

行业研究

半导体制造技术进步，原子层沉积（ALD）技术是关键

——半导体设备行业跟踪报告

要点

薄膜沉积是晶圆制造的三大核心步骤之一，薄膜的技术参数直接影响芯片性能。半导体器件的不断缩小对薄膜沉积工艺提出了更高要求，而 ALD 技术凭借沉积薄膜厚度的高度可控性、优异的均匀性和三维保形性，在半导体先进制程应用领域彰显优势。

用于薄膜沉积的技术包括物理气相沉积（PVD）、化学气相沉积（CVD）和原子层沉积（ALD）。其中 ALD 技术是一种将物质以单原子膜的形式逐层镀在基底表面的方法，能够实现纳米量级超薄膜的沉积。目前 ALD 技术可以细分为 TALD、PEALD、SALD 等，制备的薄膜类型包括氧化物、氮（碳）化物、金属与非金属单质等，涵盖介电层、导体和半导体。ALD 反应的自限制性和窗口温度较宽的特征，使其生长的薄膜具有很好的台阶覆盖率、大面积均匀、致密无孔洞等优势，且厚度等沉积参数易于精确控制。ALD 技术特别适合复杂形貌、高深宽比沟槽表面的薄膜沉积，被广泛应用于 High-K 栅介质层、金属栅、铜扩散阻挡层等半导体先进制程领域。

2020 年，全球 ALD 设备市场规模约占薄膜沉积设备整体市场的 11%。从晶圆厂设备投资构成来看，薄膜沉积设备投资额占晶圆制造设备总投资额的比重约达 25%。随着全球和国内晶圆厂的加速建设和扩产，以及半导体器件结构向更细微演进，ALD 设备市场空间广阔。

根据 SEMI，全球晶圆产能 2022 年将增长 8%，2020 年至 2024 年期间，中国大陆和中国台湾将分别增加 8 家和 11 家 300mm Fab 厂，合计约占全球新增数量的 50%。在 Fab 厂设备投资额构成中，前道晶圆制造设备占比高达 80%，其中薄膜沉积设备投资额约占晶圆制造设备的 25%。Maximize Market Research 统计显示，2017 至 2020 年全球半导体薄膜沉积设备市场规模从 125 亿美元增至 172 亿美元，CAGR 达 11.2%，预计 2025 年可达 340 亿美元。根据 Gartner 统计，2020 年 ALD 设备市场规模约占薄膜沉积设备的 11%，SEMI 预测，受益于半导体先进制程产线数量增加，2020 年至 2025 年全球 ALD 设备销售额 CAGR 将达到 26.3%，远高于 PVD 和 PECVD 设备的增速，市场前景可观。

半导体 ALD 设备市场由海外厂商高度垄断。2020 年，我国薄膜沉积设备国产化率为 8%，虽然较 2016 年的 5% 有所提升，但总体水平尤其是中高端设备的国产占比仍然较低。

在国际市场，ASMI、TEL、Lam、AMAT 等知名半导体厂商均提供 ALD 设备，其中 ASMI 为全球 ALD 设备市场龙头企业，公司在 ALD 技术领域持续深耕，通过跨国并购拓展并巩固了 ALD 业务，2020 年 ALD 设备销售额市占率高达 55%。在国内市场，经营薄膜沉积设备业务的公司主要包括拓荆科技、微导纳米、中微公司、盛美上海、北方华创，目前具备半导体 ALD 技术产业化能力的企业仍然较少。建议关注在 ALD 设备领域取得较大进展的拓荆科技、微导纳米。

拓荆科技：PEALD 产品在逻辑芯片领域已实现产业化应用，在 3D NAND FLASH、DRAM 领域验证进展顺利，ALD 反应腔通过现有客户验收；TALD 设备已取得客户订单。

微导纳米：TALD 产品在逻辑芯片 High-K 栅介质层领域已实现产业化应用；TALD 和 PEALD 设备在新型存储芯片的电容介质层、化合物半导体、量子器件的超导材料导电层等领域已与客户签署订单。

风险分析：下游晶圆厂扩产不及预期、产业化验证进展不及预期。

机械行业

买入（维持）

作者

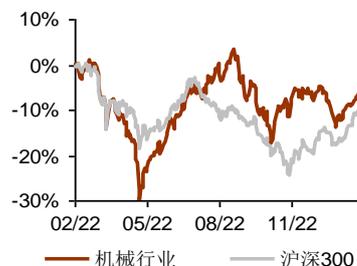
分析师：杨绍辉

执业证书编号：S0930522060001

021-52523860

yangshaohui1@ebcn.com

行业与沪深 300 指数对比图



资料来源：Wind

相关研报

量测设备空间大格局好，上海精测、中科飞测等国产品牌蓄势待发——半导体量测设备行业跟踪（2022-11-25）

技术主权之争主导设备需求，半导体设备进口替代是主旋律——全球半导体设备与零部件行业 2022 年三季度总结（2022-11-06）

“明”——“暗”检缺陷，相辅相成提良率——半导体设备研究系列之明暗场缺陷检测设备（2022-12-10）

目 录

1、ALD 技术进行薄膜沉积工艺优势明显	5
1.1、薄膜沉积：半导体工艺制程三大核心步骤之一	5
1.2、ALD 技术原理：每次反应只沉积一层原子	5
1.3、ALD 反应特征使其成为一种优异的镀膜技术	6
1.4、ALD 技术在半导体制造关键工艺中的主要应用	8
2、ALD 设备市场规模增速可观	10
2.1、半导体设备行业保持增长，国内市场发展势头强劲	10
2.2、晶圆厂建设加速推进，薄膜沉积设备需求持续旺盛	11
2.3、先进制程产线发展推动 ALD 设备需求攀升	12
3、ALD 设备被 ASMI 高度垄断，国产率低	13
3.1、ASMI：并购拓展与持续研发成就全球 ALD 设备龙头	13
3.2、薄膜沉积设备尤其是 ALD 设备国产化率较低	14
4、重点公司分析	15
4.1、拓荆科技：PECVD 设备成熟，PEALD 设备现已实现产业化应用	15
4.2、微导纳米：专注 ALD 技术，High-K ALD 设备成功填补国内空白	17
5、风险分析	19

图目录

图 1: ALD 技术原理图 (1 个周期)	5
图 2: 典型的 ALD 系统示意图.....	6
图 3: CS-ALD 过程示意图.....	7
图 4: RS-ALD 过程示意图.....	7
图 5: 沉积温度对 ALD 镀膜速率的影响及 ALD 窗口.....	8
图 6: ALD 与其他技术的镀膜效果比较	8
图 7: MOSFET 结构及 SiO ₂ 与 High-K 栅介电层比较	8
图 8: 具有金属栅电极的 FET	9
图 9: 采用 ALD 技术在高深宽比基底上沉积的铜扩散阻挡层薄膜	9
图 10: 采用 ALD 技术制备的微型电容器高深宽比三维复合电极结构	10
图 11: 2013-2021 年全球半导体设备销售额	10
图 12: 2013-2021 年中国大陆半导体设备销售额.....	10
图 13: 2020-2021 年全球半导体设备分地区销售额及占比	11
图 14: 2024 年全球 300mmFab 厂数量及产能 (千片/月) 预测.....	11
图 15: 2020 年晶圆厂半导体设备投资额占比情况	12
图 16: 2017-2025 年全球半导体薄膜沉积设备市场规模) 及增速	12
图 17: 2020 年全球薄膜沉积设备细分市场占比 (以销售额计)	13
图 18: 2005-2023 年全球薄膜沉积设备市场结构变化 (以销售额计)	13
图 19: 2017-2021 年 ASMI 营业收入及增速.....	14
图 20: 拓荆科技 2018-2022 年前三季度营业收入 (亿元)	15
图 21: 拓荆科技 2018-2022 年前三季度归母净利润 (亿元)	15
图 22: 拓荆科技 2022 年 H1 主营业务收入分产品占比.....	16
图 23: 拓荆科技 ALD 产品系列.....	16
图 24: 微导纳米 2019-2022 年前三季度营业收入 (亿元)	17
图 25: 微导纳米 2019-2022 年前三季度归母净利润 (百万元)	17
图 26: 微导纳米 2021 年主营业务收入分产品占比 (%)	18
图 27: 微导纳米半导体领域 ALD 产品系列.....	18
图 28: 微导纳米半导体领域 ALD 产品系列的镀膜工艺及应用领域	18

