



【中泰电子】光刻机行业报告：从0到1，星辰大海

中泰电子王芳团队

分析师：王芳

执业证书编号：S0740521120002

分析师：游凡

执业证书编号：S0740522120002

分析师：杨旭

执业证书编号：S0740521120001

研究助理：张琼

中泰证券研究所
专业 | 领先 | 深度 | 诚信

目录

一、光刻是芯片制造最核心环节，大陆自给率亟待提升

1.1 光刻机是芯片制造的核心设备，市场规模全球第二

1.2 一超两强垄断市场，大陆卡脖子现象凸显

二、光刻机：多个先进系统的组合，核心零部件被海外厂商垄断

2.1 从接触式到EUV，制程持续演进

2.2 多个先进系统组合，技术壁垒极高

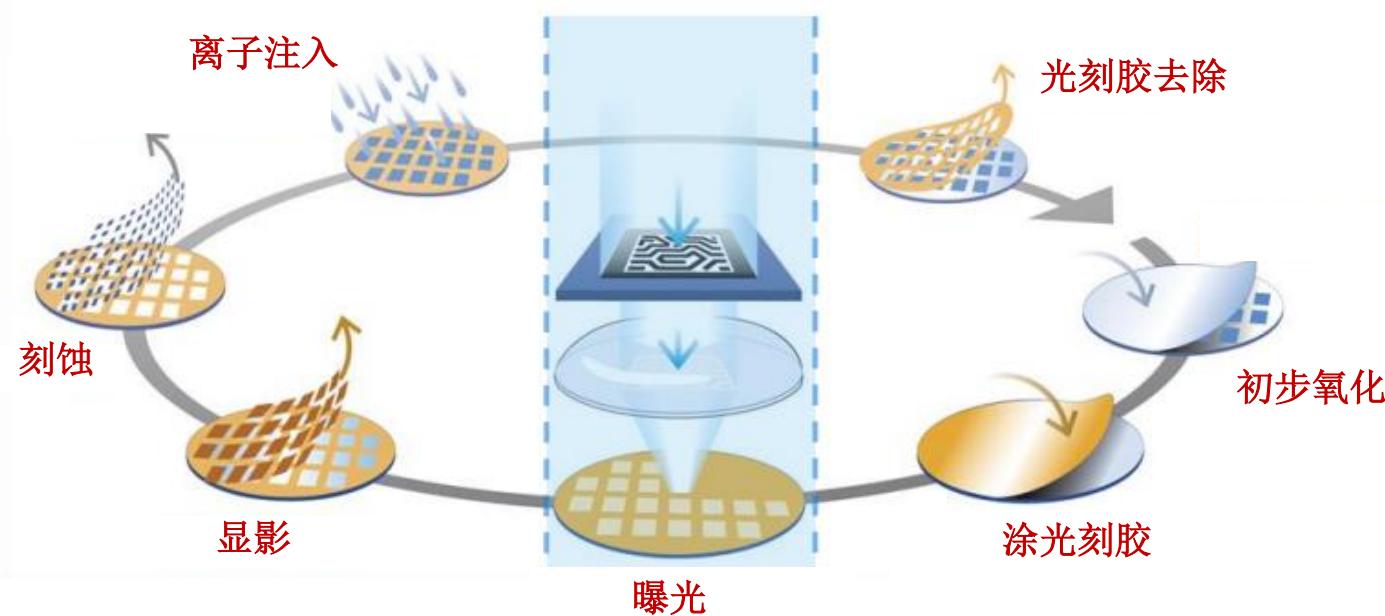
三、大陆厂商实现从“0到1”，本土化带来广阔替代空间

四、投资建议及风险提示

光刻是芯片制造最核心环节

- 光刻机是芯片制造中最复杂、最昂贵的设备。芯片制造可以包括多个工艺，如初步氧化、涂光刻胶、曝光、显影、刻蚀、离子注入。这个过程需要用到的设备种类繁多，包括氧化炉、涂胶显影机、光刻机、薄膜沉积设备、刻蚀机、离子注入机、抛光设备、清洗设备和检测设备等。在整个半导体芯片制造过程中，光刻是最复杂工艺，光刻工艺的费用约占芯片制造成本的1/3左右，耗费时间占比约为40-50%，光刻工艺所需的光刻机是最贵的半导体设备。
- 光刻机可分为前道光刻机和后道光刻机。光刻机既可以用在前道工艺，也可以用在后道工艺，前道光刻机用于芯片的制造，曝光工艺极其复杂，后道光刻机主要用于封装测试，实现高性能的先进封装，技术难度相对较小。

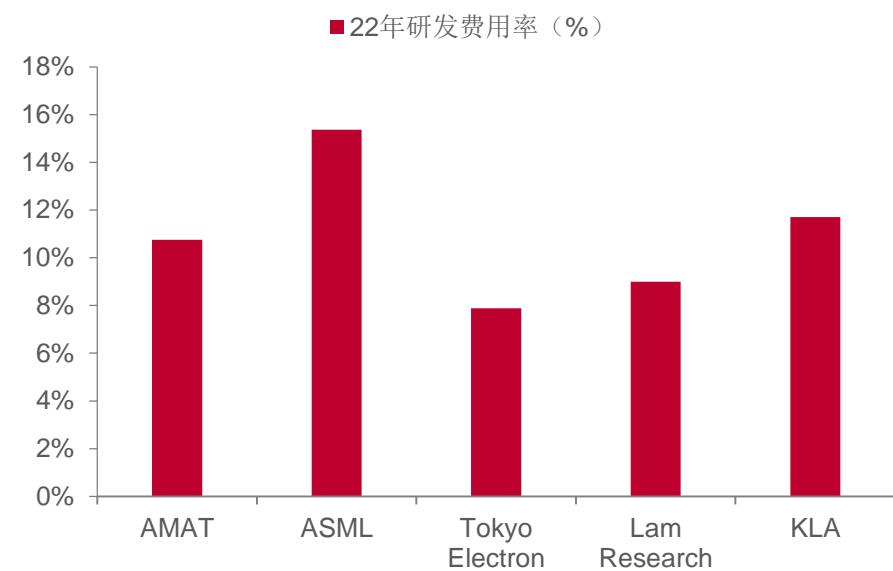
图：光刻工艺流程图



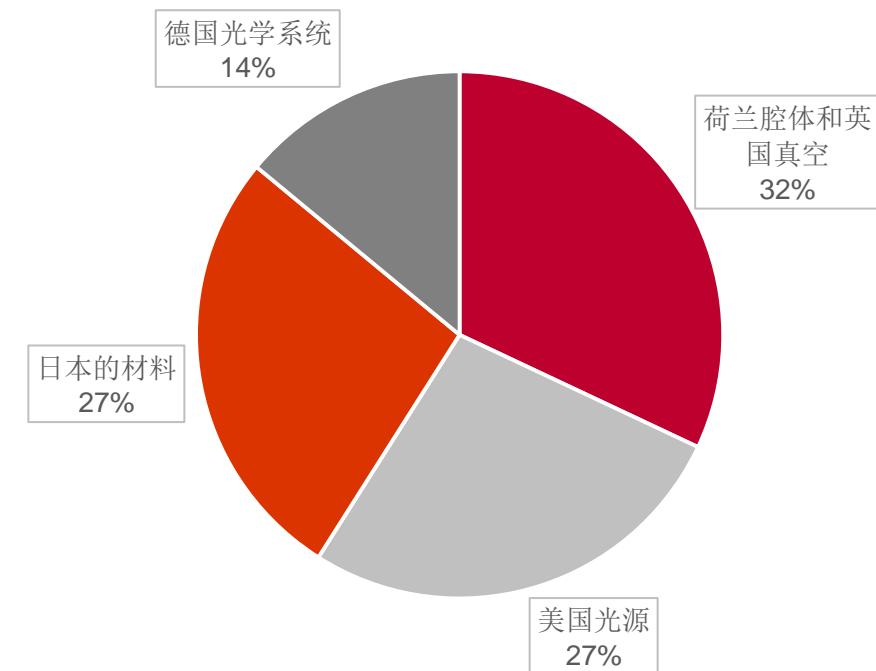
光刻机研发难度大，零部件海外垄断

- 光刻机厂商研发费用率高：22年全球前五大半导体设备厂商的平均研发费用率为11%，其中ASML研发费用率为15%，高于其他设备厂商。
- 光刻机零部件供应商遍布全球，核心零部件来自德国和美国：代表光刻机最高端技术的EUV光刻机里面有10万多个零部件，全球超过5000家供应商。整个光刻机中，荷兰腔体和英国真空占32%，美国光源占27%，德国光学系统占14%，日本的材料占27%。

图： 全球前五大半导体设备厂商研发费用率（单位：%）



图： EUV光刻机零部件占比（单位：%）



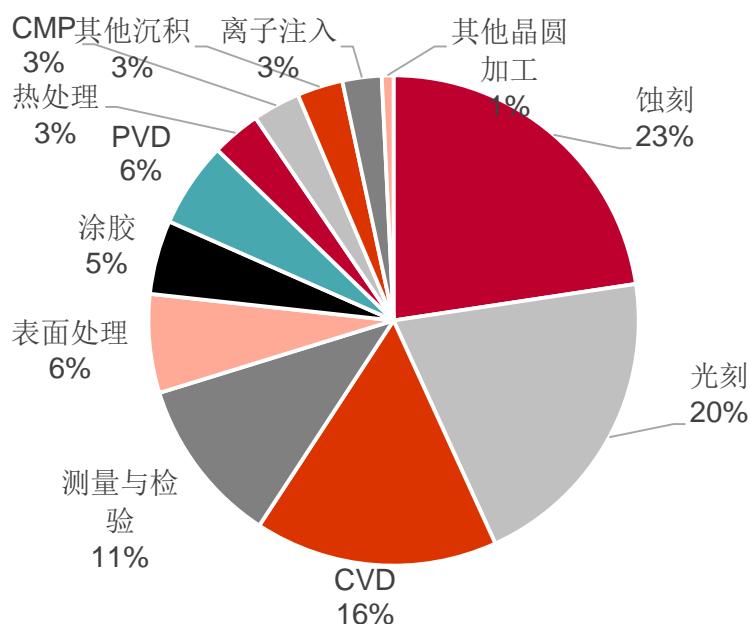
光刻设备单价最高，市场规模全球第二

- 2021年全球前道光刻设备市场规模为172亿美元，其市场份额在晶圆生产设备中占比为20%，仅次于刻蚀设备。光刻机价格昂贵，ASML当前EUV光刻机单价为1.5亿-2亿美元。

图：全球半导体制造设备市场份额（单位：百万美元）

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
半导体市场	299,521	291,562	305,584	335,843	335,168	338,931	412,221	468,778	412,106	438,979	555,893
YoY%	0%	-3%	5%	10%	0%	1%	22%	14%	-12%	7%	27%
半导体生产设备市场	43,526	36,927	31,789	37,499	36,527	41,007	56,687	64,531	59,753	71,028	102,184
YoY%	9%	-15%	-14%	18%	-3%	12%	38%	14%	-7%	19%	44%
占半导体市场比例	14.50%	12.70%	10.40%	11.20%	10.90%	12.10%	13.80%	13.80%	14.50%	16.20%	18.40%
晶圆制造总额 (fab需要)	36,309	30,210	26,729	30,831	30,634	34,260	48,041	54,833	51,740	61,133	87,139
YoY%	14%	-17%	-12%	15%	-1%	12%	40%	14%	-6%	18%	43%
占半导体生产设备市场比例	83%	82%	84%	82%	84%	84%	85%	85%	87%	86%	85%
晶圆生产设备	34,345	28,149	25,364	29,258	28,796	32,545	45,508	52,191	48,863	58,140	83,510
蚀刻	4,361	3,980	3,996	5,173	6,031	7,297	10,734	11,536	10,274	12,881	18,886
光刻	8,930	6,652	6,298	6,879	5,773	6,224	8,367	11,092	11,512	13,372	17,178
CVD	3,848	3,150	2,832	4,009	4,420	4,846	7,838	8,578	7,166	9,029	13,398
测量和检验	3,802	3,736	3,534	3,531	3,310	4,162	4,932	5,478	5,313	6,339	9,184
表面处理	2,762	2,714	1,839	2,296	2,147	2,547	3,235	3,677	3,251	3,620	5,436
涂胶	2,337	1,863	1,513	1,755	1,568	1,582	1,871	2,670	2,502	2,955	4,074
PVD	1,832	1,732	1,535	1,700	1,367	1,432	2,131	2,491	2,864	3,211	4,699
热处理	1,287	775	791	727	714	870	1,293	1,413	1,350	1,556	2,705
CMP	1,240	778	740	802	896	1,236	1,796	1,852	1,486	1,572	2,622
其他沉积	2,376	1,461	1,237	1,312	1,222	1,056	1,584	1,388	1,536	1,457	2,521
离子注入	1,289	1,032	813	833	1,071	1,012	1,325	1,587	1,271	1,664	2,161
其他晶圆加工	280	275	237	239	279	281	402	429	338	483	645
代工厂设施	852	798	683	771	875	981	1,580	1,553	1,508	1,434	2,087
掩模制造设备	1,112	1,264	682	802	963	734	953	1,088	1,369	1,559	1,542

图：2021年晶圆生产设备市场份额占比



目录

一、光刻是芯片制造最核心环节，大陆自给率亟待提升

1.1 光刻机是芯片制造的核心设备，市场规模全球第二

1.2 一超两强垄断市场，大陆卡脖子现象凸显

二、光刻机：多个先进系统的组合，核心零部件被海外厂商垄断

2.1 从接触式到EUV，制程持续演进

2.2 多个先进系统组合，技术壁垒极高

三、大陆厂商实现从“0到1”，本土化带来广阔替代空间

四、投资建议及风险提示

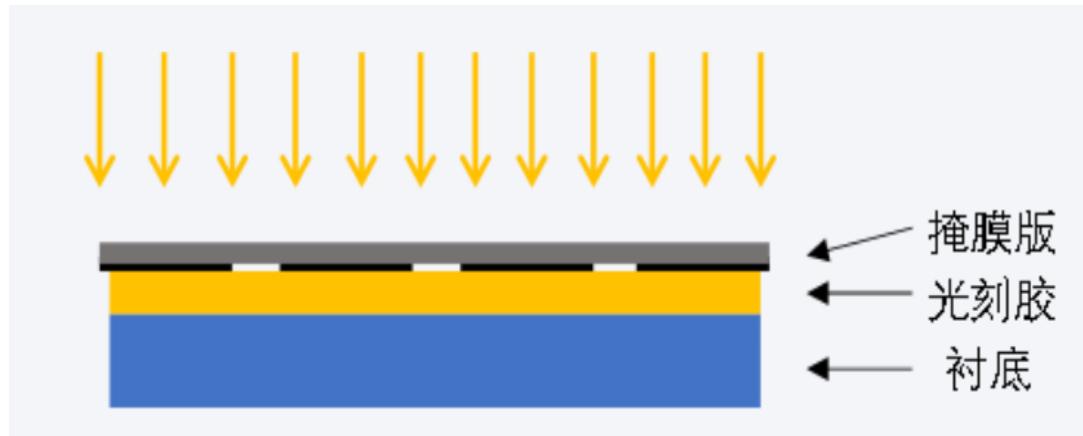
- 1961年，第一台接触式光刻机由美国GCA推出，历经60年的发展，ASML后来者居上，成为当前光刻机行业的绝对龙头。
- 光刻机问世：1955年，贝尔实验室开始采用光刻技术，1961年，GCA公司制造出第一台接触式光刻机。
- 步进式光刻机推出：1978年，步进式光刻机推出，1984年尼康和GCA各占30%份额，同年ASML成立。
- 浸没式光刻机推出：2000年，ASML推出双工件台光刻机，2003年ASML推出浸没式光刻机，至此ASML一举超越其他厂商，后来者居上。
- EUV光刻机推出：2013年，ASML推出第一台EUV量产产品，进一步加强行业垄断地位。

表：光刻技术发展历程

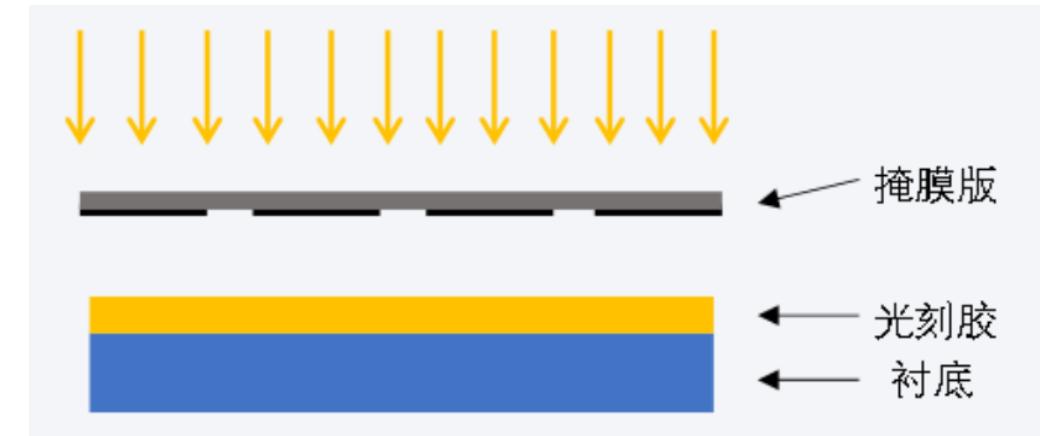
1960s-70s	1980s-90s	2000s	2010s
<p>1955年，贝尔实验室开始采用光刻技术在硅片上制作更精细复杂的电路。</p> <p>1961年，GCA发明了第一个商业化应用于半导体制造的步进和重复掩膜设备（第一台光刻机）此后，占据30%市场份额，同年ASML Kapser instrument和perkin Elmer公司先后推出了对准，投影光刻技术</p>	<p>1978年，GCA推出第一台全自动步进式光刻机，分辨率可达1微米。</p> <p>19世纪80年代，尼康发布第一台商用步进式光刻机NSR-1010G。1984年尼康与GCA刚刚成立。</p> <p>1991年，ASML推出PAS 5500步进式光刻机，成为ASML长青设备之一。</p>	<p>2000年，ASML发布TWINSCAN双工件光刻机平台，生产效率提升35%以上。</p> <p>2003年，ASML与台积电合作推出浸没式光刻机，摩尔定律实现了一次大跃进。</p> <p>2005年，摩尔定律发展再度陷入停滞。ASML研发EUV光刻技术。</p> <p>2008年春季，产生了世界上第一个full-field EUV测试芯片。</p>	<p>2010年，ASML成功研发第一台TWINSCANNXE：3100交付客户使用。</p> <p>2013年，ASML推出第一台EUV量产产品。NXE:3300正式发货。</p> <p>2017、2019、2021ASML分别开始量产出货NXE: 3400B、NXE: 3400C和NXE:3400D。分辨率、套刻精度、生产效率不断提升。</p>

- **接触式光刻技术良率低、成本高：**接触式光刻技术出现于20世纪60年代，是小规模集成电路时期最主要的光刻技术。接触式光刻技术中掩膜版与晶圆表面的光刻胶直接接触，一次曝光整个衬底，掩膜版图形与晶圆图形的尺寸关系是1:1，分辨率可达亚微米级。
 - 特点：接触式可以减小光的衍射效应，但在接触过程中晶圆与掩膜版之间的摩擦容易形成划痕，产生颗粒沾污，降低了晶圆良率及掩膜版的使用寿命，需要经常更换掩膜版，故接近式光刻技术得以引入。
- **接近式光刻技术分辨率有限：**接近式光刻技术广泛应用于20世纪70年代，接近式光刻技术中的掩膜版与晶圆表明光刻胶并未直接接触，留有被氮气填充的间隙。
 - 特点：最小分辨尺寸与间隙成正比，间隙越小，分辨率越高。缺点是掩膜版和晶圆之间的间距会导致光产生衍射效应，因此接近式光刻机的空间分辨率极限约为 $2\mu m$ 。随着特征尺寸缩小，出现了投影光刻技术。

图：接触式光刻示意图

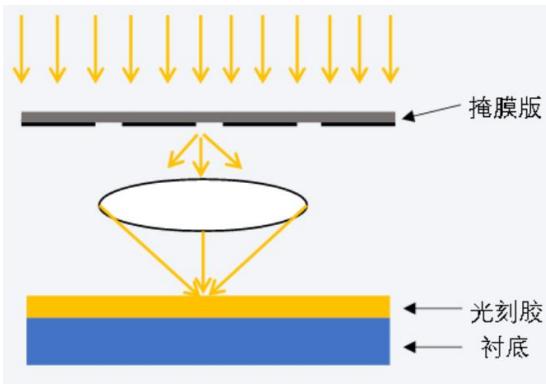


图：接近式光刻示意图

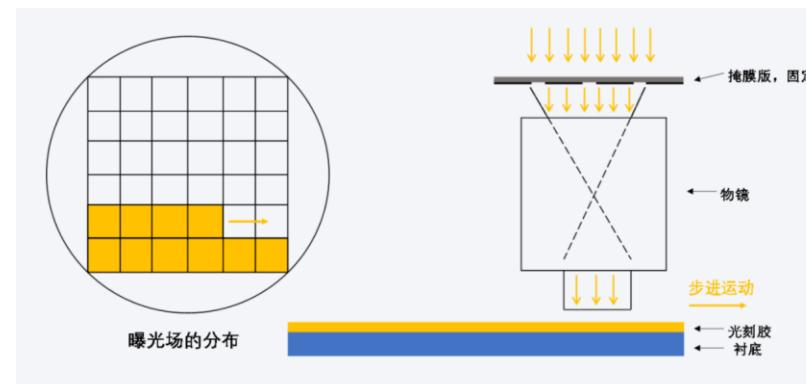


- **投影光刻技术有效提高分辨率：**20世纪70年代中后期出现投影光刻技术，基于远场傅里叶光学成像原理，在掩膜版和光刻胶之间采用了具有缩小倍率的投影成像物镜，有效提高了分辨率。早期掩膜版与衬底图形尺寸比为1:1，随着集成电路尺寸的不断缩小，出现了缩小倍率的步进重复光刻技术。
- **步进重复光刻主要应用于 $0.25\mu m$ 以上工艺：**光刻时掩膜版固定不动，晶圆步进运动，完成全部曝光工作。随着集成电路的集成度不断提高，芯片面积变大，要求一次曝光的面积增大，促使更为先进的步进扫描光刻机问世。目前步进重复光刻主要应用于 $0.25\mu m$ 以上工艺及先进封装领域。
- **步进扫描光刻被大量采用：**步进扫描光刻机在曝光视场尺寸及曝光均匀性上更有优势，在 $0.25\mu m$ 以下的制造中减少了步进重复光刻机的应用。步进扫描采用动态扫描方式，掩膜版相对晶圆同步完成扫描运动，完成当前曝光后，至下一步扫描场位置，继续进行重复曝光，直到整个晶圆曝光完毕。从 $0.18\mu m$ 节点开始，硅基底CMOS工艺大量采用步进扫描光刻， $7nm$ 以下工艺节点使用的EUV采用的也是步进扫描方式。

