

电子行业专题报告

半导体设备系列：量测检测——国产化短板，替代潜力巨大

分析师

余凌星 登记编号：S1220523070005

钟琳 登记编号：S1220523070006

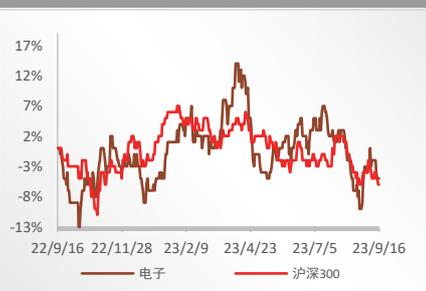
刘嘉元 登记编号：S1220523080001

行业评级：推荐

公司信息

上市公司总家数	493
总股本(亿股)	4,901.88
销售收入(亿元)	29,166.11
利润总额(亿元)	2,717.82
行业平均 PE	89.67
平均股价(元)	32.12

行业相对指数表现



数据来源：wind 方正证券研究所

相关研究

《存储复盘：拐点已至，AI 存力革新》
2023.08.04

《数字 IC 板块开启复苏节奏，IOT 类公司景气度率先修复》2023.05.15

《刻蚀工艺双子星：大马士革 & 极高深宽比》2023.05.12

《模拟板块一季报总结》2023.05.09

过程控制：半导体晶圆制造过程中不同工艺之后，需要进行尺寸测量、缺陷检测等，用于工艺控制、良率管理，要求快速、准确。过程控制设备主要包括测量类设备（Metrology）和缺陷（含颗粒）检查类设备（Inspection）。量测包括套刻对准的偏差测量、薄膜材料的厚度测量、晶圆在光刻胶曝光显影后、刻蚀后和 CMP 工艺后的关键尺寸（CD）测量、其他如晶圆厚度，弯曲翘曲（Bow/Warp），1D/2D 应力 stress，晶圆形貌等。检测主要包括无图形缺陷检测、有图像缺陷检测、掩模版缺陷检测、缺陷复检。量测检测主要作用就是生产出符合关键物理参数的芯片以及优化工艺，提升良率。

过程控制全球半导体设备总市场占比约 10.5%，持续有升级需求。2021 年全球过程控制设备市场空间约 104 亿美元，其中光刻相关（套刻误差量测、掩模板测量及检测等）相关需求约 28 亿美元、膜厚测量需求约 17 亿美元、缺陷检测需求约 58 亿美元。过程控制市场中在全球半导体设备总市场（包括晶圆制造和封装测试设备）占比约 10.5%，相对稳定，随着制程微缩、3D 堆叠推进，晶圆制造对于量测、检测需求不断增加，精度要求也不断提高，过程控制设备持续有升级需求。

全球过程控制市场主要由海外龙头 KLA 主导。过程控制市场特点在于设备品类多，分产品市场较为分散。目前全球过程控制主要赛道由海外厂商主导并垄断，KLA 通过多年来外延内生，产品系列超过 14 大类，在多个细分领域具有明显优势，公司 2023 财年营收 104.96 亿美金，同比增长 13.9%，综合毛利率 60%，在中国大陆量测检测市占率超过 50%，此外 AMAT、ASML、Nova、Hitachi 亦占据市场重要地位，2021 年全球 CR5 85.8%。

精测电子全面布局膜厚及 OCD 检测、SEM 检测等技术方向。在膜厚方面，上海精测已经推出了膜厚检测设备、OCD 检测设备等多款半导体测量设备。技术演进路径从膜厚检测的 EFILM 200UF 到 EFILM 300IM，再到 EFILM 300SS/DS，再到 OCD 测量的 EPROFILE 300FD，功能更加丰富，精密度逐渐提高。在电子光学 SEM 检测方向，公司已于 2020 年底交付首台电子束检测设备、2021 年交付首台 OCD 设备。公司核心产品已覆盖 2xnm 及以上制程，先进制程的膜厚产品、OCD 设备以及电子束缺陷复查设备已取得头部客户订单。截至 2023 年中报披露日，精测电子半导体领域在手订单约 13.65 亿元。

中科飞测量测检测营收体量国内领先，产品线持续丰富。公司目前产品主要包括无图形晶圆缺陷检测设备系列、图形晶圆缺陷检测设备系列、三维形貌量测设备系列。检测设备代表客户包括中芯国际、士兰集科、长电科技、华天科技等，量测设备主要客户有长江存储、长电科技、华天科技、蓝思科技等。2022 年公司检测设备共销售 82 台，量测设备销售 56 台。

睿励科学成立于 2005 年，专注于半导体量测检测设备。睿励的主营产品为光学膜厚测量设备和光学缺陷检测设备。2021 年 4 月，睿励首台自主研发的高精度光学缺陷检测设备（WSD200）装箱出货。2021 年 6 月，公司自主研发的第三代光学膜厚测量设备 TFX4000i 交付设备。

风险提示：国产替代进展不及预期、全球贸易纷争影响、行业竞争加剧。

正文目录

1 过程控制：量测、检测是半导体制造良率的重要保障	5
1.1 量测	8
1.2 检测	16
2 量测检测持续升级，是前道设备主赛道之一	21
3 KLA：全球量测检测龙头企业	26
4 精测电子、睿励科学仪器、中科飞测等公司布局量测检测赛道	29
5 风险提示	34

图表目录

图表 1: 半导体量测与检测分类	6
图表 2: 过程控制 (检测、测量) 和 ATE (测试) 2021 年市场空间	6
图表 3: 检测缺陷&量测尺寸	7
图表 4: 光学检测技术、电子束检测技术和 X 光量测技术特征比较	7
图表 5: 2021 年过程控制分类及市场规模 (亿美元)	8
图表 6: 套刻误差测量	8
图表 7: 常用的套刻误差测量目标图形	8
图表 8: KLA Archer 系列套刻测量系统	9
图表 9: ASML YiledStar 系列套刻测量设备	9
图表 10: 薄膜测量方法	10
图表 11: 四探针法	10
图表 12: 涡流法	10
图表 13: 椭圆偏振法原理图	11
图表 14: 依次为 Filmetrics R50、Aleris、和 SpectraFilm	11
图表 15: 光学散射测量基本流程	12
图表 16: 不同光学散射测量装置示意图 注: (a) (b) 角分辨散射仪; (c) (d) 光谱散射仪	13
图表 17: 基于非线性回归和库匹配方法的参数提取流程	14
图表 18: KLA SpectraShape 系列 CD 和形状量测系统	14
图表 19: 电子束与物质相互作用产生的信息	15
图表 20: 扫描电镜原理图	15
图表 21: SEM 图像	15
图表 22: 将 SEM 图像做成 Line Profile 计算出测定值	15
图表 23: 明场和暗场光学图形晶圆缺陷检测设备	16
图表 24: KLA 39xx、29xx 系列图案晶圆缺陷检测系统	17
图表 25: KLA Puma 系列图形晶圆缺陷检测系统	17
图表 26: 缺陷检测方式	18
图表 27: ASML HMI 系列电子束图形晶圆缺陷检测系统	19
图表 28: 无图形晶圆缺陷检测过程	19
图表 29: 典型暗场散射示意图和不同缺陷散射示意图	20
图表 30: 中科飞测与科磊无图形设备性能对比	20
图表 31: KLA Candela 8720	21
图表 32: Hitachi LS	21
图表 33: 全球半导体设备分环节市场规模 (亿美金)	22
图表 34: 全球晶圆制造设备分应用市场规模 (十亿美金)	22
图表 35: 中国大陆设备市场重要性日益提升 (左轴: 十亿美金)	22
图表 36: 半导体设备市场增速周期性	23
图表 37: 全球过程控制市场 (亿美金)	23
图表 38: 2020 年半导体检测和量测设备市场各类设备销售额及占比	24
图表 39: 2021 年过程控制细分市场 (百万美元)	24
图表 40: 2020 年全球半导体检测和量测设备市场分地区情况	25
图表 41: 中国大陆半导体检测和量测设备市场规模 (亿美金)	25
图表 42: 2020 年中国半导体量测检测设备市场格局	25
图表 43: 2021 年过程控制市场格局 (亿美金)	26
图表 44: KLA 营收及增速 (亿美金)	27
图表 45: KLA 分地域营收 (亿美金)	27

图表 46: KLA 分产品营收 (亿美金)	27
图表 47: KLA FY2023 产品结构	27
图表 48: KLA 盈利水平	27
图表 49: KLA 研发费用情况 (亿美金)	27
图表 50: 科磊产品系列	28
图表 51: KLA 产品线迭代	28
图表 52: KLA 远期增长目标	29
图表 53: 公司电子束检测设备 eView™ 全自动晶圆缺陷复查设备	30
图表 54: 中科飞测发展历程	31
图表 55: 营业收入及增速 (亿元)	32
图表 56: 归母净利润 (亿元)	32
图表 57: 检测设备和量测设备营收 (亿元)	32
图表 58: 检测设备和量测设备毛利率	32
图表 59: 中科飞测主要产品销售情况 (台, 万元)	33
图表 60: 中科飞测研发费用情况 (万元)	34
图表 61: 中科飞测 IPO 募投项目概况 (万元)	34

1 过程控制：量测、检测是半导体制造良率的重要保障

过程控制：半导体晶圆制造过程中不同工艺之后，往往需要进行尺寸测量、缺陷检测等，用于工艺控制、良率管理，要求快速、准确。尺寸测量、缺陷检测等应用于每道制程工艺之后。IC 量测设备用于工艺控制、良率管理，检测要求快速、准确、非破坏。IC 量测在发展过程中，在尺寸微缩、复杂 3D、新型材料方面面临各类技术难点，面对诸如存储、CIS、化合物半导体等不同半导体检测等多种需求不断升级。IC 量测设备的技术类别包括探针显微镜、扫描/透射电镜、光学显微镜、椭偏/散射仪等，技术发展方向包括延续现有的非破坏测量技术，电镜方面推进并行电子束技术，散射仪向 EUV、X 射线延伸以缩小波长，并联合多种测量手段和机器学习实现混合测量等。

过程控制设备包括应用于工艺过程中的测量类设备(Metrology)和缺陷(含颗粒)检查类设备(Inspection)。芯片生产过程中，在线工艺检测设备要对经过不同工艺后的晶圆进行无损的定量测量和检查，从而保证工艺的关键物理参数(如薄膜厚度、线宽、沟/孔深度、侧壁角等)满足要求，同时发现可能出现的缺陷并对其进行分类，剔除不合格的晶圆，避免后续工艺浪费。工艺检测设备的另一个作用是协助工艺开发和试生产时优化设备运行参数和光掩模的设计，优化整个工艺流程，缩短开发时间，提升成品率并实现量产。

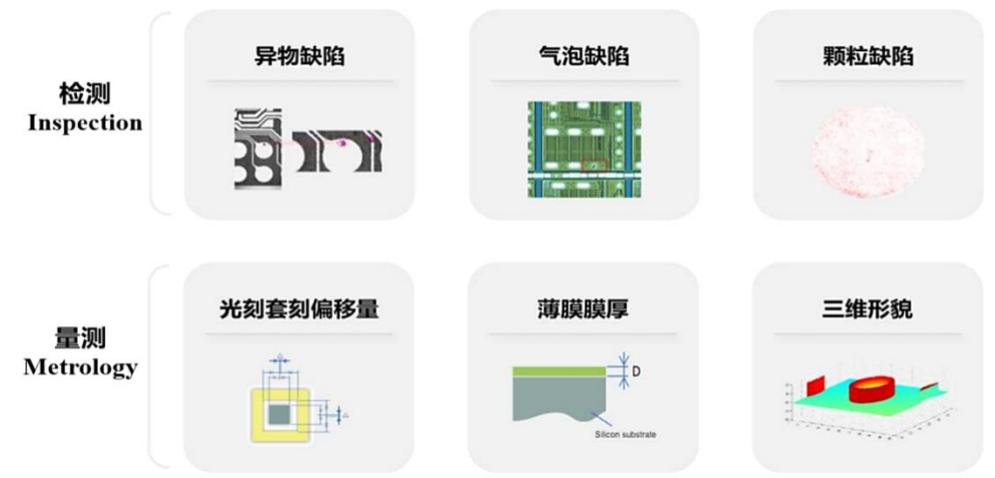
半导体量测 Metrology 主要包括：

- 1) 套刻对准的偏差测量；
- 2) 薄膜材料的厚度测量；
- 3) 晶圆在光刻胶曝光显影后、刻蚀后和 CMP 工艺后的关键尺寸(CD)测量；
- 4) 其他：如晶圆厚度，弯曲翘曲(Bow/Warp)，1D/2D 应力 stress，晶圆形貌，四点探针测电阻 RS，XPS 测注入含量等，AFM(原子力显微镜)/Metal plus(超声波)测台阶高度(Step Height)等。

半导体检测 Inspection 主要包括：

- 1) 无图形缺陷检测，包括颗粒(particle)、残留物(residue)、刮伤(scratch)、警惕原生凹坑(COP)等；
- 2) 有图像缺陷检测，包括断线(break)、线边缺陷(bite)、桥接(bridge)、线形变化(Deformation)等；
- 3) 掩模版缺陷检测，包括颗粒等；
- 4) 缺陷复检，针对检测扫出的缺陷(位置，大小，种类)，用光学显微镜或扫描电镜确认其存在。

图表1:半导体量测与检测分类



资料来源：中科飞测招股书，方正证券研究所

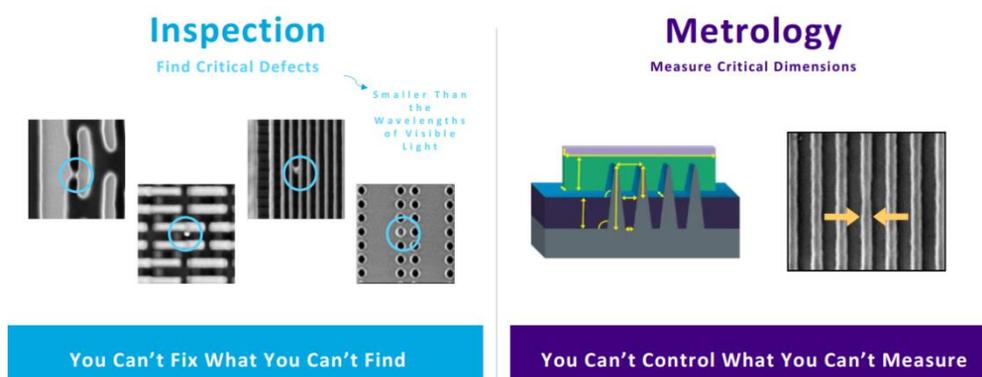
中道检测面向先进封装环节，主要是芯片倒装 (Flip-Chip)、圆片级封装 (Wafer-Level Package) 和硅通孔 (Through Silicon Via, TSV) 等先进工艺要求对凸点 (Bump)、通孔 (TSV)、铜柱 (Copper-Pillar) 等的缺损/异物残留及其形状、间距、高度的一致性，以及再布线层 (Redisriburion Layer, RDL) 进行无接触定量检查和测量。后道测试则主要是利用电学对芯片进行功能和电参数测试，主要包括晶圆测试和成品测试两个环节。