表目录

表 1: ALD 的特征、对薄膜沉积的内在影响及其实际应用中的优势	7
表 2: ASMI 发展历程.....	13
表 3: 产品线涵盖 ALD 设备的国际半导体设备制造商	14

1、ALD 技术进行薄膜沉积工艺优势明显

1.1、 薄膜沉积：半导体工艺制程三大核心步骤之一

半导体产品制造需要经过数百道工序，整个制造过程可以分为晶圆加工、氧化、光刻、刻蚀、薄膜沉积、互连、测试、封装八大步骤。其中，薄膜沉积与光刻、刻蚀是半导体制造的三大核心步骤。

薄膜沉积的作用在于制造半导体器件叠层，即在晶圆表面交替堆叠多层薄金属（导电）膜和介电（绝缘）膜，之后再通过重复刻蚀工艺去除多余部分以形成三维结构。此处的“薄膜”是指厚度小于 1 微米、无法通过普通机械加工方法制造出来的“膜”，而将包含所需分子或原子单元的薄膜附着在晶圆表面的过程就是“沉积”。目前可用于沉积过程的技术包括物理气相沉积（PVD）、化学气相沉积（CVD）以及原子层沉积（ALD）。

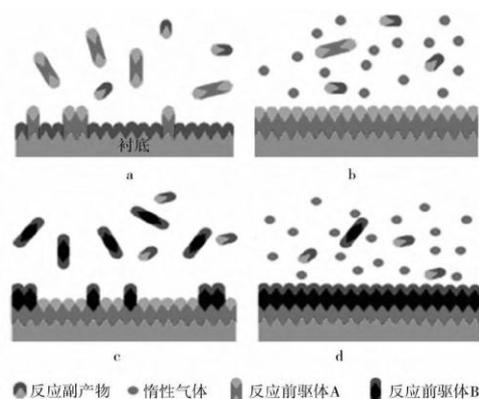
随着半导体产业不断发展，器件的小型化作为一种趋势致使 IC 线宽的特征尺寸更加细微。然而，传统的沉积技术（PVD、CVD）可能已经无法完全适应这一发展趋势。ALD 技术由于自身沉积参数的高度可控性（厚度、成份和结构）、优异的均匀性和保形性，在半导体领域尤其是先进制程中具有广泛的应用潜力。

1.2、 ALD 技术原理：每次反应只沉积一层原子

原子层沉积（Atomic Layer Deposition, ALD）是一种可以将物质以单原子膜的形式一层一层镀在基底表面的方法。在原子层沉积过程中，新一层原子膜的化学反应是直接与之前一层相关联的，这种方式使每次反应只沉积一层原子。ALD 是建立在连续的表面反应基础上的一门新兴技术，其本质是一种化学气相沉积（CVD）技术，但是与传统 CVD（化学蒸气不断地通入真空室内，因此沉积过程是连续的）不同，ALD 是交替脉冲式地将气相反应前驱体通入到生长室中，使其交替在衬底表面被吸附并发生反应。

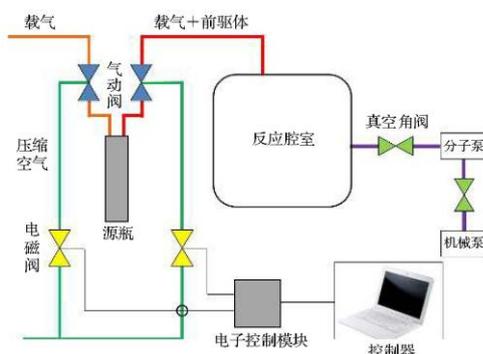
一个完整的 ALD 周期可分为 4 个步骤：a) 将气相反应前驱体 A 以脉冲形式通入反应腔，在衬底表面发生化学吸附；b) 待表面吸附饱和后，通入惰性气体将剩余的反应前驱体和副产物带出反应腔；c) 将气相反应前驱体 B 也以脉冲形式通入反应室，并与第一次化学吸附在衬底表面上的反应前驱体 A 反应；d) 待反应完成后，再次通入惰性气体将多余的反应前驱体和副产物带出反应腔。**通常一个周期需要 0.5 秒到几秒，生长的薄膜厚度大约为 0.01~0.3nm，不断重复循环这 4 个步骤即可完成整个 ALD 沉积过程。**

图 1：ALD 技术原理图（1 个周期）



资料来源：中国兵器工业第五九研究所《表面技术》，光大证券研究所

图 2：典型的 ALD 系统示意图



资料来源：中国物理学会，中国科学院物理研究所《物理学报》，光大证券研究所

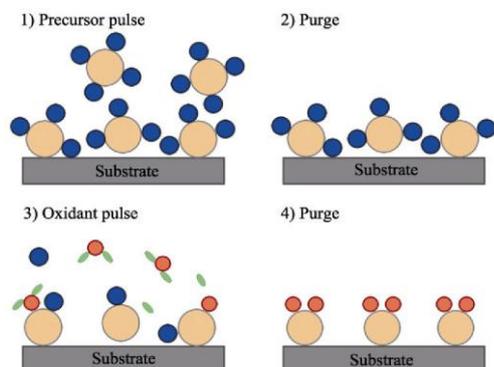
典型的原子层沉积系统通常由前驱体源、气路系统、电子控制系统和真空系统构成。一种传统的、被广泛使用的 ALD 方法是热处理原子层沉积（Thermal ALD, TALD），即利用加热法来实现原子层沉积的技术。不过由于常规 TALD 技术存在沉积速率较低、对某些沉积薄膜的沉积温度要求较高等缺点，其在工业应用中受到限制。随着原子层沉积在实验中不断优化，研究人员将 ALD 技术与其他技术或物质结合，一系列新的 ALD 技术得以产生和发展，例如等离子体增强原子层沉积（Plasma Enhanced ALD, PEALD）、空间原子层沉积（Spatial ALD, SALD）、电化学原子层沉积（Electrochemical ALD, ECALD）等等。

1.3、ALD 反应特征使其成为一种优异的镀膜技术

原子层沉积的表面反应具有自限制性（Self-limiting）特征。这是 ALD 技术的基础，不断重复这种自限制的反应就形成所需要的薄膜。根据沉积前驱体和基体材料的不同，原子层沉积的自限制特征分为两种不同的机制，即化学吸附自限制（CS）和顺次反应自限制（RS）。

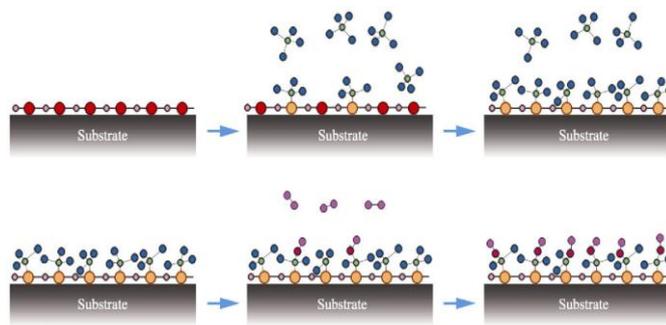
化学吸附自限制沉积（CS-ALD）过程中，第一种反应前驱体输入到基体材料表面并通过化学吸附保持在表面。当第二种前驱体通入反应器，就会与已吸附于基体材料表面的第一前驱体发生反应。两个前驱体之间发生置换反应，并产生相应的副产物，直到表面的第一前驱体完全消耗，反应会自动停止，并形成需要的原子层。而顺次反应自限制原子层沉积（RS-ALD）是通过活性前驱体物质与活性基体材料表面发生化学反应来驱动的，即得到的沉积薄膜是由前驱体与基体材料间的化学反应形成的。ALD 就是这两种自限制过程不断重复形成薄膜的技术。

