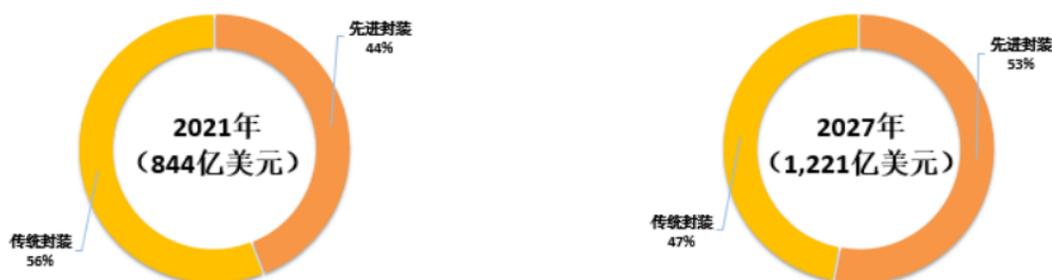
集成电路发展路线图^[105]

目前，芯片封装存在多种玩家，包括整合元器件制造商（IDM）、晶圆代工厂（Foundry）以及委外封测代工厂（OSAT）。

当芯片制程发展逐渐触及摩尔定律的底线，3D封装、扇形封装（FOWLP/PLP）、微间距焊线技术以及系统封装（SiP）成为延续摩尔定律的可选项，封测行业也逐渐从传统封测向先进封测过渡，先进封装技术在市场上的占比不断提升。

Yole数据显示，2021年全球先进封装市场规模为374亿美元，预计2027年可达650亿美元，年复合增长率达9.6%，此外，先进封装市场增长将更为显著，成为全球封测市场主要增量。^[106]

2021-2027年先进封装概览



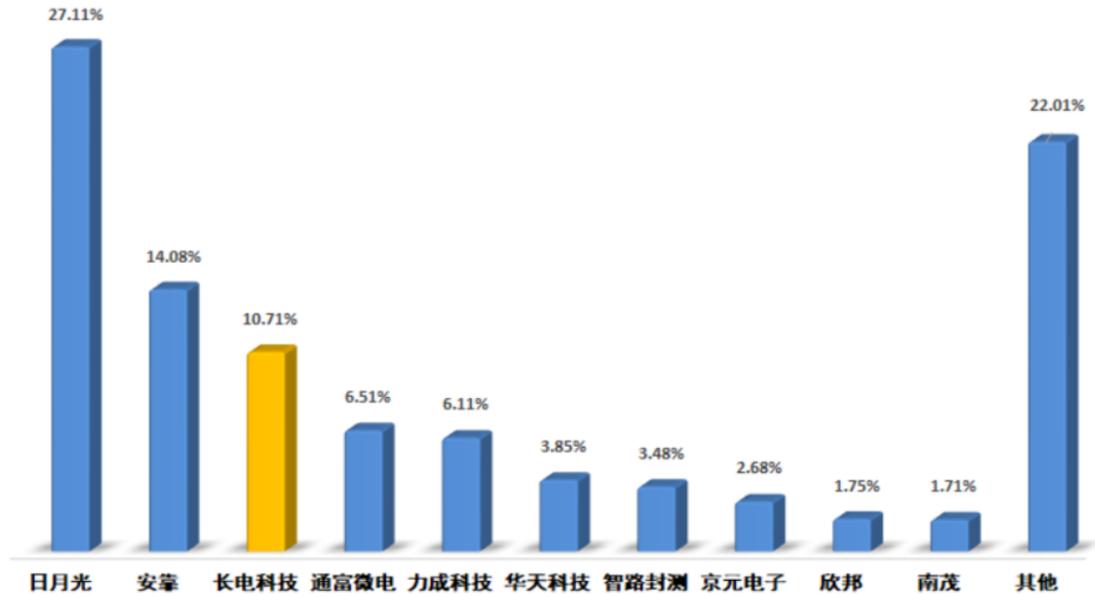
数据来源: Yole

2021年~2027年先进封装概览^[106]

从IDM和Foundry角度来看，巨头们是先进封装技术的引领者，不断抢滩技术创新。台积电相继推出基板上晶圆上的芯片（Chip on Wafer on Substrate, CoWoS）封装、整合扇外型（Integrated Fan-Out, InFO）封装、系统整合芯片（System on Integrated Chips, SoIC）等；英特尔推出EMIB（2.5D）、Foveros（3D）和Co-EMIB等先进封装技术；三星电子推出扇外型面板级封装（Fan-Out Panel Level Package, FOPLP）技术。

从全球委外封测（不包含IDM自有封测和晶圆代工公司提供封测）角度来看，芯思想研究院（Chip Insights）数据显示，2022年全球委外封测整体营收为3154亿元，同比增长9.82%，其中前十强营收达2459亿元，同比增长10.44%。^[107]

