

激光与光电子学进展

先进光刻技术的发展历程与最新进展

李艳丽, 刘显和, 伍强*

复旦大学微电子学院, 上海 201203

摘要 光刻技术是半导体集成电路技术发展的主要推动技术,其不断提高的分辨率与图形复制精度成功地将集成电路制造线宽从 40 多年前的 2~3 μm 缩小到先进的 10~15 nm。在发展过程中,众多先进的技术不断涌现,如投影式光刻、相移掩模版、化学放大型光刻胶、光学邻近效应修正等,及时确保了摩尔法则按时向前推进。以投影光刻发展的历史为主线,从 0.25 μm 到当今的 5 nm 再到未来的先进技术节点,对每个关键的技术节点的工艺要求与工艺窗口进行分析,包括采用的新技术及其作用,以展示光刻工艺与相关技术的整体面貌,给读者专业技术的参考。

关键词 光刻; 光刻工艺; 光刻机; 光刻胶; 掩模版

中图分类号 TN432

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.0922006

Evolution and Updates of Advanced Photolithography Technology

Li Yanli, Liu Xianhe, Wu Qiang*

School of Microelectronics, Fudan University, Shanghai 201203, China

Abstract Photolithography has been the main driving force for the sustained development of semiconductor integrated circuit technology. Its continuously improved resolution and pattern reproduction accuracy have successfully reduced the manufacturing linewidth of integrated circuit from 2~3 μm more than 40 years ago to the current 10~15 nm. During the course of its evolution, many advanced technologies continue to emerge, such as projection lithography, phase-shifting mask, chemically amplified photoresist, and optical proximity effect correction, which timely ensure the advancement of integrated circuit technology along the prediction of the Moore's law. This paper uses the history of projection lithography as the clue, from 0.25 μm to today's 5 nm, to analyze the process requirements and process window of each key technology node, including the added technologies and their respective roles, so as to provide a comprehensive presentation of the photolithography process and related technologies with the purpose to give the readers a professional and technical reference.

Key words photolithography; photolithography process; exposure tools; photoresist; photomask

1 引言

早期的光刻技术使用接触-接近式曝光。对于接触式曝光,缺点很明显:由于曝光时掩模版与硅片接触,每次曝光结束后都需要对掩模版进行缺陷检测和清洗,大大降低曝光的产能,缩短掩模版的

寿命。接触式曝光同时也会给硅片上的光刻胶带来缺陷,导致良率不高。对于接近式曝光,最小分辨尺寸与掩模版和硅片之间的间隙成正比,间隙越小,最小分辨尺寸越小,也即分辨率越高。一般来说,硅片的平整度在 1~2 μm ,要使掩模版悬空在硅片上方而不碰到硅片,掩模版与硅片的最小间隙需

收稿日期: 2022-03-22; 修回日期: 2022-04-07; 录用日期: 2022-04-11

基金项目: 复旦大学引进人才科研启动项目(JIH1233018, JIH1233020)