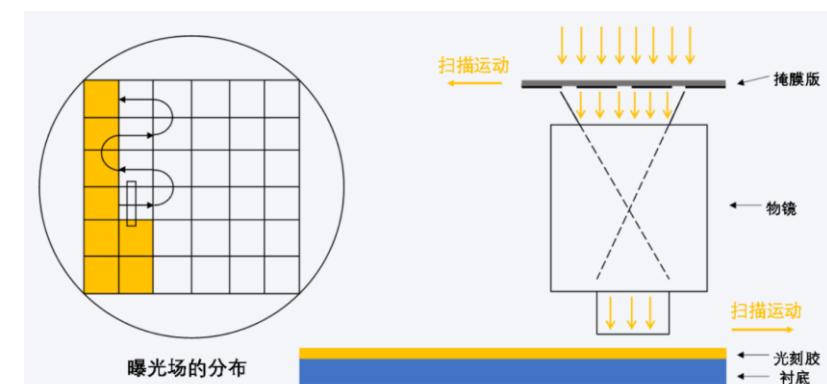
图：投影光刻示意图



图：步进重复光刻示意图



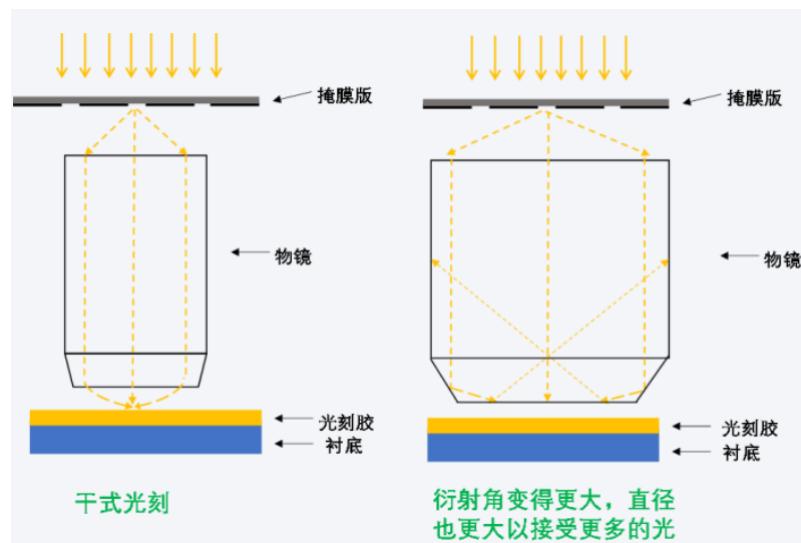
图：步进扫描光刻示意图



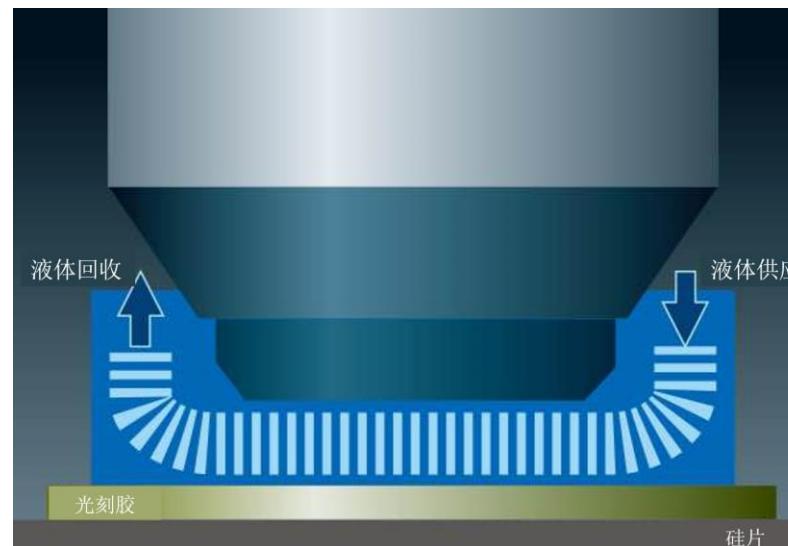
■ 投影光刻技术根据投影物镜下方和晶圆间是否有水作为介质可以分为干式光刻和湿润式光刻。

- **干式光刻技术无法满足不断缩小的线宽：**光从投影物镜射出，由玻璃介质进入空气介质，会发生衍射，光角度发生变化，最终成像于晶圆表面。随着线宽不断缩小，衍射效应不断增加，需要增大投影物镜直径来接受更多的光，这导致物镜内聚焦的光角度越来越大，再经过折射效应，射出投影物镜的光角度接近水平，无法成像，因此出现了湿润式光刻技术。
- **湿润式光刻技术使光刻水平进一步提高：**投影物镜下方和晶圆间充满水，由于水的折射率和玻璃接近（在193nm波长中，折射率空气=1，水=1.44，玻璃约为1.5），从投影物镜射出的光进入水介质后，折射角较小，光可以正常从物镜中折射出来。ArF光源加湿润技术实际等效的波长为 $193\text{nm}/1.44=134\text{nm}$ 。

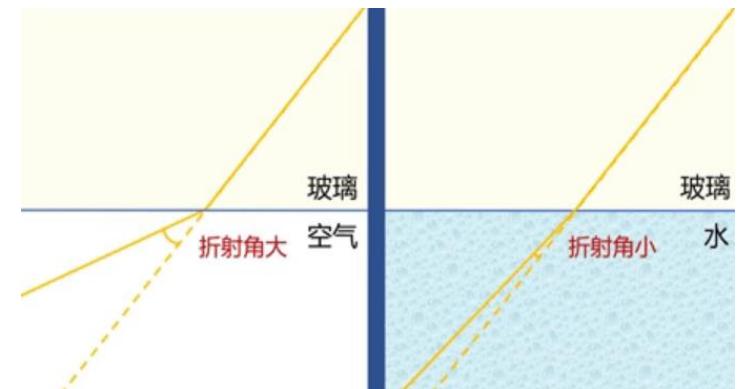
图：干式光刻示意图



图：湿润式系统示意图



图：光线在玻璃、空气、水中的折射

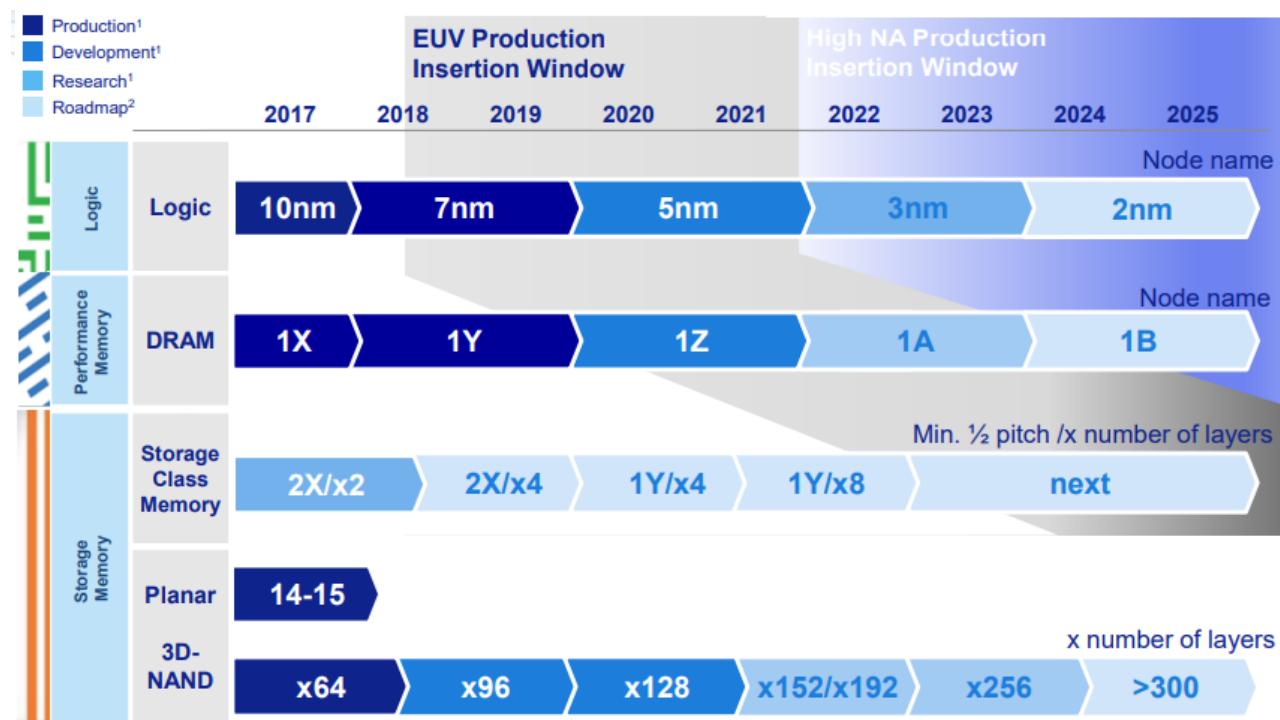


■ 光刻机的技术水平很大程度上决定了集成电路的发展水平。随着EUV光刻机的出现，芯片制程最小达到3nm。目前ASML正在研发High-NA EUV光刻机，制程可达2nm、1.8nm，预计2025年量产。同时，英伟达在23年GTC大会上也表示其通过突破性的光刻计算库cuLitho，将计算光刻加速40倍以上，使得2nm及更先进芯片的生产成为可能，ASML、台积电已参与合作，届时将带动芯片性能再次提高。

表：各个工艺节点和光刻技术的关系

制程	晶圆尺寸	金属材料	光刻机类型
0.5um	200mm	Al	g-line:436nm
0.35um	200mm	Al	i-line:365nm
0.25um	200mm	Al	KrF:248nm(stepper)
0.18um	200mm	Al	KrF:248nm(stepper&scanner)
0.13um	200/300mm	Al/Cu	ArF:193nm
90nm	300mm	Al/Cu	ArF:193nm
65/55nm	300mm	Cu	ArF:193nm
45/40nm	300mm	Cu	ArFi:193nm(134nm)
28nm	300mm	Cu	ArFi:193nm(134nm)
22/20nm	300mm	Cu	ArFi:193nm(134nm)
16/14nm	300mm	Cu	ArFi:193nm(134nm)
10nm	300mm	Cu	ArFi:193nm(134nm)
7nm	300mm	Cu	EUV:13.5nm/ArFi:193nm(134nm)
5nm	300mm	Cu	EUV:13.5nm
3nm	300mm	Cu	EUV:13.5nm

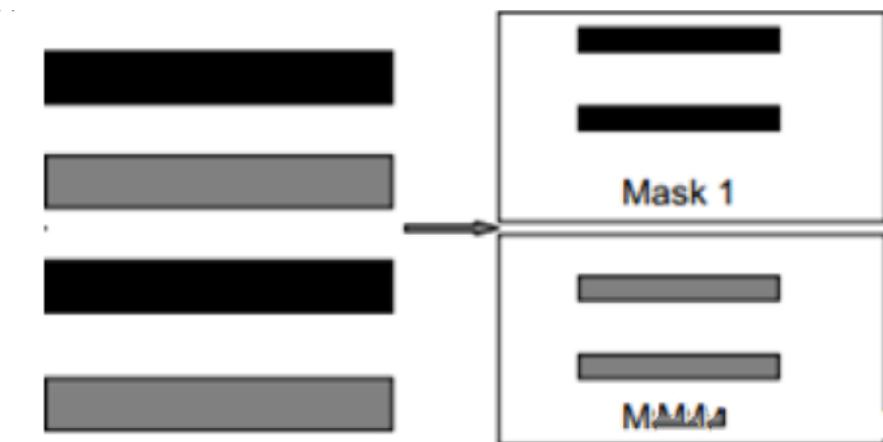
图：ASML对客户节点演进的预测



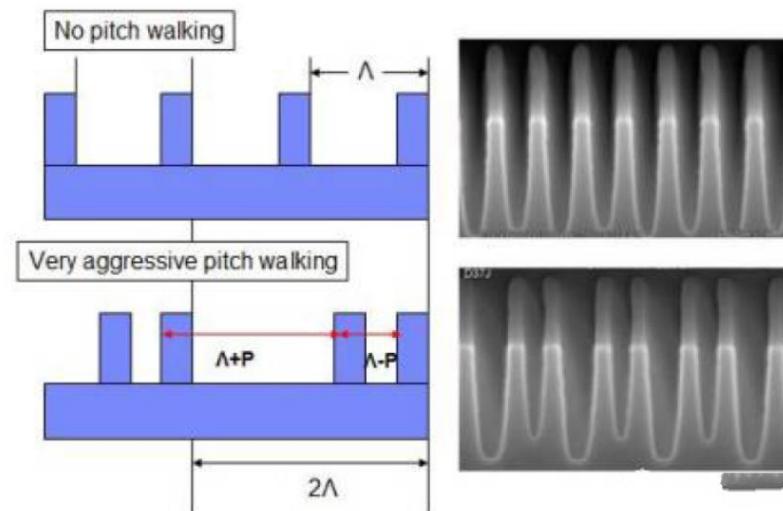
多重曝光亦可实现更小线宽，但工艺难度大

- 光刻技术利用多重曝光工艺实现更小线宽。三种多重曝光技术：LELE、LFLE、SADP，误差较小的是SADP。
- 1) LELE (LITHO-ETCH- LITHO-ETCH 光刻-刻蚀-光刻-刻蚀)：原理是把原来一层光刻图形拆分到两个或多个掩膜上，利用多次曝光和刻蚀来实现原来一层设计的图形。
- 2) LFLE (LITHO-FREEZE-LITHO-ETCH 光刻-固化-光刻-刻蚀)：原理是将第二层光刻胶加在第一层已被化学冻结但没去除的光刻胶上，再次进行光刻，形成两倍结构。LELE和LFLE技术的特点就是流程简单，缺点是两次光刻之间存在对准问题，如果工艺不够严谨，每次曝光的线宽偏差和两次曝光图形之间套刻误差将导致图形局部周期性的起伏。

图：LELE原理



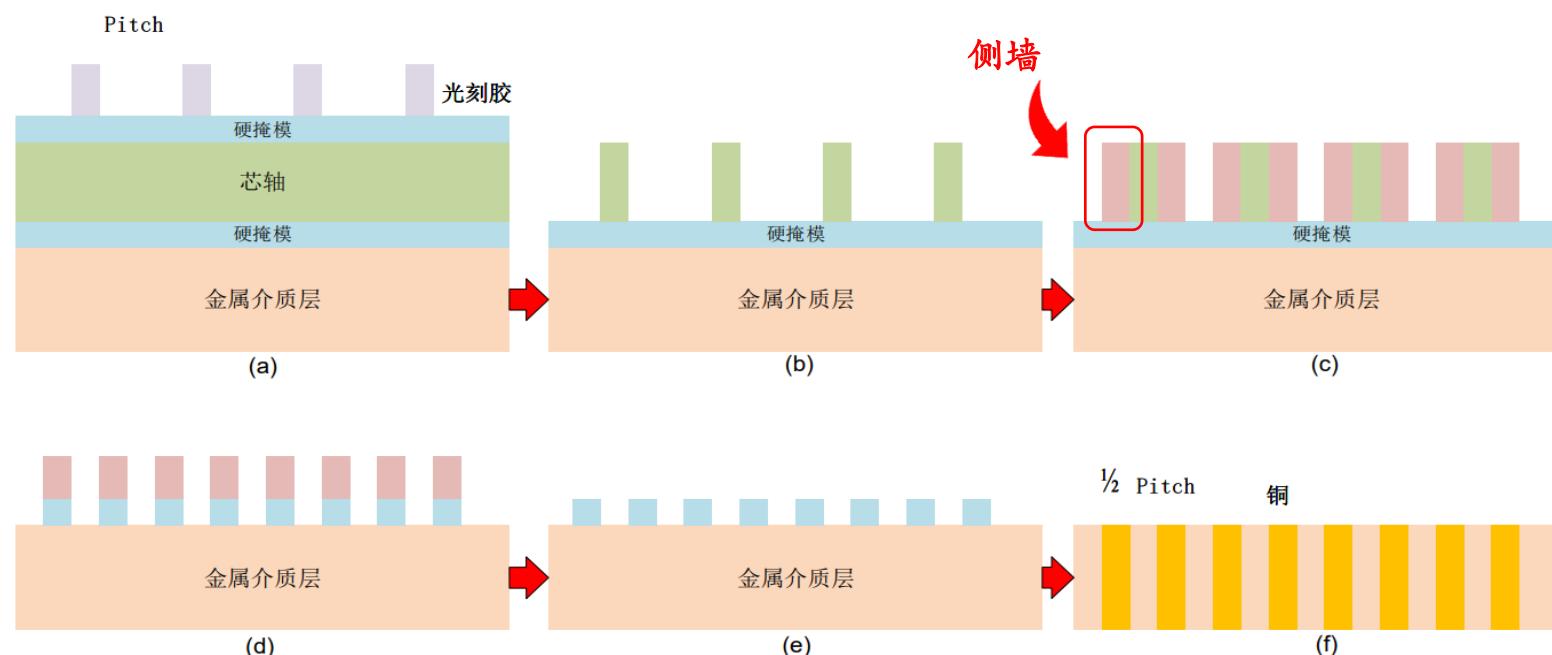
图：套刻误差引起的周期移动



多重曝光亦可实现更小线宽，但工艺难度大

- 3) SADP又称侧墙图案转移，用沉积、刻蚀技术提高光刻精度：在晶圆上沉积金属介质层、硬掩膜材料和芯轴材料（牺牲层）▶旋涂光刻胶，曝光显影后留下所需图形并刻蚀核心芯轴▶在芯轴外围沉积一层间隔侧墙，侧墙的大小即互连线的线间距，要精确控制其均匀度保证互连线间距的均一性▶清除掉芯轴材料，仅留下侧壁，再一次刻蚀将侧壁图形转移到下层掩膜层▶侧墙清除，经过掩膜层修饰后的图形，经过再一次刻蚀后传递给金属介质层形成最终图形，线宽仅为原来的1/2，SADP可以两次达到4倍精度。总结：以沉积形成的侧墙为掩膜，在金属介质层上刻蚀形成最终图形。难点：工艺过程对侧壁沉积的厚度、刻蚀形貌的控制极其重要。

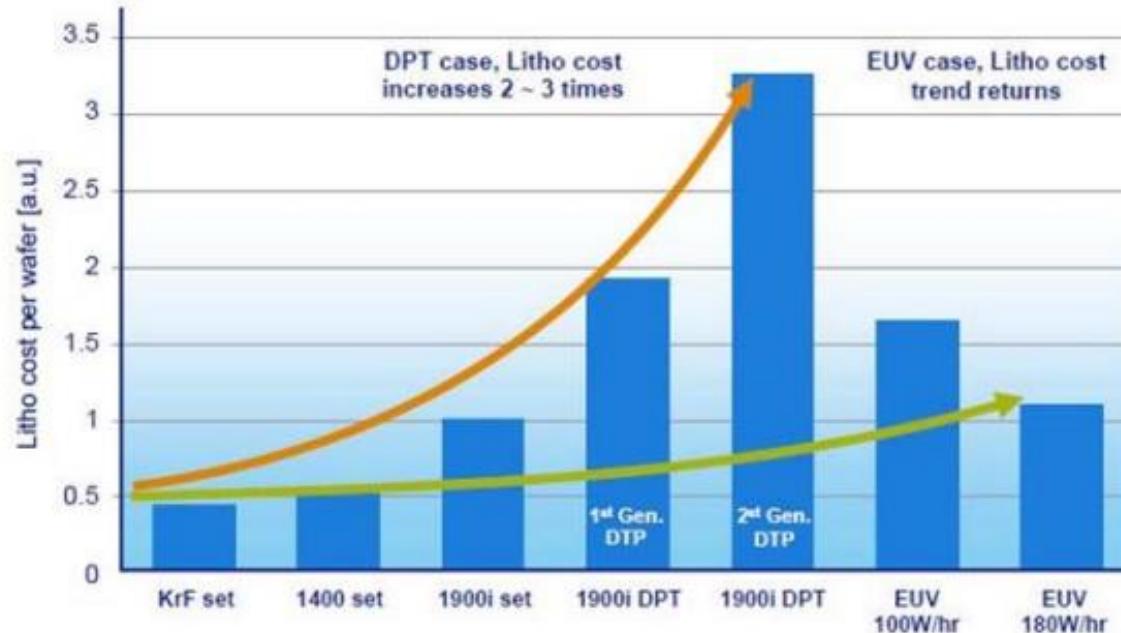
图：SADP技术工艺流程



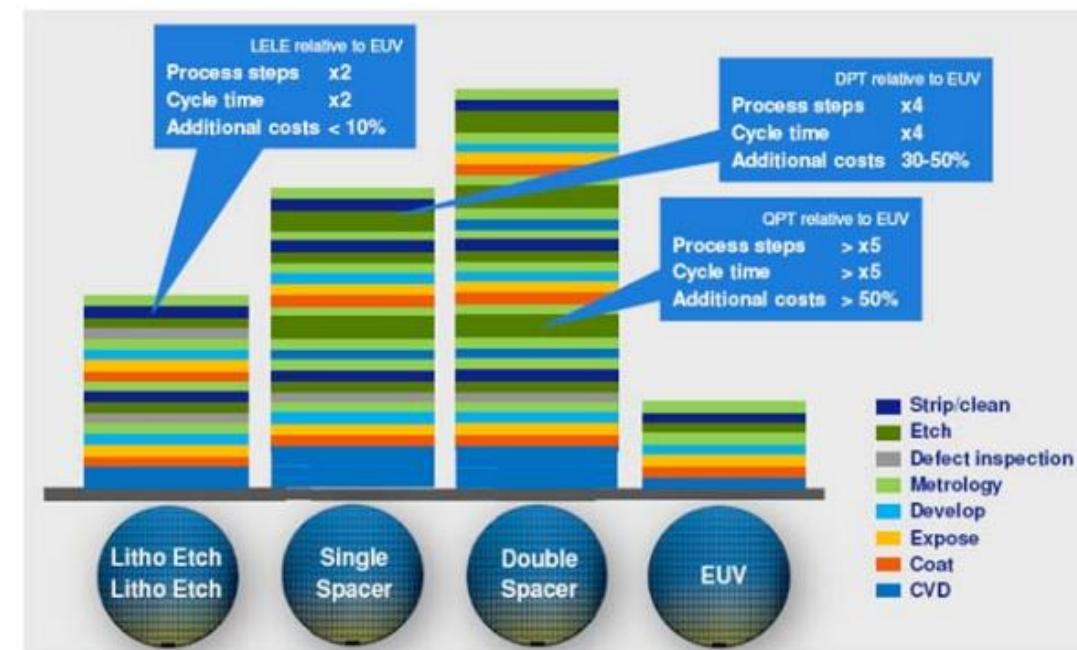
多重曝光亦可实现更小线宽，但工艺难度大

- 多重曝光可实现7nm制程但技术复杂成本高：多次LE或SADP可以实现7nm制程，但多重曝光技术提高了对刻蚀、沉积等工艺的技术要求并且增加了使用次数，使晶圆光刻成本增加了2-3倍。
- EUV可实现5nm以下制程且成本低：目前只有通过EUV能达到5nm及以下制程。此外，EUV的使用可以有效减少刻蚀、沉积等工艺步骤，工艺简单且光刻成本低。