2022年全球委外封测市场占有率



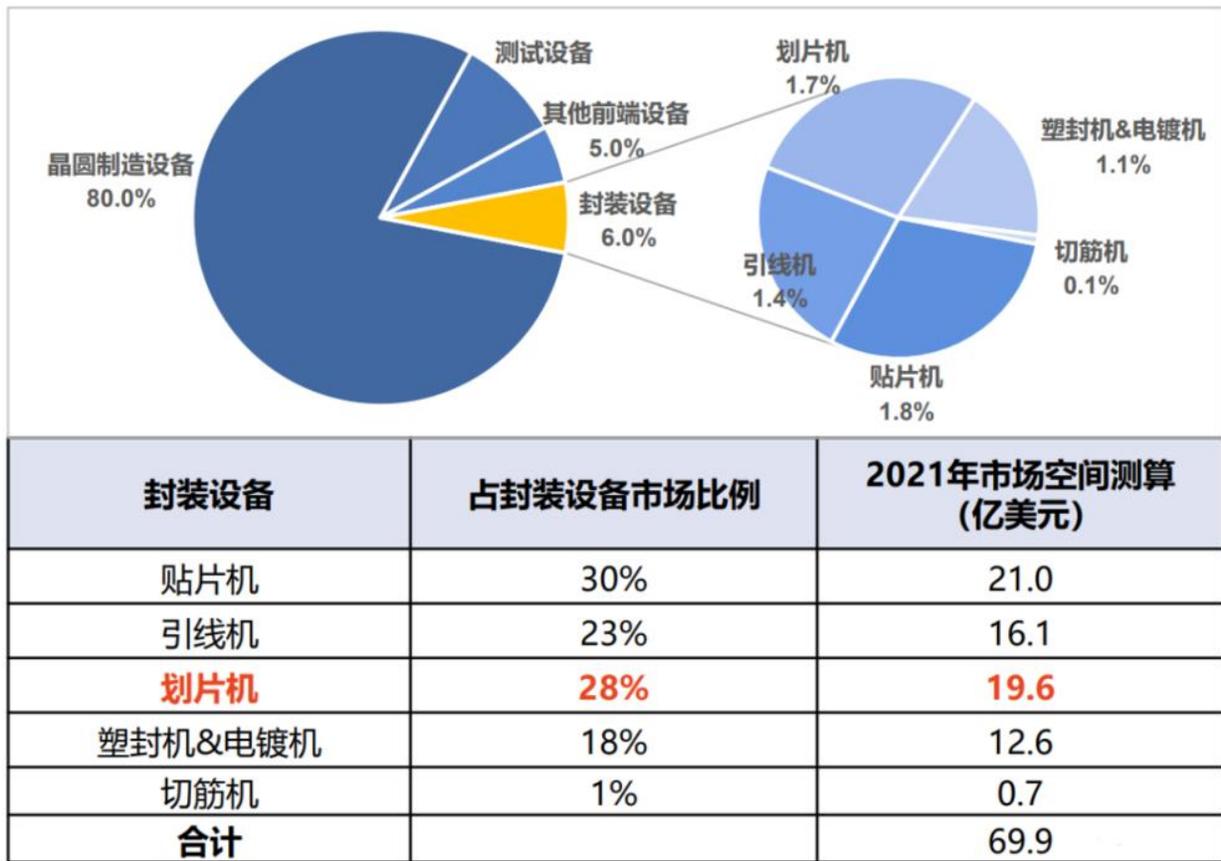
数据来源：芯思想研究院2023年2月发布

2022年全球封测前十市场占有率^[106]

2020年，我国封装市场规模达到2509.5亿元，其中先进封装市场规模351.3亿元，占比例约14%，预计2025年我国先进封装市场规模将达到1137亿元，占比将达32.0%。^[108]

封装工艺流程较长，包括划片、装片、键合、打线、塑封、电镀、上球、打标、切筋成型等工序^[109]，每种工序都需要一种设备，主要包括磨片机、划片机、固晶机、键合机、塑封设备、打标设备等。

从细分市场来看，贴片机、划片机、引线机三大主要封装设备占全球封装设备市场份额分别为30%、28%、23%，据推算2021年贴片机、划片机、引线机对应市场空间分别为21.0亿美元、19.6亿美元、16.1亿美元。^[110]



半导体封装设备细分市场情况^[110]

SEMI数据显示，2021年全球半导体封装设备市场规模为71.7亿美元^[111]，其中大部分市场由国际寡头垄断，其中K&S球焊机全球市占率达64%，Disco划片机和减薄机全球市占率达2/3以上，Besi、ASM Pacific垄断装片机市场，Besi、日本Towa、ASM Pacific和日本Yamada是塑封系统主要品牌。^[110]