通信作者: *wu_qiang@fudan.edu.cn

控制在 $2\sim 3\ \mu\text{m}$, 这使得接近式曝光机的空间分辨率极限约为 $2\ \mu\text{m}$ ^[1]。如果想要做出更细小的线宽, 就不能用这种曝光方式, 投影式曝光机由此应运而生。最早的投影式扫描曝光机是美国的 Perkin-Elmer (珀金·埃尔默) 公司于 1973 年推出的, 数值孔径 (NA) 为 0.167^[2-3]。1978 年, 美国 GCA 公司推出了 NA 为 0.28 的 g 线步进重复式曝光机 (简称步进曝光机)。1980 年至 1985 年间, 日本尼康、珀金·埃尔默、日本佳能和荷兰阿斯麦 (ASML) 公司陆续推出了他们的步进曝光机。由于大视场成像的局限性以及对高分辨率、低像差和低畸变的需求, 步进扫描式光刻机 (扫描式光刻机) 已被引入以取代步进曝光机。1990 年, 美国的 SVG 公司收购了珀金·埃尔默, 并推出了第一台分辨率为 $0.5\ \mu\text{m}$ 的扫描式光刻机。1995 年, 尼康开发了 248 nm 准分子激光照明扫描式光刻机, 分辨率可以达到 $0.25\ \mu\text{m}$ 。后来, 光刻机的波长已扩展到 193 nm (SVG 1998 年) 和 193 nm 水浸没式版本 (ASML 2004 年)。193 nm 水浸没式光刻机的 NA 最大为 1.35, 其分辨率极限为 36 nm 半周期 (Half Pitch, $0.5\times 0.5\lambda/\text{NA}$, λ 为波长), 实际曝光中应用偶极照明可达到的最小分辨率为 38 nm 半周期^[4]。从分辨率公式中可以看出, 如果需要更高的分辨率, 则需要进一步缩短光刻机照明系统的波长。2013 年, ASML 推出了第一款波长为 13.5 nm、NA 为 0.33、分辨率为 13 nm 半周期的极紫外 (EUV) 光刻机。可见, 为了达到更高的分辨率, 光刻机经历了漫长的发展过程。自 20 世纪 60 年代早期起, 从基于带有光敏剂的聚乙烯醇肉桂酸酯的负性光刻胶配方, 到后来的重氮萘醌-酚醛树脂 (DNQ-Novolac) 型的 i 线 (365 nm) 正性光刻胶配方, 光刻胶也经历了一个快速发展的过程。从 20 世纪 90 年代中期的 $0.25\ \mu\text{m}$ 节点开始, 对更高分辨率的需求推动了化学放大型光刻胶 (Chemically amplified photoresist, CAR) 的应用, 这一类型光刻胶也一直被应用到 7 nm 甚至 5 nm、3 nm 等更先进的技术节点中。化学放大型光刻胶的曝光灵敏度更高, 一方面可以减小对较难获取的氟化氪 (KrF) 和氟化氩 (ArF) 等短波长光源输出能量的依赖, 另一方面, 可以通过控制曝光后烘焙 (Post exposure bake, PEB) 的温度与时间来更加精密地调节成像质量, 如对比度、焦深、侧壁轮廓的垂直度, 使得光化学反应更加精密可控。此外, 光刻工艺中还在不断地引进其他新技术, 以支持光刻技术的持续发展, 实现更高的

分辨率, 如抗反射层 (Anti-reflection coating, ARC)^[5-7]、离轴照明 (Off-axis illumination, OAI)^[8]、相移掩模版 (Phase shifting mask, PSM)^[9]、亚分辨率辅助图形 (Sub-resolution assist feature, SRAF)^[10]、光学邻近效应修正 (Optical proximity correction, OPC)^[11-12]、偏振成像 (polarized imaging)^[13]、193 nm 水浸没式光刻机^[14-15]、光源-掩模协同优化 (Source-mask co-optimization, SMO)^[16-17]、光可分解碱 (Photo-decomposable base, PDB)^[18-19]、负显影 (Negative toned developing, NTD)^[20]、聚合物键合的光致产酸剂 (Polymer bound photo acid generator, PBPAG)^[21-22] 等技术。

2 主要技术节点的工艺细节

本文中的光刻工艺参数、设计规则以及总结的数据均来自自研的光刻仿真软件 CF Litho、CF Litho-EUV 和作者团队的技术经验积累, 部分数据参考了技术发展路线图^[23-26]以及团队的早期工作^[27]。首先, 讨论 $0.25\ \mu\text{m}$ (250 nm) 技术节点中的工艺细节。250 nm 技术节点中使用了许多新技术, 例如深紫外 248 nm KrF 准分子激光的曝光光源、化学放大型光刻胶、抗反射层和基于规则的光学邻近效应修正, 例如在方形的角落添加辅助图形 (如装饰线, Serif), 尽量减小光刻后方形角落变圆的现象等等, 如表 1 所示。表 1 中: Node 为技术节点; Gate 为栅极; Pitch 为周期; Metal 为金属; Via 为通孔; Exposure tool 为光刻机; Photoresist 为光刻胶; CD (Critical dimension) 为关键尺寸; 193 nm Dry 为 193 nm 干法 (光刻机); Ea 为光刻胶的活化能; Binary 为二元掩模版; Rule based OPC 为基于规则的光学邻近效应修正; Model based OPC 为基于模型的光学邻近效应修正; EL (Exposure latitude) 为曝光能量宽容度 (一般相对于线宽 $\pm 10\%$ 的范围); MEF (Mask error factor) 为掩模版误差因子; DoF (Depth of focus) 为对焦深度 (焦深); RET (Resolution enhancement technique) 为分辨率增强技术; Serif 为装饰线; CVI (Continuous angle varying illumination) 为连续变角度照明; Quad (Quadrupole) 为 ASML 光刻机中的 Quasar (四极照明) 和 Cross-quasar (CQ) (交叉四极照明); Etch linewidth trim 为线宽刻蚀修身; CDU (Critical dimension uniformity) 为关键尺寸均匀性/线宽均匀性; Wafer 为硅片范围; Wafer and shot 为硅片和曝光场范围。