图：每片晶圆光刻成本



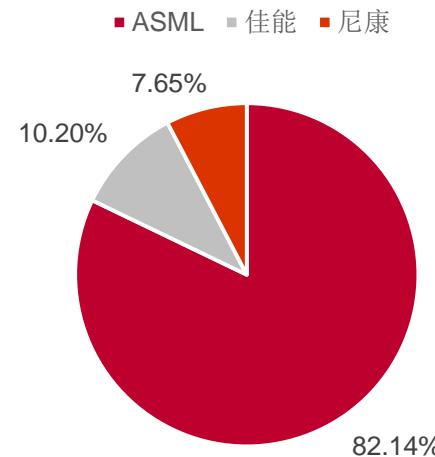
图：对蚀刻和沉积的需求



从接触式到EUV，ASML成为绝对龙头

- **历史转折点：**ASML凭借浸润式光刻机垄断市场。在浸润式光刻技术出现之前，各厂商专注于157nm波长技术的研发，“浸润式微影技术”被提出后，ASML开始与台积电合作开发浸润式光刻机，并于2007年推出浸润式光刻机，成功垄断市场。而同为光刻巨头的日本尼康、日本佳能主推的157nm光源干式光刻机被市场逐渐抛弃，两家公司由盛转衰。
- **ASML一家独大，Nikon和Canon瓜分剩余市场。**
 - 1) 全球光刻机市场的主要竞争公司为ASML、Nikon和Canon。ASML在超高端光刻机领域独占鳌头，旗下产品覆盖面最广。Canon光刻机主要集中在i-line光刻机，Nikon除EUV外均有涉及。
 - 2) 光刻机市场份额主要被ASML、Canon、Nikon包揽，从这三家的占比情况来看，2022年ASML占据82%，Canon占据10%，Nikon占据8%。

图：2022年全球光刻机TOP3市场份额占比情况



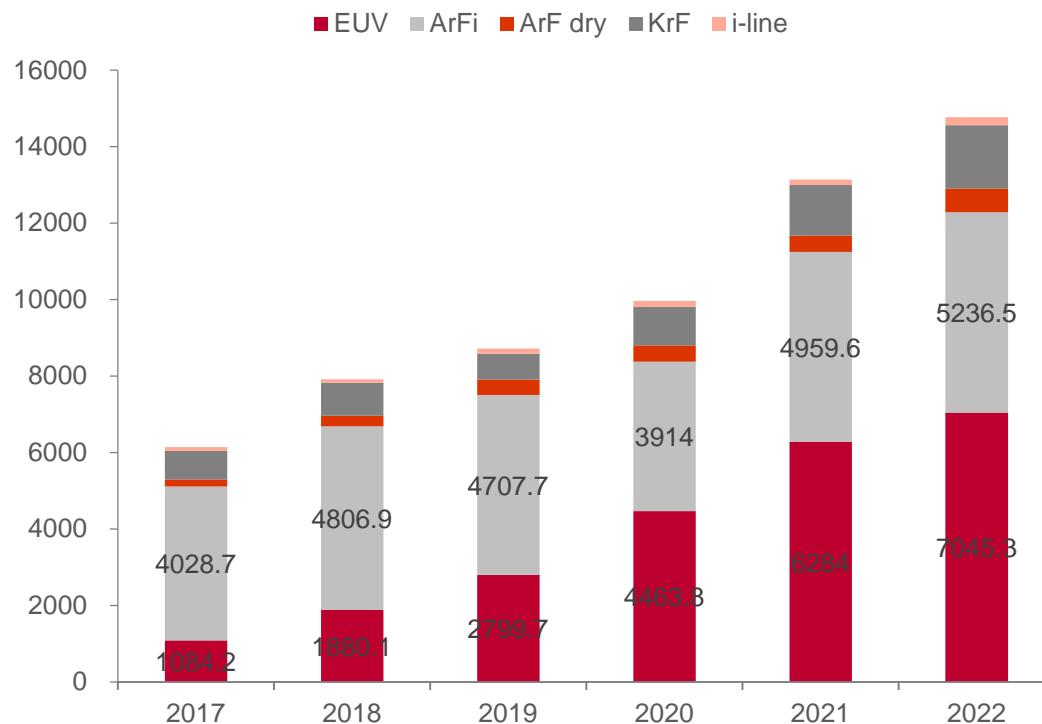
表：2022年全球半导体光刻机TOP3厂商出货情况（单位：台）

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
	i-line	45	125
	合计	345	30
			176

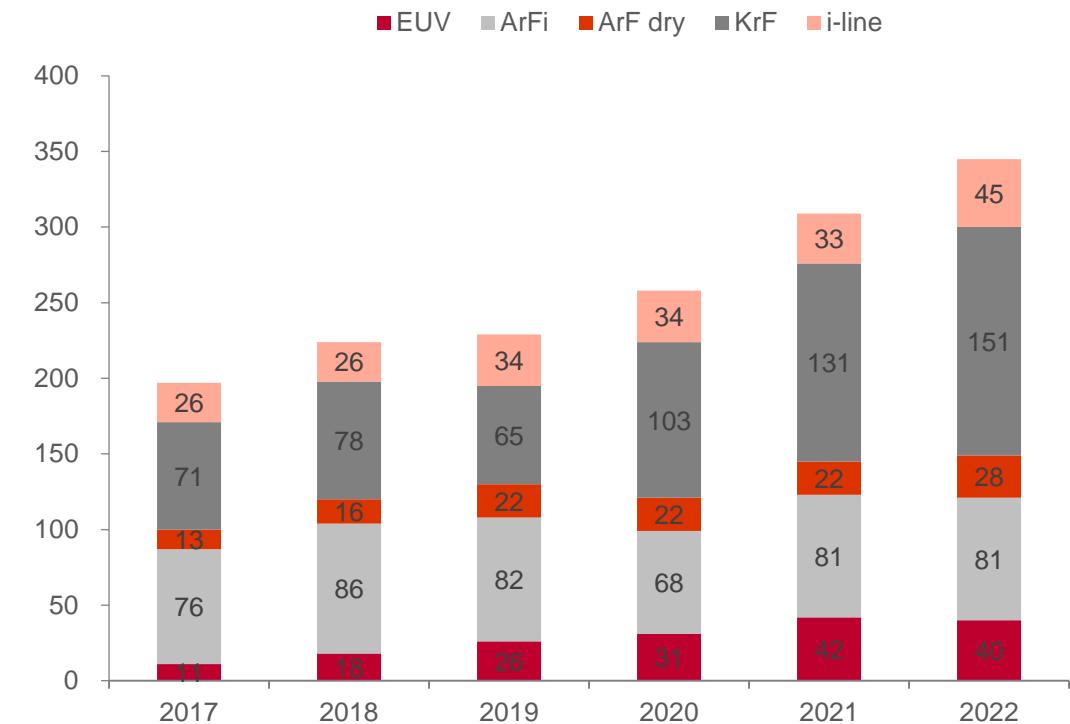
EUV光刻机为ASML贡献最主要营收

- EUV光刻机为ASML贡献最主要营收。从ASML各产品销售额来看，2022年EUV光刻机在ASML前道光刻机产品销售额占比近50%，其次是ArFi的35%。EUV和ArFi 作为高端机型，单价较贵，为ASML贡献了主要营收增长动力。
- KrF出货量最多。从ASML各产品出货量来看，2022年KrF出货量最多，其次是ArFi，再到EUV。

图：ASML各类光刻机销售额（百万欧元）



图：ASML各类光刻机出货量（台）



- ASML凭借光刻机在全球半导体设备厂商中位列第二。根据芯智讯数据，在2021年全球半导体设备厂商销售额排行中，ASML位列第二，销售额达到217.75亿美元，仅次于美国应用材料。

图：2021年全球前十大半导体设备厂商（亿美元）



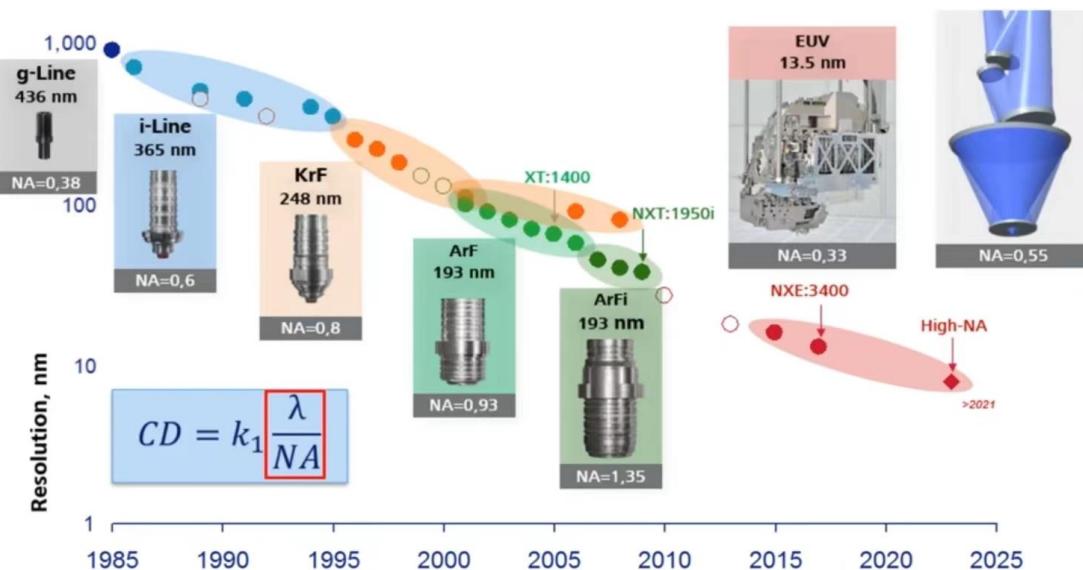
■ ASML光刻机种类最齐全，是全球唯一可生产EUV光刻机的公司，制程最小可达3nm。

- 1) 从类型来看，ASML覆盖了干式DUV光刻机、浸没式DUV光刻机及EUV光刻机，是全球唯一可生产EUV光刻机的公司，具有绝对领先优势。
- 2) 从光源来看，ASML覆盖了i-line、KrF、ArF和极紫外光源，最小光源波长为13.5nm。
- 3) 从分辨率来看，ASML覆盖了220nm、110nm、80nm、38nm、13nm等节点，EUV光刻机是目前全球分辨率最小的光刻机，经过多重曝光等工艺叠加制程可达到5nm/3nm。

表：ASML半导体光刻机产品参数

产品系列	产品名	光源	光源波长	数值孔径 NA	最高生产分辨率
Dry systems (干式DUV)	TWINSCAN XT:400L	i-line	365nm	0.65	220nm
	TWINSCAN XT:860M	KrF	248nm	0.8	110nm
	TWINSCAN XT:860N	KrF	248nm	0.8	110nm
	TWINSCAN NXT:870	KrF	248nm	0.8	110nm
	TWINSCAN XT:1060K	KrF	248nm	0.93	80nm
	TWINSCAN XT:1460K	ArF	193nm	0.93	65nm
	TWINSCAN NXT:1470	ArF	193nm	0.93	57nm
Immersion systems (浸没式DUV)	TWINSCAN NXT:1980Di	ArFi	193nm (等效134nm)	1.35	38nm
	TWINSCAN NXT:2000i	ArFi	193nm (等效134nm)	1.35	38nm
	TWINSCAN NXT:2050i	ArFi	193nm (等效134nm)	1.35	38nm
EUV光刻系统	TWINSCAN NXE:3400C	极紫外EUV	13.5nm	0.33	13nm
	TWINSCAN NXE:3600D	极紫外EUV	13.5nm	0.33	13nm

图：ASML光刻机发展历程



■ Nikon光刻机集中于DUV，是除了ASML以外唯一可以生产浸没式光刻机的厂商。

- 1) 从类型来看，Nikon具有干式DUV光刻机、浸没式DUV光刻机，是除了ASML以外唯一可以生产浸没式光刻机的厂商。
- 2) 从光源来看，Nikon覆盖了i-line、KrF、ArF光源，最小光源波长为193nm。
- 3) 从分辨率来看，Nikon覆盖了280nm、110nm、65nm、38nm等节点。

表：Nikon半导体光刻机产品参数

产品系列	产品名	光源	光源波长	数值孔径 NA	最高生产分辨率
ArF浸没式扫描光刻机	NSR-S635E	ArF	193nm	1.35	38nm
	NSR-S622D	ArF	193nm	1.35	38nm
ArF扫描光刻机	NSR-S322F	ArF	193nm	0.92	65nm
KrF扫描光刻机	NSR-S220D	KrF	248nm	0.82	110nm
i线步进式光刻机	NSR-SF155	i-line	365nm	0.62	280nm

■ Canon半导体光刻机主要集中于低端类型。

- 1) 从类型来看, Canon具有低端半导体的i-line和KrF光刻机, 未覆盖EUV、ArFi (浸没式)、ArF等机型。
- 2) 从光源来看, Canon覆盖了i-line、KrF光源, 最小光源波长为248nm。
- 3) 从分辨率来看, Canon覆盖了1.5微米、0.8微米、350nm、90nm等节点。

表: Canon半导体光刻机产品参数

产品系列	产品名	光源	光源波长	数值孔径NA	最高生产分辨率
KrF扫描式/步进式光刻机	FPA-6300ES6a	KrF	248nm	0.86~0.50	90 nm
	FPA-6300ESW	KrF	248nm	0.45~0.70	130 nm
	FPA-3030EX6	KrF	248nm	0.65~0.50	150 nm
	FPA-5550iZ2	i-line	365 nm	0.57~0.45	350 nm
	FPA-5550iX	i-line	365 nm	0.37~0.28	500 nm
i线步进式光刻机	FPA-3030i5a	i-line	365 nm		0.35 μm
	FPA-3030iWa	i-line	365 nm	0.24~0.16	0.8 μm
	FPA-5520iV	i-line	365 nm	0.18~0.15	1.5μm
	FPA-5520iV HR Option	i-line	365 nm	0.24~0.15	0.8μm
	FPA-5520iV LF Option	i-line	365 nm	0.24~0.15	1.5μm
	FPA-5520iV LF2 Option	i-line	365 nm	0.24~0.12	0.8μm
	FPA-8000iW	i-line	365 nm	0.24~0.12	1.0 μm

目 录

一、光刻是芯片制造最核心的环节，大陆自给率亟待提升

1.1 光刻机是制造的核心设备，市场规模全球第二

1.2 一超两强垄断市场，卡脖子现象凸显

二、光刻机：多个先进系统组合，核心零部件被海外厂商垄断

2.1 光刻机发展历程：从接触式光刻机到EUV，分辨率不断降低

2.2 多个先进系统的组合，技术壁垒极高

三、大陆厂商实现从“0到1”，本土化带来广阔替代空间

四、投资建议及风险提示

光刻机：人类科技之巅

- 光刻机是一种投影曝光系统：光刻机由光源、照明系统、物镜、工件台等部件组装而成。在芯片制作中，光刻机会投射光束，穿过印有图案的光掩膜版及光学镜片，将线路图曝光在带有光感涂层的硅晶圆上。通过蚀刻曝光或未受曝光的部分来形成沟槽，再进行沉积、蚀刻等工艺形成线路。
- 光刻机的三大核心系统：光源系统、光学镜头、双工作台系统。

图：光刻机总体结构

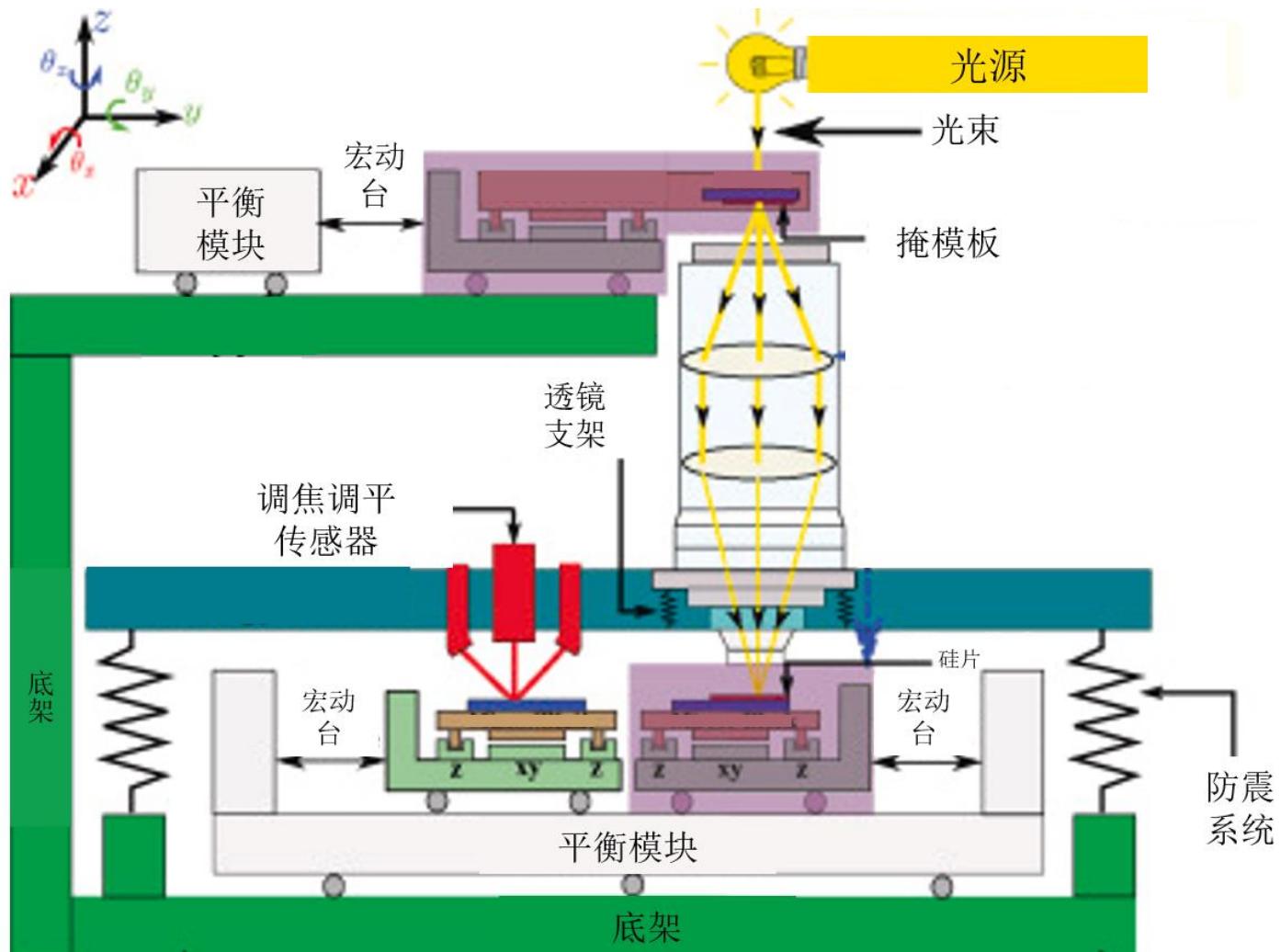


表：光刻机核心系统介绍

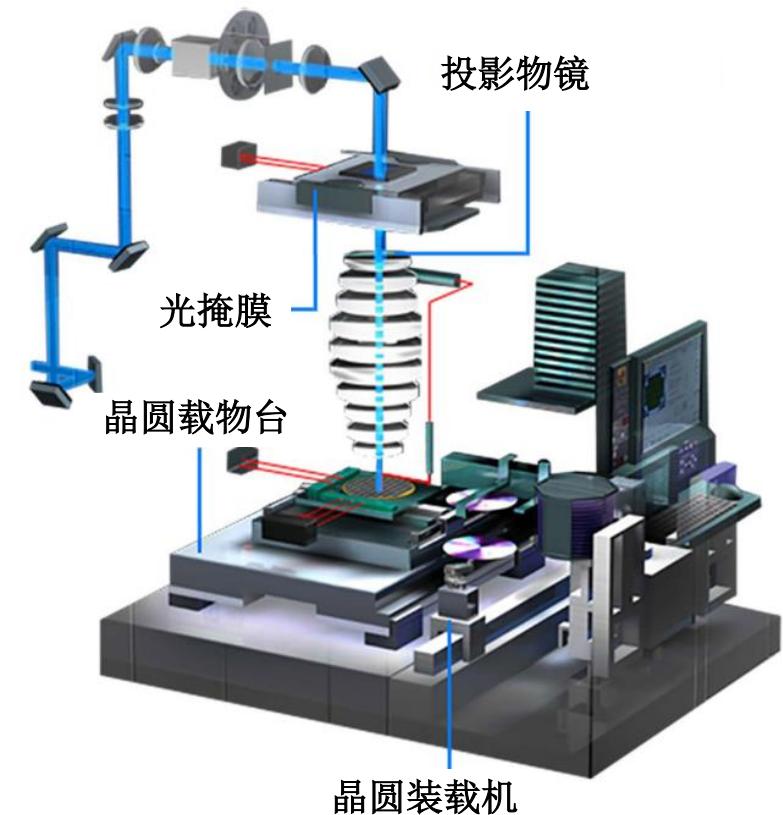
核心系统	作用
照明系统	提供高均匀性的照明光场并精确控制曝光剂量
投影物镜系统	将掩膜图形以一定的缩小比例成像到硅片上，直接影响光刻机的分辨率、套刻精度、良率
工作台/掩膜台系统	工作台负责承载传输硅片，掩膜台用于承载掩膜版
自动对准系统	控制套刻误差，保证两次光刻精准对齐
调焦调平测量系统	测量硅片表面相对于投影物镜的高度和转角，保证硅片当前场在曝光过程中始终处于投影物镜的焦深范围内
掩膜传输系统	负责运输掩膜版，控制掩膜版整个运动流程
硅片传输系统	承载硅片整个运动过程，实现硅片以高精度和高效率从片盒传送至工作台的功能
框架/减振/环境控制系统	将工作台与外部环境隔离，保持水平，减少外界振动干扰，并维持稳定的温度、压力
整机控制系统	光刻机的“大脑”和“神经”，将各分系统有机地连接起来并使其进行有序工作