图表2:过程控制 (检测、测量) 和 ATE (测试) 2021 年市场空间

	过程控制	ATE
设计		晶圆允收测试 (Wafer Acceptable Test) 晶圆测试 (Chip Probe) 终检 (Final Test) ——测试机 (49亿美元)、探针台 (12亿美元)、分选机 (14亿美元)
制造	量测 Metrology ——量测设备: 全球44亿美元 检测 Inspection ——检测设备: 全球58亿美元	晶圆允收测试 晶圆测试 ——测试机 (49亿美元)、分选机 (14亿美元)
封测	先进封装环节, 针对重布线结构、凸点与硅通孔等晶圆制造环节的量测检测	晶圆测试 ——测试机 (49亿美元)、分选机 (14亿美元)
标的	海外厂商: 科磊、应用材料、日立高新 国内厂商: 中科飞测、精测电子、上海睿励、赛腾股份、东方晶源	海外厂商: 爱德万、泰瑞达、东京精密、东京电子 国内厂商: 长川科技、华峰测控

资料来源：Gartner，华经产业研究院，方正证券研究所

图表3:检测缺陷&量测尺寸



资料来源: KLA, 方正证券研究所

根据制造过程中采用的不同材料和结构,工艺检测设备分别采用包括宽波段光谱(紫外到红外)、电子束、激光和X射线等多种不同技术。性能指标方面,随着工艺不断向细微线宽发展,器件形态结构也由二维平面结构向三维结构转变,因此对检测设备的灵敏度、可适用性、稳定性及吞吐量等都有更高要求。

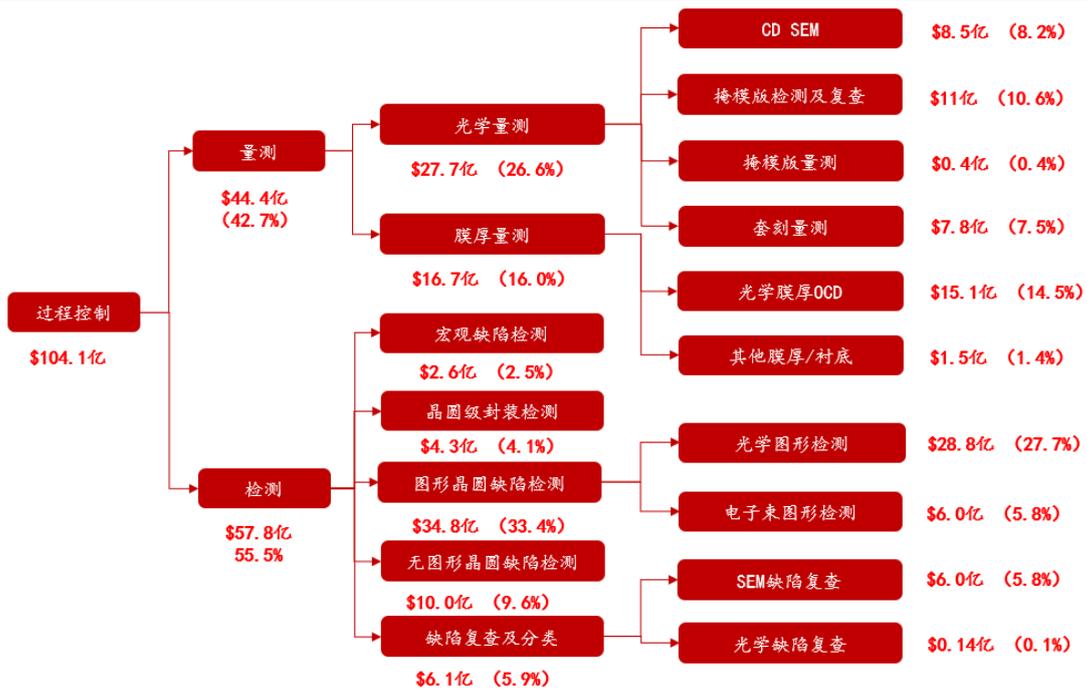
图表4:光学检测技术、电子束检测技术和 X 光量测技术特征比较

	光学检测技术	电子束检测技术	X 光量测技术
主要特征	基于光学原理,通过对光信号进行计算分析以获得检测结果,具有 速度快 、精度高,无损伤的特点	通过聚焦电子束扫描样品表面产生样品图像以获得检测结果,具有 精度高 、速度较慢的特点,通常用于部分线下抽样测量部分关键区域	基于 X 光的穿透力强及无损伤特性进行 特定场景的测量
先进工艺应用情况	应用于 28nm 及以下的全部先进制程。光学检测技术因其特点,目前广泛应用于晶圆制造环节	应用于 28nm 及以下全部先进制程。电子束检测技术因其具有精度高但速度慢特点,故基于电子束检测技术的设备部分应用于研发环节,部分应用在部分关键区域抽检或尺寸量测等生产环节,例如纳米级尺度缺陷的复查、部分关键区域的表面尺度量测及部分关键区域抽检等	应用于 28nm 及以下的全部先进制程,鉴于 X 光具有穿透性强、无损伤特性,主要应用于特定的场景,如检测特定金属成分
未来发展方向	通过 提高光学分辨率 ,并结合图像信号处理算法,进一步提高检测精度	提升检测速度,提高吞吐量 ,由单一电子束向多通道电子束技术发展	基于 X 光的穿透性特性, 扩大应用场景范围

资料来源: 中科飞测招股书, 方正证券研究所

应用光学检测技术的设备可以相对较好的实现有高精度和高速度的均衡,并能够满足其他技术所不能实现的功能,如三维形貌测量、光刻套刻测量和多层膜厚测量等应用,因此采用占多数。根据 VLSI Research 和 QY Research, 2020 年全球半导体检测和量测设备市场中,光学检测技术、电子束检测技术及 X 光量测技术的设备市场份额占比分别为 75.2%、18.7%及 2.2%。

图表5: 2021 年过程控制分类及市场规模 (亿美元)



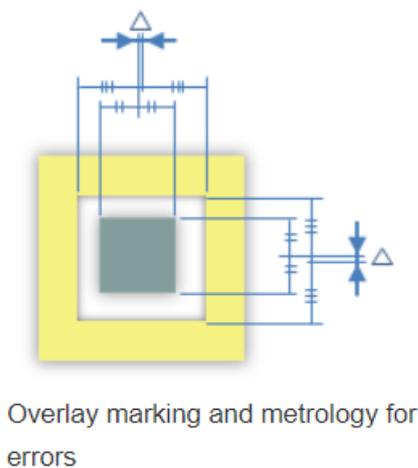
资料来源: Gartner, 方正证券研究所

1.1 量测

套刻精度测量设备: 用于测量层与层之间的套刻误差, 也就是两层图形结构中心的平面距离, 主要测量系统有 3 种, 光学显微成像 (IBO) 系统、光学衍射 (DBO) 系统和扫描电镜 (SEM-OL) 系统。**光学显微成像系统**最常用, 通过成像的方式计算套刻误差; **光学衍射系统**采用非成像的方式, 通过光强传感器测量衍射射束强度确定套刻误差, 使用的光学元件较少, 常用于先进的光刻工艺控制中; **扫描电镜系统**主要用于刻蚀后的最终套刻误差测量, 测量速度较慢。

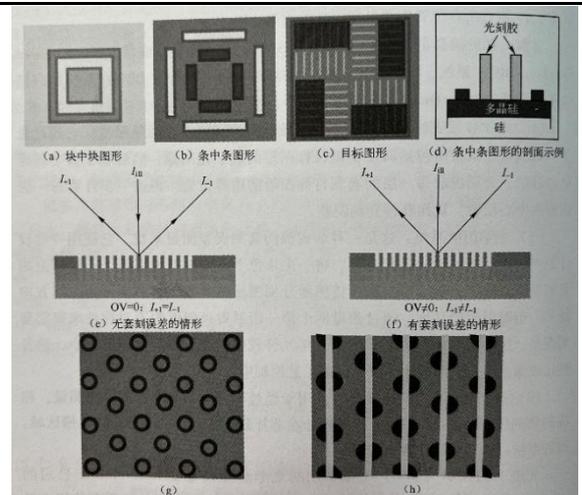
套刻精度测量的对象是套刻目标图形, 这些图形通常制作在划片槽区域, 用于成像套刻测量系统的目标图形通常有 (a) 块中块、(b) 条中条和 (c) 目标 (AIM) 图形。

图表6: 套刻误差测量



资料来源: Hitachi High-Tech 官网, 方正证券研究所

图表7: 常用的套刻误差测量目标图形



资料来源: 《集成电路产业全书》, 启阅半导体, 方正证券研究所

常见的光学套刻设备是 KLA 的 Archer 系列和 ASML 的 YieldStar 系列, Archer 系列使用 IBO 和 DBO 测量技术, 可测量多种套刻目标图形; YieldStar 使用 DBO 测量技术; Hitachi 的 CD-SEM CV 系列使用高压加速扫描电子显微镜 (SEM-OL)。

图表8:KLA Archer 系列套刻测量系统

Archer™

套刻量测系统

Archer™750套刻量测系统提供对产品套刻误差的准确反馈, 能实现快速的技术升级, 稳定生产先进的存储器和逻辑器件产品。在制造工艺不断变化的情况下, 具有10nm分辨率的波长可调性提供了准确而强大的套刻误差测量。量产应用常见于散射量测的系统, Archer 750成像技术套刻系统支持更高采样率对光刻机的高阶校正, 同时提供高产量便于进行在线监测。先进的算法和新颖的rAIM®套刻目标设计可改善目标与器件套刻误差之间的相关性, 从而帮助光刻人员准确跟踪器件套刻的状况。

主要应用
产品在线套刻控制, 在线监控, 光刻机认证, 图案控制

相关产品

Archer 700: 基于成像技术的套刻量测系统, 具备可调节光源, 可对≤7nm逻辑和高级存储器设计节点进行精确且稳定的套刻误差测量。

Archer 600: 基于图像的套刻量测系统, 用于高级存储器和≤10nm逻辑器件。

Archer 500LCM: 基于双成像和散射技术的套刻量测模块, 适用于2Xnm / 1Xnm设计节点上的一系列制程层。

Archer 500: 用于2Xnm / 1Xnm设计节点的基于成像的套刻量测系统。

ATL: 基于散射测量的覆盖量测系统, 适用于≤7nm逻辑和高级存储器设计节点。

资料来源: KLA 官网, 方正证券研究所

图表9:ASML YiledStar 系列套刻测量设备

YieldStar optical metrology

Our YieldStar optical metrology solutions for the semiconductor industry can quickly and accurately measure the quality of patterns on a wafer.



YieldStar 1385
Fast accurate optical metrology of in-device overlay for post-etch process monitoring



YieldStar 1375F
Fast, accurate in-product overlay and CD metrology for after-etch process monitoring.



YieldStar 500
The YieldStar 500 is a stand-alone optical wafer metrology system for measuring pre-etch overlay leveraging ASML's innovative TWINSCAN stage.



YieldStar 380G
The YieldStar 380G is the successor of the YieldStar 375F, providing even faster and more accurate after-develop overlay and focus measurements.



YieldStar 375F
Fast and accurate pre-etch overlay and focus measurements, whatever your process conditions.

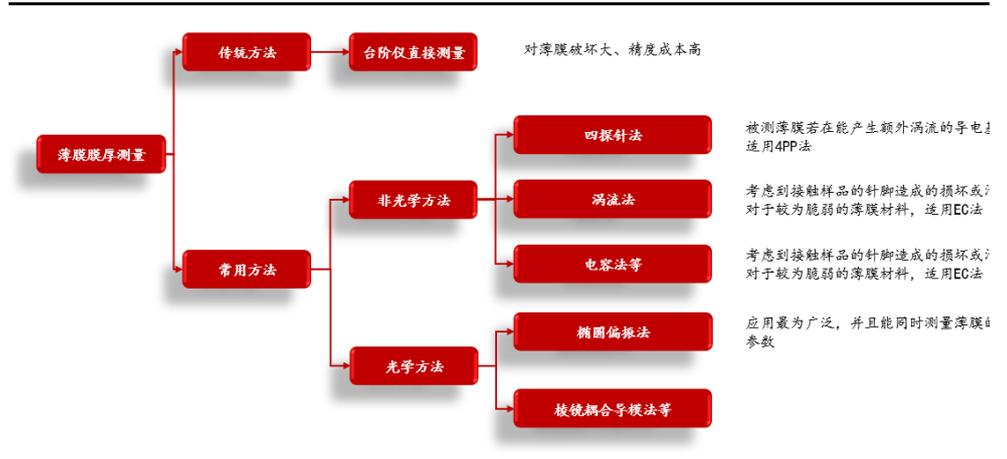
Diffraction

YieldStar is a diffraction-based optical metrology system which applies the simple fact that an object's shape determines how light reflects from it. For example, shine a beam of light onto a repeating pattern of lines on a wafer, and you can easily predict what the resulting pattern of scattered light should look like. If you collect the scattered light using a high-resolution digital camera, you can quickly determine how well the prediction matches reality and thus how well the pattern of lines has been printed.