表 1 250 nm, 180 nm, 130 nm, 90 nm 和 65 nm 技术节点的光刻工艺总结
Table 1 Summary of photolithography processes of 250 nm, 180 nm, 130 nm, 90 nm, and 65 nm nodes

Node / nm	Gate pitch / nm	Gate CD / nm	Exposure tool	Photoresist	Mask	OPC	EL / %	MEF	DoF / nm	RET	ARC	Etch	CDU
250	500	250	248 nm	248 nm CAR	Binary	Rule based	19.3	1.47	500-600	Serif	Single layer	—	—
180	430	180	248 nm	248 nm CAR	6% PSM	Rule based	17.7	1.39	450	Serif, OAI, CVI	Single layer	—	—
130	310	150	248 nm	248 nm CAR, Low Ea	6% PSM	Model based	18.9	1.66	350	Serif, OAI, CVI, SRAF	Single layer	Linewidth trim	Wafer
90	240	120	193 nm Dry	193 nm CAR, High Ea	6% PSM	Model based	19.7	1.56	350	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad	Single layer	Linewidth trim	Wafer and shot
65	210	90	193 nm Dry	193 nm CAR, High Ea	6% PSM	Model based	18.6	1.51	250	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad	Single layer	Linewidth trim	Wafer and shot
Node / nm	Metal pitch / nm	Metal CD / nm	Exposure tool	Photoresist	Mask	OPC	EL / %	MEF	DoF / nm	RET	ARC	Etch	CDU
250	640	320	248 nm	248 nm CAR	Binary	Rule based	29.3	1.03	600-800	Serif	Single layer	—	—
180	460	230	248 nm	248 nm CAR	6% PSM	Rule based	18.1	1.85	600	Serif, OAI, CVI	Single layer	—	—
130	340	160	248 nm	248 nm CAR, Low Ea	6% PSM	Model based	19.8	1.69	350	Serif, OAI, CVI, SRAF	Single layer	—	Wafer
90	240	120	193 nm Dry	193 nm CAR, Low Ea	6% PSM	Model based	16.9	2.00	350	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad	Single layer	—	Wafer and shot
65	180	90	193 nm Dry	193 nm CAR, Low Ea	6% PSM	Model based	13.4	2.85	200	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad	Single layer	—	Wafer and shot
Node / nm	Via pitch / nm	Via CD / nm	Exposure tool	Photoresist	Mask	OPC	EL / %	MEF	DoF / nm	RET	ARC	Etch	CDU
250	640	300	248 nm	248 nm CAR	Binary	Rule based	27.8	1.68	600-800	Serif	Single layer	—	—
180	460	230	248 nm	248 nm CAR	6% PSM	Rule based	25.0	2.33	580	Serif, OAI, CVI	Single layer	—	—
130	340	160	248 nm	248 nm CAR, Low Ea	6% PSM	Model based	17.6	4.12	330	Serif, OAI, CVI, SRAF	Single layer	—	Wafer
90	240	160	193 nm Dry	193 nm CAR, Low Ea	6% PSM	Model based	15.1	4.82	330	Serif, OAI, CVI, SRAF	Single layer	—	Wafer and shot
65	200	130	193 nm Dry	193 nm CAR, Low Ea	6% PSM	Model based	15.0	4.90	230	Serif, OAI, CVI, SRAF	Single layer	—	Wafer and shot

250 nm 技术节点于 20 世纪 90 年代问世,并于 1997 年左右投入量产^[28]。下一个技术节点是 180 nm,在这一节点中,为提高关键光刻层次的成像对比度或曝光能量宽裕度(EL),引入离轴照明和透射衰减相移掩模(Attenuated phase shifting mask, Att PSM)。Att PSM 是通过选择合适的硅化钼的厚度,使得光强经过原来的不透明层后衰减到只剩 6%,并且光的相位与透光区域相比发生了 180° 移动。此外,由于需要进一步优化光刻工艺窗口,连续变角度照明(CVI)已经被开发出来。采用上述三种技术是为了满足更高的关键尺寸均匀性/线宽均匀性(CDU)的要求。在典型的工艺条件下,6% 透射的 PSM 可以将成像对比度或 EL 提高 15%~20%,CVI 可以将孤立到密集的图形之间的关键尺寸的差值更精确地控制到 10 nm 以内,也即在整个周期范围内,尽量保持光刻后有相同或差异很小的线宽尺寸。