光刻机：人类科技之巅

图：光刻机结构

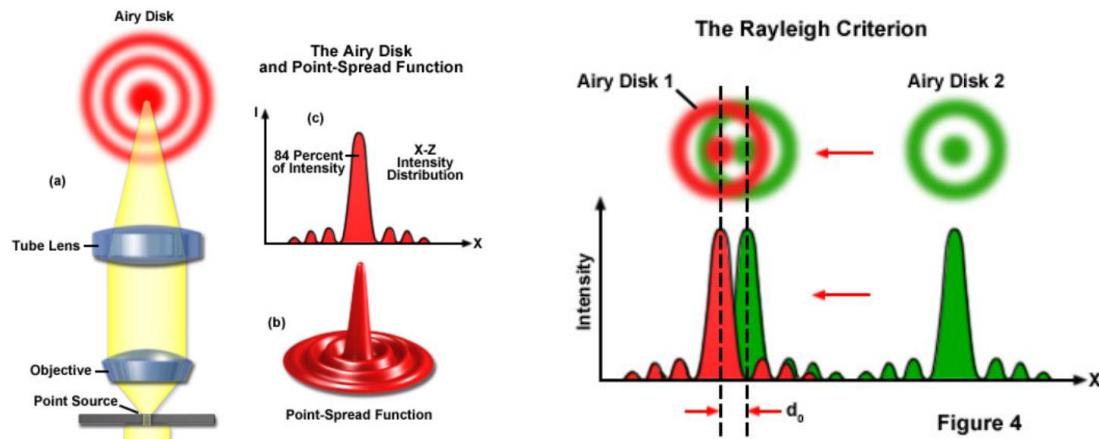


图：光刻机核心部件结构

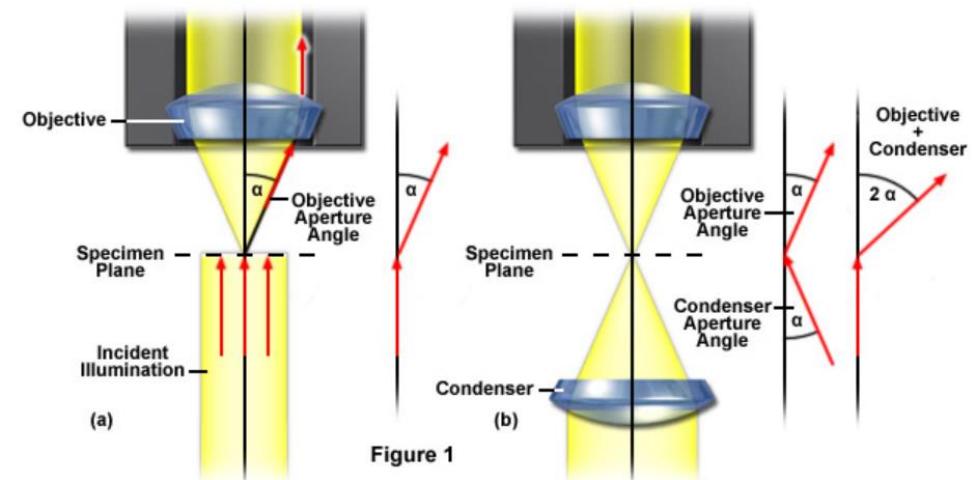


- 光刻分辨率是光刻曝光系统最重要的技术指标，由光源波长、数值孔径、光刻工艺因子决定。根据瑞利准则，分辨率公式为 $R = k_1 * \lambda / NA$ ， λ 代表光源波长，NA 代表物镜的数值孔径， k_1 代表与光刻工艺因子。数值孔径指透镜与被检物体之间介质的折射率 (n) 和孔径角 ($2a$) 半数的正弦之乘积。公式为： $NA = n * \sin \alpha$ 。n 为投影物镜系统像方介质的折射率， α 为投影物镜像方半孔径角。孔径角又称“镜口角”，是透镜光轴上的物体点与物镜前透镜的有效直径所形成的角度。孔径角越大，进入透镜的光通量就越大，它与透镜的有效直径成正比，与焦点的距离成反比。
- 瑞利准则指衍射极限系统中的分辨率极限。理想的成像系统，一个点所成的像是一个完美的点，但实际光学系统中的透镜具有一定的孔径大小，由此导致所成的像不是一个点，而是一个艾里斑。对于两个距离较近的点，所成的光斑也距离比较近。能够区分两个光斑的最小距离，就是分辨率。当一个艾里斑的中心与另一个艾里斑的第一极小值重合时，达到极限点，该极限被称为瑞利准则。

图：分辨率极限示意图

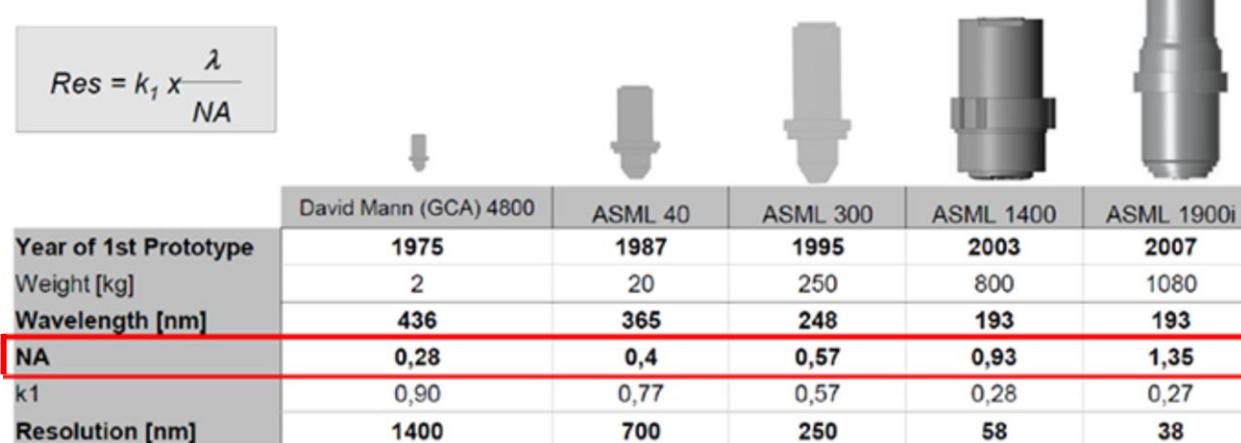


图：孔径角示意图

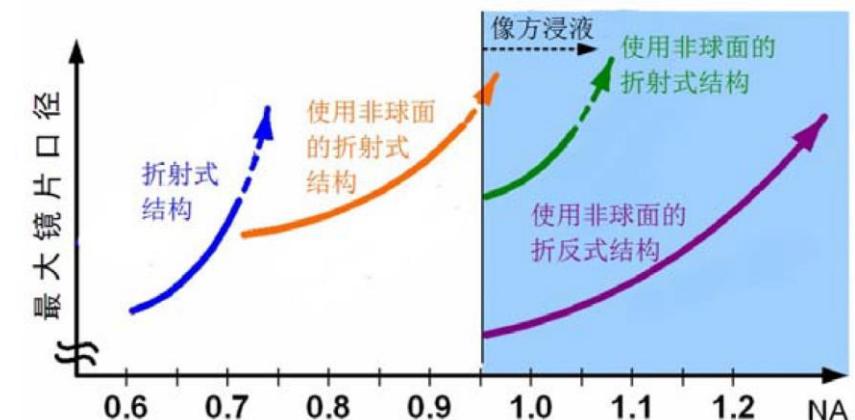


- 三方面提高光刻机分辨率：增大数值孔径、缩短波长、减小光刻工艺因子。分辨率指投影光学系统在晶圆上可实现的最小线宽。光刻机分辨率由光源波长、数值孔径、光刻工艺因子决定。因此可以从以下三方面提高分辨率：1) 增大投影光刻物镜的数值孔径；2) 缩短曝光波长；3) 减小光刻工艺因子。
- 1) 增大投影光刻物镜的数值孔径：一方面可以改进投影式透镜系统来增大入射角，另一方面可以采用折射率高的介质-浸润式。非球面的使用能够在不增加独立像差数的前提下，增加自变量的个数，有利于改善像质，同时在同等约束条件下，减少了光学元件的数量。非球面的应用使物镜NA可以增加到0.9，接近物理极限(干式光刻)；引入浸没式技术后，物镜NA可以增加到1.1以上(浸没式光刻)；加入反射镜组成折返式结构理论上物镜NA可到1.35(极限值)。趋势为(干式)球面镜→非球面镜→(浸没式)非球面镜→折返式。
- 2) 缩短曝光波长：由于晶体管越做越小，元件线路越来越密集，光刻机需要达到更高的分辨率，因此必须要寻找波长越来越短的光源。

表：数值孔径变化趋势



表：提高数值孔径的方法



- 3) 减小光刻工艺因子: 计算光刻OPC——在掩膜上增加辅助结构来消除图像失真, 实现分辨率的提高; 离轴照明OAI——通过采用特殊光源让正入射方式光变成斜入射方式, 目的是在同等数值孔径内容纳更多的高阶光, 从而曝光更小尺寸结构, 提高分辨率; 相移掩膜PSM——当两个光源进行成像时会在重合部分产生干涉及效应, 使光强增大, 导致两个光源不能有效地区分开, 如果通过改变掩膜结构在其中一个光源处采用180度相移, 这两处光源产生的光会产生相位相消, 光强相消, 两个光源可以区分开, 提高分辨率。
- **工艺因子已突破理论极限**: 理论上对于单次曝光 k_1 的最小极限约为 0.25, 通过组合使用OPC、多重图形等分辨率增强技术, 光刻工艺因子已突破其理论极限0.25。

图: 光刻OPC

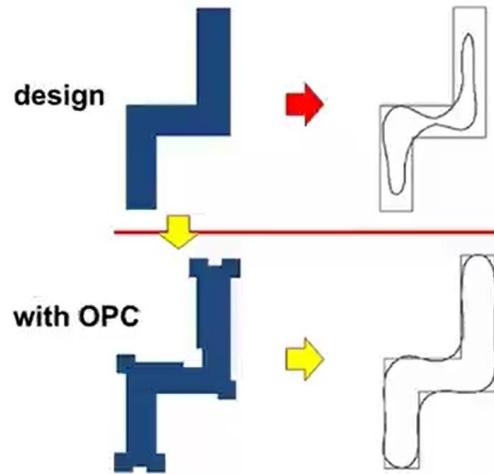


图: 离轴照明OAI

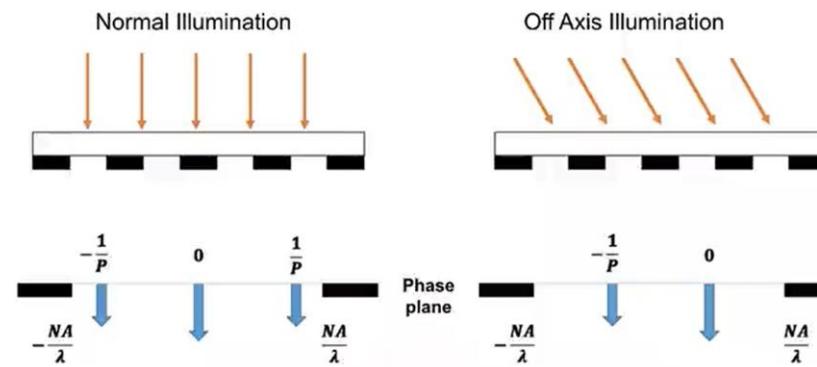
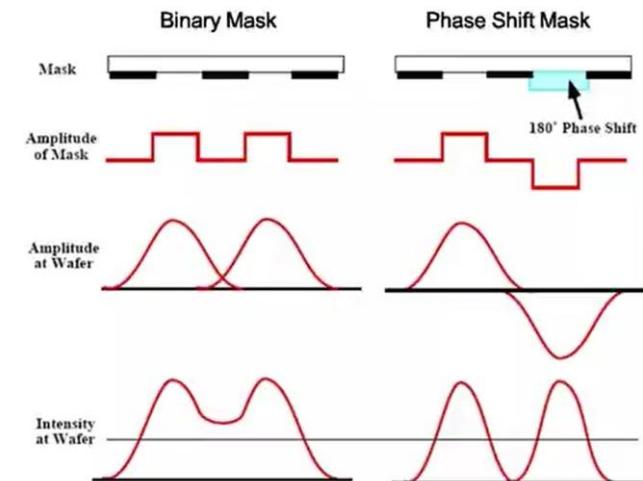


图: 相移掩膜PSM



目 录

一、光刻是芯片制造最核心的环节，大陆自给率亟待提升

1.1 光刻机是制造的核心设备，市场规模全球第二

1.2 一超两强垄断市场，卡脖子现象凸显

二、光刻机：多个先进系统组合，核心零部件被海外厂商垄断

2.1 光刻机发展历程：从接触式光刻机到EUV，分辨率不断降低

2.2 多个先进系统的组合，技术壁垒极高

三、大陆厂商实现从“0到1”，本土化带来广阔替代空间

四、投资建议及风险提示

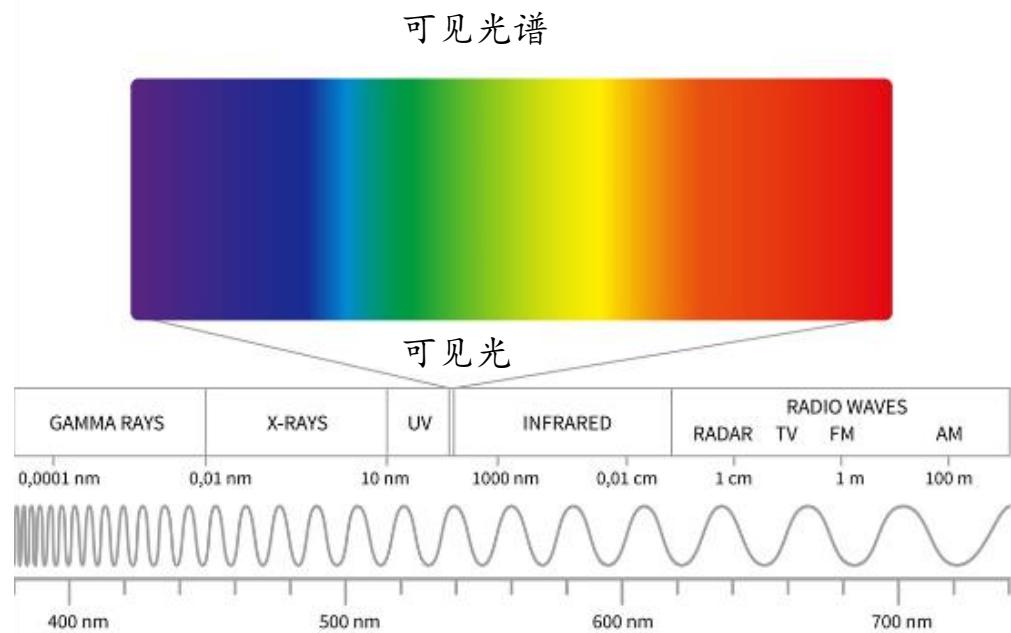
2.2.1 光源系统：能量的来源，光刻工艺的首要决定项

- 光源是光刻机核心系统之一，光刻机的工艺能力首先取决于其光源的波长。
- 光源分为汞灯产生的紫外光、深紫外光、极紫外光，目前光源波长已发展到13.5nm：为了追求更小的芯片制程，需要光源波长不断变短，最早光刻机的光源采用高压汞灯产生的紫外光源，高压汞灯可产生436nm（g-line）、365nm（i-line）波长紫外光▶随后，业界选用了准分子激光器产生的深紫外光源，深紫外光激光（DUV laser）可达KrF（248nm）、ArF（193nm）、F2（157nm）▶制程突破7nm以下时，需要极紫外光激光（EUV laser），可达13.5nm极短波长的光源，该光源无法从激光器中产生，须由高能激光轰击金属锡激发的等离子体而产生。

图：光源波长发展历程

光源类型	波长	制程节点	对应光刻机	代数
EUV光源（Extreme Ultraviolet Lithography）	13.5nm	7-3nm	极紫外式光刻机	第五代
DUV光源（Deep Ultraviolet Lithography）	ArF+immersion	193nm（等效134nm）	45-7nm/ 130-65nm	第四代
	F2	157nm		
	ArF	193nm		
	KrF	248nm	180.13nm	第三代
汞灯光源	i-line	365nm	800-250nm	第二代
	h-line	405nm		
	g-line	436nm		第一代

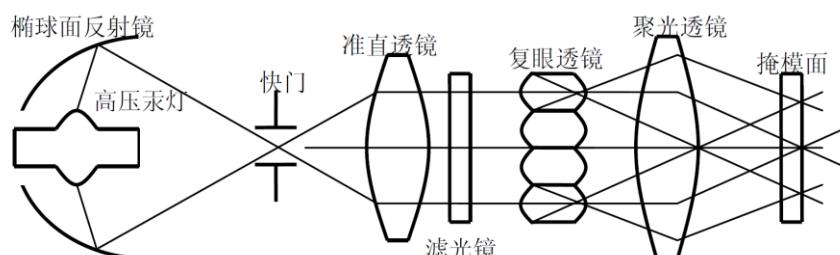
图：光谱图



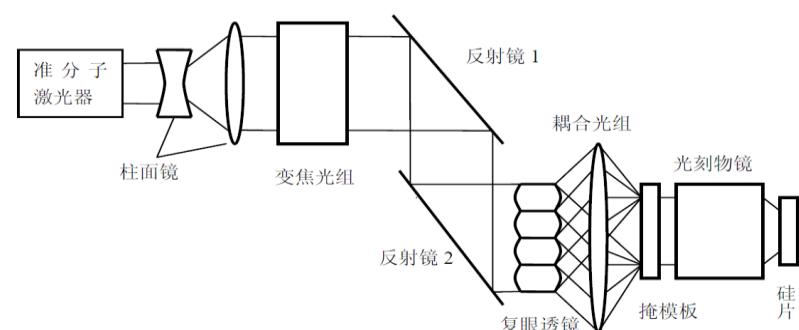
2.2.1 光源系统：能量的来源，光刻工艺的首要决定项

- 光刻光源系统不断发展，从高压汞灯光刻光源到深紫外光光源再到极紫外光光源。
- 1) 高压汞灯：一种气体放电电光源，汞蒸气被能量激发，汞原子最外层电子受到激发从而跃迁，落回后放出光子。放电管内充有启动用的氩气和放电用的汞。
- 2) 深紫外光光源：一般采用准分子激光器作为光源。准分子激光光源工作介质一般为稀有气体及卤素气体，并充入惰性气体作为缓冲剂，工作气体受到放电激励，在激发态形成短暂存在的“准分子”，准分子受激辐射跃迁，形成紫外激光输出。准分子激光器常在输出能量、波长、线宽、稳定性等方面远超越前期的汞灯光源。

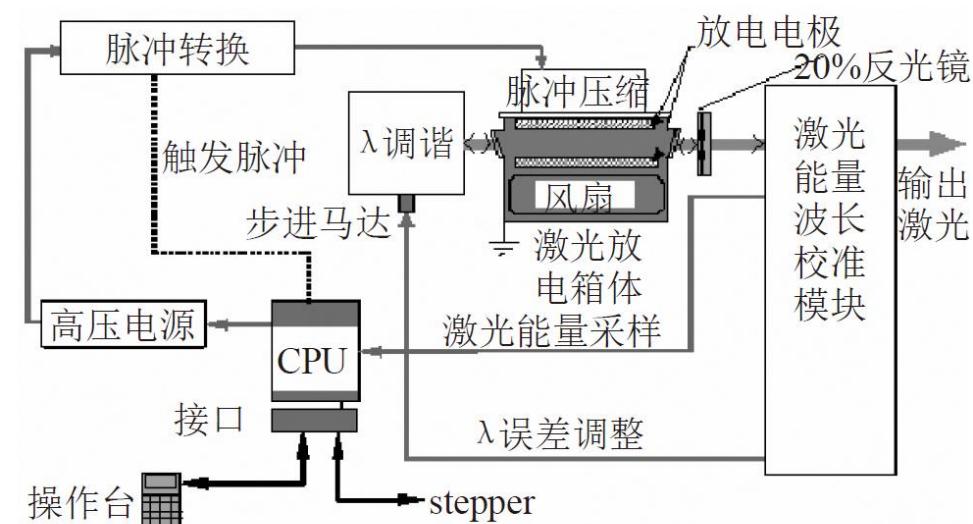
图：高压汞灯光刻光源系统结构图



图：紫外激光器照明系统结构图



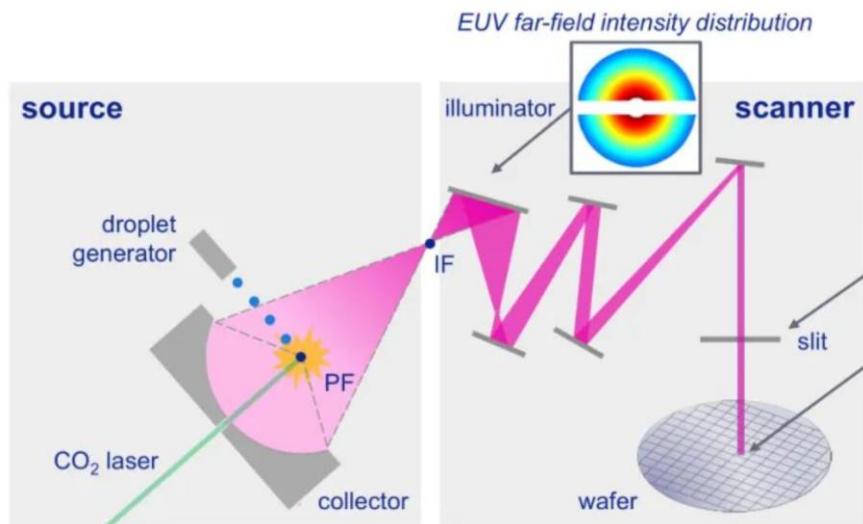
图：Cymer准分子激光器的工作原理



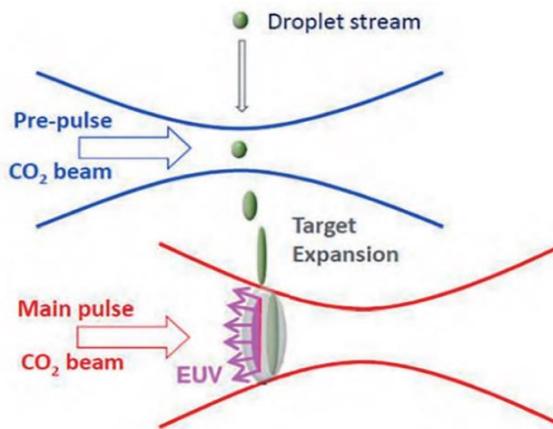
2.2.1 光源系统：能量的来源，光刻工艺的首要决定项

- 3) **极紫外光光源**：极紫外光光源由光的产生、光的收集、光谱的纯化与均匀化三大单元组成。工作元器件包括大功率CO₂激光器、多层涂层镜、负载、光收集器、掩膜版等。
- **极紫外光光源原理**：高功率激光击打金属锡，产生等离子体，辐射出极紫外光。将高功率的二氧化碳激光打在直径为30微米的锡液滴上，通过高功率激光蒸发锡滴，把融化的锡从高处以每秒5万次的频率滴下，每一滴锡20微米的大小，瞄准每一滴锡滴，以CO₂激光器产生的高能激光击中并产生等离子体，从而发出13.5nm波长的EUV光。实际上激光会发出两个脉冲——预脉冲和主脉冲。预脉冲首先击中锡珠，将其变成正确的形状，然后主脉冲将压扁的锡珠转化为等离子体，发射出EUV光。