国产方面，封测设备国产化率不足5%，低于制程设备整体10%~15%的国产化率^[109]。其中，划片机以中国电子科技集团公司第45研究所、武汉三工光电、江苏京创、沈阳和研和郑州琦升为代表，固晶机以新益昌、艾科瑞思、大连佳峰为代表，塑封设备以文一三佳、安徽耐科装备为代表。

| 设备 | 国际厂商 | 国内厂商 |
|-------|----------------------------|--------------|
| 圆片减薄机 | 日本 Disco、东京精密 | 中电科、华海清科等 |
| 砂轮划片机 | 日本 Disco、东京精密 | 中电科、光力科技等 |
| 激光划片机 | 日本 Disco、美国 JPSA、瑞士 Synova | 大族激光、德龙激光等 |
| 固晶机 | ASM、BESI 等 | 新益昌等 |
| 引线键合机 | K&S、ASM、BESI 等 | 中电科、奥特维、新益昌等 |
| 塑封设备 | TOWA 等 | 耐科装备等 |

来源：中泰证券研究所整理

半导体封装设备主要企业及情况^[111]

2. 测试设备

测试设备穿插在封装工艺的一前和一后，即晶圆检测（CP，Circuit Probing，又称中测）和成品测试（FT，Final Test，又称终测）。

简单来说，就是在一颗颗芯片从刻好电路的晶圆上切割下来前，测试一遍各种参数，通过测试后，再像装香肠一样，封装成芯片，之后再测试一遍芯片的性能。

测试设备包括测试机（Tester）、探针台（Prober）、分选机（Test Handler）三种，无论是晶圆检测还是成品测试，测试芯片均需先将芯片引脚与测试机功能模块相连（探针台和分选机的作用），再通过测试机向芯片输入信号，并检测输出信号。^[112]

三种测试设备中，测试机市场更大，技术壁垒也更高，不止如此，客户还对测试精度、响应速度、存储能力、采集分析能力、应用程序定制化、平台延展性等方面提出越来越高的要求。

半导体封测是我国最早转型的制造环节，迄今为止，它已成为我国集成电路产业链中相对成熟的环节。早在2010年，我国就已在封装测试环节实现632亿元的销售额，其产值一度占据我国集成电路产业总产值的70%以上^[113]。而在2020年，我国半导体测试设备市场规模达到91.4亿元，并且连续多年成为全球最大半导体销售市场。

虽然看似一片繁荣，但实际核心的测试机国产市占率较低。通过查看2015年到现在国内封测厂商长电科技公开招标信息，测试机主要以海外头部厂商为主。

2019年，美国泰瑞达（Teradyne）、日本爱德万（Advantest）两大龙头全球合计市占率达到90%，占据国内测试设备市场将近91.2%的市场份额，此外，美国科休（Cohu）、美国安捷伦（Agilent）、美国科利登（Xcerra）等厂商也长期盘踞位居前几。反观国内本土市场，华峰测控占比国内市场份额仅6.1%，长川科技为2.4%。^[114]

相比来说，爱德万、泰瑞达早在20世纪60~70年代进入半导体测试领域，我国则起步较晚，所以产品线单一，侧重于模拟/混合测试机，海外厂商则在SoC测试机、存储测试机、模拟/混合测试机三大种类均有涉猎。

探针台方面，Tokyo Electron和Accretech占据全球73%份额，惠特科技（Fittech）、旺矽科技（MPI）两家中国台湾企业占据剩余市场份额大部分空间。^[114]

| | ATE | | |
|------|------------------|-------------|----------------------------|
| | Soc 测试机 | 存储器测试机 | 模拟 / 混合测试机 |
| 泰瑞达 | UltraFLEX | Magnum | Eagle |
| 爱德万 | T2000/V93000 | T5500/T5800 | T912 |
| 科休 | X-Series/Diamond | | |
| 武汉精鸿 | | JH5320 | |
| 长川科技 | | | CTA 系列 CTT 系列 |
| 佛山联动 | | | QT-8000 QT-4000 |
| 华峰测控 | STS8300 | | STS8200/8250 STS8200 扩充 |

国内外设备厂商ATE测试机对比^[114]

3. 封装材料

封装材料按类型可分为陶瓷、金属和聚合物三大类。其中，90%以上使用的是塑料，陶瓷和金属合计占比约为10%。^[115]

| 分类 | 具体材料 | 特点 |
|-------|--|-------------------------------|
| 陶瓷材料 | Al ₂ O ₃ 、BeO、AlN等 | 热膨胀系数低、机械强度高、热导率高、耐湿性好 |
| 金属材料 | Cu、Al、Mo、W及合金等 | 热导率高、强度高和可靠性高，但热膨胀系数较高且成本较高 |
| 聚合物材料 | 聚酯类、环氧类、聚酰胺类和有机硅类 | 重量轻、易加工、成本低，但气密性不好，大多聚合物对湿度敏感 |

参考 | 《中国胶粘剂》  果壳硬科技

封装材料分类及特点，制表 | 果壳硬科技

参考资料 | 《中国胶粘剂》^[116]