接下来的技术节点是 130 nm,由于光刻胶性能的显著改善,例如降低了化学放大型光刻胶的活化能(Ea)。同时其等效光酸扩散长度(Effective photoacid diffusion length, EPDL)也从 130 nm 节点的 40~70 nm 缩短至 20~30 nm,因此 KrF 光刻机仍然适用于 130 nm 技术节点。同时,有些芯片制造商还在这一节点引入了基于模型的 OPC 和 SRAF 来进一步改进逻辑电路的 CDU(硅片范围内)和焦深(DoF)。此外,为实现线条与沟槽 1:1 的高对比度成像,刻蚀修身(trim etch)工艺也被引入芯片制造工艺流程中。例如前段的栅极光刻工艺中,先将线条尺寸做得较大,再通过刻蚀修身工艺将线条尺寸缩小。需要注意的是,一般来说,考虑到明场成像与使用透射衰减相移掩模的规律,光刻工艺的线条尺寸会略小于沟槽尺寸。且到底采用多大的线宽偏置,需要综合考虑光刻工艺窗口和刻蚀与光刻之间的线宽偏置。130 nm 节点一般也是 248 nm 光刻机可以做到的最后一个节点,NA 最大为 0.7。

到了 90 nm 技术节点,由于需要更高的分辨率以及更好的硅片范围内的线宽均匀性和曝光场内的线宽均匀性,所以引入 193 nm 干法光刻机以及四极(Quasar)^[29-30]照明光瞳,这种照明光瞳还可以提高 DoF。需要注意的是,表 1 中的 Quad 代表 ASML 光刻机中的 Quasar(照明点位于光瞳的 ±45° 与 ±135° 位置)和 Cross-Quasar(CQ)(照明点位于光瞳的 0°、90°、180°、270° 位置),不同节点可根据工艺需

求选择合适的 Quad 照明。此外,ASML 在其扫描光刻机上推出了曝光能量分布测绘(Dose mapping, DoMa)功能,在光刻工艺中弥补后续工艺可能造成的线宽不均匀问题。该节点于 2002 年首次投入量产^[28]。同样地,193 nm 干法光刻工艺已扩展到 65/55 nm 节点,其中 NA 已从 90 nm 节点的 0.75 增加到 0.85~0.93。

由于 193 nm 干法光刻机的 NA 已经接近 1(0.93),不可能再通过增加 NA 来进一步提高分辨率,而是需要通过进一步缩短曝光波长来实现。早在 20 世纪,美国 Intel 公司就曾经倡议采用以氟气体(F₂)分子为激光媒介的准分子激光器作为光刻机光源,波长可缩短至 157 nm。我们知道,小于 193 nm 的紫外光会被空气大量吸收,所以 157 nm 的光刻机需要在真空环境中完成曝光。同时,由于投影物镜无法使用对 157 nm 吸收强烈的熔融石英(193 nm 光刻机的镜头材料),而是需要选择氟化钙,此材料与熔融石英不同,不仅有潮解性,还有本征双折射。2003 年,Intel 宣布放弃 157 nm 波长曝光的光刻技术^[31]。193 nm 水浸没式光刻技术被选为 65 nm/55 nm 以下技术节点的主力,曝光波长也因此延伸到 134.657 nm(水的折射率在 193.368 nm 约为 1.436,所以等效波长约为 193.368 nm/1.436 ≈ 134.657 nm)左右,不仅波长比 157 nm 要短,而且还不需要真空曝光环境。