图：EUV光源系统结构图



图：EUV光源双脉冲方案



图：EUV光产生的过程



2.2.1 光源系统：能量的来源，光刻工艺的首要决定项

- EUV 光刻机技术难点主要是光源功率高：为满足极紫外光刻需求，光源应具有以下性能：（1）光源功率达250W，且功率波动小；（2）较窄的激光线宽，具有频率噪声和很小的相对强度噪声，减少光学损耗；（3）较高的系统效率。光源转化率最终要达到250w以上的功率，因此激光器的平均功率要达到20kW。为了让激光束以极大的功率稳定传输，系统非常复杂。EUV 激光系统由大约 45 万个零件组成，重约 17 吨。从种子光发生器到锡珠有 500 多米的光路，对所有零部件的要求非常苛刻。
- Gigaphoton（EUV光源供应商之一）激光器功率达27kW：Gigaphoton 成立以来一直为 ASML、Nikon 和 Canon 提供激光光源。共设计三款EUV光源，分别为Proto#1、Proto#12、Pilot#1，其中Pilot#1为商业化应用的产品，激光器功率为27kw，输出功率达到250W。目前EUV光源只有两家公司能够生产：一家是美国Cymer，另外一家是日本Gigaphoton。

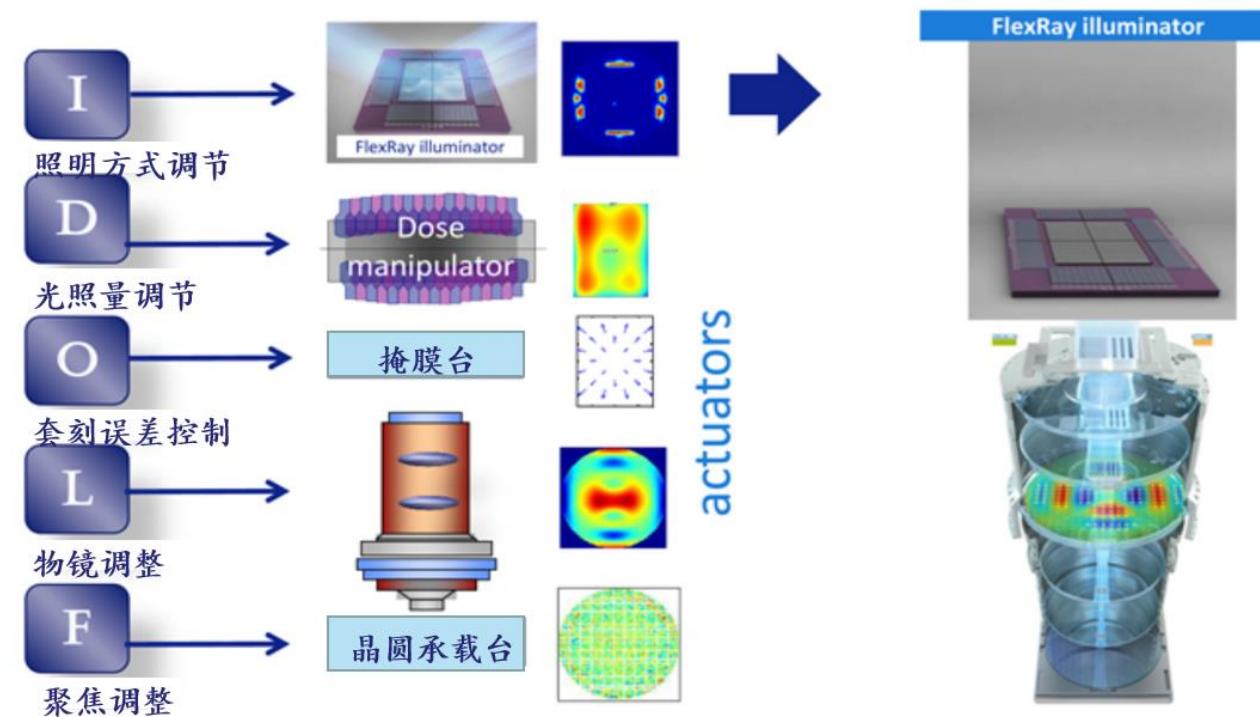
表：Gigaphoton 公司 EUV 光源产品参数

		Proto#1	Proto#2	Pilot#1
技术参数	目标性能 euv功率	25W	>100W	250W
	脉冲速率	100kHz	100kHz	100kHz
	输出角度	水平	向上62°	向上62°
	CO2 激光器功率	5kW	20kW	27kW
	反射膜收集镜寿命	实验平台	10天	超过3个月

2. 2. 2 曝光系统：照明系统+投影物镜

- 曝光系统：曝光系统包含照明系统（光源加工）和投影物镜（高分辨成像），是光刻机中最昂贵最复杂的部件之一。物镜的性能决定了光刻机的线宽、套刻精度，是光刻机的核心部件，其技术水平很大程度上代表了光刻机的技术水平。

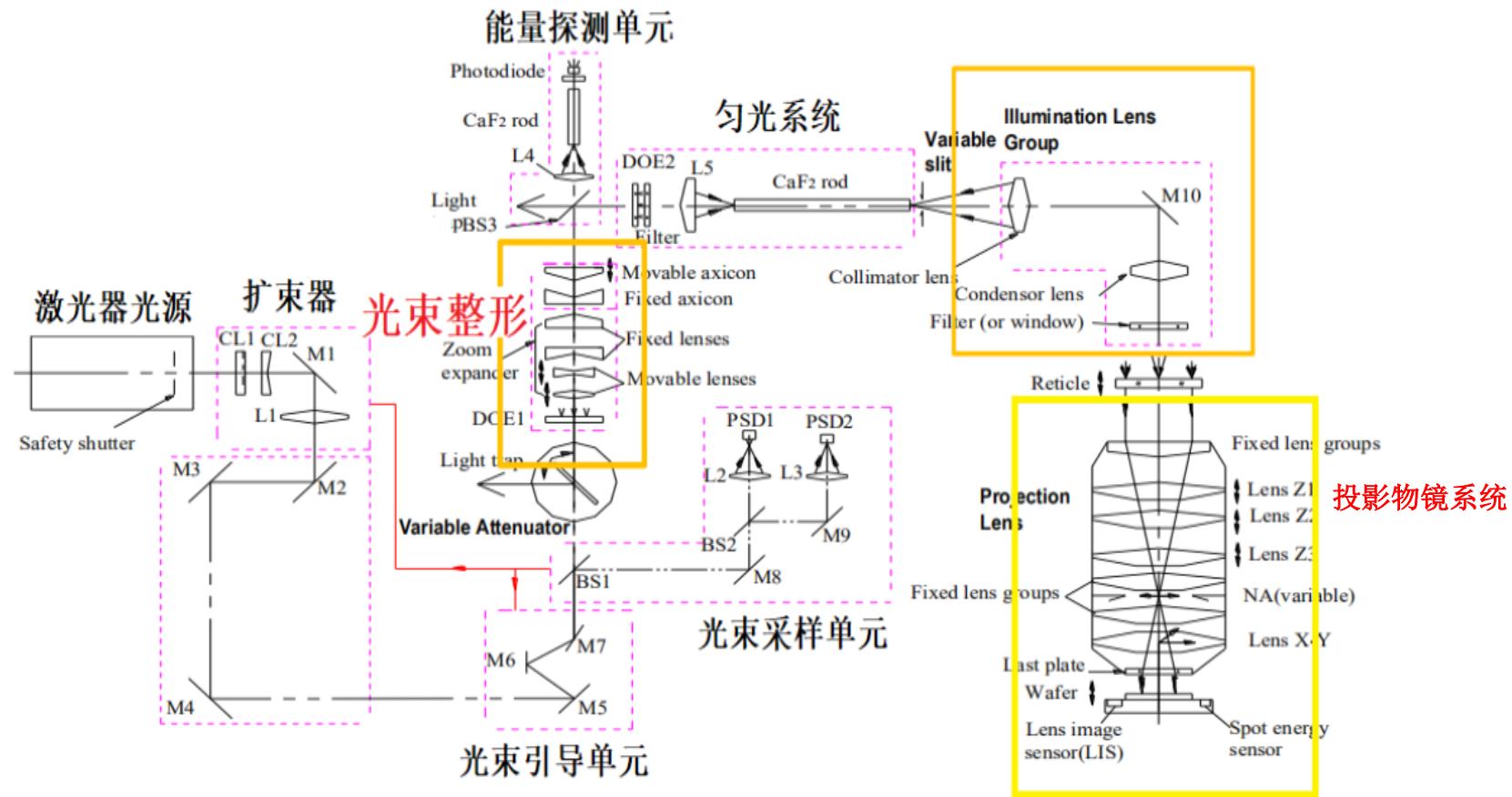
图：光刻机照明与投影物镜系统的工作流程图



2.2.2 照明系统：光源高质量加工的关键

- 照明系统为投影物镜成像提供特定光线角谱和强度分布的照明光场。照明系统位于光源与投影物镜之间，是复杂的非成像光学系统。照明系统的主要功能是为投影物镜成像提供特定光线角谱和强度分布的照明光场。照明系统包括光束处理、光瞳整形、能量探测、光场匀化、中继成像和偏振照明等单元。

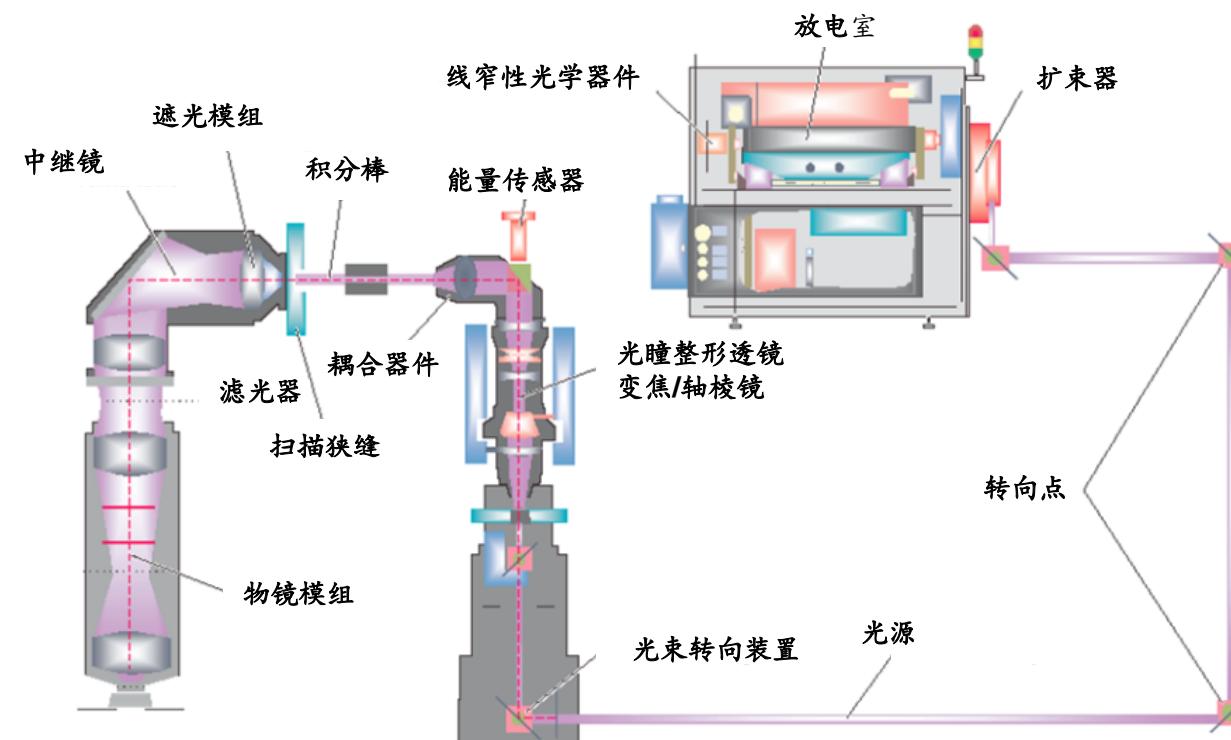
图：光学系统原理



2.2.2 照明系统：光源高质量加工的关键

- 照明系统组成部件： 1) 光束处理单元：与光源相连，主要实现光束扩束、光束传输、光束稳定和透过率控制等功能，其中光束稳定由光束监测和光束转向两部分组成。 2) 光瞳整形单元：光刻机需要针对不同的掩膜结构采用不同的照明模式以增强光刻分辨率，提高成像对比度。光瞳整形单元通过光学元件调制激光束的强度或相位分布，实现多种照明模式。 3) 光场匀化单元：用于生成特定强度分布的照明光场。引入透射式复眼微透镜阵列，每个微透镜将扩束准直后的光源分割成多个子光源，每个子光源经过科勒照明镜组后在掩膜面叠加，从而实现高均匀性的照明光场。4) 中继镜：在掩膜面上形成严格的光束强度均匀的照明区域并将中间的平面精确成像在掩膜版平面。

图：照明系统结构

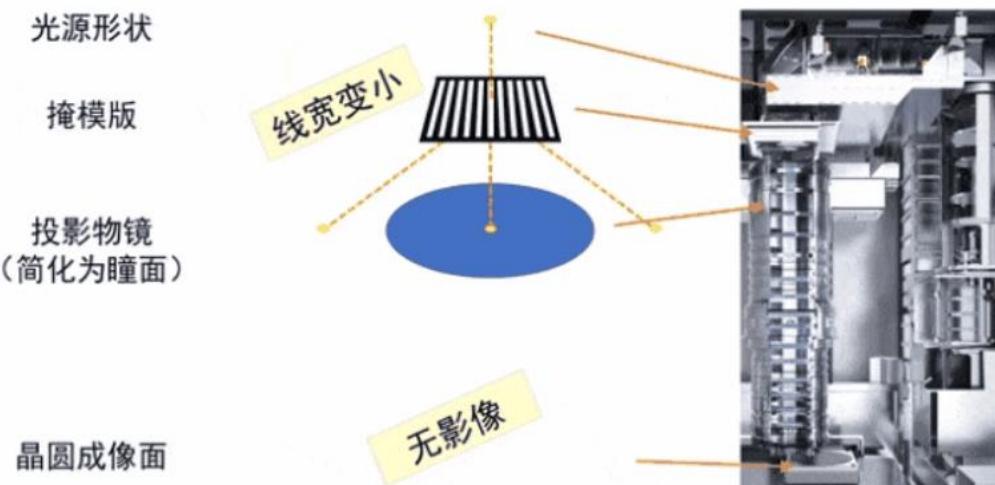


2.2.2 照明系统：光源高质量加工的关键

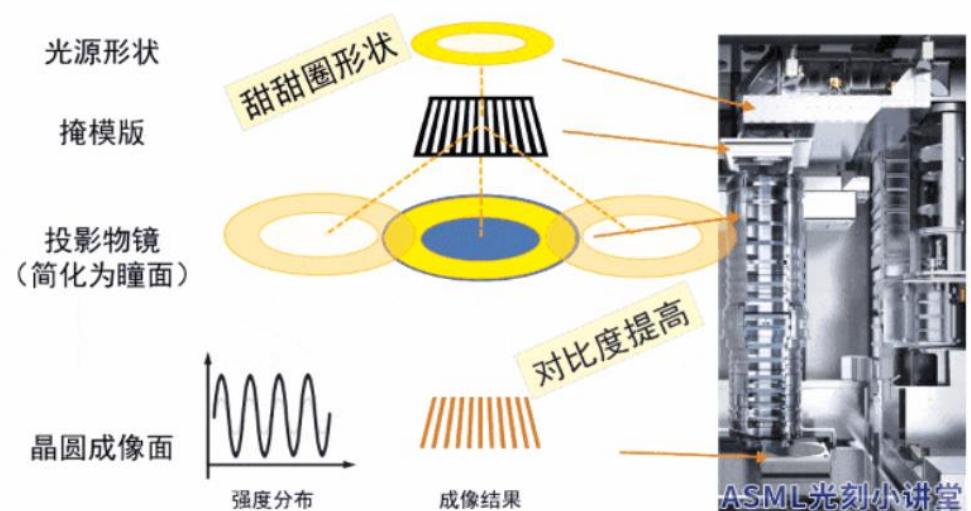
■ 照明系统技术难点：为了使光能在晶圆上完美成像，需要进行高质量加工。

- 1) 提升光均匀度：光刻要以来回扫描的方式成像，这束条形光的任何位置能量都需一致。需要通过镜子进行多次反射，提升光的均匀度。
- 2) 控制扫描条形光的开合：晶圆上曝光单元的所有位置需要接受等量的光，因此扫描的条形光必须是能开合的。
- 3) 调节光形状，需要用到光瞳整形技术：不同的照明方式，比如圆形、环形、二级、四级光源下，光刻机分辨率不同。例如：光穿过掩膜版上的图案时会产生衍射效应，线宽越小，衍射角度越大，1阶衍射光超过投影物镜外就无法成像。如果将点光的形状改成环状光或其他形状，1阶衍射光就可以被收进物镜且图像对比度清晰。

图：衍射光无法成像



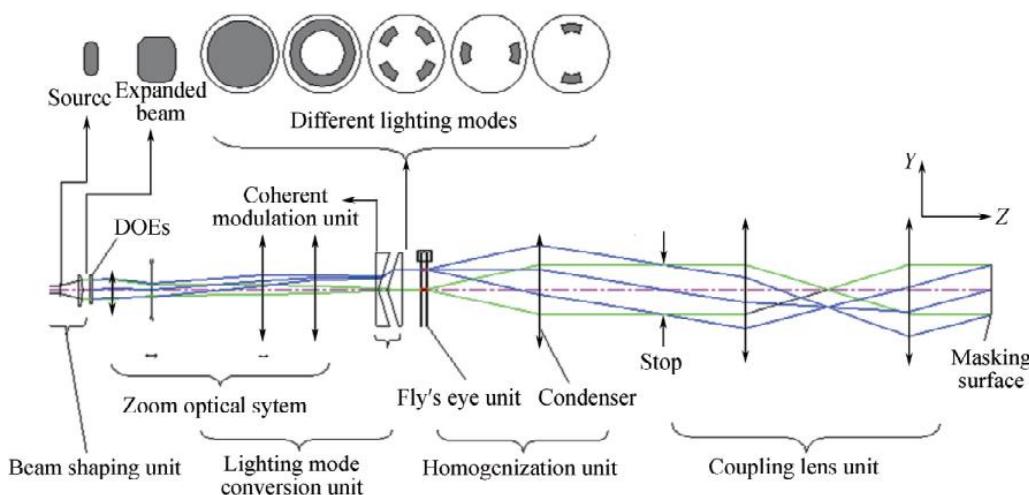
图：环形光成像



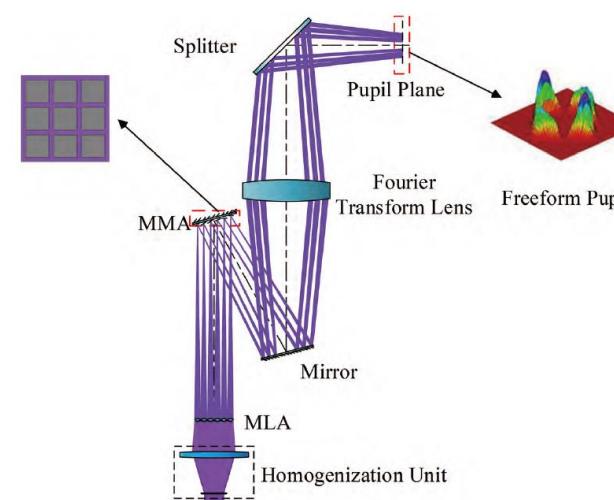
2.2.2 照明系统：光源高质量加工的关键

- 光瞳整形单元是照明系统中技术难度较大的部件，主要技术有：基于衍射光学元件（DOE）的光瞳整形技术和基于微反射镜阵列（MLA）的自由光瞳整形技术。
- 衍射光学元件（DOE）的光瞳整形：光瞳整形单元主要包括衍射光学元件、变焦距傅里叶变换镜组、锥形镜组和光瞳补偿器。衍射光学元件用于实现照明光瞳的角向调制，傅里叶变换镜组、锥形镜组用于照明光瞳的径向调制。缺点：1个衍射光学元件只能实现1种照明模式。
- 微反射镜阵列（MLA）的自由光瞳整形：主要由能量均衡组件、光束分割组件、微反射镜阵列和傅里叶变换镜组组成。核心器件是微反射镜阵列，由数千个二维转角连续可调的微反射镜组成，通过调整微反射镜阵列的角位置分布可实现任意照明模式，ASML先进机型中较多使用自由光瞳整形技术。

图：基于衍射光学元件的光瞳整形技术



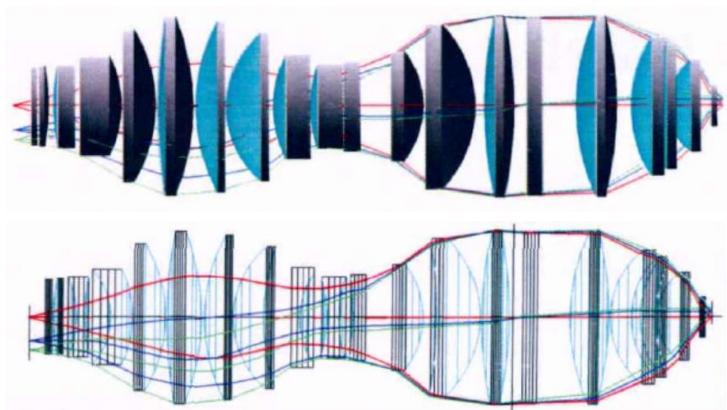
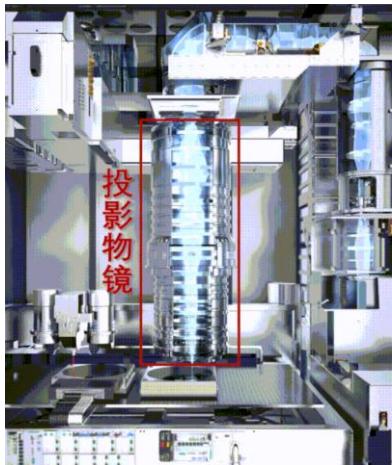
图：基于微反射镜阵列的光瞳整形技术