按用途，封装材料分为封装基板、引线框架、键合丝、塑封料四大主材，全球市场占比分别为32.46%、16.75%、16.23%和6.81%。

- **封装基板**：日韩企业市占率将近达到90%，国内主流基板厂包括深南电路、珠海越亚、兴森科技、丹邦科技；
- **引线框架**：三井高科、新光电器、SDI、ASM、长华科技、HDS、宁波康强几家企业市占率分别为12%、10%、9%、9%、8%、7%、4%，国内企业主要包括宁波康强、宁波华龙、厦门永红、广州丰江微电子、深圳富美达、无锡华晶利达、济南晶恒山田、泰州市永志、宁波埃斯科光电、四川金湾电子、天水华洋、天水华天、泰州东田、铜陵丰山三佳等，虽然企业较多，但依然没有形成产业集群，且技术落后；

- **键合丝**：日本田中贵金属、新日铁、德国贺利氏、韩国MKE、Heesung等国际厂商占据主要市场，国内键合丝生产企业共有二十几家，代表企业为贺利氏、田中等，但缺乏对于新技术的掌控力；
- **塑封材料**：95%以上集成电路都使用塑料封装，而其中又有97%以上都是环氧树脂，塑封材料日本住友电木、日立化成、京瓷化学、信越化学、松下电工、韩国三星Cheil占据主要市场，国内拥有二十几家塑封料生产商，但缺乏高端产品。^[13]

SEMI数据显示，2022年~2027年，全球半导体封装材料市场规模将从261亿美元增长至298亿美元，年复合增长率达2.7%。^[117]

五、写在最后

不可否认的是，虽然国内陆续涌现一批有实力的制造企业，但相比国际仍存在5年以上的技术落差，缺乏高端技术和产品。芯片制造从晶圆制造、前期芯片加工到封装测试层层相扣，但凡其中一个环节存在落后，都会成为国产芯片制造的痛点。^[118]

业界也普遍认为，国产半导体设备自给率低主因在于系统、终端、制造和封测厂商习惯性采购国外大厂产品，造成本土设备难以自证自身实际生产制造能力。^[119]

除此之外，造芯片，晶圆厂是关键，这其中也蕴含许多门道：

首先，半导体晶圆制造属规模经济行业，必须在不同地区建立多座制造工厂以充分利用闲置资源，如台积电在中国、美国、新加坡等地均设有晶圆厂。

其次，晶圆厂一经建立，必须保持全年每日24小时不停歇运转，长时间持续生产难免产生性能下降、故障率增加等问题，预防性维护是做晶圆厂的必修课。

另外，晶圆厂对加工工厂的空气洁净度、湿度、温度等指标都有严格的要求，要知道芯片制造的无尘室内洁净度能够达到医院手术室的100000倍。

最后，制造业属高耗能产业，生产过程产生大量污染环境的有害气体和液体，废水废气处理和低碳都是关键。^[120]

可以说，芯片制造是国产芯片的最为重要的推动力，只有当我们全面拥抱制造，才能真正支撑起来芯片设计和应用等环节，而这将会是不断的投入和企业不断的整合并购。

References:

- [1] 王彪, 彭琳, 昌道励. 粤芯半导体副总裁李海明: 补齐芯片制造短板 跨领域创业机遇多[N]. 南方日报, 2021-07-16(A08).
- [2] 张振哲. 现代芯片制造技术的发展趋势展望[J]. 集成电路应用, 2020, 37(06):22-23.
- [3] 余泽健. 现代芯片制造技术的展望[J]. 集成电路应用, 2021, 38(01):4-5. DOI:10.19339/j.issn.1674-2583.2021.01.002.
- [4] 珠海杰理科技股份有限公司: 首次公开发行股票并在科创板上市招股说明书 .2021.9.13. http://file.finance.sina.com.cn/211.154.219.97:9494/MRGG/CNSESZ_STOCK/2021/2021-9/2021-09-13/7540702.PDF
- [5] 国信证券: 半导体系列报告之四: 半导体硅片摩尔定律演进, 半导体硅材料历久弥新 .2022.3.8. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202203091551497056_1.pdf?1646819782000.pdf
- [6] 上海硅产业集团股份有限公司: 首次公开发行股票并在科创板上市招股说明书 .2020.4.15. <http://static.cninfo.com.cn/finalpage/2020-04-15/1207500150.PDF>
- [7] HongXiao, 杨银堂, 段宝兴译. 半导体技术导论[M]. 电子工业出版社. 2013.1. P435 ~ 437
- [8] 中科院半导体所: 晶圆? 为什么没有“晶方”呢? .2019.4.16. <https://mp.weixin.qq.com/s/rQbmKe-czb9zAKjMLHvaFg>
- [9] 有研半导体硅材料股份公司: 首次公开发行股票并在科创板上市招股说明书 .2022.11.7. http://static.sse.com.cn/disclosure/listedinfo/announcement/c/new/2022-11-07/688432_20221107_39HW.pdf
- [10] 广州市半导体协会: 会员新闻 | 持续专注模拟芯片制造, 粤芯半导体完成B轮战略融资 .2022.12.2. <https://mp.weixin.qq.com/s/4Ebu5vFzJdJvTEtecQuT3A>
- [11] 广州市半导体协会: 投资70亿元, 增芯月产2万片12英寸晶圆制造量产线正式开工 .2022.12.15. https://mp.weixin.qq.com/s/-rCYQRQboNoRBT1x7_Nkxw