资料来源: ASML 官网, 方正证券研究所

薄膜厚度测量：晶圆在进行多次各种材质的薄膜沉积后，需要对薄膜厚度和其他参数性质进行准确判断，以确保产品满足性能设计要求。测量薄膜厚度的方法很多，传统的方法主要是通过台阶仪直接测量，但是这种方法对薄膜本身破坏较大，同时测量结果受仪器精度的影响较大，因此精确测量成本较高。目前应用较普遍的方法主要有非光学方法和光学方法两大类，非光学方法只能用于薄膜厚度的测量，主要包括**四探针法**、**涡流法**、**电容法**、**电磁等**，其中四探针法和涡流法为较多应用的方法；利用光学原理测量薄膜厚度的方法主要有**棱镜耦合导模法**、**光切法**、**多光束干涉法**、**分光光度测量法**、**椭圆偏振法等**。其中**椭圆偏振法应用最为广泛**，并且能同时测量薄膜的光学参数。

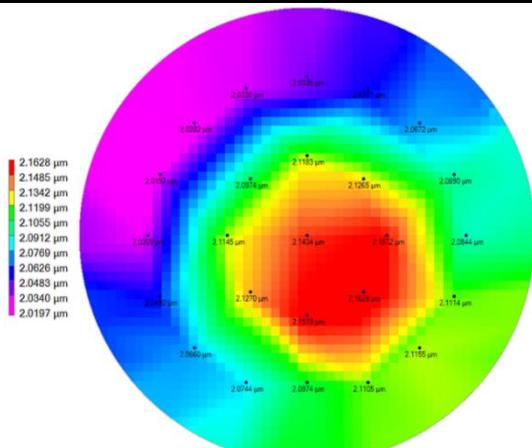
图表10: 薄膜测量方法



资料来源：《基于椭圆偏振法的薄膜厚度测量》，方正证券研究所

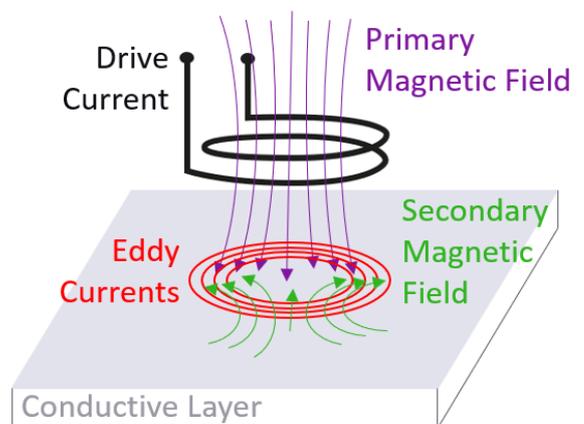
四探针法 (4PP) 是指用四个等距的金属探针接触薄膜材料表面，外围两探针通直流电流，中间两根探针接电位差计测量电压降，基于所测的电压和电流得出具体位置的电阻，薄膜厚度由薄膜材料电阻率除以所得电阻得到，一般通过软件计算得出。**涡流法 (EC)** 是指通过线圈的时变电流在导电层中产生时变的涡流。这些时变的涡流反过来产生一个磁场，改变驱动线圈的阻抗，该阻抗与薄膜材料的电阻成反比，同样通过换算可以得出薄膜厚度参数。

图表11: 四探针法



资料来源：KLA，方正证券研究所

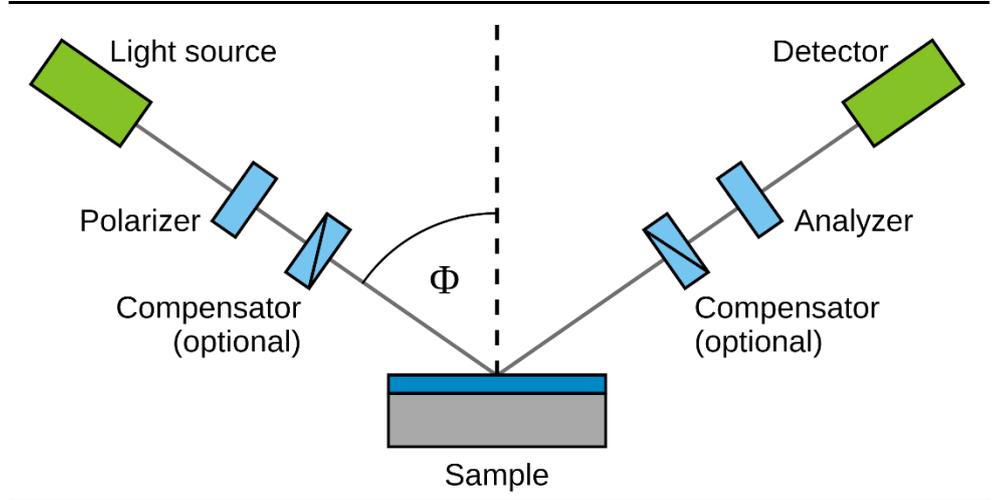
图表12: 涡流法



资料来源：KLA，方正证券研究所

椭圆偏振法基本原理为：将一束椭圆偏振光按照一定的入射角照射到样品上，已知入射光的偏振态，可根据偏振态的改变来确定薄膜材料的具体结构，得到其厚度和光学参数信息（如复折射率、厚度或复介电常数等）。

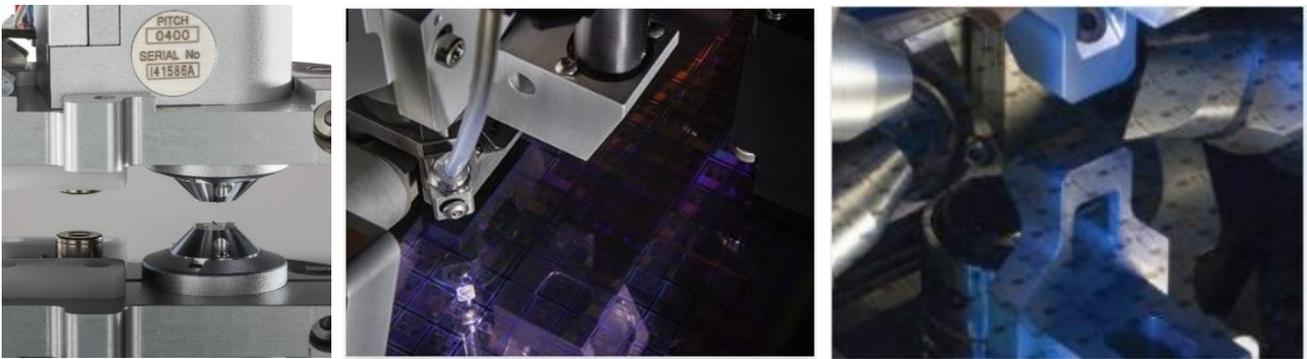
图表13:椭圆偏振法原理图



资料来源: *Wikimedia*, 方正证券研究所

目前非光学测量薄膜膜厚产品主要有科磊的 Filmetrics R50 系列，光学测量薄膜膜厚产品主要有包括科磊的 Aleris 系列和 SpectraFilm 系列。国内光学测量薄膜膜厚产品有上海精测的 EFILM 系列。

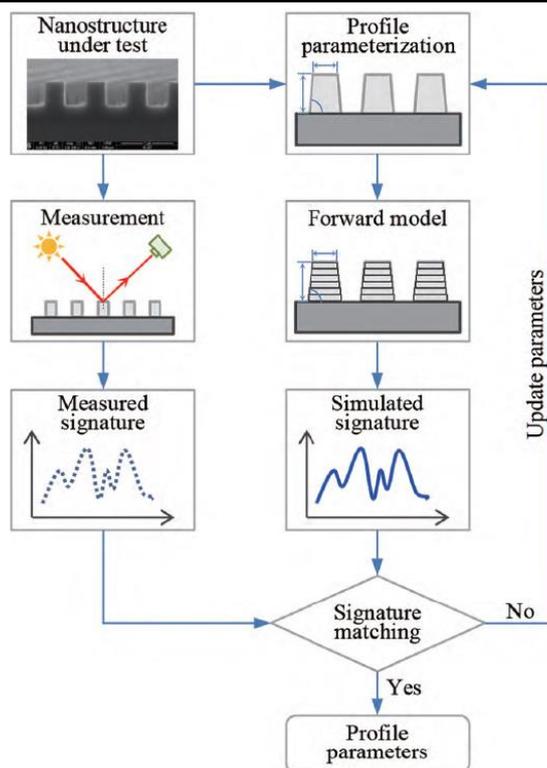
图表14:依次为 Filmetrics R50、Aleris、和 SpectraFilm



资料来源: *KLA*, 方正证券研究所

关键尺寸测量设备：主要用于芯片生产过程中的关键尺寸（CD）、高度、侧壁角的在线测量和关键设备（光刻机、涂胶显影设备等）的性能监控。其中关键尺寸测量主要用于显影后检查（ADI: After Development Inspection）和刻蚀后检查（AEI: After Etch Inspection）。目前主要依靠光学散射仪的非成像式测量技术，光学散射仪又称为光学关键尺寸测量仪（OCD），其原理是通过测量样品的散射信息，求解逆散射问题来重构待测样品的三维形貌。

图表15: 光学散射测量基本流程

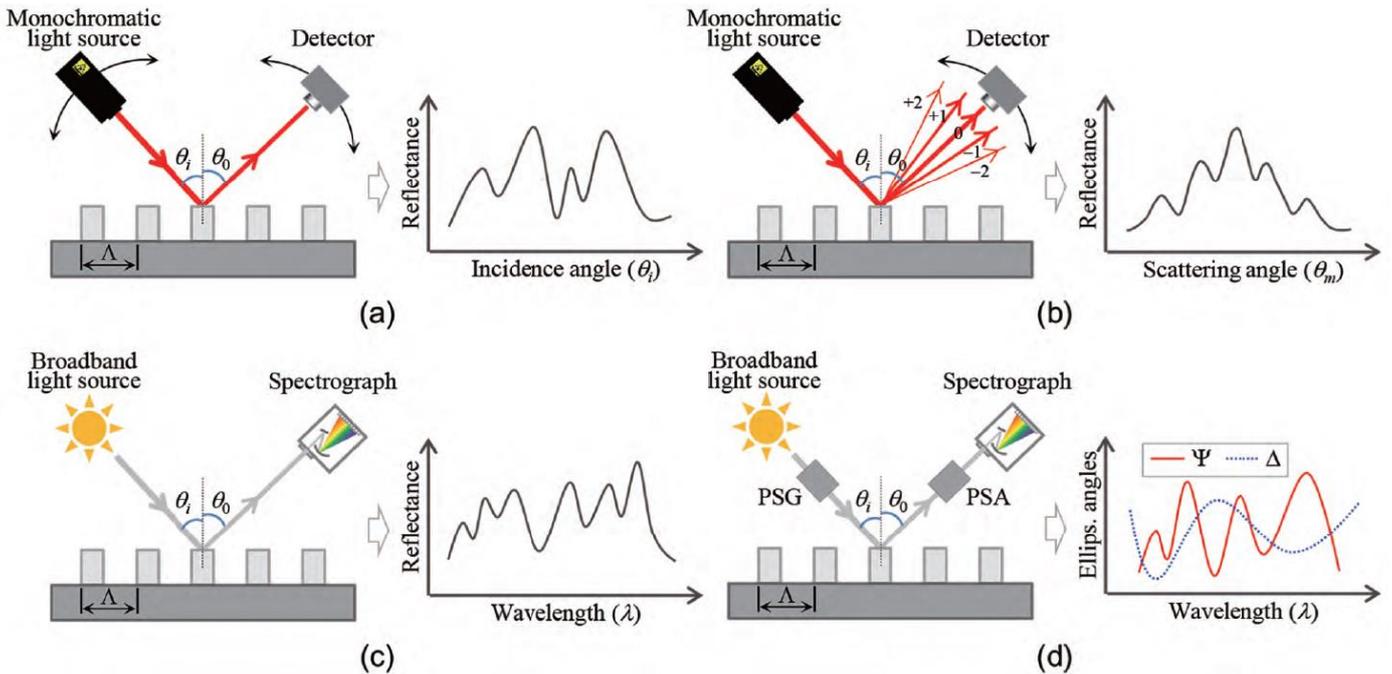


资料来源：《集成电路制造在线光学测量检测技术：现状、挑战与发展趋势》，方正证券研究所

OCD 测量的基本流程主要包括正问题和反问题两个重要步骤，正问题是通过一定的散射测量装置获得待测样品结构的散射信息，需要解决的是仪器测量问题，反问题是需要从测量得到的散射数据中提取待测样品的三维形貌参数，需要解决的是构建光与待测样品结构间相互作用的正向散射模型并选择合适的求解算法。

测量仪器：目前主要使用的光学散射装置可以分为角分辨散射仪和光谱散射仪。角分辨散射仪的优点在于由于采用单一波长，在数据分析时不需要对样品材料的介电函数进行假设；此外可以相对容易扩展到较短的波长范围，如 EUV 和 X 射线。其劣势在于其中包含移动组件，限制了测量速度。光谱散射仪的优势在于测量速度非常快，目前常用的一种基于光谱椭圆偏仪（SE）的散射仪，其可以达到很高的垂直分辨率，相对于角分辨散射仪，可以获得更多的测量信息。其劣势在于，为了精确测量，尤其是在椭圆偏散射测量中，需要精确的校准，并需要预先确定样品材料在较宽光谱范围内的光学常数。实际使用中，为了提高测量灵敏度，通常将两种散射测量方式相结合。

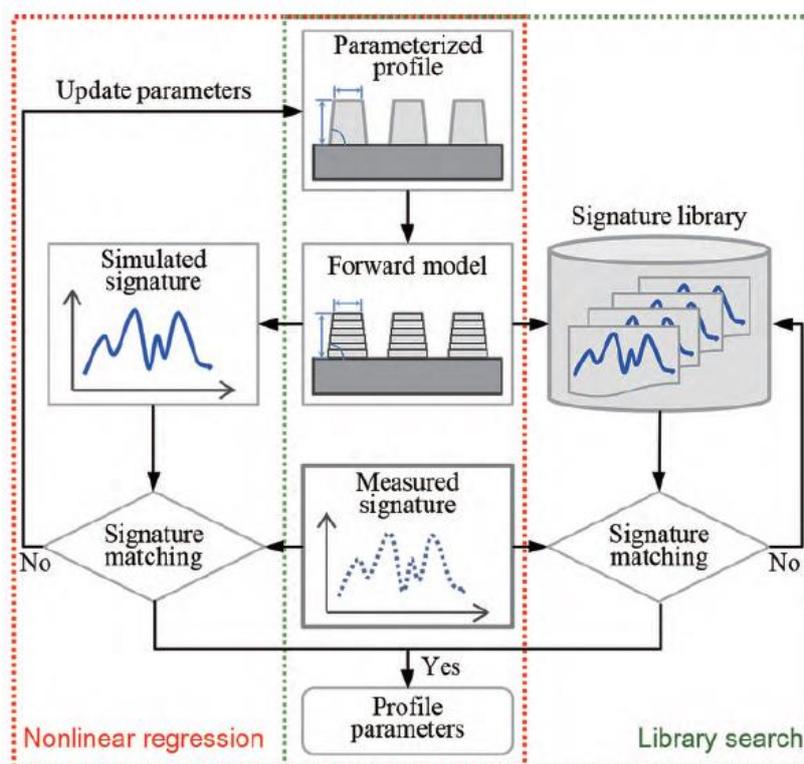
图表16: 不同光学散射测量装置示意图 注: (a) (b) 角分辨散射仪; (c) (d) 光谱散射仪