表 2 描述了使用 193 nm 浸没式光刻机曝光时,45 nm、28 nm、16 nm/14 nm 一直到 7 nm 技术节点中几个关键层次的光刻工艺总结。从 16/14 nm 工艺节点开始,由于 NA > 1,同时鳍型晶体管(Fin field effect transistor, Fin FET)结构造成衬底的不平整度大大增加,会影响整个曝光的焦深。所以,需要采用两层抗反射层(Bi layer),一方面可以抑制更大入射角范围的衬底反射,使得所有图形的反射率都达到很低的水平;同时,也靠下面一层较厚的抗反射层来填平衬底,增加光刻工艺的焦深。当 NA 超过一定的数值(>0.75)时,横磁波(Transverse magnetic, TM)偏振光的引入会造成对比度显著降低。如果能通过只采用横电波(Transverse electric, TE)偏振光照明成像,就能保持较高的成像对比度。原则上,从 65 nm 开始就可以运用偏振照明,但是由于更大数值孔径(如 0.85~0.93)可以满足 65 nm 节点,甚至 55 nm 节点的成像需求,相对复杂的偏振照明就没有被使用。到了水

表 2 45 nm, 28 nm, 16/14 nm, 7 nm 技术节点的光刻工艺总结
Table 2 Summary of photolithography process of 45 nm, 28 nm, 16/14 nm, and 7 nm technology nodes

Node / Gate pitch / nm	Gate CD / nm	Exposure tool	Photoresist	Mask	OPC	EL / %	MEF	DoF / nm	RET	ARC	Etch	CDU	Multiple patterning	Design regularization	
45	180	193 nm Water immersion	193 nm CAR, Low Ea	6% PSM	Model based	22.5	1.51	150	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad	Single layer	Linewidth trim	Wafer and shot	Cut	—	
28	118	193 nm Water immersion	193 nm CAR, Low Ea	6% PSM	Model based	21.5	1.40	80	Serif, OAI, CVI, SRAF, DP, Polarized imaging	Single layer	Linewidth trim	Wafer and shot, Etch tuning	Cut	Uni-directional	
16/14	90	193 nm Water immersion	193 nm CAR, Low Ea	6% PSM	Model based	22.6	1.45	60	Serif, OAI, CVI, SRAF, DP, Polarized imaging, SMO	Bi layer	Linewidth trim	Wafer and shot, Etch tuning	Cut	Uni-directional	
7	56	193 nm Water immersion	193 nm CAR, Low Ea	6% PSM	Model based	25.4	1.22	55	Serif, OAI, CVI, SRAF, DP, Polarized imaging, SMO	Bi layer	Linewidth trim	Wafer and shot, Etch tuning	SADP, Cut	Uni-directional	
Node / nm	Metal pitch / nm	Metal CD / nm	Exposure tool	Photoresist	Mask	OPC	EL / %	MEF	DoF / nm	RET	ARC	Self-aligned method	CDU	Multiple patterning	Design regularization
45	160	80	193 nm Water immersion	193 nm CAR, Low Ea	6% PSM	Model based	14.9	2.63	200	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad	Single layer	—	Wafer and shot	—	—
28	90	45	193 nm Water immersion	193 nm CAR, Low Ea	6% PSM	Model based	13.8	3.14	80-100	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad, Polarized imaging	Single layer	—	Wafer and shot	—	—
16	64	32	193 nm Water immersion	193 nm CAR, Low Ea, PDB	6% PSM, OMOG	Model based	13.8	3.14	80-100	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad, Polarized imaging, SMO	Bi layer	—	Wafer and shot	LELE	—

表 2(续)

14	64	32	193 nm Water immersion	193 nm CAR, Mid Ea, PDB, NTD	6% PSM, OMOG	Model based	12.9	3.17	60-80	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad, Polarized imaging, SMO, NTD	Bi layer	—	Wafer and shot	LELE	—
7	40	20	193 nm Water immersion	193 nm CAR, Low Ea, PDB, NTD	6% PSM	Model based	12.7	3.50	55-70	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad, Polarized imaging, SMO, NTD	Bi layer	Metal SALELE	Wafer and shot	SALELE, Cut	Uni- directional
Node / nm	Via pitch /nm	Via CD /nm	Exposure tool	Photoresist	Mask	OPC	EL /%	MEF	DoF / nm	RET	ARC	Etch	CDU	Multiple patterning	Self-aligned method
45	180	90	193 nm Water immersion	193 nm CAR, Low Ea	6% PSM	Model based	18.0	3.53	150	Serif, OAI, CVI, SRAF	Single layer	—	Wafer and shot	—	—
28	100	65	193 nm Water immersion	193 nm CAR, Low Ea	6% PSM	Model based	15.1	5.20	75	Serif, OAI, CVI, SRAF, Polarized imaging	Single layer	Shrink	Wafer and shot	—	—
16	64	42	193 nm Water immersion	193 nm CAR, Low Ea, PDB	6% PSM	Model based	14.6	5.23	70	Serif, OAI, CVI, SRAF, Polarized imaging, SMO	Bi layer	Shrink	Wafer and shot	LE4	—
14	64	42	193 nm Water immersion	193 nm CAR, Mid Ea, PDB, NTD	6% PSM	Model based	12.4	7.72	60-70	Serif, OAI, CVI, SRAF, Polarized imaging, SMO, NTD	Bi layer	Shrink	Wafer and shot	LE4	—
7	57	38	193 nm Water immersion	193 nm CAR, Low Ea, PDB, NTD	6% PSM	Model based	12.9	6.90	55-70	Serif, OAI, CVI, SRAF, Polarized imaging, SMO, NTD	Bi layer	Shrink	Wafer and shot	LE4	—