- [12] 中商情报网：2022年中国半导体硅片行业市场前景及投资研究报告（简版）
.2022.9.30.https://www.askci.com/news/chanye/20220930/1608081990895_3.shtml
- [13] SIMIT战略研究室：我国集成电路材料专题报告（全）
.2019.7.22.<https://mp.weixin.qq.com/s/xNmREBgDj6HLFANxQW8zBA>
- [14] SEMI：<https://yourewelcome.org/zh-hans/how-theyre-made/>
- [15] 国泰君安证券：半导体公司全面布局，攻坚国产替代.2023.3.13
- [16] IRDS：Devices will continue to aggressively scale in the next 5 years.https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2021/2021IRDS_ES.pdf
- [17] 中金点睛：中金看海外 | LAM：领先的刻蚀设备供应商，聚焦刻蚀、薄膜、清洗三大领域
.2023.1.30.<https://mp.weixin.qq.com/s/HuF0JnleJe4SYDc8Q4q3-g>
- [18] 国海证券：盛美上海(688082)深度报告：半导体清洗设备龙头，平台化战略开启新征程
.2022.4.27.https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202204281562130616_1.pdf?1651143487000.pdf
- [19] Jackson K A. 半导体工艺[M]. 屠海令, 万群, 译. 北京: 科学出版社, 1999.
- [20] 张海藩, 吕云翔. 软件工程[M]. 4版. 北京: 人民邮电出版社, 2013.
- [21] 任泽生. 匀胶显影设备工艺原理、结构及常见故障分析[J]. 电子技术与软件工程, 2022(15):128-131.
- [22] 张霞, 刘宏波, 顾文, 等. 全球光刻机发展概况以及光刻机装备国产化[J]. 无线互联科技, 2018, 15(19): 110-111.https://bdtgy.xaut.edu.cn/___local/1/3B/22/0F9DDFBC7626300CB493E851A52_5F2C0669_18A415.pdf
- [23] 袁琼雁, 王向朝, 施伟杰, 等. 浸没式光刻技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(008): 13-20.<https://www.researching.cn/ArticlePdf/m00002/2006/43/8/2.pdf>
- [24] 林楠, 杨文河, 陈韞懿, 等. 极紫外光刻光源的研究进展及发展趋势[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922002.<https://www.opticsjournal.net/Articles/OJe83bd70142deb50a/Abstract>
- [25] 骆志军, 刘紫玉, 王舒虹, 等. 下一代光刻机技术的探索: 第六代双光束超分辨光刻机概念, 技术和未来 Invited[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922028.
- [26] 陈宝钦. 光刻技术六十年[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922031.<https://www.opticsjournal.net/Articles/OJab9feb818f67ca72/FullText>

- [27] ASML: <https://www.asml.com/en/news/stories/2021/semiconductor-manufacturing-process-steps>
- [28] 段晨, 宗明成, 范伟, 等. 浸没式光刻机对焦控制技术研究[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0912002. <https://www.researching.cn/ArticlePdf/m00006/2018/38/9/0912002.pdf>
- [29] Wei Y Y. Advanced lithography theory and application of VLSI[M]. Beijing : Science Press, 2016: 6-10.
- [30] 李艳丽, 刘显和, 伍强. 先进光刻技术的发展历程与最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(9): 0922006. <https://www.opticsjournal.net/Articles/OJ6ef620a86d7e19e/Abstract>
- [31] 中泰证券: 光刻机行业报告: 从0到1, 星辰大海
.2023.4.3. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202304061585172426_1.pdf?1680777189000.pdf
- [32] 芯思想: 2022年度全球光刻机市场
.2023.2.21. <https://mp.weixin.qq.com/s/Ldt3H8L0U1SmL16YJ5Y4mQ>
- [33] VanZP. 芯片制造: 半导体工艺制程实用教程[M]. 赵树武, 朱践知, 于世恩, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [34] 祁峰. 半导体涂胶显影机产能分析[J]. 中国新技术新产品, 2018(05): 49-50.
- [35] 东方证券: 引领涂胶显影设备国产替代, 积极开拓清洗设备市场
.2022.3.15. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202203151552770527_1.pdf?1647360393000.pdf
- [36] 李靖恒. 芯源微向前一步[N]. 经济观察报, 2022-03-21(019)
- [37] 财通证券: 精雕细刻筑产业基石, 国产刻蚀机未来可期
.2022.11.9. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202211101580127804_1.pdf?1668070522000.pdf
- [38] Transparency Market Research:
<https://www.transparencymarketresearch.com/semiconductor-etching-equipment-market.html>
- [39] 轩中. 中国芯片产业上的亮点——芯片刻蚀机生产企业调研[J]. 互联网周刊, 2018(11): 28-29.
- [40] SK海力士: 薄膜技术部门: 在晶圆上铺设均匀的“绘图纸”
.2021.12.13. <https://news.skhyun.com.cn/people-who-put-a-uniform-drawing-paper-on-a-wafer-thin-film-technology/>
- [41] 天风证券: 半导体设备专题报告(一): 前道设备——扼喉之手, 亟待突破!
.2023.5.16. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202305231587092369_1.pdf?1684862495000.pdf
- [42] 申港证券: 薄膜沉积设备竞争格局讨论
.2020.1.7. http://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202001101373856635_1.pdf