资料来源: 《集成电路制造在线光学测量检测技术: 现状、挑战与发展趋势》, 方正证券研究所

构建正向散射模型并选择求解算法: 在光学散射测量中, 从散射测量数据中提取出待测样品三维形貌参数的本质上是逆散射问题的求解过程。目前主要有两种求解方法, 分别是库匹配法和非线性回归法。**库匹配**的参数提取过程中, 是事先建立散射仿真数据库, 然后将测量数据跟仿真数据比较, 得到最佳匹配测试数据的仿真数据所对应的待测参数值。**非线性回归法**是不断调整输入参数, 使得测量数据与正向散射模型计算出来的仿真数据差异降至允许范围内。库匹配法的优势在于可以快速提取待测参数, 但是需要事先建立并存储庞大的仿真数据库, 且准确度受数据库网格间距的限制。非线性回归法的优势是不需要建立仿真数据库, 且可以得到比较准确的结果, 但是由于每次迭代都要调用正向散射模型来计算仿真数据, 因此非常耗时。

图表17: 基于非线性回归和库匹配方法的参数提取流程



资料来源：《集成电路制造在线光学测量检测技术：现状、挑战与发展趋势》，方正证券研究所

图表18: KLA SpectraShape 系列 CD 和形状量测系统

SpectraShape™
 光学临界尺寸 (CD) 和形状量测系统

SpectraShape™11k 尺寸量测系统用于全面表征和监控 finFET 的关键尺寸 (CD) 及其三维形状、垂直堆叠的 NAND 和 DRAM 结构以及前沿设计节点上集成电路的其他复杂功能。利用光学技术和专利算法的先进性突破，SpectraShape 11k 可以识别关键器件的参数 (关键尺寸、高k和金属栅极凹槽、侧壁角度、光刻胶高度、硬掩模高度、间距偏移) 的细微变化。SpectraShape 11k 配备了经过改进的工作台和全新的测量模块，可实现高产量运转，能够在线快速识别制程中的问题，从而帮助晶圆厂加快产量提升并实现稳定的生产。

主要应用
 在线制程监测，图形控制，制程窗口扩展，制程窗口控制，高级制程控制 (APC)，工程分析

相关产品

AcuShape®：先进的建模软件，解析来自 SpectraShape 系统的信号，从而有助于加快构建强大的 3D 形状模型的过程。

SpectraShape 10K：光学 CD 和形状量测系统，可测量 1Xnm 逻辑和高级存储 IC 器件的复杂功能。

SpectraShape 9000：光学 CD 和形状量测系统，可以测量 20nm 及以下设计节点的 IC 器件的复杂功能。

SpectraShape 8810/8660：光学 CD 测量和形状测量系统，可对 32nm 及以下设计节点的 IC 器件的关键结构参数进行制程监控。

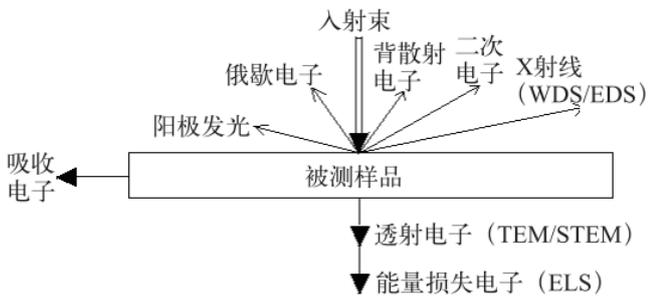
[显示较少 ^](#)

资料来源：KLA 官网，方正证券研究所

除了 OCD 之外，原子力显微镜 (AFM) 和扫描电镜 (SEM) 也是微纳米线间距尺寸测量类仪器应用最广泛的两类。二者所获得图像的横向分辨率相近。AFM 得到被测产品表面的形貌结构图像，是真正的三维图像，并能测量样品的三维信息。SEM 只能提供二维图像，但其图像有很大的景深，视野较大。关键尺寸扫描电子显微镜 (CD-SEM) 是具有自动定位并测量线条功能的扫描电镜，广泛用于半导体产线线宽的监控。

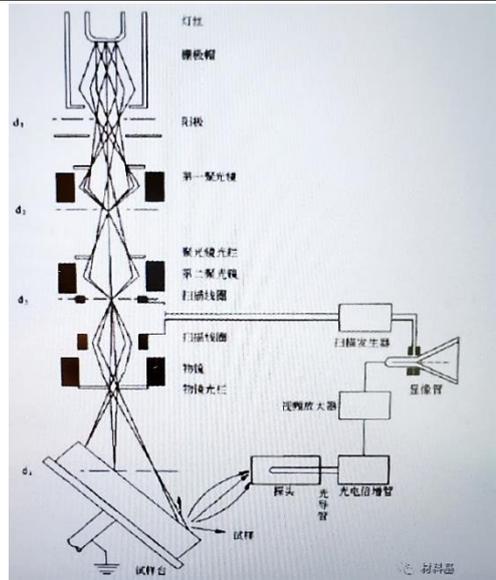
扫描电子显微镜是利用材料表面特征差异，在电子束作用下通过试样不同区域产生不同的亮度差异，从而获得具有一定衬度的图像。成像信号是二次电子、背散射电子或吸收电子，其中二次电子是最主要的成像信号。高能电子束轰击样品表面，激发出样品表面的各种物理信号，再利用不同的信号探测器接受物理信号转换成图像信息。

图表19: 电子束与物质相互作用产生的信息



资料来源: 《SEM在半导体工艺研究中的应用实例》，方正证券研究所

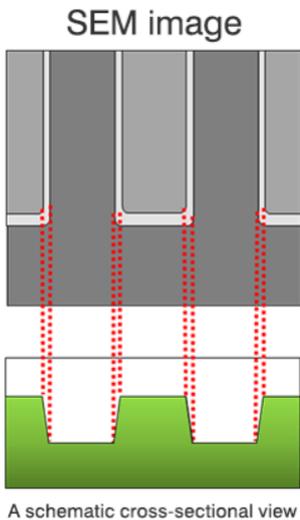
图表20: 扫描电镜原理图



资料来源: 钰思百检测，方正证券研究所

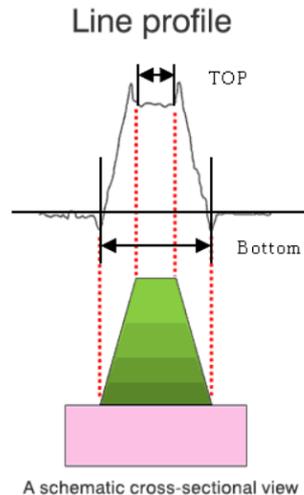
算法: CD-SEM 获得测量图形的影像后，CD-SEM 进行测量并将数据上传。CD-SEM 在测量算法上需要不断优化和提高，以使测量结果真实准确反映样品的性能。例如，推出新的测量方式，包括边缘粗糙度 (Edge Roughness)、间隙 (Gap)、扭曲度 (Wiggling)、叠对 (Overlay)、图形重心 (Center Gravity) 等，此外还需要不断提高测量可靠性，以及对产品工艺波动的敏感度。

图表21: SEM 图像



资料来源: Hitachi High-Tech 官网，方正证券研究所

图表22: 将 SEM 图像做成 Line Profile 计算出测定值



资料来源: Hitachi High-Tech 官网，方正证券研究所

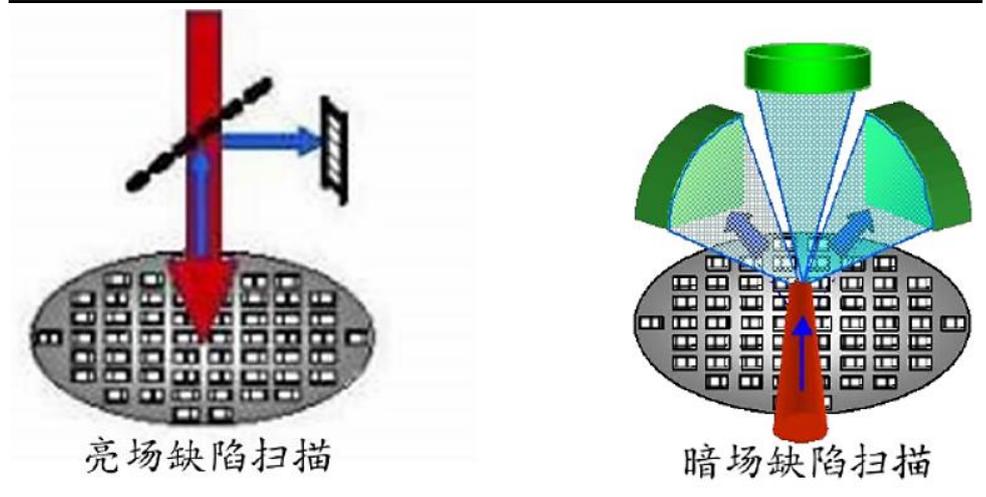
1.2 检测

图形晶圆缺陷检测：光学图形晶圆缺陷检测设备是通过高精度光学检测技术，对晶圆上的缺陷和污染进行检测和识别，向晶圆厂提供不同生产节点中晶圆的产品质量问题，并确认工艺设备的运行情况是否正常，从而提高良率，节约成本。光学检测技术是通过从深紫外到可见光波段的宽光谱照明或者深紫外单波长高功率的激光照明，以高分辨率大成像视野的光学明场或暗场的成像方法，获取晶圆表面电路的图案图像，实时地进行电路图案的对准、降噪和分析，以及缺陷的识别和分类，实现晶圆表面图形缺陷的捕捉。

光学图形晶圆缺陷检测设备分为明场和暗场两大类，两者的主要区别是：**明场**设备是收集晶圆表面垂直反射的光信号来分析缺陷，而**暗场**设备是收集晶圆表面散射回来的光信号来分析。如果晶圆表面是平整没有缺陷的，则明场设备反射回来的光是相对比较完整的入射光，而**暗场**设备的入射光则被全反射，其接收到的是散射光信号。

随着设备行业不断发展，明场与暗场的定义也在变化，现在**明场**一般指的照明光路和采集光路在临近晶圆段共用同一个显微物镜，而**暗场**指照明光路和采集光路在物理空间上是完全分离的。因为垂直反射和散射光信号的差别，明场设备的检测灵敏度比暗场设备的高，但明场设备扫描速度也较慢。

图表23: 明场和暗场光学图形晶圆缺陷检测设备



资料来源：《28 纳米关键工艺缺陷检测与良率提升》，方正证券研究所

明场光学图形圆片缺陷检测设备发展趋势：更亮的光源照明、更宽的光谱范围、更高的呈现分辨率、更大数值孔径、更大成像视野等。传统光源以氙灯或汞放电灯，到目前的激光持续放电灯。光源波长范围为 180~650nm，光学系统以透镜为主，为了在宽光谱波长范围中达到更好的光学分辨率，会加入多层反射镜片降低色差。针对不同类型的晶圆，明场光学图形晶圆缺陷检测可以使用不同的配置，即不同光学参数和系统参数的组合，当前的设备的配置数量超过一万种。

当前市场上的主流设备是 KLA 的 39xx 系列、29xx 系列和应用材料的 UVision 系列。

图表24:KLA 39xx、29xx 系列图案晶圆缺陷检测系统



对此产品感兴趣或有疑问?

联系我们

39xx

超分辨率宽光谱等离子图案晶圆缺陷检测系统

392x系列宽光谱等离子缺陷检测系统可以提供晶圆级别的缺陷检测、良率改进以及对于 $\leq 7\text{nm}$ 设计节点的逻辑及领先内存检测。独具的深紫外 (SR-DUV) 波段光源技术可提供超分辨率,同时配合创新的传感器。3920和3925对独特的缺陷类型具备捕获能力。392x系列还配有先进的pixel+point™和Nano+cell™设计认知算法,能够在对良率关键的图案位置捕获缺陷并对392x系列将检测速度和灵敏度相结合,并支持Discovery at the Speed of Light™ (光速发现) 功能,从而使其产量达到在求,在研发和批量生产中缩短了晶圆级数据的采集时间并能完整表征制程问题。

主要应用

缺陷发现、制程弱点发现、制程调试、EUV光刻制程检查、工程分析、生产线监控、制程窗口发现

相关产品

3900 and 3905: 宽光谱等离子晶圆缺陷检测仪, 针对10nm及以下的逻辑和高级内存器件进行针对影响良率的关键缺陷的

29xx 系列: 针对一系列设计节点和器件类型, 与39xx系列的检测性能相补充的宽光谱等离子晶圆缺陷检测仪。

资料来源: KLA 官网, 方正证券研究所

暗场光学图形晶圆缺陷检测设备发展趋势: 更好的噪声控制、更高的成像分辨率、更高的检测扫描速度等, 光源以激光光源为主, 发光波长为 193nm、266nm、355nm 等, 波长越短, 成像分辨率越高。

当前市场上的主流设备是 KLA 的 Puma 系列和日立 (Hitachi High-Tech) 的 DI 系列。

图表25:KLA Puma 系列图形晶圆缺陷检测系统



对此产品感兴趣或有疑问?