图 3: CS-ALD 过程示意图



资料来源: 中国兵器工业第五九研究所《表面技术》, 光大证券研究所

图 4: RS-ALD 过程示意图



资料来源: 中国兵器工业第五九研究所《表面技术》, 光大证券研究所

原子层沉积的另一特征是其温度窗口较宽。化学吸附作为一个热力学过程会受反应温度的影响, 而原子层沉积速率存在温度“窗口”, 即低于窗口温度时前驱体会产生物理冷凝吸附, 温度过高时前驱体会受热分解, 甚至已经沉积好的薄膜也会解除吸附。因此, 薄膜沉积的过程中需要控制整个基板不同区域的温度保证处于 ALD 温度窗口, 使沉积速率接近恒定值。而 ALD 的温度窗口较宽, 这意味着 ALD 过程反应对生长温度并不敏感, 可以适应不同温度环境下的薄膜制备。

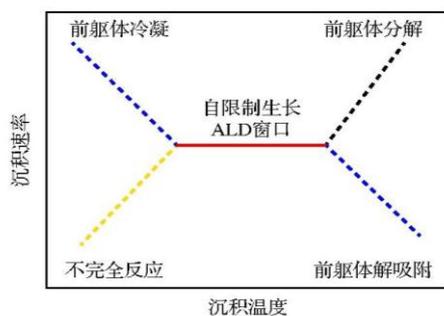
ALD 技术的自限制性、温度窗口宽的特点使其在实际应用中颇具优势。相比其他薄膜沉积技术, 例如传统 CVD、PVD、溶胶凝胶 (Sol-gel) 等, ALD 技术具有优异的三维贴合性 (保形性)、大面积成膜的均匀性, 且薄膜致密无孔洞、薄膜厚度等沉积参数可精确控制, 特别适合复杂表面形貌及高深宽结构的填隙生长, 随着芯片结构复杂度不断提升, ALD 技术优势更加明显。

表 1: ALD 的特征、对薄膜沉积的内在影响及其实际应用中的优势

ALD 特征	对薄膜沉积的内在影响	实际应用中的优势
自限制的 表面反应	薄膜厚度只取决于循环次数	精确控制薄膜厚度, 形成达到原子层厚度精度的薄膜
	前驱物是交替通入反应室	精确控制薄膜成分, 避免有害物质的污染
	前驱物是饱和和化学吸附	很好的台阶覆盖率及大面积厚度均匀性
	连续反应	薄膜无针孔、密度高
窗口温度较宽	不同材料的沉积条件稳定匹配	可以沉积多组分纳米薄层和混合氧化物; 薄膜生长可以在低温 (室温到 400°C) 下进行; 可以广泛适用于各种形状的衬底。

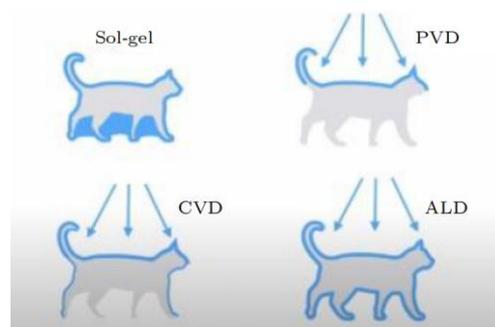
资料来源: 中国真空学会《真空科学与技术学报》, 光大证券研究所

图 5：沉积温度对 ALD 镀膜速率的影响及 ALD 窗口



资料来源：中国物理学会，中国科学院物理研究所《物理学报》，光大证券研究所

图 6：ALD 与其他技术的镀膜效果比较



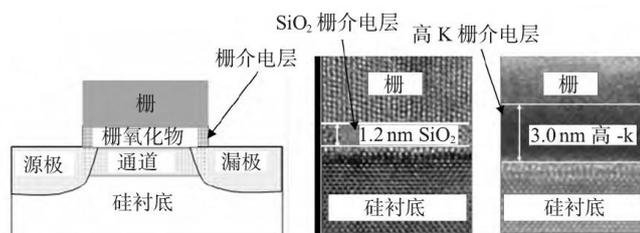
资料来源：中国物理学会，中国科学院物理研究所《物理学报》，光大证券研究所

1.4、ALD 技术在半导体制造关键工艺中的主要应用

1) 晶体管栅极介电层（高介电常数/High-K）

介电常数/K（希腊文 Kappa）这一术语用以描述一种材料保有电荷的能力，有些材料比其他材料能够更好地存储电荷，因此拥有更高的 K 值。在晶圆制造进入 65nm 制程及之前，集成电路主要通过沉积 SiO_2 薄膜形成栅极介质减少漏电，但进入 45nm 制程特别是 28nm 之后，传统的 SiO_2 -MOSFET（金属氧化物半导体场效应晶体管）规模缩小到薄膜材料厚度需在 1nm 及以下时，将产生明显的量子隧穿效应和多晶硅耗尽效应，导致漏电流急剧增加，器件性能急剧恶化，已不能满足技术发展的要求。相应地，如果使用 High-K 材料，那么在所要求的电容密度下，栅电介质的物理厚度就可以制作得更高，从而可以在降低等效氧化物厚度（EOT）的同时大幅减少漏电流。

High-K 栅介电层厚度往往小于 10nm，所需的膜层很薄（通常在数纳米量级内），因此 ALD 是一种较好的可以制备 High-K 电介质材料的技术，目前其沉积的 High-K 材料主要包括 Al_2O_3 、 HfO_2 、 TiO_2 、 ZrO_2 、 Ta_2O_5 ，稀土元素氧化物以及一些硅酸盐混合的纳米层状结构材料。

图 7：MOSFET 结构及 SiO_2 与 High-K 栅介电层比较

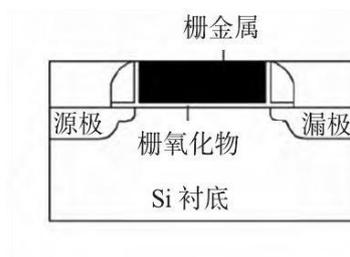
资料来源：中国电子科技集团公司第四十九研究所《传感器与微系统》，光大证券研究所

2) 金属栅极

High-K 电介质材料中的 Hf 原子会与传统多晶硅栅极中的 Si 原子发生化学反应形成 Hf-Si 键，从而形成缺陷中心，导致无法通过离子掺杂来改变多晶硅的功函数，造成费米能级的钉扎现象。也就是说，High-K 电介质与多晶硅栅极的兼容性不是很好。对此，半导体业界利用金属代替多晶硅作为器件栅极材料，这可以避免 Hf 原子和多晶硅界面上缺陷中心的产生，同时金属栅极具有极高的电子密度，可以把偶极性分子的振动屏蔽掉，提高器件通道内的迁移率，有效地解决多晶硅栅极耗尽问题¹。

因为金属替代栅极工艺中金属栅极是沉积在多晶硅沟槽里面，要求沉积工艺具有很好的台阶覆盖率，另外，ALD（尤其是 PEALD）是一种非常适合生长金属纳米薄膜的技术，所以通常选择 ALD 技术沉积金属栅极。