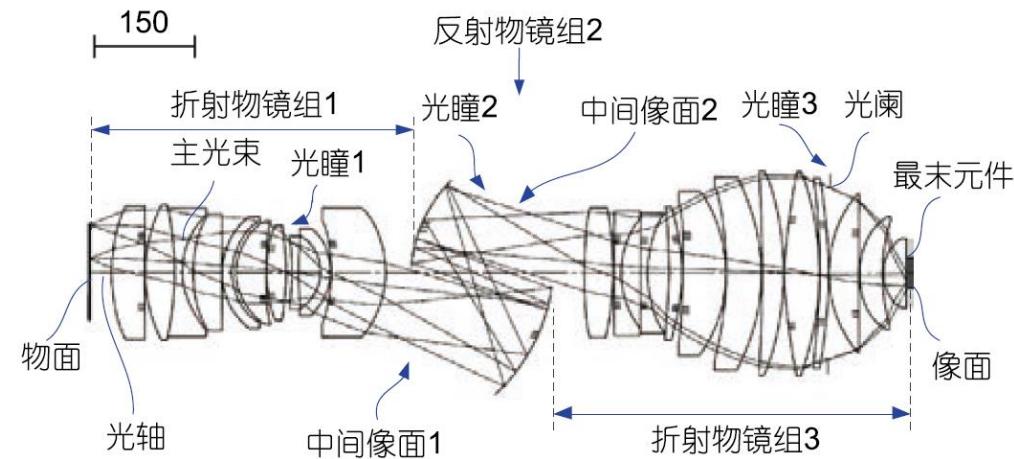
2.2.3 投影物镜系统：精准成像，对线宽起重要作用

- **投影物镜是精准成像的关键：**投影物镜要将照明模组发射出的1阶衍射光收进物镜内，再把掩膜版上的电路图案缩小，聚焦成像在晶圆上，并且还要补偿光学误差。投影物镜主要由多枚镜片组成。随着分辨率要求不断提高，光刻机投影物镜结构越来越复杂，对光学材料、光学加工、光学镀膜等要求达到目前工业水平的极限，是光刻机中技术壁垒最高的零部件之一。
- **投影物镜的结构型分为折射式和折反式：**1) 折射式：光学元件旋转对称并沿着同一个光轴对准，视场位于光轴中央，结构简单易于装调；2) 折反式($NA > 1.1$)：反射镜有着正光焦度和负值场曲，不依赖传统“腰肚”结构，使用较少数量和较小口径的光学元件满足对场曲的校正在一定物镜尺寸限制内实现更大的NA。
- **物镜特点是直径大、镜片多、镜片可动：**1) 物镜直径大：ASML DUV光刻机中的先进机种的投影物镜直径大于40厘米，增加投影物镜的直径可以提高数值孔径，进而提高光刻机分辨率。2) 多片透镜组合：ASML DUV光刻机投影物镜的高度超过1米，镜片数量超过15片。和相机一样，单个透镜的光学特性会导致图像失真，需要组合透镜来修正图像形变。3) 可动镜片：用运动着的镜片来消除镜头组装及光刻生产等过程中所产生的各种像差。可动镜片覆盖了垂直修正、倾斜修正和多向修正。

图：典型折射式投影物镜示意图



图：折反式投影物镜示意图



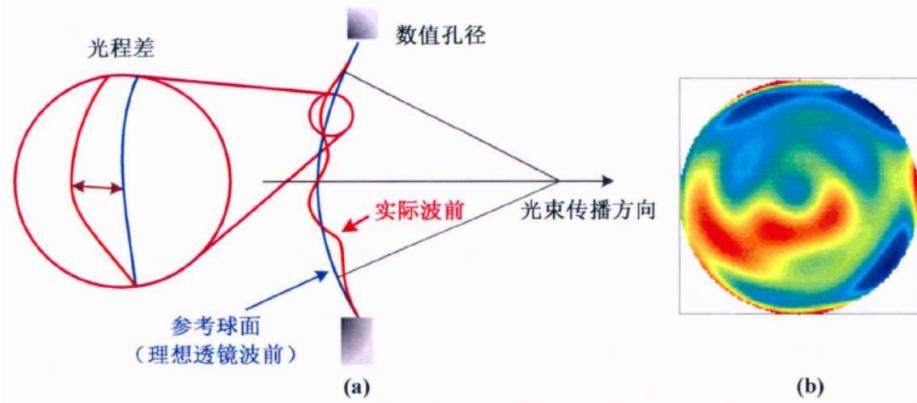
2.2.3 投影物镜系统：精准成像，对线宽起重要作用

■ 投影物镜技术难点：像差调节要求高、工艺精密。

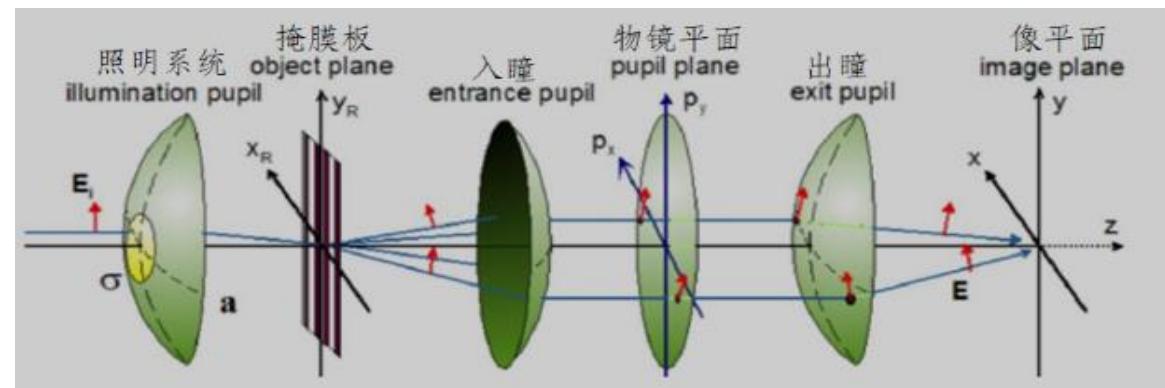
➤ 1) 像差调节要求高：

• 波像差是实际波面与理想波面之间发生的偏离：光在介质中传播的时候，从物点发出的同心光束相当于球面波，球面波经过光学系统的时候，其曲率发生改变。如果是理想的光学系统，它会形成另外一个球面波。但在实际的光学系统，会受到投影物镜自身材料、特性、厚度、粗糙度、环境等因素的影响，经过投影物镜的出射，波面会发生变形。实际波面与理想波面之间发生的偏离就是波像差。波像差直接影响光刻机成像质量、光刻分辨率，因此光刻机的投影物镜系统需要对像差像差进行校正。

图：像差示意图

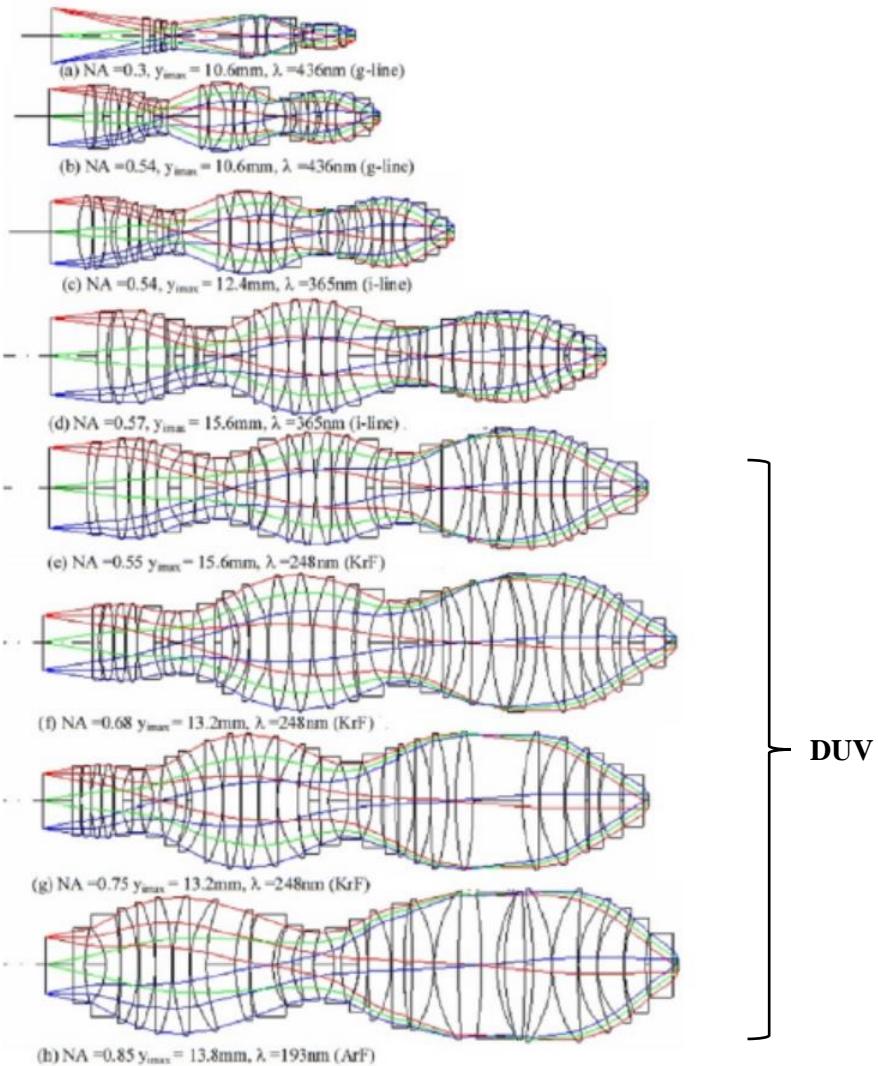


图：光刻机成像过程



2.2.3 投影物镜系统：精准成像，对线宽起重要作用

图：尼康公司光刻物镜结构变化（1981-2004）



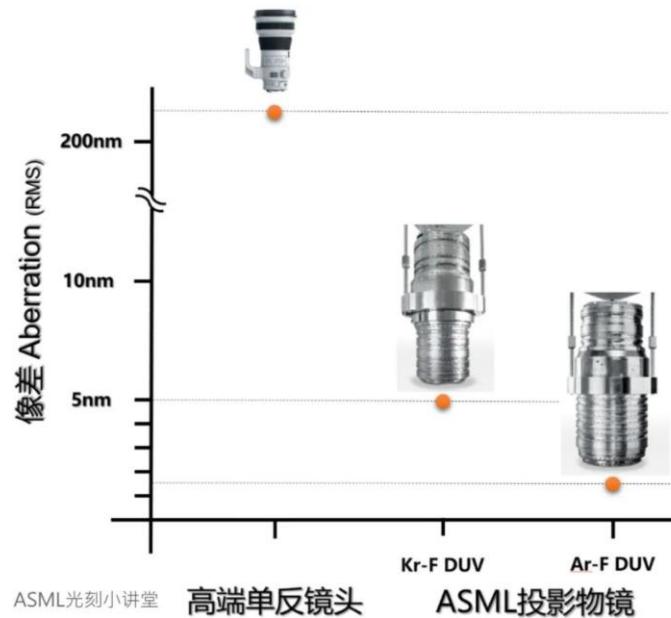
➤ 1) 像差调节要求高：

- 为了更好的调节像差，物镜发展趋势为：从“双腰”到“单腰”、引入非球面镜片与反射式镜片。
- “双腰”到“单腰”：为了实现场曲的矫正，投影物镜采用的都是“腰肚”式结构。最初系统的结构依次为正组，负组，正组，负组，正组，形成“腰肚”，随着非球面数量的增加，双腰结构结构逐渐从“1.5腰结构”变为“单腰结构”，光学元件数减少。
- 引入非球面镜片：NA大于0.75时，需引入非球面镜片。原因：一方面，如果采用全球面结构形式，光学元件的孔径尺寸及体积随着NA的增加急剧增加；另一方面，物镜投影物镜NA增加，分辨率增强，成像质量要求也进一步提高，采用全球面光学系统，设计复杂度随之增加。
- 引入反射式镜片：NA大于1.1时，需采用折反式投影光刻物镜。加入凹面反射元件。凹面有正的光焦度，对场曲的贡献是负值，凹面镜能较好的矫正场曲。

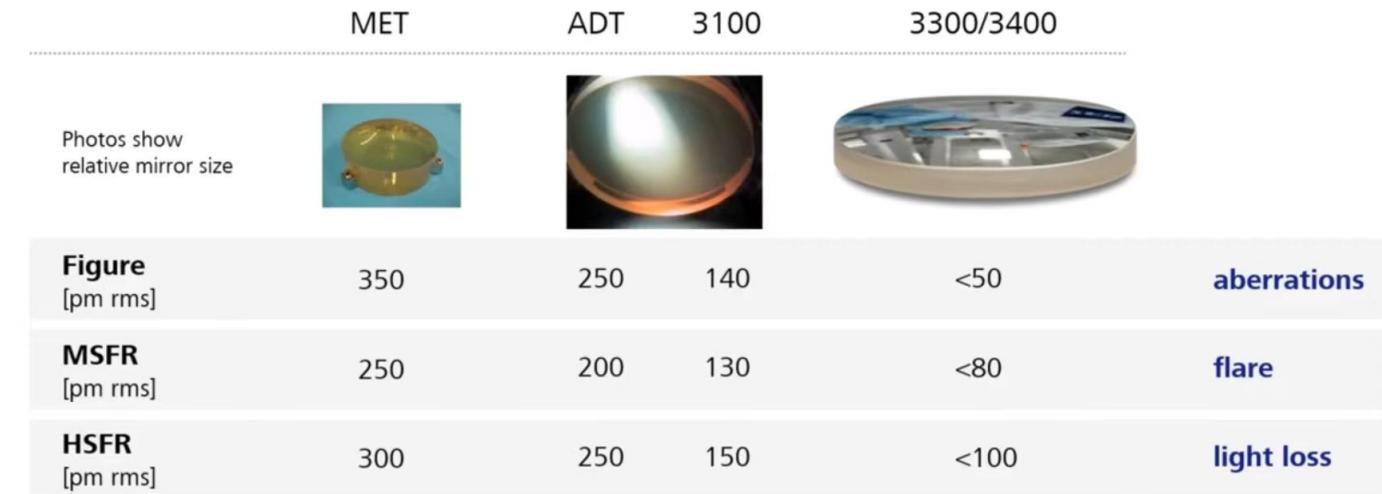
2. 2. 3 投影物镜系统：精准成像，对线宽起重要作用

- 1) 像差调节要求高：
- ASML DUV高端投影物镜的像差 $\leq 2\text{nm}$ 。高端单反镜头像差最多达到 $200+\text{nm}$ ，而ASML DUV高端投影物镜的像差 $\leq 2\text{nm}$ ，因此光刻机镜片的平整度要求非常高，同时物镜内还需要可动镜片，垂直、倾斜和多向修正镜头组装及生产过程中产生的像差，还要尽量消除光损失产生的热量。
- 2) 工艺精密：光刻机所要求的镜面光洁度非常高，需要采用精度最高的打磨机和最细的镜头磨料，此外还需要顶级的技术工人。在光学镜头的生产工序中，仅CCOS的抛光就有小磨头抛光、应力盘抛光、磁流变抛光、离子束抛光等超精密抛光高难度工序。蔡司生产的最新一代EUV光刻机反射镜最大直径1.2米，面形精度峰谷值0.12纳米，表面粗糙度20皮米（0.02纳米），达到了原子级别的平坦。

图：投影物镜与高端单反镜头像素差



图：蔡司物镜参数



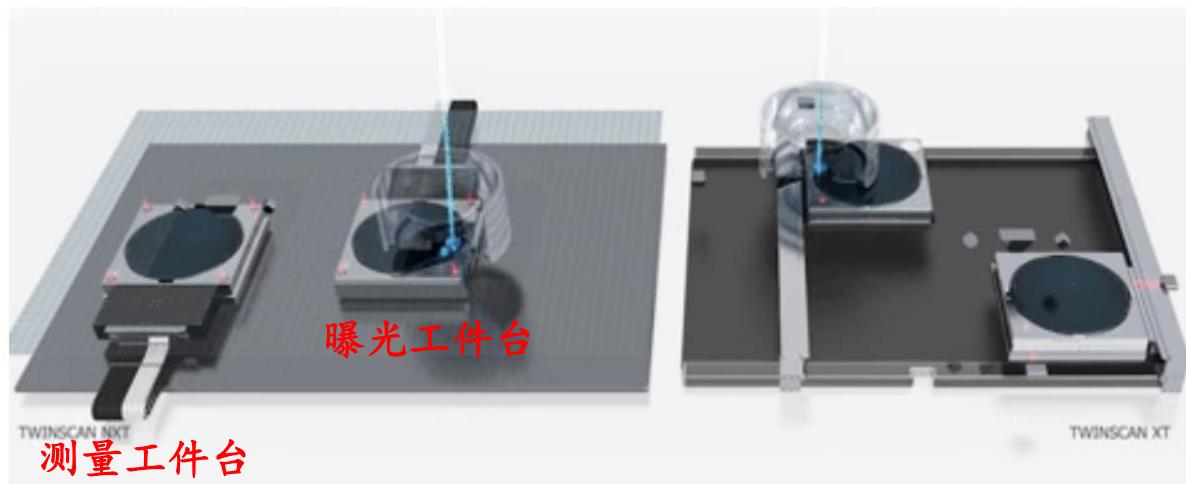
Photos show relative mirror size

	MET	ADT 3100	3300/3400	
Figure [pm rms]	350	250	140	aberrations <50
MSFR [pm rms]	250	200	130	flare <80
HSFR [pm rms]	300	250	150	light loss <100

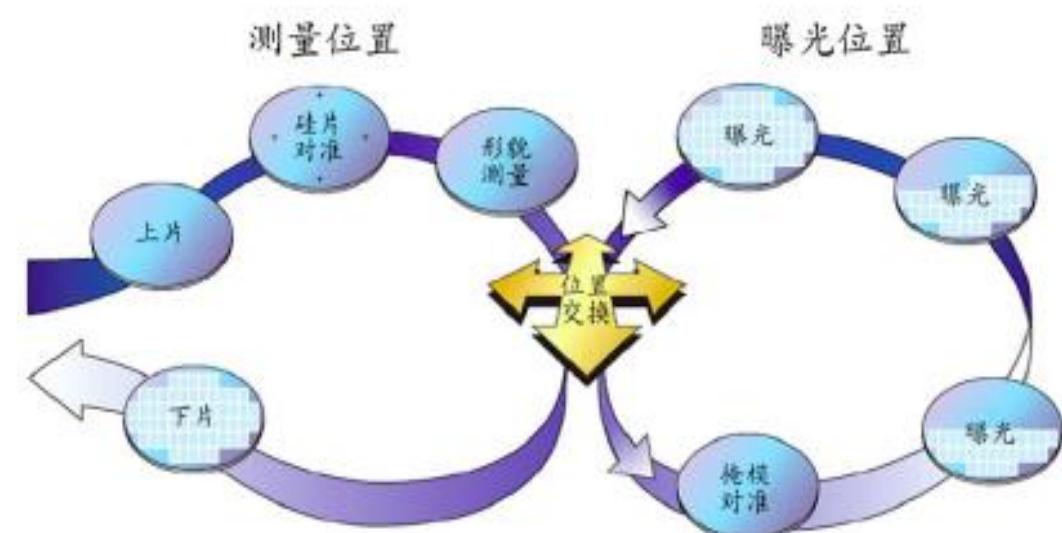
2.2.4 双工作台系统：精确对准+光刻机产能的关键

- 光刻机双工作台由两个工件台组成，两个工件台同时独立工作，负责完成步进运动、曝光扫描、对准扫描、上下硅片等功能。
- 双工作台工作流程：工作台分为1号和2号，1) 2号工件台处于物镜下方，对晶圆进行调平调焦、曝光、刻片等操作，与此同时1号台进行待刻晶圆的上片下片；2) 当2号台刻片完成，工件台系统进行换台，1号工件台换到物镜下方进行刻片，2号台进行上片下片，如此循环往复实现光刻机的高效生产。特点：双工作台较原先的单工作台效率提高了35%，精度提高10%，有效提高了光刻机的产能。

图：双工作台



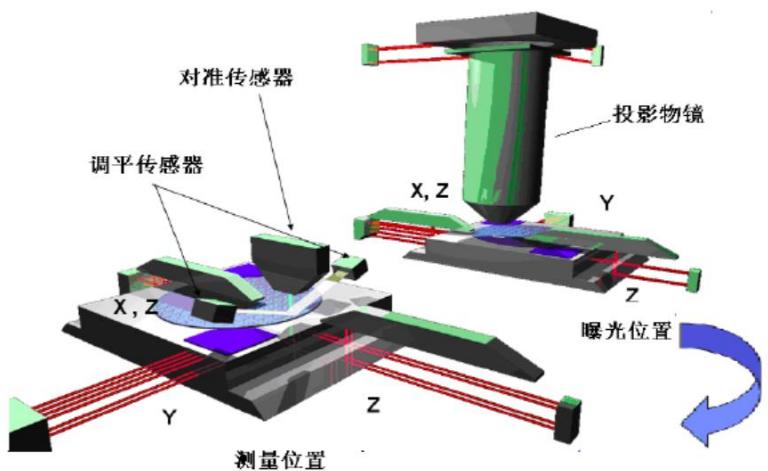
图：双工作台系统结构及换台过程



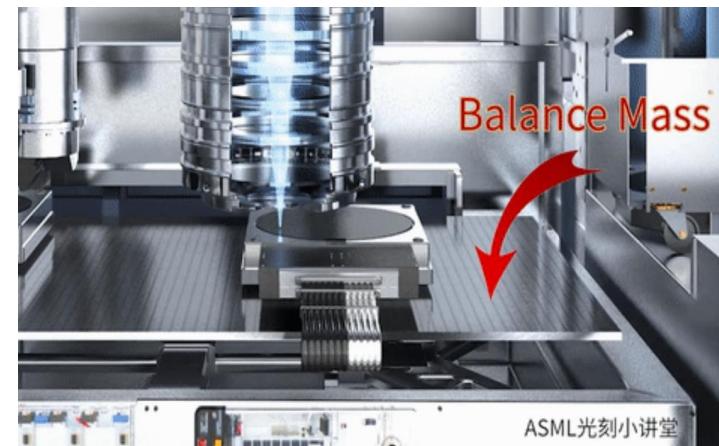
■ 双工作台技术难点：需要速度快、对准精度高、运动稳定。

- 1) 速度快：目前最先进的DUV光刻机，晶圆的光刻生产速度为300片/h，1个影像单元的曝光成像约0.1秒，实现这个成像速度，晶圆平台需以高达7g的加速度高速移动。7g的加速度意味着从0加速到100km/h只要约0.4秒，F1赛车需要2.5秒。
- 2) 精确对准：面临的难点有巨大偏移——芯片制造需一层层向上叠加，每次重叠的误差称为套刻精度，要求是1-2nm。晶圆从传送模组到晶圆平台上，会产生机械误差，一般是数千纳米的偏移。高低差——投影物镜太大，对焦点上下可接受的影像范围小于100nm。而晶圆表面高低不平，累加晶圆平台的高低差，晶圆表面不同位置的光阻高度可相差500-1000nm。因此每次曝光前，须针对每片晶圆做精密量测，截取到晶圆每一个区块纳米等级的微小误差，在曝光阶段实时校正。
- 3) 运动稳定：稳定运动——利用balance mass吸收平衡晶圆平台所施加于机座的反作用力，使整座机台完全静止。稳定定位——晶圆要在完成量测后，要在极短的曝光时间内完美定位，ASML光刻机可达到精度为0.06纳米的传感器确认精准定位。稳定运作——晶圆平台为减少磨损采用悬浮的移动方式，达成极高速的运动和持久稳定的运作。