联系我们

Puma™

激光扫描图案晶圆缺陷检测系统

Puma™ 9980激光扫描检测系统增强了多项灵敏度和速度功能, 在提供了足够量产所需产能的同时, 帮助1Xnm的先进逻辑器DRAM及3D NAND内存器件的批量制造捕获关键缺陷(DOI)。作为先进晶圆缺陷检测与复检设备系列的一部分, Puma 99提升对于图案层(e.g., Multi-patterning)缺陷类型的捕获, 为量产提升监控提供了最高产能的解决方案。Puma 9980结合了NanoPoint™这一设计解析功能, 提升了缺陷检测灵敏度、更好的系统性噪音分离, 以及缺陷定位精度的提高, 为最终的检测提供了更多的可操作性。

想了解更多关于适用于Puma的i-PAT®自动化在线芯片筛选解决方案的信息吗? 请点击[这里](#)。

主要应用

产品线监测, 设备监测, 设备认证

相关产品

Puma 9850: 为2X / 1Xnm内存和逻辑器件提供全芯片(Die)区域的高灵敏度偏移监控。

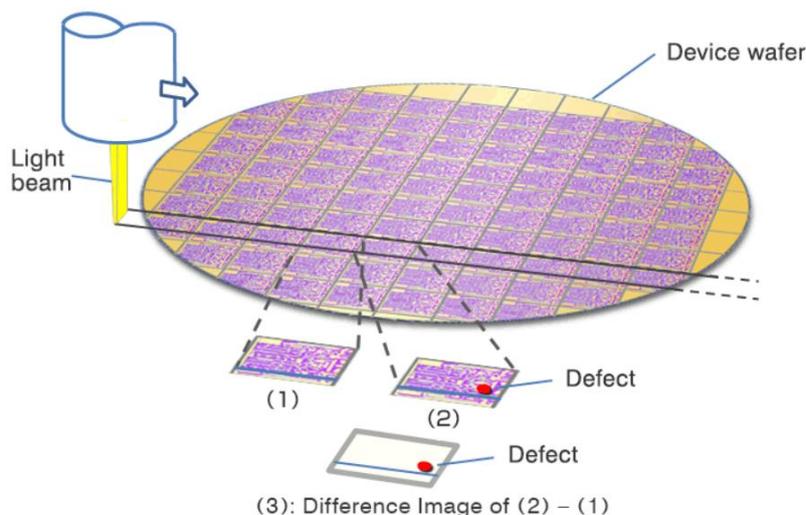
Puma 9650: 为 $\leq 28\text{nm}$ 的内存和逻辑器件提供全芯片(Die)区域的高性能偏移监控。

Puma 9500: 为 $\leq 32\text{nm}$ 的内存和逻辑设备提供高性能的偏移监控。

资料来源: KLA 官网, 方正证券研究所

缺陷检测的常用算法就是将每个芯片的图像与前/后若干芯片的图像进行比较, 找到图像的不同, 得到可能的缺陷图像。此外还有一种方式是将每个芯片的图像和实现取得的黄金芯片 (Golden Die) 的图像对比, 找到图像的不同。明场和暗场光学图形晶圆缺陷检测过程及检测算法类似。

图表26: 缺陷检测方式



资料来源: Hitachi High-Tech, 方正证券研究所

电子束图形晶圆缺陷检测设备。随着半导体技术进步和先进工艺对缺陷容忍度降低，与普通光学明场和暗场晶圆缺陷检测设备相比，电子束图形晶圆缺陷检测设备对图形的物理缺陷（颗粒、突起、桥接、空穴等）具有更高的分辨率，以及特有的通过电压衬度检测隐藏缺陷的能力。由于具有可以通过电压衬度成像检测到光学显微镜下不可见的缺陷等优势，逐步发挥越来越大的作用，成为光学检测设备的有力补充。

电子束图形晶圆缺陷检测设备是一种利用扫描电子显微镜在前道工序中对集成电路晶圆上的刻蚀图形直接进行缺陷检测的工艺检测设备。其核心是扫描电子显微镜，通过聚焦电子束对晶圆表面进行扫描，接受反射回来的二次电子和背散射电子，将其转换成对应的晶圆表面形貌的灰度图像。通过比对晶圆上不同芯片同一位置的图像，或者通过图像和芯片设计图形的直接比对，可以找出刻蚀或设计上的缺陷。其性能强调具有更高的扫描和图像采集速率、更大的扫描场、高速的样品运动定位能力以及在低入射电压下的图像质量。

与光学缺陷检测设备相比，虽然电子束检测设备在性能上占优，但因逐点扫描的方式导致其检测速度太慢，不能满足晶圆厂对吞吐能力的需求，无法大规模替代光学设备承担在线检测任务，目前主要用于先进工艺的开发，工作模式主要为抽样检测。

当前市场上的主流供应商是 ASML（收购汉民微测科技）和应用材料。

图表27: ASML HMI 系列电子束图形晶圆缺陷检测系统

E-beam metrology and inspection

Our HMI e-beam solutions help to locate and analyze individual chip defects amid millions of printed patterns.

 <p>HMI eScan 1100 The first generation multiple e-beam (multibeam) wafer inspection tool for in-line defect inspection applications</p>	 <p>HMI eScan 1000 The world's first multiple e-beam (multibeam) wafer inspection tool.</p>	 <p>HMI eScan 600 Flexible e-beam inspection solution that detects multiple defect types in one system.</p>	 <p>HMI eP5 Our highest resolution e-beam system offers CD metrology and defect detection for chip development and production monitoring.</p>
--	--	---	---

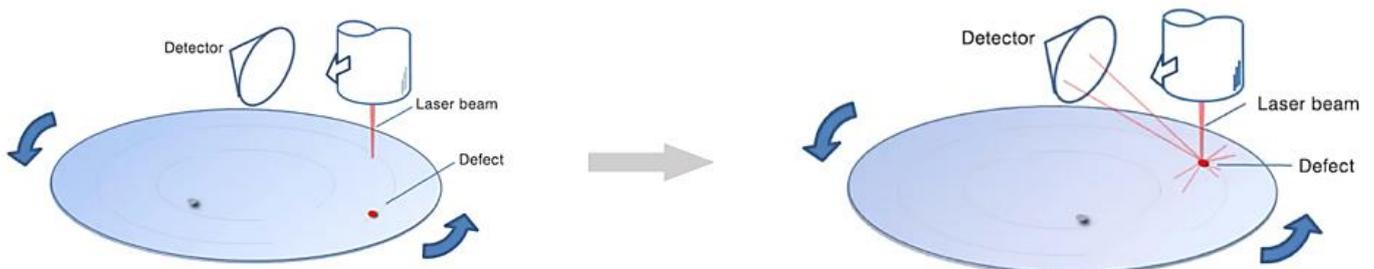
资料来源：ASML 官网，方正证券研究所

无图形晶圆缺陷检测设备：其作用是检测裸晶圆缺陷，为后续图形化检测打下基础。无图形晶圆表面检测系统能够检测的缺陷类型包括颗粒污染、凹坑、水印、划伤、浅坑、外延堆垛、CMP 突起、晶坑、滑移线等，应用领域主要有三类：

- (1) 芯片制造：主要包括来料品质检测、工艺控制、晶圆背面污染检测、设备洁净度监测等；
- (2) 硅片制造：主要包括工艺研发中的缺陷检测、硅片出厂前的终检流程；
- (3) 半导体设备制造：主要包括工艺研发中的缺陷检测、设备的工艺品质评估（颗粒、金属污染）等。

检测过程：无图形晶圆缺陷检测设备能够实现无图形晶圆表面的缺陷计数、识别缺陷的类型和空间分布。通过将单波长光束照明到晶圆表面，利用大采集角度的光学系统，收集在高速移动中的晶圆表面上存在的缺陷散射光信号。通过多维度的光学模式和多通道的信号采集，实时识别晶圆表面缺陷、判别缺陷的种类，并报告缺陷的位置。

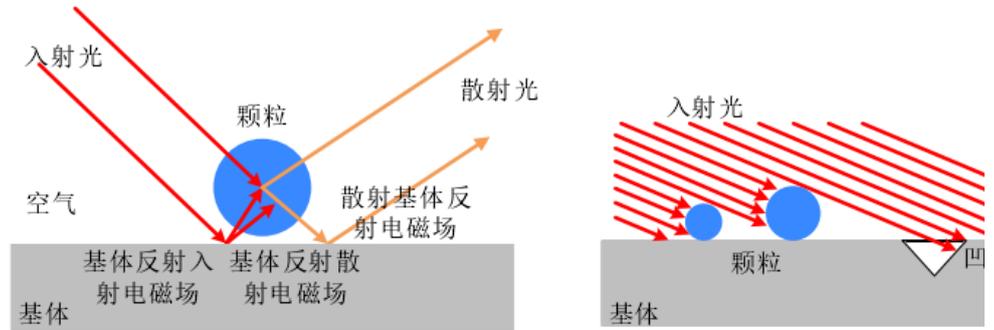
图表28: 无图形晶圆缺陷检测过程



资料来源：Hitachi High-Tech 官网，方正证券研究所

暗场无图形检测：光学缺陷检测中，暗场散射技术通常用于晶圆等精密元件的表面缺陷检测，具有非接触、非破坏、灵敏度高以及检测速度快等诸多优点。同时，相比于明场检测，暗场检测检测速度更快，更适用于高频的三维形貌，并能检测远小于系统分辨率和光学尺寸的缺陷，因此尤其适用于无图形晶圆缺陷检测。

图表29:典型暗场散射示意图和不同缺陷散射示意图



资料来源：《基于暗场散射的无图形晶圆表面缺陷检测系统研制》，方正证券研究所

最小灵敏度和吞吐量是关键指标。最小灵敏度表示设备能够检测到晶圆表面最小颗粒缺陷的直径，该指标的数值越小，表明设备能够检测到晶圆表面更小尺寸的缺陷；吞吐量表示该设备单位时间内完成检测的晶圆数量，该指标的数值越大，表明设备的检测速度越快。

图表30: 中科飞测与科磊无图形设备性能对比

公司	中科飞测	科磊半导体
设备型号	S1	Surfscan SP1TBI
工艺节点	130nm 或以上	130nm 或以上
最小灵敏度	60nm	60nm
吞吐量	100wph (灵敏度 102nm)	未披露
公司	中科飞测	科磊半导体
设备型号	S2	Surfscan SP3
工艺节点	2Xnm 或以上	2Xnm 或以上
最小灵敏度	23nm	23nm
吞吐量	25wph (灵敏度 26nm)	未披露

资料来源：中科飞测招股书，方正证券研究所

全球无图形晶圆检测设备长期由 KLA 和日立主导。KLA 的无图形晶圆缺陷检测设备 Surfscan 具备 DUV 灵敏度和高产能的无图案晶圆表面检测系统，可以检测裸晶圆、平滑和粗糙膜以及精细的光阻和光刻涂层中独特的缺陷类型；HITACHI 的 LS 系列通过暗场检测从缺陷散射的光，同时抑制晶片表面的背景噪声，实现了高灵敏度，被广泛用于控制 10 纳米级半导体制造中的污染，以及交付和来料晶圆质量控制。国产厂家中科飞测的无图形晶圆检测设备 S1 性能已达到国际先进水平，未来有望实现无图形缺陷检测设备的国产替代。

图表31:KLA Candela 8720



资料来源: KLA 官网, 方正证券研究所

图表32:Hitachi LS



资料来源: Hitachi High-Tech 官网, 方正证券研究所

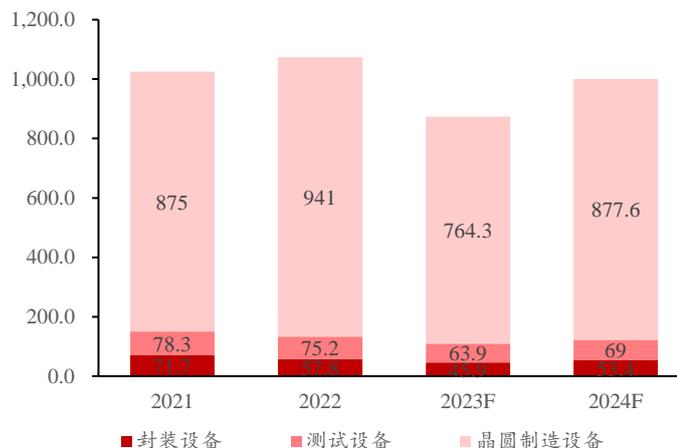
2 量测检测持续升级，是前道设备主赛道之一

2024 年全球晶圆厂设备开支有望恢复至 970 亿美金。根据 SEMI 最新全球半导体设备预测报告，2023 年全球半导体设备销售市场规模预计将从 2022 年创新高的 1074 亿美金同比下降 18.6%至 874 亿美金，随后在 2024 年恢复至 1000 亿美元以上的市场规模。2023 年市场规模的下降主要是芯片需求疲软及消费及移动终端产品库存增加。2024 年市场需求的回暖主要得益于半导体库存修正结束以及高性能计算（HPC）和汽车领域半导体需求增长。

前道设备仍是行业主要反弹驱动力。分设备所处环节来看，2023 年晶圆厂设备市场规模将同比下降 18.8%至 764 亿美金，同时也将是 2024 年总体设备市场重返 1000 亿美金最主要的推动力，预计届时晶圆厂设备市场规模达到 878 亿美金。后道设备市场方面，由于宏观经济环境面临挑战，同时半导体行业整体需求疲软，2023 年半导体测试设备市场预计同比下降 15%至 64 亿美金（2024 年预计同比增长 7.9%），封装设备预计同比下降 20.5%至 46 亿美金（2024 年预计同比增长 16.4%）。

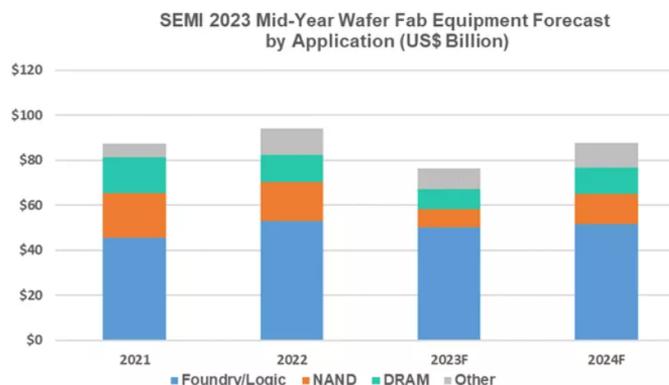
先进制程设备需求较稳定，存储用设备市场波动剧烈。在晶圆制造设备中，分应用领域来看，2023 年代工和逻辑厂所用设备市场预计同比下降 6%至 501 亿美金，仍然是半导体设备行业占比最高的应用领域，2023 年先进制程设备需求维持平稳，成熟节点的设备需求略有下降，预计 2024 年这一领域的投资规模将增长 3%。由于消费和企业市场需求同时疲软，2023 年 DRAM 设备市场预计收缩 28.8%至 88 亿美金，但随着市场逐步修复，SEMI 预计 2024 年这一市场将增长 31%至 116 亿美金。2023 年 NAND 设备市场预计将大幅收缩 51%至 84 亿美金，同时 2024 年亦将同比强势增长 59%至 133 亿美金。

图表33:全球半导体设备分环节市场规模(亿美金)