图 8：具有金属栅电极的 FET

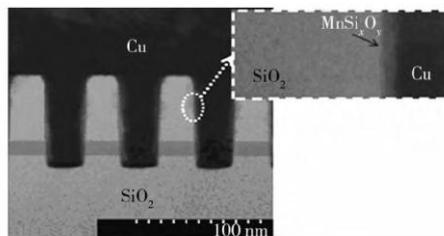


资料来源：中国电子科技集团公司第四十九研究所《传感器与微系统》，光大证券研究所

3) 铜互连扩散阻挡层

目前应用于互连技术的常见工艺主要有铝工艺和铜工艺。与铝相比，铜的导电性更加优良。同时，铜本身具有抗电迁移的能力，且能够在低温下进行沉积。由于金属铜具有这些优势，所以在 250nm 及以下半导体制程中，更倾向于采用铜互连技术。但铜也存在许多缺点，其中最大的一个不足就是铜的扩散速度很快，容易在电介质内部移动使器件“中毒”，因此在镀铜之前必须首先沉积一层防扩散的阻挡层。通过 ALD 技术沉积铜扩散阻挡层，在器件内部沟槽深宽比超过 100:1 时薄膜仍具有良好的保形性、均匀性以及防扩散阻挡特性。

图 9：采用 ALD 技术在高深宽比基底上沉积的铜扩散阻挡层薄膜



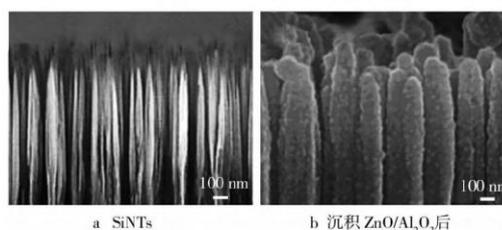
资料来源：中国兵器工业第五九研究所《表面技术》，光大证券研究所

¹ 多晶硅栅耗尽问题：当栅与衬底之间存在压差时，他们之间存在电场，使多晶硅靠近氧化层界面附近的能带发生弯曲并电荷耗尽，从而形成多晶硅栅耗尽区。

4) 微型电容器

ALD 在电容器中应用主要包括 100nm 以下 DRAM（动态随机存储器）、嵌入式 DRAM（Embedded DRAM, eDRAM）等。随着 DRAM 存储器容量不断增大，其内部的电容器数量随之剧增，而单个电容器的尺寸将进一步减小，电容器内部沟槽的深宽比也越来越大。深沟槽将需要更高的薄膜表面积，例如在 45nm 制程中，沟槽结构深宽比达到 100:1，所沉积薄膜的有效面积大约是器件本身表面积的 23 倍。这些给沉积技术提出了更高的要求。同样地，得益于薄膜以单原子层为量级生长所带来的大面积均匀性、高台阶覆盖率和对膜厚的精确控制，ALD 技术能够很好地满足这些要求。

图 10：采用 ALD 技术制备的微型电容器高深宽比三维复合电极结构



资料来源：中国兵器工业第五九研究所《表面技术》，光大证券研究所

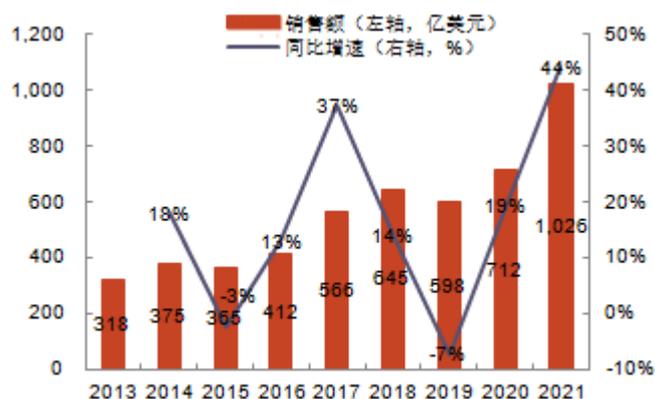
2、ALD 设备市场规模增速可观

2.1、 半导体设备行业保持增长，国内市场发展势头强劲

2013 年以来，半导体设备市场呈增长趋势。根据 SEMI 统计，全球半导体设备销售额从 2013 年的 318 亿美元增长至 2021 年的 1,026 亿美元，年均复合增长率约 15.8%。根据 SEMI 在 2022 年 7 月的预测，原始设备制造商的半导体制造设备全球总销售额将在 2022 年达到创纪录的 1,175 亿美元，较 2021 年同比增长约 15%，并将在 2023 年增至 1,208 亿美元。

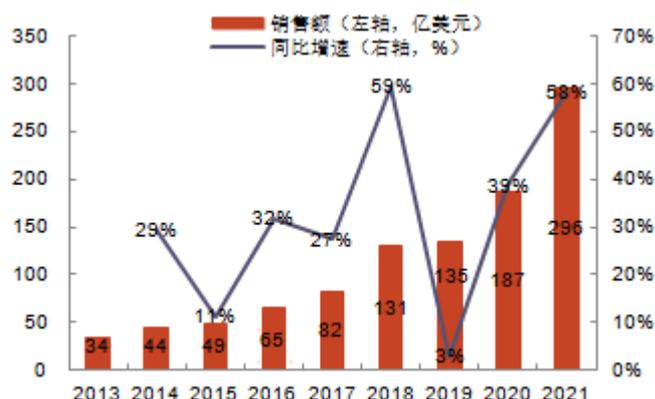
从国内需求端分析，根据 SEMI 数据，2013 年至 2021 年半导体设备在中国大陆销售额的年均复合增长率约达 31.1%，远高于全球同期水平。2021 年，中国大陆半导体设备销售额达到 296.2 亿美元，较 2020 年同比大幅增长 58.2%，占全球半导体设备销售额的 28.9%。2020 年和 2021 年，中国大陆地区连续两年成为全球第一大半导体设备市场，领先于韩国和中国台湾，发展势头强劲。

图 11：2013-2021 年全球半导体设备销售额



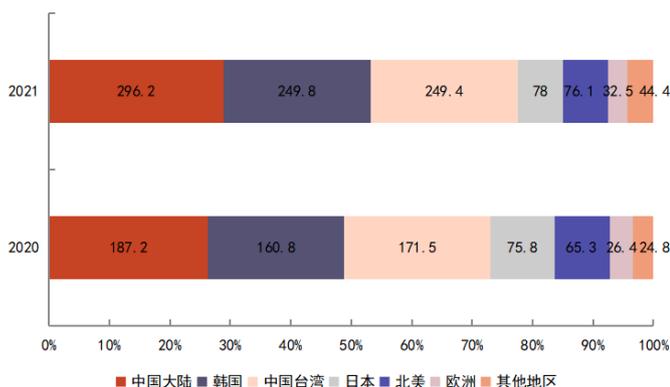
资料来源：SEMI，光大证券研究所

图 12：2013-2021 年中国大陆半导体设备销售额



资料来源：SEMI，光大证券研究所

图 13：2020-2021 年全球半导体设备分地区销售额（亿美元）及占比

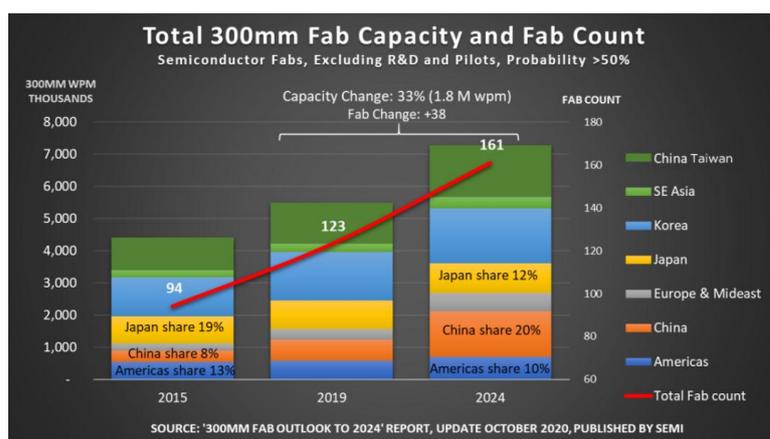


资料来源：SEMI，光大证券研究所

2.2、晶圆厂建设加速推进，薄膜沉积设备需求持续旺盛

受益于全球晶圆厂积极扩产以及中国大陆地区晶圆厂建设加速推进，半导体设备市场需求快速增长。根据 SEMI 统计及预测，继 2021 年增长 7% 之后，全球晶圆产能 2022 年将增长 8%，2020 年至 2024 年期间，全球芯片行业至少将新增 38 家 300mm Fab 厂，其中中国大陆与中国台湾地区分别将增加 8 家和 11 家，合计约占新建厂总数的一半。到 2024 年，全球芯片行业将拥有 161 家 300mm Fab 厂，月产能将达到 700 万片。根据 ChipInsights，截至 2021 年 Q2，我国投产、在建和规划的 56 条 12 英寸（300mm）晶圆制造线中已经投产的有 27 条，在建未完工、开工建设或签约项目有 29 条。宣布投产的项目合计装机月产能约达 118 万片，在建未完工、开工建设或签约项目的规划月产能总计 132 万片。新增的产能布局，尤其是中国晶圆厂的产能扩张，处于自主可控、安全发展的考虑，新增产线将以国产设备为主，这将推动国内半导体设备的国产化加速。