图：TWINSCAN双工件台结构示意图



图：晶圆平台

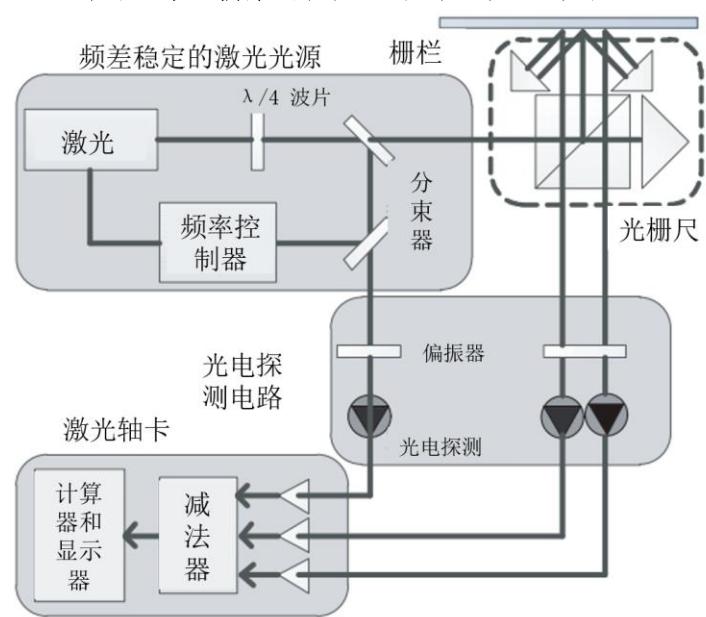


2.2.4 双工作台系统：精确对准+光刻机产能的关键

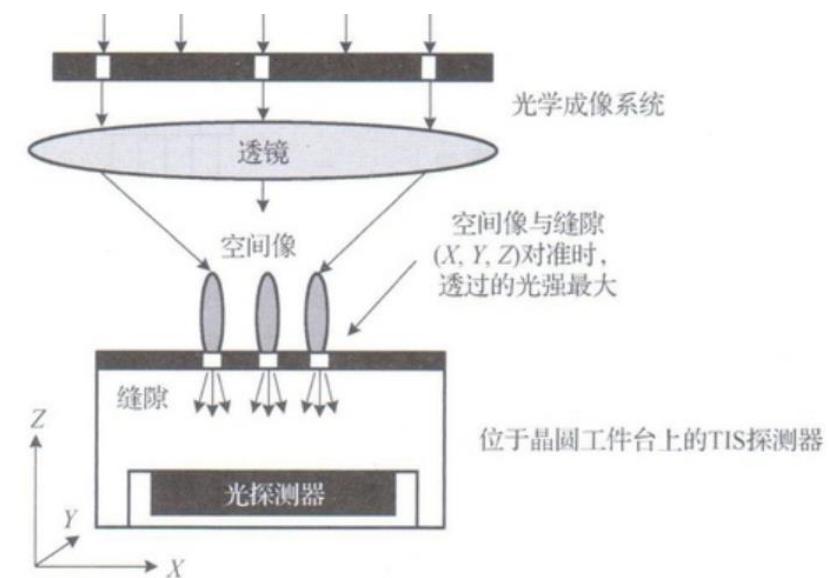
➤ 为了确保工件台稳定定位、精确对准。需要用到光栅尺、TIS传感器等。

- 光栅尺用于工作台的定位。位移测量传感器有激光干涉仪和光栅尺，由于激光干涉仪对环境敏感性较高，目前高端机型较多使用光栅尺。原理：激光光源输出频差稳定的线偏振方向相互垂直的双频激光，一束作为参考差频信号由光电探测电路接收，另一束传输至光栅尺，光栅尺基于光栅多普勒效应和光学干涉原理实现位移测量。
- TIS系统用于掩膜工作台与晶圆工作台之间的对准。TIS系统包括①设置在掩膜工作台上的TIS标识（透光的密集线条）；②晶圆工作台上的TIS传感器。TIS标识通过光学成像透镜系统，投射在晶圆工作台。晶圆工作台上的TIS传感器测出TIS标识像强度的空间分布，从而计算出掩膜工作台上TIS标识相对于晶圆工作台的位置。TIS系统还可以进一步确定投影透镜系统的像差和成像系统的畸变。

图：光栅尺测量系统示意图



图：TIS对准系统示意图



目 录

一、光刻是芯片制造最核心的环节，大陆自给率亟待提升

1.1 光刻机是芯片制造的核心设备，市场规模全球第二

1.2 一超两强垄断市场，卡脖子现象凸显

二、光刻机：多个先进系统的组合，核心零部件被海外厂商垄断

2.1 光刻机发展历程：从接触式光刻机到EUV，分辨率不断降低

2.2 多个先进系统的组合，技术壁垒极高

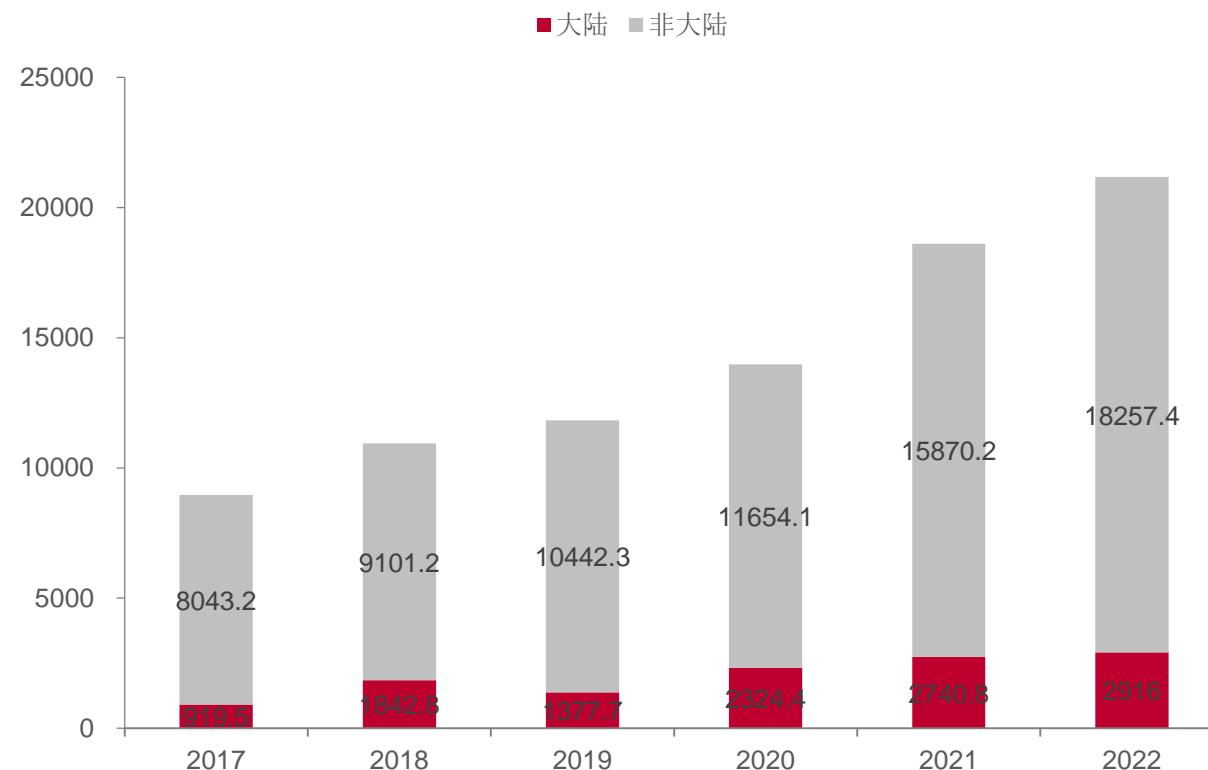
三、大陆厂商实现从“0到1”，本土化带来广阔替代空间

四、投资建议及风险提示

大陆光刻设备需求持续增高

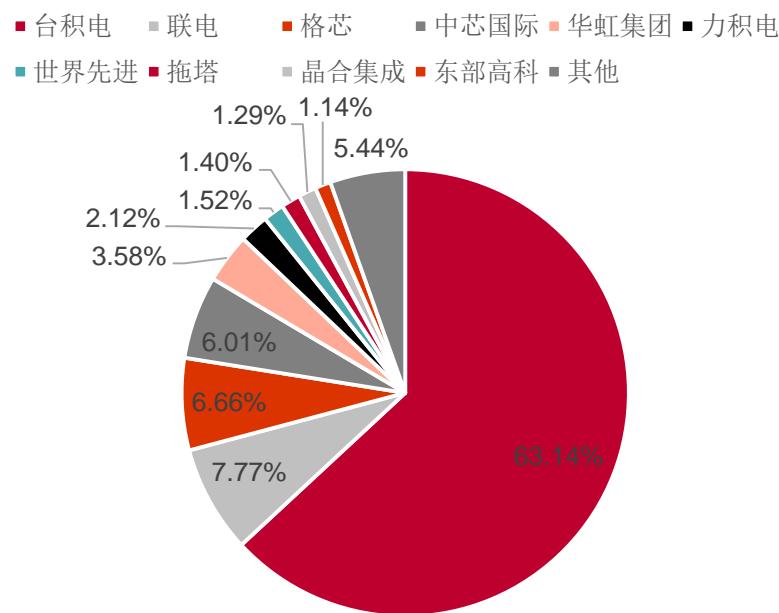
- 2017-2022年ASML在大陆地区营收的年均复合增长率为26%。ASML2017年在大陆地区的营收为9亿欧元，2022年为29亿欧元，2017-2022年年均复合增长率为26%，高于ASML总营收的年均复合增长率19%。23年大陆晶圆代工厂中芯国际、华虹集团等陆续恢复扩产，另外有数十条新兴fab厂处于建设期，未来大陆地区对光刻机的需求将持续增高。

图：2017-2022年ASML分地区营收情况（百万欧元）



- 2022年前十大专属晶圆代工公司中，中国大陆有三家。分别为中芯国际、华虹集团、晶合集成，排名第四、第五和第九。
- 国内晶圆厂陆续恢复扩产，有望带动半导体设备的需求。
- 中芯国际：2023年资本开支预计与22年持平，约63.5亿美元。
- 华虹集团：2023年资本开支预计5亿美元以上，将适时启动新厂建设。

图：2022年全球晶圆代工厂市占率



表：中芯国际、华虹集团陆续恢复扩产(亿美元)

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023E
中芯国际	23	18	20	57	45	63.5	63.5
中芯国际 YoY		-21%	11%	180%	-21%	41%	0%
华虹集团	1	2	9	11	9	10	5
华虹YoY		66%	301%	18%	-14%	6%	-50%

■ 2023年国内有近10家新兴Fab产线处于建设中：

- 12寸新Fab占主导地位。主要包括紫光集团在成都的DRAM项目，大湾区的粤芯、华润微、鹏芯微、鹏新旭、增芯科技，以及青岛芯恩、合肥赛微电子。
- 8寸主要为青岛芯恩8寸厂、中芯集成（前“中芯绍兴”）在扩建，此外中芯集成在扩建6寸化合物产线。

表：2023年在建的国内新兴Fab厂

状态	厂商	地点	尺寸（英寸）	规划产能 (万片/月)
在建	紫光集团	成都	12	30
在建	粤芯三期	广州	12	4
在建	芯恩	青岛	12	4
在建	芯恩	青岛	8	8
在建	燕东微	北京	12	4
在建	华润微	深圳	12	4
在建	鹏芯微	深圳	12	1
在建	鹏新旭	深圳	12	/
在建	增芯科技	广州	12	2
在建	赛微电子	合肥	12	2
在建	中芯集成二期	绍兴	8	12
在建	中芯集成二期	绍兴	6	10

- 上海微电子是大陆光刻机进展最快的厂商。上海微电子装备(集团)股份有限公司主要致力于半导体装备、泛半导体装备、高端智能装备的开发、设计、制造、销售及技术服务。公司设备广泛应用于集成电路前道、先进封装、FPD面板、MEMS、LED、Power Devices等制造领域。
- 上海微电子的光刻机可满足IC前道制造90nm、110nm、280nm关键层。目前上海微电子正在攻坚的28nm的DUV光刻机，未来中国光刻机有望从90nm突破至28nm。

表：上海微电子产品布局和进度

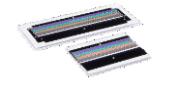
应用领域	系列	型号	分辨率	曝光光源	硅片尺寸
IC前道制造	600系列光刻机	SSA600/20	90nm	ArF excimer laser	200mm/300mm
		SSC600/10	110nm	KrF excimer laser	200mm/300mm
		SSB600/10	280nm	i-line mercury lamp	200mm/300mm
IC后道先进封装	500系列光刻机	SSB500/40	2μm	ghi-line/gh line/i-line mercury lamp	200mm/300mm
		SSB500/50	1μm	ghi-line/gh line/i-line mercury lamp	200mm/300mm
LED、MEMS、 Power Devices 制造	300系列光刻机	SSB300			
		SSB320			
		SSB380			
TFT曝光	200系列光刻机	SSB225/10			
		SSB225/20			
		SSB245/10			
		SSB245/20			
		SSB260/10T			
		SSB260/20T			

表：大陆光刻机零部件厂商进度

光刻机组件及配套设施	公司名称	公司代码	目前进展
物镜系统	国望光学	/	研发光刻机曝光光学系统
	赛微电子	300456.SZ	给ASML提供透镜系统MEMS部件和晶圆制造服务
光源	科益虹源	/	研发准分子激光器
	福晶科技	002222.SZ	研发KBBF晶体(用于激光设备的上游关键零部件), KBBF晶体是目前可直接倍频产生EUV激光的非线性光学晶体
光学元件	茂莱光学	688502.SH	光刻机光学透镜提供商, 目前生产的半导体光学透镜被应用在光刻机光学系统中
	腾景科技	688195.SH	公司多波段合分束器已完成产品开发, 进入半导体设备厂供应链
	炬光科技	688167.SH	为上海微电子等企业提供了半导体激光退火系统以及核心元器件
	晶方科技	603005.SH	子公司Anteryon为全球领先的光学设计和晶圆级光学镜头制造商, 是ASML光学平台和晶圆对位传感器的供应商
浸没式系统	苏大维格	300331.SZ	向上海微电子提供了光刻机用的定位光栅产品
	启尔机电	/	浸没系统供应商
双工作台	华卓精科	A20224.SH	双工件台供应商
空气净化设备	美埃科技	688376.SH	为上海微提供了光刻设备所需的洁净过滤产品
结构零部件	富创精密	688409.SH	半导体零部件制造的工艺技术达到主流国际客户标准, 是ASML的战略供应商
	新莱应材	300260.SZ	真空产品以及气体产品均可以应用到光刻机的设备中

■ 茂莱光学深耕精密光学产业，产品不断升级，下游应用丰富。茂莱光学1999年成立，公司主要产品覆盖深紫外 DUV、可见光到远红外全谱段，主要包括精密光学器件、光学镜头和光学系统三大类，下游覆盖生命科学、半导体、航空航天、AR/VR、生物识别等领域。公司在半导体领域的高精度光学显微成像镜头应用于半导体检测，其余产品通常应用于光刻机。

表：公司产品结构

公司主要产品					
精密光学器件		精密光学镜头		精密光学系统	
透镜	平片	显微物镜系列	机器视觉镜头	医疗检测光学模组	生物识别光学模组
半导体DUV光学透镜	窄带多光谱滤光片	显微物镜系列	3D检测镜头	基因测序光学引擎	生物识别模组
					
飞机抬头显示系统光学器件	荧光滤光片				
					
棱镜	相位延迟窗口	成像镜头	监测镜头	PCR基因扩增光学模组	AR/VR光学测试模组
高精度干涉组合镜	光线折返异性棱镜	航天星敏/监测相机镜头	紫外镜头		
					
		无人驾驶激光雷达镜头	X射线镜头	眼科扫频光学模组	AR/VR光学检测设备
					

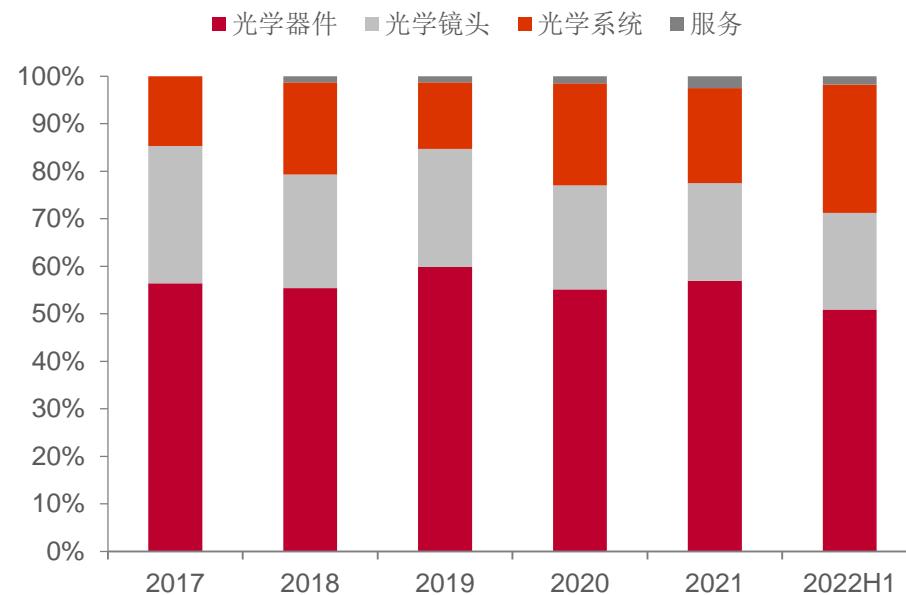
表：公司产品及下游应用

产品类型	细分类别	22H1营收占比	生命科学			半导体		航空航天	ARV R检测	无人驾驶	生物识别
			口腔扫描	基因测序	其他	检测	光刻机				
光学器件	平片	27%	√	√	√		√	√		√	√
	透镜	16%			√	√	√	√			
	棱镜	7%	√					√			√
光学镜头	机器视觉镜头	10%	√			√					√
	显微物镜	9%		√		√					
	成像镜头	1%						√		√	√
	监测镜头	1%			√	√		√			
光学系统	医疗检测光学系统模组	8%	√	√	√						
	半导体检测光学模组	6%				√					
	AR/VR光学测试模组	3%							√		
	生物识别光学模组	4%									√
	AR/VR光学检测设备	6%							√		
合计		98%	21.3%	6.8%	8.1%	25.8%	2.3%	4.2%	10.2%	2.6%	8.3%

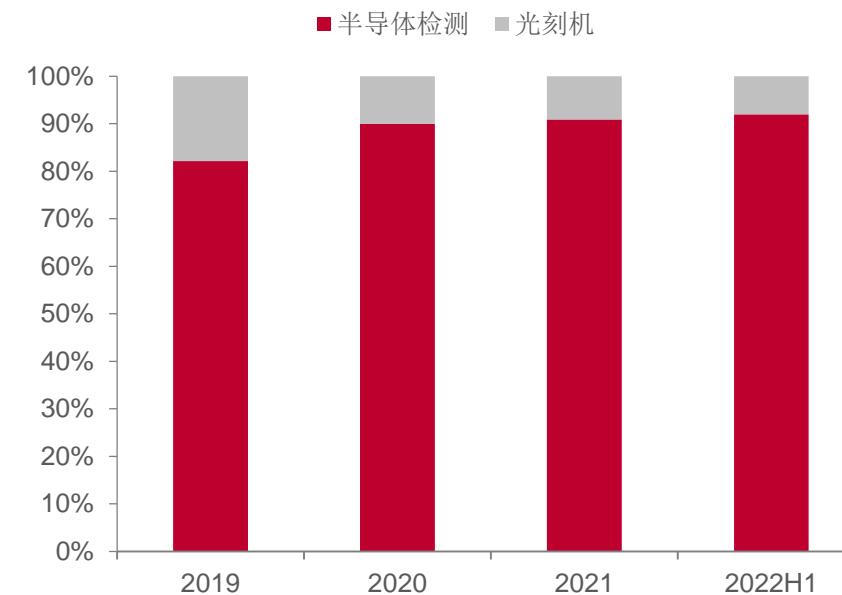
茂莱光学：光刻机营收占比约10%

- 光刻机相关业务营收占比约10%。半导体领域分为检测和光刻机，2019-2022H1半导体检测在半导体领域的营收占比分别为82%/90%/91%/92%，是半导体主要收入来源，光刻机占比较小，稳定在10%附近。

图：公司主营业务收入分产品情况

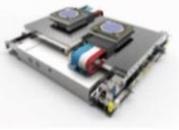


图：半导体领域下游营收占比



- **华卓精科深耕纳米精度运动及测控系统等半导体设备产业。**华卓精科2012年5月创立于北京，深耕纳米精度运动及测控系统等半导体设备产业，公司业务涵盖纳米精度运动及测控系统、超精密测控装备整机及大部分超精密测控装备部件产品等领域，并均处于国内前沿。
- **公司是国内首家自主研发并实现光刻机双工件台商业化生产的企业。**光刻机双工件台是芯片制造IC前道光刻机的核心部件之一，可实现对准和光刻同步进行，极大地提高了光刻机的精度和生产效率。公司生产的光刻机双工件台采用了宏-微叠层驱动的技术方案，由磁悬浮驱动。双工作台产品分为DWS系列和DWSi系列，其中DWS系列双工件台主要适用于干式光刻机，已投产。DWSi系列双工件台适用于浸没式光刻机，正在研发中。
- **公司是上海微电子双工件台产品及技术开发的供应商，2020年光刻机相关业务占公司营收的11%。**