资料来源: SEMI, 方正证券研究所

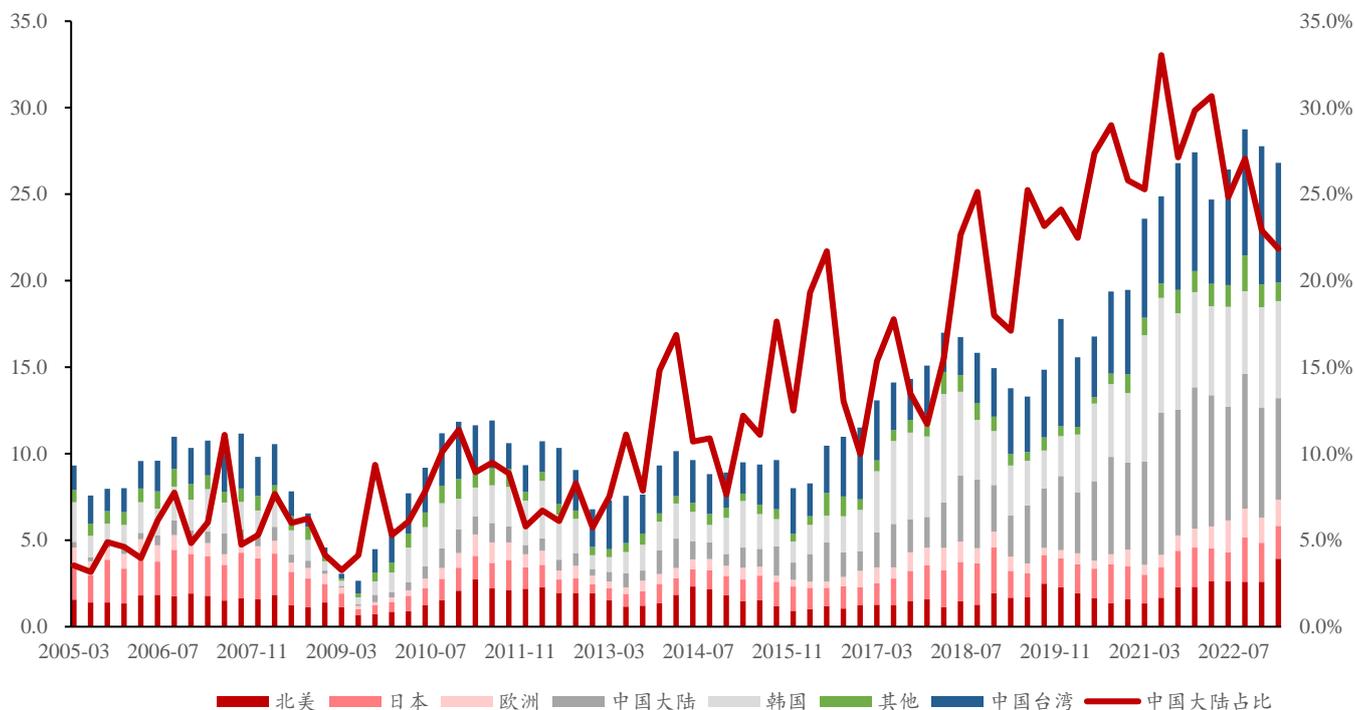
图表34:全球晶圆制造设备分应用市场规模(十亿美金)



资料来源: SEMI, 方正证券研究所

中国大陆引领 2024 年全球半导体设备市场。分地域来看, 中国大陆、中国台湾省、韩国主导全球设备市场。其中 SEMI 预计中国大陆将在 2024 年引领全球市场规模, 同时我们也看到近年来中国大陆在全球半导体设备市场份额呈上升趋势, 大陆设备市场重要性日益提升。

图表35:中国大陆设备市场重要性日益提升(左轴:十亿美金)

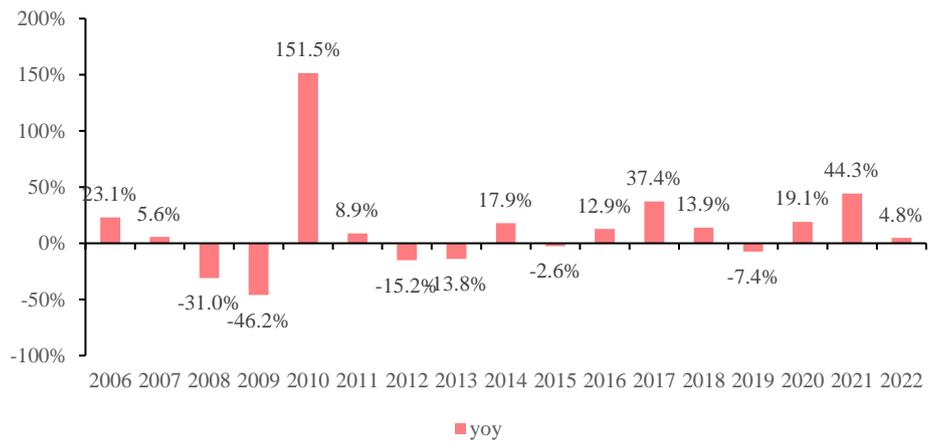


资料来源: Wind, 方正证券研究所

半导体设备行业呈现明显的周期性, 受下游厂商资本开支节奏变化较为明显。2017 年, 存储厂商的大幅资本开支推动半导体设备迎来巨大需求, 且这一势头一直延续到 2018 年上半年。但随后产能过剩致使存储价格走低, 导致 DRAM 和 NAND

厂商纷纷推迟设备订单。存储产能过剩一直持续到 2019 年上半年，同时上半年整体半导体行业景气度不佳，虽然下半年随着行业景气度恢复，以台积电为代表的晶圆厂陆续调高资本开支大幅扩产，2019 年全年半导体设备需求同比仍回落约 2%。2020 年全球各地先后受疫情影响，但存储行业资本支出修复、先进制程投资叠加数字化、5G 带来的下游各领域强劲需求，全年设备市场同比增长 19%。伴随半导体厂商新一轮资本开支开启，2021 年全球设备市场继续大幅增长 44%。当前海外设备龙头应用材料、泛林集团等均预计 2022 年全球设备市场规模将进一步增长。

图表36: 半导体设备市场增速周期性



资料来源: Wind, 方正证券研究所

过程控制全球半导体设备总市场占比约 10.5%，持续有升级需求。2021 年全球过程控制设备市场空间约 104 亿美元，其中光刻相关（套刻误差量测、掩模板测量及检测等）相关需求约 28 亿美元、缺陷检测需求约 58 亿美元、膜厚测量需求约 17 亿美元。过程控制市场中在全球半导体设备总市场（包括晶圆制造和封装测试设备）占比约 10.5%，相对稳定，随着制程微缩、3D 堆叠推进，晶圆制造对于量测、检测需求不断增加，精度要求也不断提高，过程控制设备持续有升级需求。

图表37: 全球过程控制市场（亿美金）



资料来源: VLSI, 中科飞测招股书, Gartner, Wind, 方正证券研究所

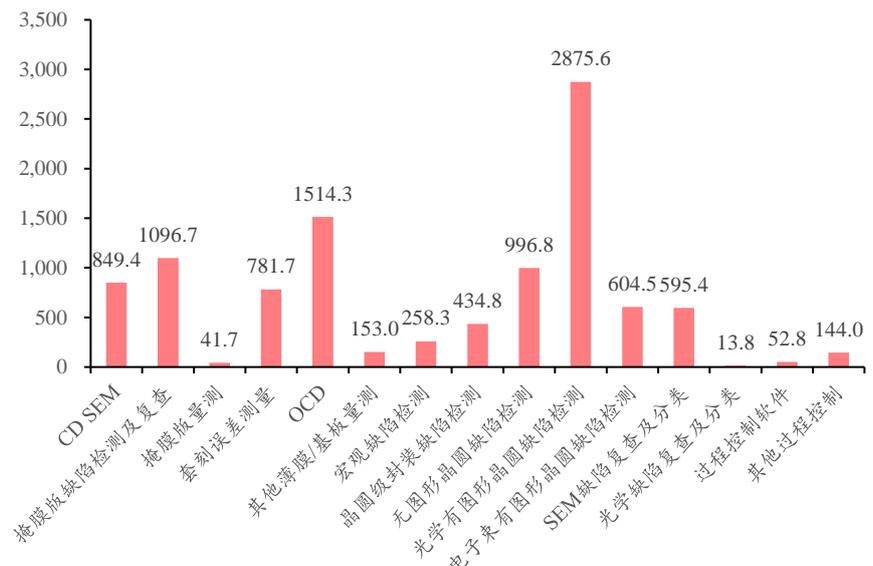
根据 VLSI Research, 2020 年全球半导体检测和量测设备市场规模总计 76.5 亿美金, 其中检测设备占比 62.6%, 包括无图形晶圆缺陷检测设备、图形晶圆缺陷检测设备、掩模版检测设备; 量测设备占比 33.5%, 包括三维形貌量测设备、薄膜膜厚度量测设备、套刻精度量测设备、关键尺寸量测设备、掩模版量测设备等。

图表38:2020 年半导体检测和量测设备市场各类设备销售额及占比

设备类型	销售额 (亿美金)	占比
纳米图形晶圆缺陷检测设备	18.9	24.7%
掩模版缺陷检测设备	8.6	11.3%
关键尺寸量测设备	7.8	10.2%
无图形晶圆缺陷检测设备	7.4	9.7%
电子束关键尺寸量测设备	6.2	8.1%
套刻精度量测设备	5.6	7.3%
图形晶圆缺陷检测设备	4.8	6.3%
电子束缺陷检测设备	4.4	5.7%
电子束缺陷复查设备	3.8	4.9%
晶圆介质薄膜量测设备	2.3	3.0%
X 光量测设备	1.7	2.2%
掩模版关键尺寸量测设备	1.0	1.3%
三维形貌量测设备	0.7	0.9%
晶圆金属薄膜量测设备	0.4	0.5%
其他	2.9	3.9%
合计	76.5	100.0%

资料来源: VLSI, 中科飞测招股书, 方正证券研究所

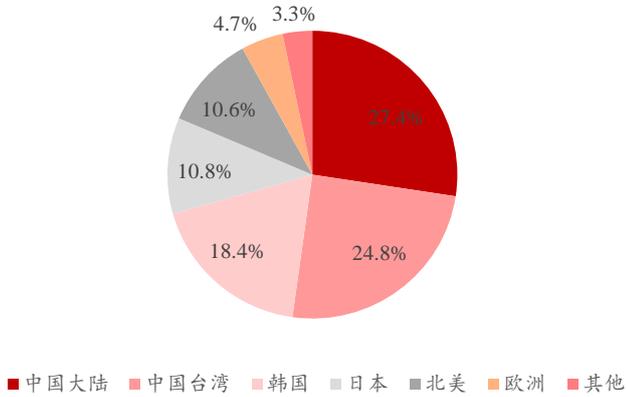
图表39:2021 年过程控制细分市场 (百万美元)



资料来源: Gartner, 方正证券研究所

全球过程控制市场主要由海外龙头 KLA 主导。全球过程控制主要赛道由海外厂商主导并垄断，KLA 在大多细分领域具有明显优势，此外 AMAT、Hitachi、Onto、ASML 也有所布局。国内公司精测电子、睿励科学仪器、中科飞测、东方晶源、赛腾股份等主要布局。

图表40:2020 年全球半导体检测和量测设备市场分地区情况



资料来源：中科飞测招股书，VLSI，方正证券研究所

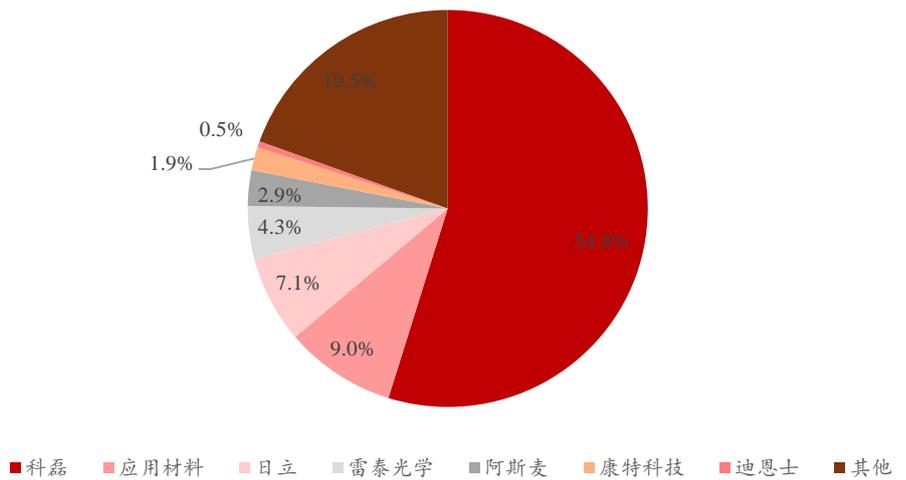
图表41:中国大陆半导体检测和量测设备市场规模（亿美金）



资料来源：中科飞测招股书，VLSI，方正证券研究所

海外厂商主导国内市场，国产替代空间广阔。中国半导体检测与量测设备市场国产化率低，海外龙头主导国内市场，科磊在国内市场份额超过 50%，且得益于中国市场规模近年来高速增长，根据 VLSI，科磊在中国大陆市场 2016-2020 年 5 年的营收 CAGR 超过 35.7%，显著高于其在全球约 13.2% 的复合增速。

图表42:2020 年中国半导体量测检测设备市场格局



资料来源：中科飞测招股书，VLSI，方正证券研究所

图表43: 2021年过程控制市场格局 (亿美金)

前道检测设备分类	2021年市场规模	占比	全球份额
光学图形晶圆缺陷检测	28.8	27.6%	KLA 87%、应材 11%
OCD	15.1	14.5%	KLA 55%、Nova 22%、Onto 20%
掩膜版检测与分析	11.0	10.5%	Lasertec 44%、KLA 44%
无图形晶圆检测	10.0	9.6%	KLA 91%、日立 6%
关键尺寸扫描电子显微镜 (CD SEM)	8.5	8.2%	日立 69%、应材 31%
套刻误差测量	7.8	7.5%	KLA 68%、ASML 32%
电子束图形晶圆缺陷检测/测量	6.0	5.8%	ASML 59%、应材 38%
扫描电子显微镜缺陷分析与分类	6.0	5.7%	应材 78%、KLA 20%
其他	11.0	10.5%	
合计	104.1	100.0%	

资料来源: Gartner, 方正证券研究所

3 KLA: 全球量测检测龙头企业

检测/测量设备收入龙头: KLA-Tencor 成立于 1976 年, 是全球过程控制业界龙头, 产品包括晶圆缺陷检测、刻蚀光罩检测、其他检测、服务等。

KLA FY2023 营收创新高, 综合毛利率达 60%。公司 FY2023 (截至 June 30, 2023) 营收 104.96 亿美金, 同比增长 13.9%, 综合毛利率 60%。单 Q4 营收 23.55 亿美金, 毛利率 61.2%, 均位于指引中值附近。公司指引 FY2024Q1 收入 22.25-24.75 亿美金, 中值 23.5 亿美金, 同比减少 12.96%, 环比减少 2.08%, 单季度毛利率 60%-62%, 中值环比略降。公司下游需求依旧强劲, 逻辑代工厂多个制程节点持续广泛投资驱动需求增长, 存储方面, 尽管有部分客户投资有放缓的迹象, 其他多个行业的需求多样化仍然强劲。

分业务来看, 晶圆检测业务方面, 公司 FY23Q4 收入同比下降 14%, 环比下降 7%。电子、包装和零部件业务领域, 公司单季营收 0.65 美金, 同比下降 64%, 环比下降 6%。服务业务 FY23Q4 营收超过 5 亿美金, 同比增长 5%。