图 14：2024 年全球 300mm Fab 厂数量及产能（千片/月）预测



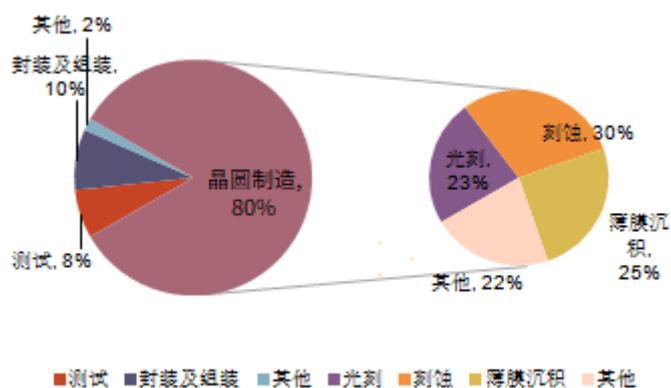
资料来源：SEMI，光大证券研究所；预测机构：SEMI

半导体设备主要包括前道工艺设备和后道工艺设备，前道工艺设备为晶圆制造相关设备，具体包括氧化/扩散设备、光刻设备、刻蚀设备、清洗设备、离子注入设备、薄膜沉积设备、化学机械抛光（CMP）设备、量测检测设备等；后道工艺设备包括封装设备和测试设备，其他类型设备主要包括硅片生长设备等。而薄

膜沉积设备作为晶圆制造的三大主设备之一(另外两类为光刻设备和刻蚀设备),未来市场需求将保持旺盛。从新建晶圆厂的设备投资构成来看,根据 SEMI 统计,2020 年晶圆制造设备投资额占总体设备投资的比重高达 80%,而薄膜沉积设备的投资规模约占晶圆制造设备投资额的 25%。

根据 Maximize Market Research 统计,全球半导体薄膜沉积设备市场规模从 2017 年的 125 亿美元扩大至 2020 年的 172 亿美元,年均复合增长率为 11.2%。据 Maximize Market Research 预测,到 2025 年,薄膜沉积设备市场规模可达 340 亿美元。

图 15: 2020 年晶圆厂半导体设备投资额占比情况



资料来源: SEMI, 光大证券研究所

图 16: 2017-2025 年全球半导体薄膜沉积设备市场规模及增速



资料来源: Maximize Market Research, 光大证券研究所; 预测机构: Maximize Market Research

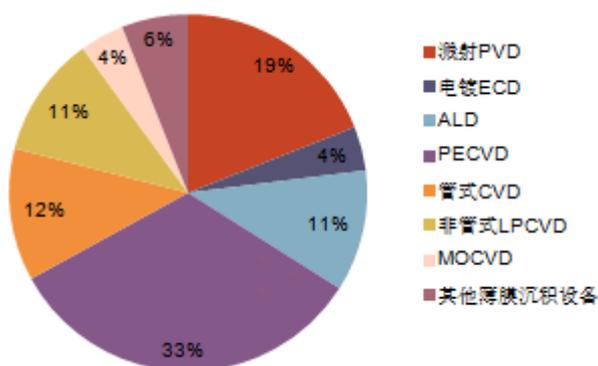
2.3、先进制程产线发展推动 ALD 设备需求攀升

从半导体薄膜沉积设备细分市场结构上来看,根据 Gartner 统计,2020 年溅射 PVD 和电镀 ECD 设备的销售额分别占整体薄膜沉积设备市场的 19%和 4%;PECVD 设备是薄膜沉积设备中销售额占比最高的类型,占比为 33%,管式 CVD、非管式 LPCVD 和 MOCVD 设备的销售额占比分别为 12%、11%和 4%;而 ALD 设备销售额占薄膜沉积设备市场规模的比重约为 11%。

在半导体制程进入 28nm 后,由于器件结构不断缩小且更为 3D 立体化,生产过程中需要实现厚度更薄的膜层并在更为立体的器件表面均匀镀膜。在此背景下,ALD 凭借优异的三维共形性、大面积成膜的均匀性和精确的膜厚控制等特点,显示出较大技术优势。ALD 设备在 high-K 材料、金属栅极等工艺中的优势使其被广泛应用于逻辑芯片、DRAM、3D NAND 器件等半导体制造领域,未来其在薄膜沉积环节的市场占有率将持续提高。

近年来全球 ALD 设备市场规模快速增长。根据 SEMI 统计,2020 年至 2025 年,ALD 设备市场规模(以销售额计)的年均复合增长率将达到 26.3%,远高于 PECVD、PVD 设备的 8.5%和 8.9%。根据 Acumen Research and Consulting 预测,受益于半导体先进制程产线数量增加,全球 ALD 设备市场规模将在 2026 年达到约 32 亿美元。

图 17: 2020 年全球薄膜沉积设备细分市场占比 (以销售额计)



资料来源: Gartner, 光大证券研究所

图 18: 2005-2023 年全球薄膜沉积设备市场结构变化 (以销售额计)



资料来源: E.Kessel ALD 2019, 微导纳米 IPO 路演, 光大证券研究所; 预测机构: E.Kessel ALD 2019

3、ALD 设备被 ASMI 高度垄断，国产率低

3.1、ASMI: 并购拓展与持续研发成就全球 ALD 设备龙头

ASM International (ASMI) 于 1968 年成立，总部位于荷兰，是全球 ALD 设备的龙头企业，也是全球十大半导体设备供应商之一。目前公司主要业务包括 TALD、PEALD、低压化学气相沉积 (LPCVD)、等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 以及扩散、外延等半导体工艺设备。

表 2: ASMI 发展历程

时间节点	重要事项
1968 年	公司创立，以晶圆加工设备起家。
1975 年	在中国香港建立 ASM Pacific Technology (ASMPT)，拓展后端装配和包装业务。
1981 年	在美国纳斯达克交易所上市。
1984 年	和飞利浦合资成立 ASML，后因财务问题于 1988 年退出。
1996 年	在阿姆斯特丹 AEX 交易所上市。
1999 年	收购芬兰 Microchemistry 公司拓展 ALD 业务。
2004 年	收购韩国 Genitech 集团，进一步巩固了 ALD 领域地位，但由于 ALD 的研发成本很高且市场应用尚未铺开，ASMI 在盈利上一直面临较大压力。
2009 年	英特尔投资 ASMI 的 High-K/ALD 技术，同时在先进工艺节点下 ALD 的技术优势也得到体现，公司迎来转折。
2013 年	公司恢复盈利。随后凭借着在 ALD 领域的技术积累，ALD 设备市场份额持续提升，逐步成为 ALD 设备龙头企业。
2020 年	公司 ALD 设备市场份额达到 55%。