- [43] 郭运德.半导体材料与器件快速热处理[J].河南冶金, 1999(02):7-9.
- [44] 泛林集团: 泛林小课堂 | 揭秘半导体制造全流程 (上篇)
.2021.7.15.<https://mp.weixin.qq.com/s/WhXjXMwX8x2PdASIsB6hqg>
- [45] 三星: 半导体工艺(二)保护晶圆表面的氧化工艺
.https://semiconductor.samsung.com/cn/support/tools-resources/fabrication-process/eight-essential-semiconductor-fabrication-processes-part-2-oxidation-to-protect-the-wafer/
- [46] 高鹄资本: 挑战与机遇并存, 系统性拆解半导体设备国产化机会 | 高鹄观点
.2023.2.28.https://mp.weixin.qq.com/s/uRI8zk0mIcd5rCzD_TzZDg
- [47] 广发证券: 氧化/扩散/退火设备: 热工艺设备受益国产替代, 持续关注国内领先厂商
.2020.4.21.http://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202004231378449923_1.pdf
- [48] 华经情报网: 离子注入设备行业发展现状分析, IC离子注入机呈现寡头垄断的局面 [图]
.2021.8.29.<https://www.huaon.com/channel/trend/743650.html>
- [49] 头豹: 2021年中国半导体系列报告: 离子注入设备行业概览
.2021.9.https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202110011519666501_1.pdf?1633599914000.pdf
- [50] 中银证券: 半导体设备国产化专题十一: 离子注入机
.2021.8.19.https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202108191511036825_1.pdf?1630178364000.pdf
- [51] 李丹.化学机械抛光(CMP)技术、设备及投资概况[J].电子产品世界, 2019, 26(06):31-34.
- [52] 安集微电子科技(上海)股份有限公司: 2022年年度报告
.2023.4.12.<http://static.cninfo.com.cn/finalpage/2023-04-12/1216380750.PDF>
- [53] 德邦证券: 华海清科(688120.SH): CMP设备国产龙头, 拓展减薄设备与晶圆再生
.2022.8.4.https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202208041576908608_1.pdf?1659648688000.pdf
- [54] 张汝京.纳米级集成电路制造工艺(第2版)[M].清华大学出版社.2017.1.P1611~1612
- [55] 华海清科股份有限公司: 首次公开发行股票并在科创板上市招股说明书(上会稿)
.2021.6.9<http://static.sse.com.cn/stock/information/c/202106/ff7916f508bf4614bb1c04a6eeeb6ff.pdf>
- [56] 国金证券: CMP设备稀缺龙头, 在手订单快速增长
.2022.6.6.https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202206071570638055_1.pdf?1654678480000.pdf
- [57] 平安证券: 半导体清洗设备: 筑芯片良率保障墙, 看国产品牌角逐差异化
.2020.8.31.https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202008311404507199_1.pdf?1598990956000.pdf

- [58] SEMI产业投资平台：从盛美的崛起，看新时代中国半导体清洗设备市场的发展机遇！
.2021.11.4.<https://mp.weixin.qq.com/s/hmXkdYaMTeJCY2EpzBIPsw>
- [59] 安信证券：芯片良率的重要保障，半导体清洗设备国产替代正当时
.2021.11.17.https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202111181529678979_1.pdf?1637229715000.pdf
- [60] SIA: STRENGTHENING THE GLOBAL SEMICONDUCTOR SUPPLY CHAIN IN AN UNCERTAIN ERA.2021.4.https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2021/05/BCG-x-SIA-Strengthening-the-Global-Semiconductor-Value-Chain-April-2021_1.pdf
- [61] 陈炳欣.全球将新建多座晶圆厂 半导体测试市场迎来黄金时代[N].中国电子报, 2022-02-15(008)
- [62] 深圳中科飞测科技股份有限公司：首次公开发行股票并在科创板上市招股意向书
.2023.4.27.http://static.sse.com.cn/disclosure/listedinfo/announcement/c/new/2023-04-27/688361_20230427_YWP4.pdf
- [63] Allied Market Research: <https://www.alliedmarketresearch.com/semiconductor-metrology-and-inspection-market-A31718>
- [64] 平安证券：半导体系统报告（二）半导体设备篇
.2021.5.28.https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202105281494477002_1.pdf?1622217308000.pdf
- [65] 东吴证券：半导体量/检测设备专题报告：前道设备弹性最大环节之一，迎国产替代最佳机遇
.2022.12.6.https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202212081580922462_1.pdf?1670505704000.pdf
- [66] 中国科学院：材料：科技发展的动力和瓶颈
.2002.2.6.https://www.cas.cn/xw/zjsd/200906/t20090608_640063.shtml
- [67] 重庆大学：院士讲堂|潘复生院士为重庆大学本科生讲述“材料的重要性、神奇性和镁基能源材料的发展机遇”.2023.5.12.<http://www.cmse.cqu.edu.cn/info/1571/8263.htm>
- [68] SEMI: GLOBAL SEMICONDUCTOR MATERIALS MARKET REVENUE REACHES RECORD \$73 BILLION IN 2022, SEMI REPORTS.2023.6.13.<https://www.semi.org/en/news-media-press-releases/semi-press-releases/global-semiconductor-materials-market-revenue-reaches-record-%2473-billion-in-2022-semi-reports>
- [69] 新微超凡：行业观察 | 光掩膜：通往“芯时代”的底片
.2023.4.12.<https://mp.weixin.qq.com/s/jA5B2mW8Nar10q2oHcX4wA>
- [70] 安信证券：渗透率提升+国产芯片崛起双重驱动，掩模版行业进入高速增长通道
.2022.8.26.https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202208261577714579_1.pdf?1661679485000.pdf