- **收入业务结构:** KLA 本财年 89% 半导体工艺控制及相关服务收入, 6% 特种半导体工艺业务、5.2% PCB 及显示器及元件检测等业务。
- **收入产品结构:** KLA 本财年晶圆检测系统占比 41%, 图案制作包括光罩检测占比 27%, 特种半导体工艺占比 5%, PCB 及显示器和元件检测收入占比 4%, 服务营收占比 20%。
- **收入区域结构:** KLA 本财年下游客户中国大陆 29%、中国台湾 24%、日本 9%、韩国 18%、北美 12%、欧洲 7%。

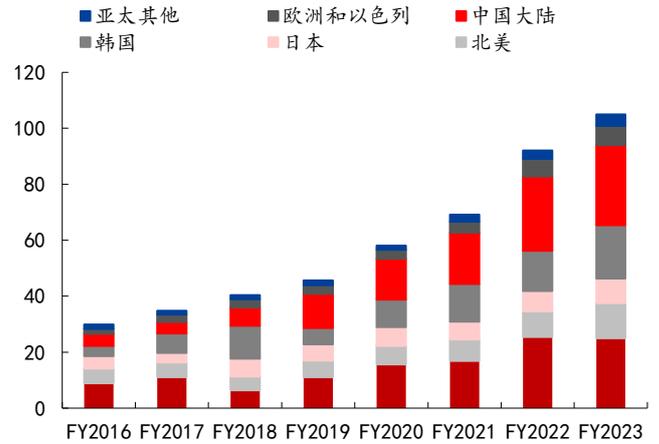
行业及公司业绩展望: KLA 还投资于晶圆和光网基础设施投资, 公司表示这些投资对其收入表现有所贡献, 预计 2023 年公司相对行业表现仍然强劲。公司看好长期商业环境趋于稳定, 并推动半导体行业长期需求和 WFE 的投资, 以及跨多个技术节点的半导体含量增长。

图表44:KLA 营收及增速 (亿美金)



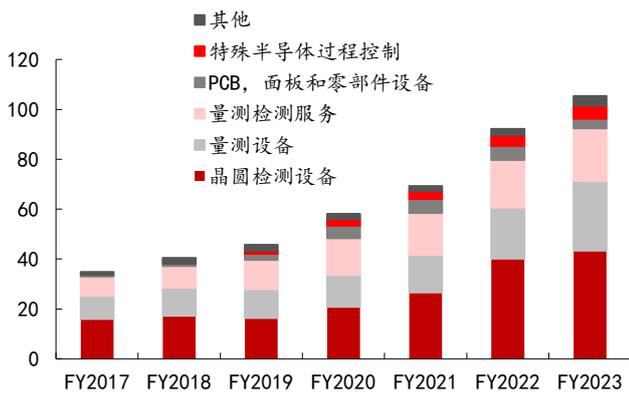
资料来源: Wind, 方正证券研究所

图表45:KLA 分地域营收 (亿美金)



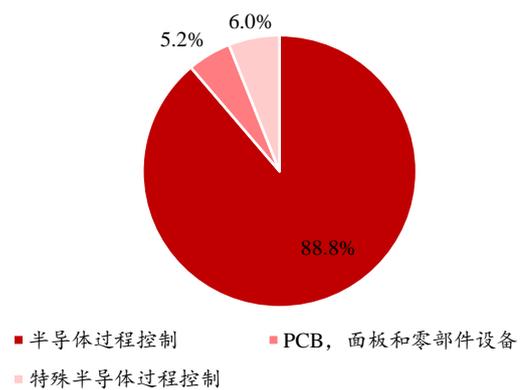
资料来源: Wind, 方正证券研究所

图表46:KLA 分产品营收 (亿美金)



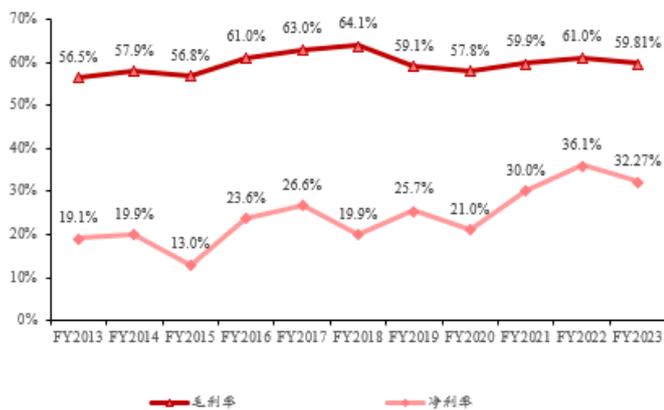
资料来源: Wind, 方正证券研究所

图表47:KLA FY2023 产品结构



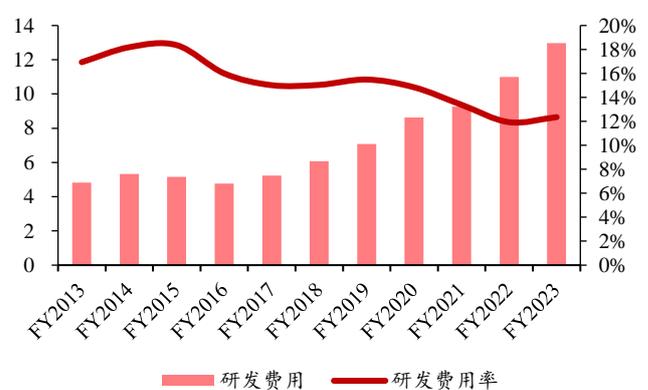
资料来源: Wind, 方正证券研究所

图表48:KLA 盈利水平



资料来源: Wind, 方正证券研究所

图表49:KLA 研发费用情况 (亿美金)



资料来源: wind, 方正证券研究所

产品线持续迭代，形成较强产品阵列。科磊关键产品：Gen 5（3900 系列）有图形晶圆检测；Archer 套刻误差检测；Teron 掩膜版测量（EUV）；Puma 有图形晶圆检测（DRAM/Nand）、Surfscan 无图形晶圆检测（DUV/EUV）等。

图表50:科磊产品系列

应用	尺寸测量				缺陷检测				软件
	膜厚测量	套刻误差测量	OCD测量	晶圆形貌测量	掩膜板测量	无图案晶圆测量	有图案晶圆测量	电子束复检	
产品	Alert系列, SpectraFilm系列	Archer系列, ATL系列	SpectraShape系列	Wafersight系列, PWG系列	Teron系列, LMS IPRO系列	SurtscanSP系列	3900系列, 29cx系列Puma系列, Voyager系列	eDR7200系列	Klarity系列, FabVisionPro, ATA

资料来源：KLA 公司官网，方正证券研究所

图表51:KLA 产品线迭代

Market Leadership Sustained by New Product Introductions

2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
2900 / 2905	2910 / 2915	2920 / 2925		3900 / 3905 2930 / 2935			3920 / 3925 2950 / 2955
Puma™ 9650		Puma™ 9850		Puma™ 9980		Voyager™ 1015	
CIRCL™	BDR300™		8920	CIRCL™5			8930
eS800™	eDR®-7100 eS805™ / eS810™	eDR®-7110		eDR7280™			eDR7380™ eSL10™
Surfscan® SP3 450		Surfscan® SP5		Surfscan® SP5 ^{XP}		Surfscan® SP7	
Archer™ 500			Archer™ 500LCM		Archer™ 600 ATL100™		Archer™ 700 / 750 ATL150™
Aleris® 8510			SpectraFilm™ LD10		SpectraFilm™ F1		
	SpectraShape™ 9000				SpectraShape™ 10K		
WaferSight™ 2+		WaferSight™ PWG			WaferSight™ PWG2		PWG3™
X5.2™ Teron™ 611	Teron™ 630	Teron™ SL650 LMS IPRO6	X5.3™	Teron™ SL655 Teron™ 640	FlashScan® 200 Teron™ 640e LMS IPRO7		Teron™ SL670e
PROLITH™ X4.1	PROLITH™ X4.2 PROLITH™ X5		PROLITH™ X5.1 PROLITH™ X5.2	PROLITH™ X6.0			PROLITH™ 2019b
		K-T Analyzer® 9.0	ProDATA™ V2.0	RDC	5D Analyzer® X1		ProDATA™ V2.1
WI-2280			CIRCL™-AP			Kronos™ 1080	
	ICOS™ CI-T640		ICOS™ T830		ICOS™ T3 Series ICOS™ T7 Series	ICOS™ F160	

资料来源：KLA 公司公告，方正证券研究所

KLA 在 2022 年 6 月 16 日投资者日上披露了 2026 年新的长期收入增长目标和财务模型。以及公司对于半导体行业年复合增长率 6%-7% 的假设，2021 年到 2026 年，KLA 收入符合增速目标为 9%-11%，主要来源于公司市场份额的提升。

图表52:KLA 远期增长目标

Sustainable Outperformance Drives Strong Results & Achievements

Collaboration, Innovation and Execution are critical to our success

2019 Commitments for 2023E Targets		Results	New 2026E Targets Based on 2021	
Growth	7-9% revenue growth	✓	9-11% revenue growth CAGR from 2021 – 2026E	
Semi PC	6-7% revenue CAGR and 300+ bps market share and intensity gains	✓	10-11% revenue CAGR driven by market share and intensity gains	
EPC	~10% revenue CAGR	✓	11-12% revenue CAGR	
Services	9-11% recurring revenue CAGR	✓	12-14% recurring revenue CAGR	
Capital Returns	Greater than 70%	✓	Greater than 85%	

资料来源: KLA, 方正证券研究所

4 精测电子、睿励科学仪器、中科飞测等公司布局量测检测赛道
精测电子增资加速布局，聚焦半导体前道测试设备。上海精测成立于 2018 年 7 月，主要布局半导体前道测试，以椭圆偏振技术为核心开发了适用于半导体工业级应用的膜厚测量以及光学关键尺寸测量系统。上海精测半导体技术有限公司常务副总经理马骏，原任天马微电子助理总经理。在 2019 年 9 月增资 5.5 亿的公告计划中，马骏认缴出资额 2500 万元，与上海精测高度绑定。2020 年 12 月底，公司定增再次增资上海精测，增资完成后，上海精测注册资本将由 7.5 亿元增加至 13.7 亿元。

精测电子全面布局膜厚及 OCD 检测、SEM 检测等技术方向。公司产品规划路径清晰，技术覆盖面齐全。在膜厚方面，上海精测已经推出了膜厚检测设备、OCD 检测设备等多款半导体测量设备。技术演进路径从膜厚检测的 EFILM 200UF 到 EFILM 300IM，再到 EFILM 300SS/DS，再到 OCD 测量的 EPROFILE 300FD，功能更加丰富，精密度逐渐提高。在电子光学 SEM 检测方向，公司已于 2020 年底交付首台电子束检测设备、2021 年交付首台 OCD 设备。目前公司膜厚产品（含独立式膜厚设备）、电子束量测设备已进入广州粤芯、长江存储、中芯国际等知名半导体厂商，并取得国内一线客户的批量订单，2021 年公司半导体业务营收 1.36 亿元。

首款半导体电子束检测设备 2020 年底正式交付。随集成电路工艺节点推进，光学缺陷检测设备已无法满足大规模生产和先进制程开发需求。上海精测从自主研发的电子束检测设备 eView™ 全自动晶圆缺陷复查设备，采用了扫描电子显微镜技术，具有超高分辨率，可用于 10x nm 及以下集成电路制程的工艺缺陷自动检测。此外，设备搭载可自主开发的基于深度神经网络的 AI 算法，提升缺陷分类准确度；运用全新超低压 EDSX 射线探测技术，实现轻量元素高分辨率解析。这一设备也是国内首台拥有完全自主知识产权的半导体前道检测设备。

图表53:公司电子束检测设备 eView™ 全自动晶圆缺陷复查设备



资料来源：精测电子官网，方正证券研究所

2021年，公司出货国内首台 OCD 设备。2021年7月13日，公司首台12寸独立式光学线宽测量设备（OCD）与国内唯一12寸全自动电子束晶圆缺陷复查设备（Review SEM）顺利出机。12寸独立式光学线宽测量机台（OCD）是该类型的国内首台机台，主要用于45nm以下、特别是28nm平面CMOS工艺的测量，并可以延伸支持上述先进工艺节点的快速线宽测量。EPROFILE 300FD测量系统拥有完全自主知识产权，包括宽谱全穆勒椭圆偏测头、对焦对位系统、系统软件等核心零部件均为自主研发，是真正意义上的高端国产化机台。

持续拓展产品品类，半导体在手订单饱满。2022年7月，精测 OCD 设备 EPROFILE 300FD 再次通过关键客户 28nm 工艺验证，顺利进入量产产线并全面投入使用。根据公司 2023 年半年报，目前上海精测膜厚系列产品、OCD 设备、电子束设备已取得国内多家客户的批量订单；半导体硅片应力测量设备也取得客户重复订单；明场光学缺陷检测设备已完成首台套交付，且已取得更先进制程订单；有图形暗场缺陷检测设备等其余储备的产品目前正处于研发、认证以及拓展的过程中。公司核心产品已覆盖 2xnm 及以上制程，先进制程的膜厚产品、OCD 设备以及电子束缺陷复查设备已取得头部客户订单。截至 2023 年中报披露日，精测电子在手订单金额总计约 31.3 亿元，其中半导体领域订单约 13.65 亿元。

睿励科学仪器成立于 2005 年，专注于半导体量测检测设备。睿励的主营产品为光学膜厚测量设备和光学缺陷检测设备，以及硅片厚度及翘曲测量设备等。睿励自主研发的 12 英寸光学测量设备 TFX3000 系列产品，已应用在 65/55/40/28 纳米芯片生产线并在进行了 14 纳米工艺验证，在 3D 存储芯片产线支持 64 层 3DNAND 芯片的生产，并正在验证 96 层 3DNAND 芯片的测量性能。2021 年 3 月，睿励获得中微公司 1 亿元投资，其他股东包括浦东科创、张江科投、国家大基金、上海创投、上海国盛等一众知名产业投资机构。

2021 年 4 月 18 日，睿励首台自主研发的高精度光学缺陷检测设备（WSD200）装箱出货，交付国内知名客户，这是睿励研发的光学缺陷检测设备进入集成电路晶圆缺陷检测市场的重大突破。

2021 年 6 月，公司自主研发的第三代光学膜厚测量设备 TFX4000i 交付设备。相对于早已实现批量生产的 TFX3000P，TFX4000i 延续使用了与 TFX3000P 相同的主