资料来源: ASMI, 立鼎产业研究网, 光大证券研究所

ASMI 坚持深耕 ALD 工艺技术，研发投入占比高。根据 Bloomberg 数据，自 1990 年至 2020 年，ASMI 研发支出营收占比基本保持在 10% 以上，面临盈利压力时也始终坚持研发投入。根据公司年报，2021 年公司研发支出规模达 2.06 亿欧元；截至 2021 年 12 月 31 日，公司研发人员达 649 人，专利累计达 2250 项，在 ALD 领域积累了深厚的技术优势。

目前 ASMI 在 ALD 领域独占鳌头，成为全球最大、市占率最高的 ALD 设备供应商。VLSI Research 数据显示，2019 年 ASMI 的单晶圆 ALD 设备销售额在全球市场中占据 53% 的份额。ASMI 年报显示，2020 年公司 ALD 设备所占市场份额（以销售额计）达到了 55%。在营收方面，2021 年 ASMI 实现营收 17.30 亿欧元，较 2020 年同比增长 30.27%。

图 19：2017-2021 年 ASMI 营业收入及增速



资料来源：ASMI，光大证券研究所

3.2、 薄膜沉积设备尤其是 ALD 设备国产化率较低

我国半导体设备经过近些年的快速发展，已在部分领域取得一定进步，但是整体国产化率尤其是关键工艺步骤设备的国产化率较低。就薄膜沉积设备而言，根据中商产业研究院数据，2016 年和 2020 年半导体薄膜沉积设备的国产化率分别为 5% 和 8%，虽然略有提升，但总体占比尤其是中高端产品占比仍然较低。

从全球市场来看，半导体 ALD 设备基本由国际巨头垄断，目前，国际半导体设备领军厂商先晶半导体 (ASMI)、东京电子 (TEL)、泛林半导体 (Lam)、应用材料 (AMAT) 等的产品线均涵盖 ALD 设备。从国内市场来看，拥有半导体薄膜沉积设备业务的上市公司主要有拓荆科技、微导纳米、北方华创、中微公司、盛美上海。其中，拓荆科技主要经营 PVD、PECVD 产品，ALD 设备已实现出货，在部分客户端处于工艺验证阶段；微导纳米主营 ALD 设备，其应用于逻辑芯片 High-K 栅介质层的 TALD 产品目前已实现产业化应用，另有多个 ALD 产品系列处于验证阶段；中微公司主要为半导体客户提供刻蚀、MOCVD 设备，ALD 设备仍在筹划开发中；盛美上海已于 2022 年下半年推出立式 ALD 和 PECVD 新产品。

表 3：产品线涵盖 ALD 设备的国际半导体设备制造商

企业名称	总部所在地	成立时间	产品情况
ASMI	荷兰	1968 年	产品涵盖晶圆加工技术的重要方面，包括光刻、薄膜沉积、离子注入和单晶圆外延。近年来，公司将 ALD 和 PEALD 技术引入先进制造商的主流生产。
TEL	日本	1963 年	日本最大的半导体薄膜沉积、刻蚀设备公司，产品线包含 ALD 设备。
Lam	美国	1980 年	产品涵盖半导体薄膜沉积、刻蚀、剥离和清洗等多个设备类型。
AMAT	美国	1967 年	产品横跨 ALD、CVD、PVD、离子注入、刻蚀、CMP、RTP（快速热处理）、量检测等除光刻机外的几乎所有半导体设备。

资料来源：SEMI，光大证券研究所

目前国内拥有半导体 ALD 技术产业化能力的企业数量较少，且国内企业的业务规模与海外头部公司相比还很小。在国产化进程加速的背景下，随着核心技术的

不断突破、不同环节工艺水平的提升、量产的持续推进，国内 ALD 设备企业具有广阔的发展空间。

4、重点公司分析

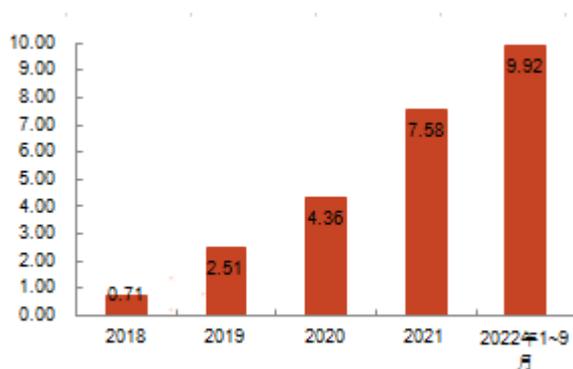
4.1、拓荆科技：PECVD 设备成熟，PEALD 设备现已实现产业化应用

拓荆科技股份有限公司成立于 2010 年 4 月，为国家级高新技术企业，主要从事高端半导体专用设备的研发、生产、销售与技术服务，多次承担国家重大专项/课题。拓荆科技总部位于沈阳市，在北京、上海、海宁、美国成立四家子公司，公司股票于 2022 年 4 月在科创板上市。

公司主要产品包括等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 设备、原子层沉积 (ALD) 设备和次常压化学气相沉积 (SACVD) 设备三个产品系列，拥有自主知识产权，技术指标达到国际同类产品先进水平，**现已广泛应用于国内晶圆厂 14nm 及以上制程集成电路制造产线，并已展开 10nm 及以下制程产品验证测试。**除集成电路晶圆制造以外，公司产品还应用于 TSV 封装、光波导、Micro-LED、OLED 显示等高端技术领域。

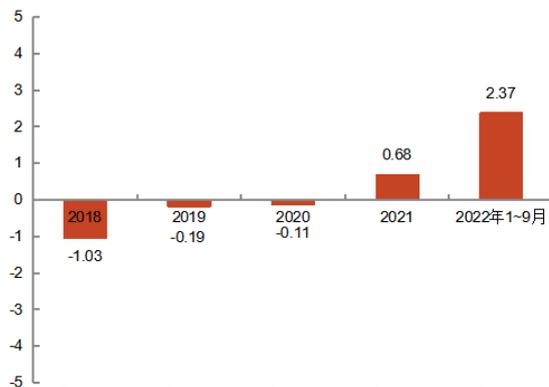
受益于产品的竞争优势、下游晶圆厂的产能扩充以及国家政策对国产设备的大力支持，公司营业收入实现大幅增长，2022 年前三季度营业收入为 9.92 亿元，同比增长 165.2%；2022 年前三季度归母净利润为 2.37 亿元，同比增长 309.7%，公司业绩进入快速放量阶段。根据公司披露的业绩预告，公司预计 2022 年年度实现营业收入 16.5~17.2 亿元，同比增长 117.69%~126.92%；实现归母净利润 3.3~4.0 亿元，同比增长 381.85%~484.06%。

图 20：拓荆科技 2018-2022 年前三季度营业收入（亿元）



资料来源：公司公告，光大证券研究所

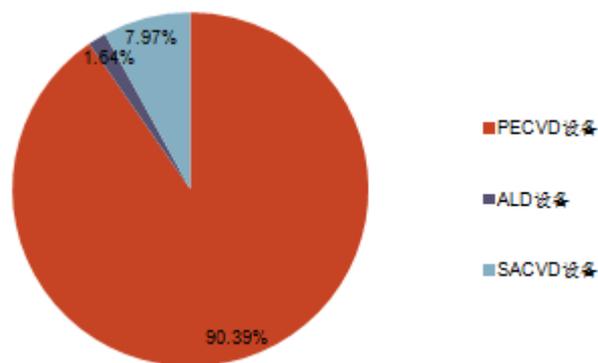
图 21：拓荆科技 2018-2022 年前三季度归母净利润（亿元）



资料来源：公司公告，光大证券研究所

公司主营业务收入占比最高的是 PECVD 设备，近年来公司营业收入的快速增长主要是由于 PECVD 产品收入的高速增长。2022 年 H1，公司 ALD 设备销售收入为 848 万元，约占主营业务收入的 1.64%，占比相对较低。