- [71] 信达证券：光刻胶，核心半导体材料，步入国产替代机遇期. 2021.09.03
- [72] 国盛证券：科华杜邦战略合作，加速光刻胶国产替代. 2021.11.08
- [73] 天风证券：半导体材料皇冠上的明珠，迎来国产化机遇. 2021.05.31
- [74] 前瞻产业研究所：2021年全球半导体光刻胶行业市场规模与竞争格局分析 市场稳步增长、产能集中度较高.2021.09.18.<https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/210918-8dcf7cfc.html>
- [75] 天风证券：半导体材料皇冠上的明珠，迎来国产化机遇. 2021.05.31
- [76] 东北证券：三种增量、两种替代，电子成长长青 . 2021.12.09
- [77] 景瑞电子材料股份有限公司：创业板向不特定对象发行可转换公司债券募集说明书. 2021.08.12
<http://www.cninfo.com.cn/new/disclosure/detail?orgId=9900031917&announcementId=1210726586&announcementTime=2021-08-12>
- [78] 浙商证券股份有限公司：半导体材料·电子气体投资宝典——电子气体深度报告
.2020.3.24.http://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202003241376865500_1.pdf
- [79] 国家统计局：《战略性新兴产业分类（2018）》（国家统计局令第23号）
.2018.11.26.http://www.stats.gov.cn/tjgz/tzgb/201811/t20181126_1635848.html
- [80] 苏州金宏气体股份有限公司：首次公开发行股票并在科创板上市招股说明书
.2019.12.6.<http://static.sse.com.cn/stock/information/c/201912/034df3b90f2c46abb9d42662ca9ce885.pdf>
- [81] 集微网：华特气体：全球电子半导体气体市场规模约300亿元，公司占比不足2%.2021.9.7.<https://www.laoyaoba.com/n/791954>
- [82] 李靖恒.电子特种气体国产替代进行中[N].经济观察报，2022-06-20(021)
- [83] 何晖，包汉波.国内外特种气体发展概况[J].深冷技术，2017(03):55-59.
- [84] 张望.电子特气进入景气赛道毛利率高达84.67%[N].21世纪经济报道，2022-09-07(009)
- [85] 柏元灏.电子特气布局长远[J].产城，2022，(05):58-59.
- [86] 新华财经：凯美特气：打破芯片制造用气“卡脖子”现状 多种电子特气已实现量产
.2021.6.2.<https://www.cnfin.com/stock-xh08/a/20210602/1988890.shtml>
- [87] 中国工业新闻网：半导体制造“供血不足” 电子特气国产化亟待提速
.2022.7.2.http://www.cinn.cn/gongjing/202207/t20220702_258553.shtml
- [88] 王雅雯.电子气体产业发展亟待提质升级[N].中国质量报，2022-10-13(002)
- [89] 张凯，张念椿，魏永明，马晓华，杨虎，庄黎伟，汤初阳，李金荣，郑鹤立，许振良.电子化学品分离纯化材料制备及其应用技术进展[J].山东化工，2022，51(22):73-77+80.