图：公司光刻机工件台相关产品

产品系列	产品图示	产品特性	技术参数	研发/生产阶段
DWS系列		采用磁悬浮平面电机驱动，多轴激光干涉位移测量。用于I-line、KrF 和 ArF 干式光刻机，产率 ≥ 150 片/小时	运动平均偏差:4.5nm 运动标准偏差:nm 最大速度:1.1m/s 最大加速度: 2.4g	已发货
DWSi系列		采用磁悬浮平面电机驱动，平面光栅干涉位移测量。用于ArFi光刻机，产率 ≥ 150 片/小时	运动平均偏差:2.5nm 运动标准偏差:5nm 最大速度: 1.5m/s 最大加速度: 3.2g	研发中

图：国内首台纳米级超精密气浮运动台



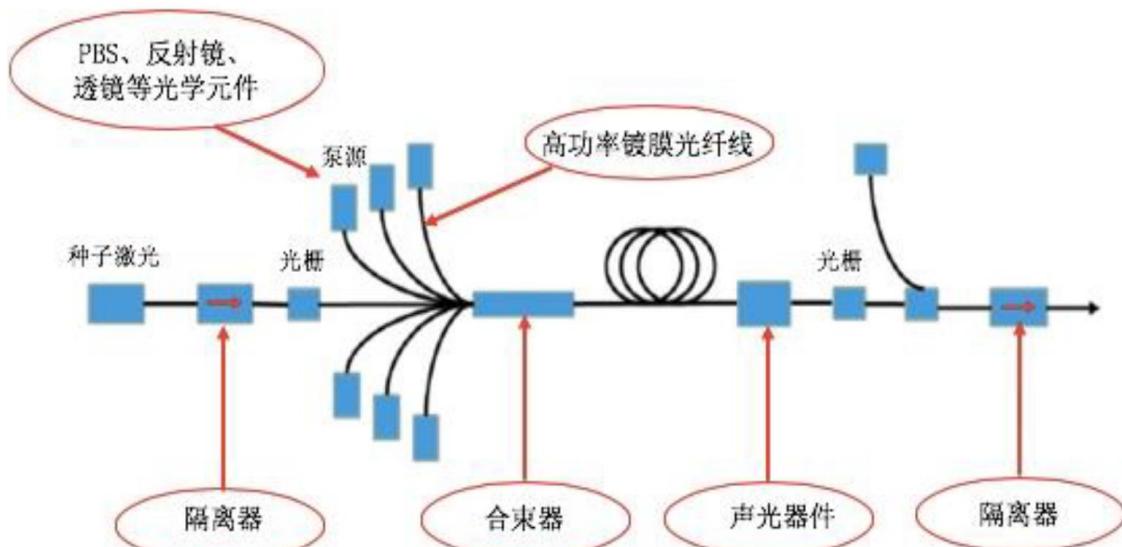
- 公司深耕激光产业上游元器件领域，主营产品包括晶体元件、精密光学元件和激光器件。公司成立于2001年，主营产品为晶体元器件、精密光学元件及激光器件等产品，主要用于固体激光器、光纤激光器的制造，是激光器系统的核心元器件，部分精密光学元件应用于光通讯、AR、激光雷达、半导体设备和科研等领域。
- 公司研发的非线性光学晶体，是光刻机重要的上游原材料。非线性光学晶体能够转换激光的种类，广泛应用于固体激光器的制造。目前公司有多个项目聚焦于晶体质量与性能的提升，未来产品市场有望进一步扩张。

表：公司产品及主要用途

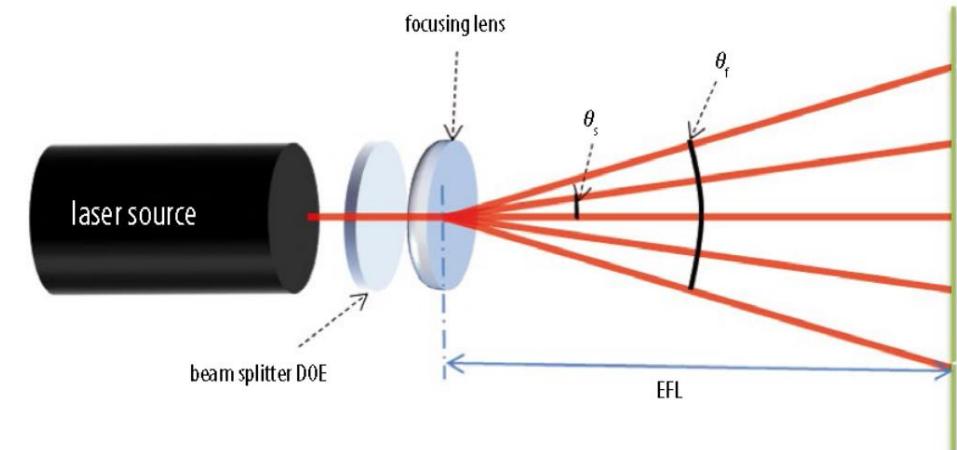
类别	产品	图示	用途
晶体	非线性光学晶体、激光晶体、双折射晶体、磁光晶体、声光及电光晶体、闪烁晶体等		主要用途： 作为固体激光器的工作物质、非线性频率转换、磁光材料、电光材料等 主要细分应用市场： 固体激光器、光纤激光器
精密光学元件	非球面透镜、球面透镜、柱面透镜、反射镜、窗口片、棱镜、波片、偏振镜，分光镜、光栅等		主要用途： 应用于激光器谐振腔、准直聚焦、光路转换、光束整形、偏振转换、分光合束等 主要细分应用市场： 固体激光器、光纤激光器、光通讯、AR/VR、激光雷达、半导体设备
激光器件	磁光器件、声光器件、电光器件驱动器、光开关、光学镜头（扫描场镜、扩束镜）、光纤传输器件等		主要用途： 光纤于固体激光器的声光调制器、电光调制器、Q开关、隔离器等 主要细分应用领域市场： 固体激光器、光纤激光器、光通讯

- 公司主营产品为精密光学元件与光纤器件。公司于2013年12月成立，主要业务为各类精密光学元件、光纤器件研发、生产和销售。产品主要应用于光通信、光纤激光等领域，其他少量产品应用于量子信息科研、生物医疗、消费类光学等领域。
- 公司开发的合分束器项目已处于产品验证阶段，主要用于光刻机的光学系统。预计未来投产后将满足客户对合分束器的需求，弥补该领域空白，实现国产设备替代。
- 分束器是一种衍射光学元件。分束器将单个激光束分成几个光束，每个光束具有原始光束的特性，激光通过分束器之后的光束直径和相位都不变，而传播方向和能量会发生改变。

图：光纤激光器内部光学系统图（红色框为公司提供的产品）



图：分束器原理图



表：腾景科技主要产品及应用领域

产品	图示	介绍
滤光片		应用于光通信、生物医疗、消费类光学领域，是光收发模块的关键元件，用于实现特定波长的光通过，阻止其他波长的光通过。
偏振分束器		应用于光通信、光纤激光、量子信息科研领域，是光通信器件、光纤激光器、量子信息科研项目的关键元件，用于按照总体强度百分比、波长或偏振状态分割光。
消偏振分束器		消偏振分束器是光通信器件、量子信息科研项目的干涉关键元件，用于按照总体强度百分比分割光线而不受入射光偏振态影响。
平面光学反射镜 器件		应用于光纤激光领域，是光纤激光器泵源的关键元件，用于将单管功率小、发散角度较大、光束质量较差的激光转化合并输出为发散角较小、光束质量较好、功率大的泵浦光。
窗口片		应用于光通信、量子信息科研等领域，是光路中保护电子元件、传感器、半导体元件的基础光学元件，用于防止电子传感器、检测器或其他敏感光电子元器件被外界环境因素（如湿气或其它微量污染物）损坏。
棱镜		应用于光通信领域，是光开关、光环行器、波分光梳等光通信器件的关键元件，用于将光束折转、反射，实现光信号切断、双向通信等光路设计功能。
波片		应用于光通信领域，是波长选择开关模块、量子信息科研领域的关键元件，用于改变光的相位，满足不同入射角度和温度的设计要求。
透镜		应用于光通信、光纤激光领域，是波长选择开关模块、掺铒光纤放大器模块、光纤激光器等的关键元件，用于光的准直、耦合、聚焦、扩束或其它整形需求。
球面光学柱面镜 器件		应用于光通信、光纤激光领域，是波长选择开关模块的关键元件，用于光的一维准直、耦合、聚焦、扩束或其它整形需求。
模压玻璃非球面透镜		应用于光通信、光纤激光领域，是发射激光二极管光源封装、光纤激光器泵源等的关键元件，用于光的准直、耦合、聚焦、扩束需要。
镀膜光纤器件		包括镀膜光纤线和光纤头，镀膜光纤线作为光纤激光器泵源的尾纤，用于高功率光纤激光的光纤耦合，具备高功率激光耐受能力；光纤头是在镀膜光纤线的一端装配上陶瓷插芯或毛细管形成的组合件，可用于激光的耦合传输。
光纤产品 准直器		应用于光通信、光纤激光领域，是光收发模块、光纤激光器的关键器件，用于将光纤内的传输光转变成准直光（平行光），或将外界平行光耦合至单模光纤内。
声光器件		应用于光纤激光领域，是调Q脉冲光纤激光器的关键器件，用于高速调节激光谐振腔的损耗，使激光器可以脉冲方式输出激光。

苏大维格：光学元器件供应商

- 公司深耕高端微纳光学材料。苏州苏大维格科技股份有限公司2001年成立，2012年在深交所上市，公司深耕高端微纳光学材料及反光材料制品多年，已发展形成了公共安全和新型印材、消费电子新材料、反光材料、高端智能装备四大事业群，下游覆盖公共安全、液晶平板、交通安全、高端智能装备等领域。
- 公司于2021年末向上海微电子提供了光刻机用的定位光栅产品，该器件是光刻机产品的重要部件。

图：苏大维格主要经营业务



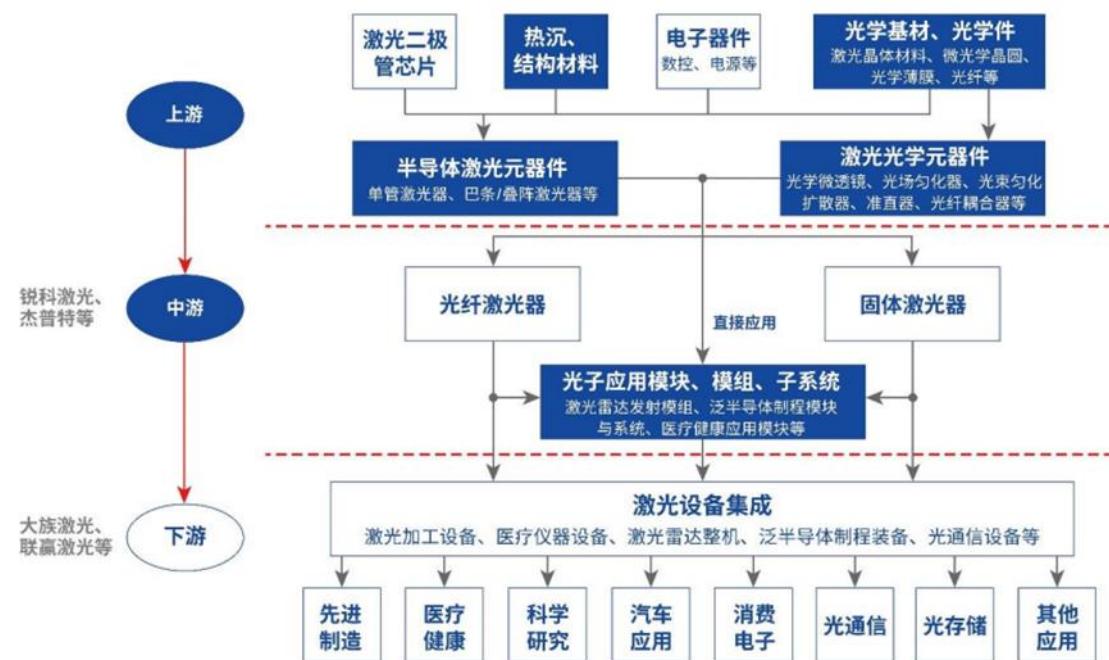
表：苏大维格主要产品及应用领域

产品群	产品类别	产品类型	用途
高端智能装备	微纳光学高端设备	光刻设备	用于微纳光学制造的原版制造工艺
公共安全和新型印材	微纳光学产品智能装备	微纳光学产品智能装备	用于微纳光学产品生产的智能化装备
反光材料	公共安全防伪材料	公共安全防伪膜(行驶证、驾驶证防伪材料)	光学防伪
消费电子新材料	新型光学印材	镭射膜、镭射纸	烟标、酒标、化妆品、日化用品等包装，美观防伪
	反光膜、反光标识	车牌膜、棱镜膜、玻璃微珠反光膜	用于各类交通标志牌和作业区设施，警示标志、宣传牌等
	新型显示光学材料	导光板/膜、扩散板	通讯、IT产品的局部照明、平板显示背光模组
	中大尺寸触控产品	柔性透明导电膜	中大尺寸电容触控屏
	特种装饰材料	特种装饰膜	手机背板防爆装饰膜

炬光科技：激光元器件产业领军者

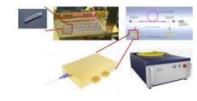
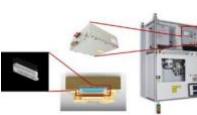
- 公司主营业务为激光产业上游元器件。公司成立于2007年9月，主要从事光子产业链上游的高功率半导体激光元器件和原材料、激光光学元器件的研发、生产和销售，主要产品为半导体激光业务典型产品、激光光学业务典型产品、汽车应用业务典型产品、光学系统业务典型产品。目前正在积极拓展光子产业链中游的光子应用模块、模组、子系统业务，下游重点布局消费电子、汽车应用、泛半导体制程、医疗健康等领域。
- 公司为上海微电子提供了半导体激光退火系统以及核心元器件，2021年H1光刻机相关业务占公司营收的3.3%。

图：炬光科技主营业务在产业链中所处位置



炬光科技：激光元器件产业领军者

表：炬光科技激光光学类产品及应用领域

产品线	典型产品名称	产品图片	下游应用设备	终端应用场景
单 (非) 球面柱面透镜	快轴准直镜/ 慢轴准直镜			激光切割
光束转换器	光束转换器			塑料焊接
光束准直器	一体化透镜			激光投影
光纤耦合器	耦合器			塑料焊接
光场匀化器	光场匀化器			半导体光刻
光束扩散器	微透镜阵列			3D成像
微光学晶圆	广角光束扩散器			机器视觉检测
	微光学晶圆			微光学透镜生产

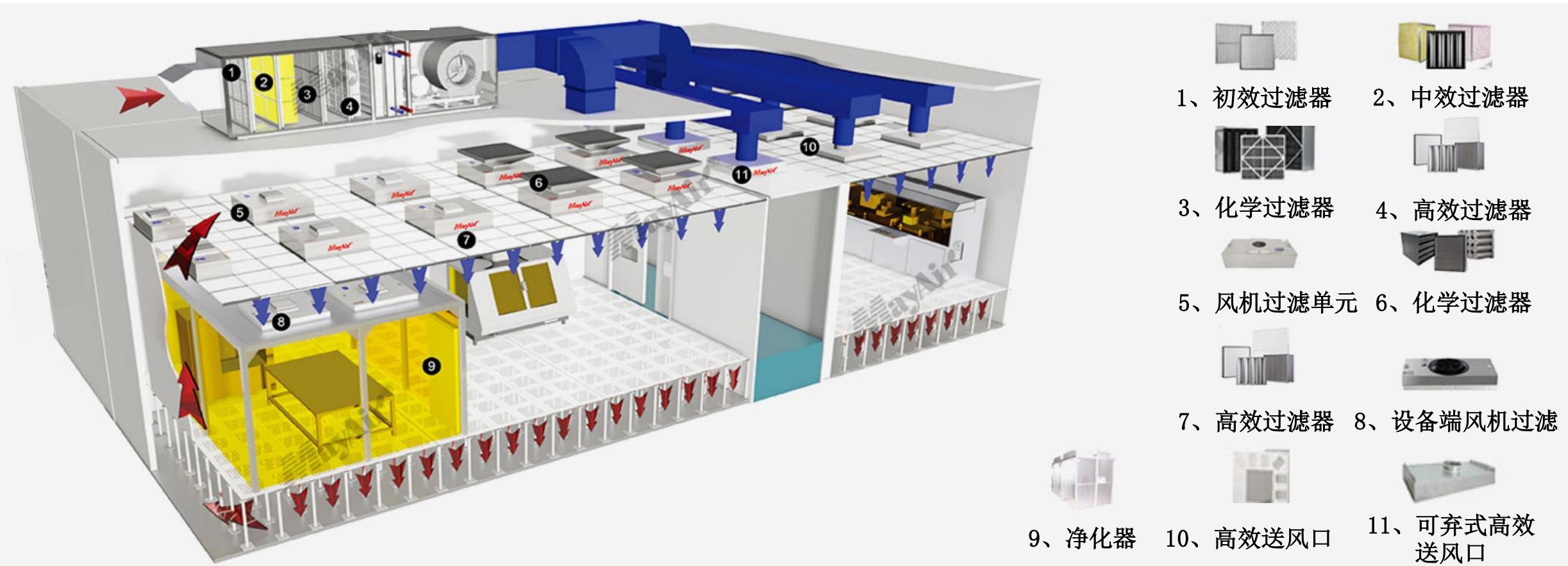
美埃科技:大陆洁净设备龙头厂商

- 公司主营业务为空气净化产品、大气环境治理产品。公司产品主要应用于洁净室空气净化，下游应用细分主要包括半导体、生物制药、食品等，主要产品包括风机过滤单元、高效过滤器、化学过滤器。
- 公司是中芯国际、上海微的供应商。公司2002年起进入半导体洁净室领域，为中芯国际供应FFU、高效/超高效过滤器、化学过滤器等产品。同时，公司为上海微电子构建国际最高洁净等级标准（ISO Class 1级）洁净环境提供EFU及ULPA等产品。

表：公司主要产品及应用领域

设备名称	图示	用途
风机过滤单元		广泛应用于半导体、生物制药、食品加工等行业的洁净厂房及洁净室中，是洁净室空气净化的关键设备。
高效过滤器		主要包括高效过滤器（HEPA）、超高效过滤器（ULPA）。主要用于半导体芯片、液晶平板显示器生物制药、医院手术室、负压病房、食品饮料等生产厂房、模块化洁净室及要求严格的微环境、精密机台等，是洁净室空气净化的核心设备。
初中效过滤器		初中效过滤器按形态主要分为板式过滤器和袋式过滤器。主要用于洁净室新风及空调系统的空气预过滤，去除进入室内空气中较大颗粒的杂质、粉尘等污染物，对空气净化系统中高级别的过滤器起到保护作用。
静电过滤器		静电过滤器主要应用于商业楼宇或大型公共建筑的暖通系统空气净化，可以去除空气中PM2.5等颗粒物并具有杀菌的效果。
化学过滤器		该类过滤器主要应用于洁净厂房的特定工序中（如芯片厂的酸洗、蚀刻等），去除生产工艺中产生的气态分子污染物；也应用于机房与数据中心的防腐蚀控制，保护数据中心与机房控制设备的稳定运行；
生物安全、无菌净化设备		主要应用于生物制药产业生产线、P3/P4实验室、洁净室等场景的送风及排风净化、环境除尘、除菌、滤网非接触式替换。
商用、医用、家用空气净化机		主要用于室内空气净化，可高效去除PM2.5及细菌微生物、高效分解甲醛、VOCs等有机、有害气体。
工业除尘设备/除油雾设备		主要应用于工业生产，用于去除生产过程中产生的粉尘、油雾，提高生产效率和安全，保护工作环境及人员，降低机器生产损耗。
除油烟净化器		主要应用于商用餐厅、餐饮厨房油烟排放净化场景，用于净化烹饪产生的油烟、颗粒物、臭味等，使对外排放的气体达到环保标准。

图: 半导体行业洁净空气解决方案



目 录

一、光刻是芯片制造最核心的环节，大陆自给率亟待提升

1.1 光刻机是芯片制造的核心设备，市场规模全球第二

1.2 一超两强垄断市场，卡脖子现象凸显

二、光刻机：多个先进系统的组合，核心零部件被海外厂商垄断

2.1 光刻机发展历程：从接触式到投影式，分辨率不断降低

2.2 多个先进系统的组合，技术壁垒极高

三、大陆厂商实现从“0到1”，本土化带来广阔替代空间

四、投资建议及风险提示

- 光刻机是代工最关键和核心设备，也是大陆最薄弱环节。光刻机21年全球市场172亿美金，其市场份额在晶圆生产设备中占比为20%，是半导体设备第二大品类。竞争格局上，ASML一家独大，Nikon+Canon 占据剩余份额，大陆厂商目前进展较快的有上海微电子。
- 光刻机制裁落地，国产化势在必行。美国对大陆制裁层层升级，23年3月8日光刻机制裁落地，荷兰政府发布新出口管制，ASML需要申请出口许可，才能装运最先进的浸没式DUV系统，光刻机国产化亟待加速。
- 建议关注：
 - 光学器件：福晶科技、腾景科技、茂莱光学、炬光科技、苏大维格、晶方科技、奥普光电；
 - 洁净设备：美埃科技；
 - 结构零部件：富创精密，新莱应材；
 - 其他：张江高科。



风险提示

- 国产替代技术突破受阻，下游需求不及预期。
- 中美贸易摩擦加剧、研报使用的信息更新不及时的风险、行业数据或因存在主观筛选导致与行业实际情况存在偏差风险。

重要声明

- 中泰证券股份有限公司（以下简称“本公司”）具有中国证券监督管理委员会许可的证券投资咨询业务资格。本报告仅供本公司的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户提供。
- 本报告基于本公司及其研究人员认为可信的公开资料或实地调研资料，反映了作者的研究观点，力求独立、客观和公正，结论不受任何第三方的授意或影响。本公司力求但不保证这些信息的准确性和完整性，且本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次公开发布时的判断，可能会随时调整。本公司对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。本报告所载的资料、工具、意见、信息及推测只提供给客户作参考之用，不构成任何投资、法律、会计或税务的最终操作建议，本公司不就报告中的内容对最终操作建议做出任何担保。本报告中所指的投资及服务可能不适合个别客户，不构成客户私人咨询建议。
- 市场有风险，投资需谨慎。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。
- 投资者应注意，在法律允许的情况下，本公司及其本公司的关联机构可能会持有报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，并可能为这些公司正在提供或争取提供投资银行、财务顾问和金融产品等各种金融服务。本公司及其本公司的关联机构或个人可能在本报告公开发布之前已经使用或了解其中的信息。
- 本报告版权归“中泰证券股份有限公司”所有。事先未经本公司书面授权，任何机构和个人，不得对本报告进行任何形式的翻版、发布、复制、转载、刊登、篡改，且不得对本报告进行有悖原意的删节或修改。