图 22：拓荆科技 2022 年 H1 主营业务收入分产品占比



资料来源：公司公告，光大证券研究所

拓荆科技的 ALD 系列产品涵盖 PEALD 设备和 TALD 设备。截至 2022 年 6 月底，公司 **PEALD 系列产品**已在逻辑芯片领域实现产业化应用，可以沉积高温、低温、高质量等多种指标要求的 SiO₂ 介质材料薄膜。此外 PEALD 系列产品在 3D NAND FLASH、DRAM 存储芯片制造领域的验证进展顺利，ALD 反应腔通过现有客户验收。

图 23：拓荆科技 ALD 产品系列

PE-ALD 设备【PF-300T（双站式）】		PE-ALD【PF-300T（双站式）】设备在 40/28nm 及以下 SADP、STI Liner 工艺，55-40nm BSI 工艺的晶圆制造以及封装领域已实现产业化应用；在 DRAM 存储芯片制造领域进行产业化验证。该设备可以沉积高温、低温、高质量等 SiO ₂ 介质材料薄膜。
PE-ALD 设备【NF-300H（六站式）】		PE-ALD【NF-300H（六站式）】设备在 128 层 3D NAND FLASH 芯片制造领域进行产业化验证，可以沉积高温、低温、高质量等 SiO ₂ 介质材料薄膜。
Thermal-ALD 设备【PF-300T（双站式）】		Thermal-ALD【PF-300T（双站式）】设备在研发设计阶段，根据客户指标要求持续优化改进，已取得客户订单。该设备主要应用于 28nm 及以下逻辑芯片，可以沉积 Al ₂ O ₃ 、AlN 等多种金属化合物薄膜材料。

资料来源：公司公告，光大证券研究所

在 TALD 方面，截至 2022 年 6 月底，公司 TALD【PF-300T（双站式）】设备已完成产品开发并取得客户订单，将根据客户指标要求进行持续优化改进。2022 年 H1，公司基于上述设备开发了 TALD【TS-300（多边形高产平台）】设备，在提高产能的同时实现多种薄膜工艺的集成组合，可以沉积 Al₂O₃、AlN 等多种金属化合物薄膜材料，目前已取得客户订单。

风险提示：产品验收周期较长的风险，无法持续引入高端技术人才的风险，市场竞争风险。

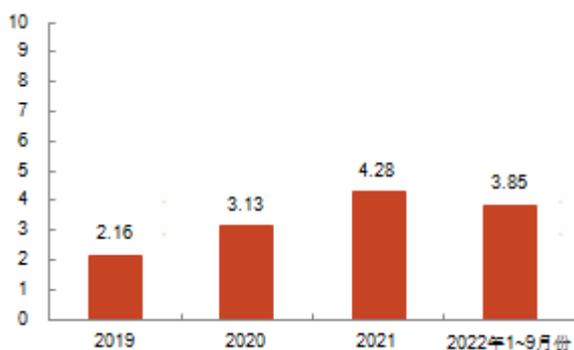
4.2、微导纳米：专注 ALD 技术，High-K ALD 设备成功填补国内空白

江苏微导纳米科技股份有限公司成立于 2015 年 12 月，是一家面向全球的高端设备制造商。公司以原子层沉积（ALD）技术为核心，专注于先进微米级、纳米级薄膜沉积设备的研发、生产与应用，业务涵盖集成电路、光伏、LED、MEMS 等半导体相关领域，以及新能源和柔性电子领域。

公司主要产品为应用于逻辑芯片、存储芯片、硅基微显示和 3D 封装等半导体及泛半导体 ALD 设备和技术，以及应用于柔性电子、新一代高效太阳能电池的薄膜设备和量产解决方案。公司创立初期率先孵化光伏业务，**随后开发对技术水平和工艺要求更高的半导体薄膜沉积设备，是国内首家成功将量产型 High-K 原子层沉积设备应用于 28nm 节点集成电路制造前道生产线的国产设备公司**，设备总体表现和工艺关键性能参数达到国际同类水平，并已获得客户重复订单认可。

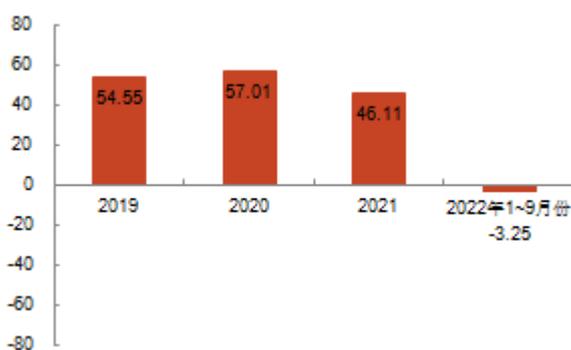
近年来公司营业收入持续增长，2021 年营收为 4.28 亿元，同比增长 36.91%。2020 年起，公司加大人才引入力度和产品应用领域拓展，使得营业收入呈增长态势，但期间费用金额的上升也导致公司净利润水平有所波动。2022 年前三季度公司出现亏损，主要是由于客户现场工作受到新冠疫情影响，公司营业收入因而有所下降，加以期间费用大幅增长，最终导致了利润承压。根据公司披露的业绩预告，公司预计 2022 年年度实现营业收入 6.48~7.16 亿元，同比增长 51.33%~67.26%；实现归母净利润 0.53~0.62 亿元，同比增长 15%~35%。

图 24：微导纳米 2019-2022 年前三季度营业收入（亿元）



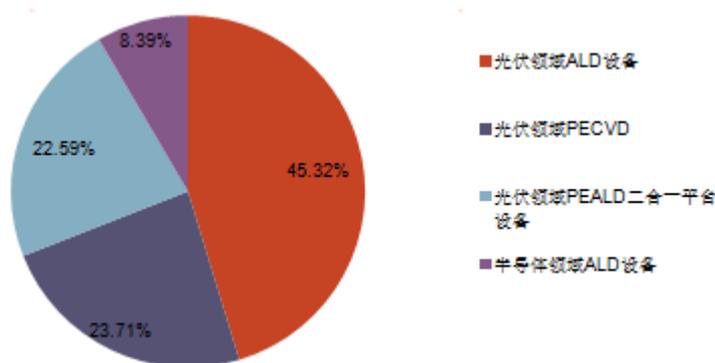
资料来源：公司公告，光大证券研究所

图 25：微导纳米 2019-2022 年前三季度归母净利润（百万元）



资料来源：公司公告，光大证券研究所

图 26：微导纳米 2021 年主营业务收入分产品占比 (%)



资料来源：微导纳米招股说明书，光大证券研究所

2021 年，公司半导体领域 ALD 设备销售收入为 2,520 万元，约占主营业务收入的 8.39%，目前不及光伏领域 ALD 及其他薄膜沉积设备的销售收入，公司在半导体领域业务还有较大发展空间。

目前微导纳米在半导体领域的 ALD 产品系列同样包括 TALD 设备和 PEALD 设备。其中 TALD 设备——凤凰 (P) 系列原子层沉积镀膜系统可以实现 HfO_2 的沉积，该设备在逻辑芯片 High-K 栅介质层领域**已实现产业化应用**。

除已实现产业化应用的功能外，公司 ALD 设备沉积的 HfO_2 、 ZrO_2 、 La_2O_3 以及互相掺杂沉积工艺可用于新型存储器如铁电存储 (FeRAM) 芯片的电容介质层，沉积的 Al_2O_3 、TiN、AlN 可用于化合物半导体、量子器件的超导材料导电层等，截至 2022 年 6 月底，公司在这些领域均**已完成客户的试样测试并签署订单**。

图 27：微导纳米半导体领域 ALD 产品系列

凤凰 (P) 系列原子层沉积镀膜系统		主要用于单片型 12 寸及 8 寸晶圆生产中氧化物、氮化物及金属镀膜工艺	产业化应用
凤凰 (P-Lite) 轻型原子层沉积镀膜系统		主要用于单片型 8 寸、6 寸及以下的第三代化合物半导体、量子器件等氧化物、氮化物及金属镀膜工艺	产业化验证
麒麟 (QL) 系列原子层沉积镀膜系统		用于批量型 12 寸及 8 寸晶圆生产中氧化物、氮化物及金属镀膜工艺，单腔体每批次可容纳最多 25 片 12 寸 (兼容 25 片 8 寸晶圆镀膜)	产业化验证