- [90] 付雪涛. 集成电路工艺化学品标准体系探讨[J]. 信息技术与标准化, 2013 (1): 29-32.
- [91] 安集微电子科技(上海)股份有限公司: 2022年年度报告
.2023.4.12.<http://static.cninfo.com.cn/finalpage/2023-04-12/1216380750.PDF>
- [92] 杭州格林达电子材料股份有限公司: 首次公开发行股票招股说明书
.2020.8.6.<http://static.cninfo.com.cn/finalpage/2020-08-06/1208131136.PDF>
- [93] 江阴江化微电子材料股份有限公司: 首次公开发行股票招股说明书
.2017.3.23.<http://static.cninfo.com.cn/finalpage/2017-03-23/1203188461.PDF>
- [94] 华安证券: 国内湿电子化学品领军企业, 新产能释放未来可期
.2022.2.17.https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202202181547737897_1.pdf?1645194731000.pdf
- [95] 宁波江丰电子材料股份有限公司: 首次公开发行股票并在创业板上市招股说明书
.2017.6.2.<http://static.cninfo.com.cn/finalpage/2017-06-02/1203579943.PDF>
- [96] 宁波江丰电子材料股份有限公司: 2022年年度报告
.2023.4.7.<http://static.cninfo.com.cn/finalpage/2023-04-07/1216346771.PDF>
- [97] 首创证券: 国内靶材龙头, 半导体零部件再助增长
.2022.3.21.https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202203211554036010_1.pdf?1647884314000.pdf
- [98] 国海证券: 国内CMP抛光液龙头, 深度受益国产替代——安集科技(688019)深度报告
.2021.1.4
- [99] 姚丽丽, 史海波, 刘昶. 半导体封装测试生产线排产研究[J]. 自动化学报, 2014, 40(5): 892-900.
- [100] 周晓阳. 先进封装技术综述[J]. 集成电路应用, 2018, 35(06):1-7.
- [101] 江苏华海诚科新材料股份有限公司: 首次公开发行股票并在科创板上市招股说明书
.2023.3.30.<http://static.cninfo.com.cn/finalpage/2023-03-30/1216260520.PDF>
- [102] 陈芳, 董瑞丰. “芯”想事成: 中国芯片产业的博弈与突围[M]. 人民邮电出版社. 2018. P377-378
- [103] 孙国辉. 集成电路封装领域知识产权情况[J]. 中国集成电路, 2022, 31(11):12-16+91.
- [104] 马力, 项敏, 石磊, 郑子企. 高端性能封装技术的某些特点与挑战[J]. 电子与封装, 2023, 23(03):94-102.
- [105] 曹立强, 侯峰泽, 王启东等. 先进封装技术的发展与机遇[J]. 前瞻科技, 2022, 1(03):101-114.
- [106] 江苏长电科技股份有限公司: 2022年年度报告
.2023.3.31.<http://static.cninfo.com.cn/finalpage/2023-03-31/1216269388.PDF>

- [107] 芯思想：2022年全球委外封测增长10%，通富微电跃居全球第四
.2022.2.1.https://mp.weixin.qq.com/s/FYVSIpdPMN37P_IgtqPpVg
- [108] 中银证券：先进封装推动设备需求高增，国产设备迎发展良机-先进封装设备行业深度
.2023.5.15.https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202305161586684818_1.pdf?1684259534000.pdf
- [109] SEMI：业界对国产半导体封装设备寄予厚望
.2021.8.16.<https://mp.weixin.qq.com/s/Pyv8aSSSbkaAJBpNQBdx7A>
- [110] 国海证券：半导体划片机国产替代领头羊
.2022.2.16.https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202202171547513865_1.pdf?1645089604000.pdf
- [111] 中银证券：先进封装推动设备需求高增，国产设备迎发展良机-先进封装设备行业深度
.2023.5.15.https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202305161586684818_1.pdf?1684259534000.pdf
- [112] 周万成.半导体测试设备选型研究[D].苏州大学，2012.
- [113] 中商情报局：2022年中国半导体测试设备产品结构及发展趋势预测分析（图）
.2022.11.10.<https://www.askci.com/news/chanye/20221110/1144512017286.shtml>
- [114] 彭荣超.晶圆检测设备产业的现状、挑战与发展趋势研究[J].中国设备工程，2023，(07):174-176.
- [115] 前瞻经济学人：2020年半导体封装材料行业市场发展现状分析 环氧树脂需求量崛起
.2020.8.13.<https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/200813-628be23c.html>
- [116] 王娟娟，余英丰，景华等.微电子封装材料及其可靠性研究进展[J].中国胶粘剂，2023，32(02):25-41+50.
- [117] SEMI：GLOBAL SEMICONDUCTOR PACKAGING MATERIALS MARKET TO NEAR \$30 BILLION BY 2027.2023.5.23.<https://www.semi.org/en/news-media-press-releases/semi-press-releases/global-semiconductor-packaging-materials-market-to-near-%2430-billion-by-2027>
- [118] 王彪，彭琳，昌道励.粤芯半导体副总裁李海明：补齐芯片制造短板 跨领域创业机遇多[N].南方日报，2021-07-16(A08).
- [119] 张倩.关于我国集成电路装备国产化问题的研究[J].电子测量技术，2019，42(02):28-32.
- [120] 董君，叶春明.半导体晶圆节能分布式制造与预维护联合优化[J].系统仿真学报，2022，34(3): 584.

本文来自微信公众号：果壳硬科技（ID：guokr233），作者：付斌，编辑：李拓

<https://www.huxiu.com/article/1698203.html>