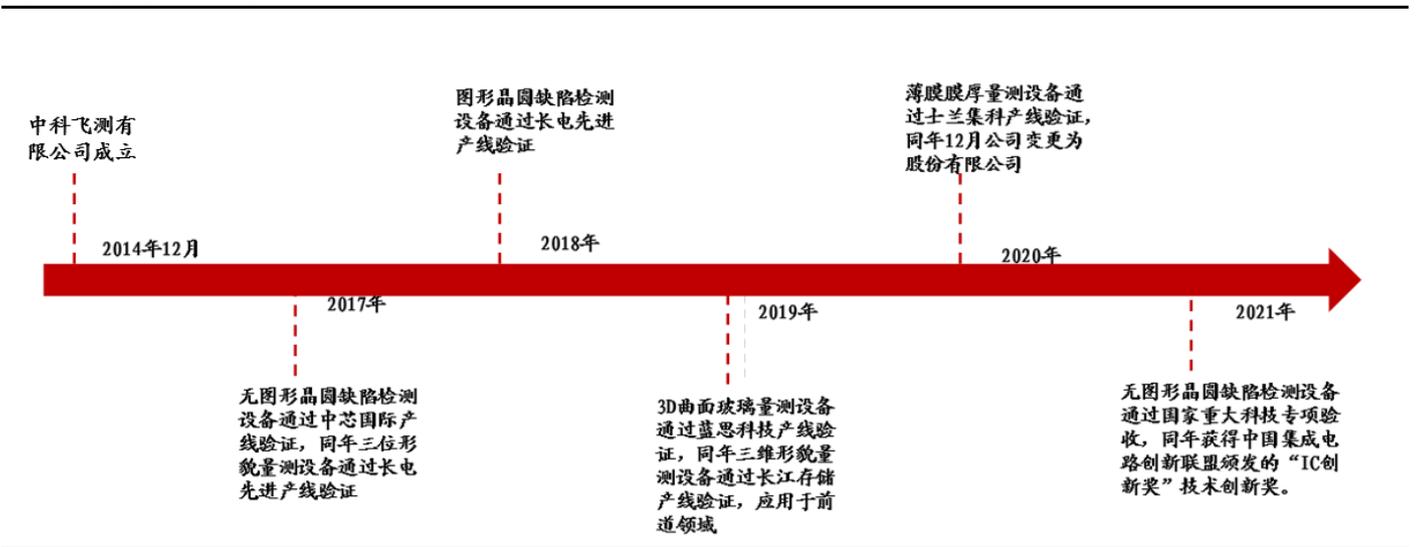
框架及软件架构，最大程度保持了二代产品的优良测量性能和可靠性，同时TFX4000i 新增加了反射测量模块和深紫外测量模块，具有更宽的光谱范围，涵盖了更广泛的工艺段应用，可以满足更先进的工艺要求。

2022年7月，睿励完成新一轮增资1.6亿元，本轮融资将主要用于光学膜厚度测量设备和缺陷检测设备的产品迭代研发及新产品研发和生产投入。目前公司的膜厚测量、缺陷检测及光学关键尺寸测量等设备已被国内近20家前道半导体晶圆制造客户采用。12英寸膜厚度测量设备TFX4000系列和应用于明暗场的12英寸高精度光学缺陷检测设备WSD系列在相继交付国内重要客户后，快速通过验证并已取得多台重复销售订单。

中科飞测是国内领先的高端半导体质量控制设备厂商，公司成立于2014年12月，公司自成立以来始终专注于检测和量测两大类集成电路专用设备的研发、生产和销售，产品主要包括无图形晶圆缺陷检测设备系列、图形晶圆缺陷检测设备系列、三维形貌量测设备系列、薄膜膜厚度测量设备系列等。公司拥有独立的研发、采购、生产和销售体系，产品已广泛应用在中芯国际、长江存储、士兰集科、长电科技、华天科技、通富微电等国内主流集成电路制造产线，打破在质量控制设备领域国际设备厂商对国内市场的长期垄断局面。

自主研发针对生产质量控制的世界领先的**光学检测技术**。公司最具代表的产品和服务有：三维形貌量测系统，表面缺陷检测系统，智能视觉缺陷检测系统，3C电子行业精密加工玻璃手机外壳检测系统，公司产品已经获得国内多家顶尖先进封装厂商的设备验收及批量订单，填补了国内集成电路先进封装检测设备在高端市场的空白。

图表54: 中科飞测发展历程

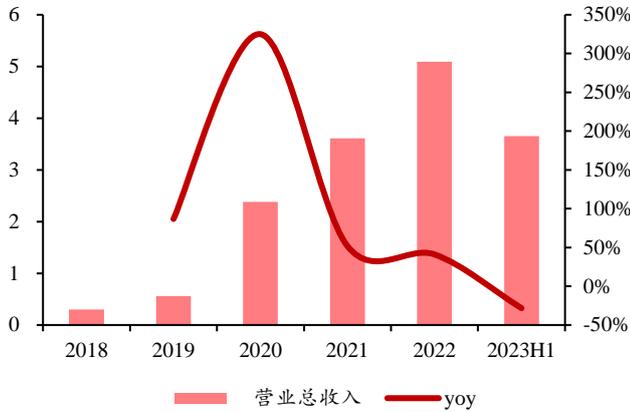


资料来源：中科飞测招股书，方正证券研究所

营收高速增长。中科飞测2022年营业收入5.09亿元，同比增长41.2%，分产品来看，2022年公司检测设备营收3.85亿元，同比增长45.3%。量测设备收入1.18亿元，同比增长25.5%。2023H1公司实现营收3.65亿元，同比增长202.25%，下游市场需求强劲，公司持续自主创新，研发出能够对标进口产品性能的设备，持续提高公司的竞争力，积累了越来越多优质的国内客户。2022年中科飞测实现归

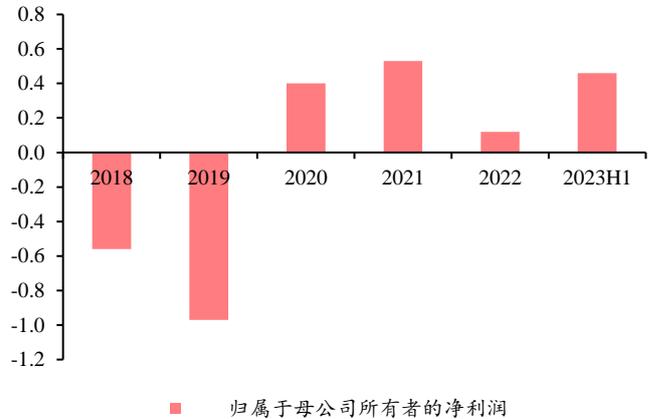
母净利润 1,174.35 万元，同比下降 78.02%。2023H1 公司实现归母净利润为 4,593.91 万元，同比增长 242.88%。

图表55:营业收入及增速 (亿元)



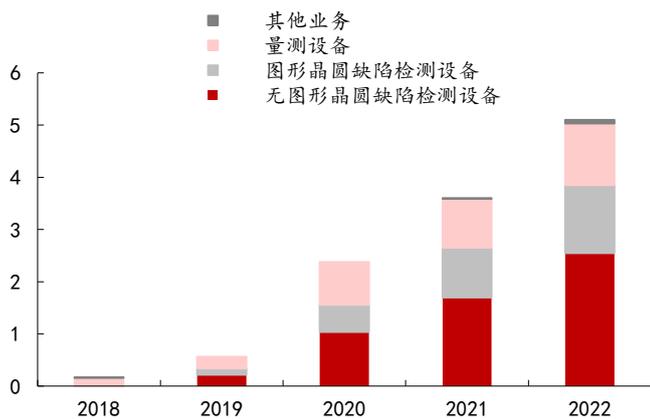
资料来源: Wind, 方正证券研究所

图表56:归母净利润 (亿元)



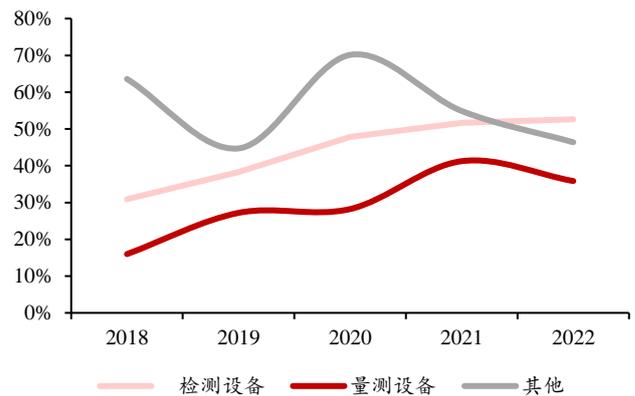
资料来源: Wind, 方正证券研究所

图表57:检测设备和量测设备营收 (亿元)



资料来源: Wind, 方正证券研究所

图表58:检测设备和量测设备毛利率



资料来源: Wind, 方正证券研究所

中科飞测目前产品主要包括无图形晶圆缺陷检测设备系列、图形晶圆缺陷检测设备系列、三维形貌量测设备系列。公司检测设备代表客户包括中芯国际、士兰集科、长电科技、华天科技等，量测设备主要客户有长江存储、长电科技、华天科技、蓝思科技等。2022 年公司检测设备共销售 82 台，量测设备销售 56 台。

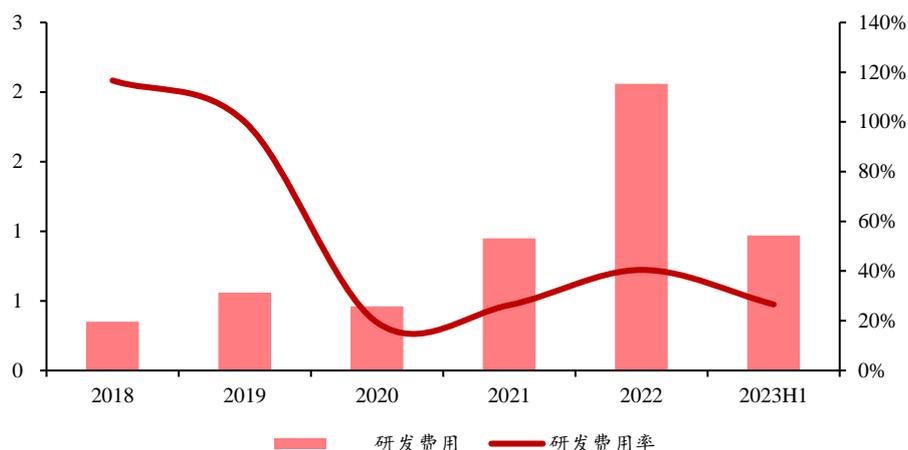
图表59: 中科飞测主要产品销售情况 (台, 万元)

无图形晶圆缺陷检测设备				图形晶圆缺陷检测设备			
SPRUCE-600	2022	2021	2020	BIRCH-60	2022	2021	2020
销售金额	11,590.81	7,601.96	6,912.83	销售金额	427.43	789.19	2,509.46
销售数量	37	25	21	销售数量	2	4	13
平均单价	313.27	304.08	329.18	平均单价	213.72	197.30	193.04
毛利率	61.23%	57.19%	57.31%	毛利率	42.11%	22.89%	26.32%
SPRUCE-800	2022	2021	2020	BIRCH-100	2022	2021	2020
销售金额	13,899.22	9,428.69	3451.33	销售金额	2198.11	5817.1	1987.98
销售数量	10	6	2	销售数量	8	22	9
平均单价	1389.92	1571.45	1725.665	平均单价	274.76	264.41	220.89
毛利率	56%	58.44%	65.40%	毛利率	42.88%	39.29%	20.88%
三维形貌量测设备				整体			
CYPRESS-T910	2022	2021	2020		2022	2021	2020
销售金额	2372.18	5377.68	4267.56	检测设备	3.85	2.65	1.56
销售数量	11	23	21	占比	75%	74%	66%
平均单价	215.65	233.81	203.22	毛利率	52.6%	51.7%	47.8%
毛利率	38.26%	38.12%	22.72%				
CYPRESS-U950	2022	2021	2020		2022	2021	2020
销售金额	1766.68	1583.88	1691.19	量测设备	1.18	0.94	0.82
销售数量	4	4	4	占比	23%	26%	34%
平均单价	441.67	395.97	422.80	毛利率	35.8%	41.2%	28.2%
毛利率	34.10%	54.63%	29.17%				

资料来源: 中科飞测招股书, 方正证券研究所

大力研发投入, 算法、软件重要性凸显。中科飞测 2022 年研发费用 2.1 亿元, 同比增长 116.8%, 占营收比重 40.5%。公司始终重视研发, 截至 2023H1, 公司研发人员数量 334 人, 占员工总数比重 43.0%。光学检测技术未来重要发展趋势之一就是大数据检测算法和软件重要性凸显, 晶圆检测和量测的算法专业性很强, 设备对于检测速度和精度要求非常高, 且目前市场上没有可以直接使用的软件, 业内企业均在自己的检测和量测设备上自行研制开发算法和软件, 因此与工艺设备相比, 过程控制行业对软件人才要求也更多。

图表60: 中科飞测研发费用情况 (万元)



资料来源: Wind, 方正证券研究所

IPO 募集资金主要用于扩产及研发。公司 IPO 拟募集 10 亿元, 用于高端半导体质量控制设备产业化项目、研发中心升级建设项目和补充流动资金。高端半导体质量控制设备产业化项目将大幅提高公司检测和量测设备的产能, 并逐步实现新产品的产业化, 满足下游客户需求, 提升市场竞争力。研发中心升级建设项目主要是引进优秀技术人才, 将重点针对无图形晶圆缺陷检测设备、纳米图形晶圆缺陷检测设备等相关方向展开深入研发, 进一步提升公司创新能力。

图表61: 中科飞测 IPO 募投项目概况 (万元)

	项目投资总额	拟使用募集资金金额
高端半导体质量控制设备产业化项目	30,895.8	30,800.0
研发中心升级建设项目	14,563.1	14,200.0
补充流动资金	55,000.0	55,000.0
合计	100,458.9	100,000.0

资料来源: 中科飞测招股书, 方正证券研究所

5 风险提示

国产替代进展不及预期: 半导体设备及材料新技术难度较高, 验证周期较长, 具有一定的不确定性, 若国产设备供应商产品验证进展不及预期, 则可能对行业营收规模及盈利水平带来不利影响。

全球贸易纷争影响: 全球贸易纷争存在不确定性, 尤其是科技领域竞争激烈, 导致科技产业链具有不稳定性, 影响国内晶圆厂扩产节奏, 从而对国内供应商订单及营收带来不利影响。

行业竞争加剧: 量测检测设备与其他制程类设备相比, 具有产品品类多, 市场相对分散的特点, 当前国内多家上市及非上市公司布局量测检测类产品, 或导致未来行业竞争加剧。