资料来源：微导纳米招股说明书，光大证券研究所

图 28：微导纳米半导体领域 ALD 产品系列的镀膜工艺及应用领域

凤凰 (P) 系列原子层沉积镀膜系统	TALD	HfO_2 工艺	逻辑芯片——高 k 栅介质层	产业化应用
		HfO_2 工艺	存储芯片——高 k 栅电容介质层 (单元和多元掺杂介质层)	产业化验证
		ZrO_2 工艺		
		La_2O_3 工艺		
		TiO_2 工艺	存储芯片——高 k 栅介质覆盖层	产业化验证
凤凰 (P-Lite) 轻型原子层沉积镀膜系统	TALD	TiN 工艺	半导体量子器件——超导材料导电层	产业化验证
		Al_2O_3 和 AlN 工艺	第三代化合物半导体——钝化层和过渡层	产业化验证
	PEALD	Al_2O_3 和 AlN 工艺	第三代化合物半导体——钝化层和过渡层	产业化验证
麒麟 (QL) 系列原子层沉积镀膜系统	TALD	Al_2O_3 和 TiO_2 工艺	硅基微型显示芯片——阻水阻氧保护层	产业化验证

资料来源：微导纳米招股说明书，光大证券研究所

风险提示：技术迭代及新产品开发风险、新产品验证进度及市场发展不及预期的风险。

5、风险分析

下游晶圆厂扩产不及预期

随着产线逐渐升级，晶圆厂对薄膜沉积设备数量和性能的需求将继续随之提升，国内下游晶圆厂的扩产为设备公司提供销量增长的良好契机。从下游终端来看，目前 5G 手机等消费电子市场持续低迷，细分市场需求下降将会影响传统存储器以及中低端逻辑芯片的需求，进而影响晶圆厂的扩产计划。此外，先进制程技术进展是否顺利、重大的自然灾害以及地缘政治对总体经济的影响等，也会对晶圆代工厂的扩产造成影响。倘若未来晶圆厂扩产进展不及预期，薄膜沉积设备厂商的销售收入将受到一定影响。

产业化验证进展不及预期

晶圆制造属于高精密制造领域，对产线上各环节的良率要求极高，任何进入量产线的设备均需经过长时间工艺验证和产线联调联试。并且由于薄膜的技术参数直接影响芯片性能，晶圆厂对薄膜沉积设备进行验证所需的时间相比其他半导体专用设备可能更长。如果受某些因素影响，薄膜沉积设备公司的产品验证周期延长，其收入确认将有所延迟，另外还可能存在验收不通过、收款时间延后等风险，对其财务状况造成一定影响。

行业及公司评级体系

	评级	说明
行业及公司评级	买入	未来 6-12 个月的投资收益率领先市场基准指数 15%以上
	增持	未来 6-12 个月的投资收益率领先市场基准指数 5%至 15%；
	中性	未来 6-12 个月的投资收益率与市场基准指数的变动幅度相差-5%至 5%；
	减持	未来 6-12 个月的投资收益率落后市场基准指数 5%至 15%；
	卖出	未来 6-12 个月的投资收益率落后市场基准指数 15%以上；
	无评级	因无法获取必要的资料，或者公司面临无法预见结果的重大不确定性事件，或者其他原因，致使无法给出明确的投资评级。
基准指数说明：		A 股主板基准为沪深 300 指数；中小盘基准为中小板指；创业板基准为创业板指；新三板基准为新三板指数；港股基准指数为恒生指数。

分析、估值方法的局限性说明

本报告所包含的分析基于各种假设，不同假设可能导致分析结果出现重大不同。本报告采用的各种估值方法及模型均有其局限性，估值结果不保证所涉及证券能够在该价格交易。

分析师声明

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并注册为证券分析师，以勤勉的职业态度、专业审慎的研究方法，使用合法合规的信息，独立、客观地出具本报告，并对本报告的内容和观点负责。负责准备以及撰写本报告的所有研究人员在此保证，本研究报告中任何关于发行商或证券所发表的观点均如实反映研究人员的个人观点。研究人员获取报酬的评判因素包括研究的质量和准确性、客户反馈、竞争性因素以及光大证券股份有限公司的整体收益。所有研究人员保证他们报酬的任何一部分不与、不与，也将不会与本报告中具体的推荐意见或观点有直接或间接的联系。

法律主体声明

本报告由光大证券股份有限公司制作，光大证券股份有限公司具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格，负责本报告在中华人民共和国境内（仅为本报告目的，不包括港澳台）的分销。本报告署名分析师所持中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格编号已披露在报告首页。

中国光大证券国际有限公司和 Everbright Securities(UK) Company Limited 是光大证券股份有限公司的关联机构。

特别声明

光大证券股份有限公司（以下简称“本公司”）创建于 1996 年，系由中国光大（集团）总公司投资控股的全国性综合类股份制证券公司，是中国证监会批准的首批三家创新试点公司之一。根据中国证监会核发的经营证券期货业务许可，本公司的经营范围包括证券投资咨询业务。

本公司经营范围：证券经纪；证券投资咨询；与证券交易、证券投资活动有关的财务顾问；证券承销与保荐；证券自营；为期货公司提供中间介绍业务；证券投资基金代销；融资融券业务；中国证监会批准的其他业务。此外，本公司还通过全资或控股子公司开展资产管理、直接投资、期货、基金管理以及香港证券业务。

本报告由光大证券股份有限公司研究所（以下简称“光大证券研究所”）编写，以合法获得的我们相信为可靠、准确、完整的信息为基础，但不保证我们所获得的原始信息以及报告所载信息之准确性和完整性。光大证券研究所可能将不时补充、修订或更新有关信息，但不保证及时发布该等更新。

本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次发布时光大证券研究所的判断，可能需随时进行调整且不予通知。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。客户应自主作出投资决策并自行承担投资风险。本报告中的信息或所表述的意见并未考虑到个别投资者的具体投资目的、财务状况以及特定需求。投资者应当充分考虑自身特定状况，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。对依据或者使用本报告所造成的一切后果，本公司及作者均不承担任何法律责任。

不同时期，本公司可能会撰写并发布与本报告所载信息、建议及预测不一致的报告。本公司的销售人员、交易人员和其他专业人员可能会向客户提供与本报告中观点不同的口头或书面评论或交易策略。本公司的资产管理子公司、自营部门以及其他投资业务板块可能会独立做出与本报告的意见或建议不相一致的投资决策。本公司提醒投资者注意并理解投资证券及投资产品存在的风险，在做出投资决策前，建议投资者务必向专业人士咨询并谨慎抉择。

在法律允许的情况下，本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易，也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问或金融产品等相关服务。投资者应当充分考虑本公司及本公司附属机构就报告内容可能存在的利益冲突，勿将本报告作为投资决策的唯一信赖依据。

本报告根据中华人民共和国法律在中华人民共和国境内分发，仅向特定客户传送。本报告的版权仅归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、复制、转载、刊登、发表、篡改或引用。如因侵权行为给本公司造成任何直接或间接的损失，本公司保留追究一切法律责任的权利。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。

光大证券股份有限公司版权所有。保留一切权利。

光大证券研究所

上海

静安区南京西路 1266 号
恒隆广场 1 期办公楼 48 层

北京

西城区武定侯街 2 号
泰康国际大厦 7 层

深圳

福田区深南大道 6011 号
NEO 绿景纪元大厦 A 座 17 楼

光大证券股份有限公司关联机构

香港

中国光大证券国际有限公司
香港铜锣湾希慎道 33 号利园一期 28 楼

英国

Everbright Securities(UK) Company Limited
64 Cannon Street, London, United Kingdom EC4N 6AE