浸没式时期,由于水的折射率为 1.436,较大的数值孔径在水里实际的角度比较小,如 $NA=1.1$ 在水里的实际角度为 50° (类似干法 $NA=0.77$),所以,在 45 nm/40 nm 技术节点,由于有足够的成像对比度,可以不使用偏振。所以,偏振成像最后从 32 nm/28 nm 技术节点开始才被用于光刻工艺中。另外,在 7 nm 这一技术节点就可以引入极紫外光刻技术^[32],例如中国台积电、韩国三星、美国格罗方德以及 Intel 等先进的芯片代工厂已经有这方面的技术积累。然而,中国大陆暂时没有极紫外光刻机,芯片代工厂都是用 193 nm 水浸没式光刻机多次曝光实现 7 nm 逻辑芯片的光刻工艺流程。一般来说,7 nm 技术节点引入极紫外光刻工艺可用于前段鳍和栅极的剪切层次以及中-后段的金属、通孔等层次。这里说的是每种光刻机可以做到的技术节点的极限,以及考虑到作者团队参与的实际 7 nm 节点的研发也是基于 193 nm 水浸没式光刻工艺的,所以表 2 将 7 nm 罗列在 193 nm 水浸没式光刻可以实现的

各个技术节点中。表 2 中: 193 nm Water immersion 为 193 nm 水浸没式光刻机; DP(Dipole)为偶极照明; Etch tuning CDU 为刻蚀调整线宽均匀性; Etch shrink 为刻蚀缩小线宽(缩孔); SADP(Self-aligned double patterning)为自对准双重图形技术; Cut 为剪切层; Multiple patterning 为多重图形技术; SALELE(Self-aligned litho-etch litho-etch)为自对准光刻-刻蚀、光刻-刻蚀图形方法; LE4 为四次光刻-刻蚀方法; Uni-directional design 为单向设计。

表 3 展示了从 250 nm 开始一直到已经量产的 5 nm 技术节点中关键层次的设计周期,还包含更先进技术节点(如 3 nm, 2.1 nm, 1.5 nm 以及 1 nm)中关键层次的发展路线图。从 20 nm/16 nm/14 nm 节点开始,设计规则的周期已经小于光刻机的分辨率极限,需要开始采用双重或多重曝光技术。同时,还采用了光源掩模协同优化,它可以将给定设计规则的光刻工艺窗口性能提高 8%~10%。此外,负显影工艺也已被用于生产线中段(Middle-end-of-

表 3 250 nm 一直到 1 nm 技术节点中关键光刻层次的设计规则总结

Table 3 Summary of design rules for critical layers from 250 nm to 1 nm technology nodes

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

line, MEOL) 和后段 (Back-end-of-line, BEOL) 光刻工艺流程中, 这可以减少光刻和刻蚀之间的线宽偏置, 从而显著提高良率。

从 10 nm 和 7 nm 技术节点开始, 193 nm 水浸没式配合双重或多重曝光工艺 (包含自对准) 已经在前段 (Front-end-of-line, FEOL) 的鳍层、金属栅极和后段的金属、通孔层次中使用, 以最大化实现套刻偏差的减小和 CDU 性能的提升。此外, 对于 80 nm 周期的金属层, 由于掩模版的开口尺寸 (160~180 nm, 4 倍率) 与照明波长 (193 nm) 相比相对较小, 照明光不容易穿过掩模版到达投影物镜, 所以将发生严重的掩模三维 (3D) 散射, 并将导致曝光能量增加 30%~70%, 掩模误差因子 (Mask error factor, MEF), 又叫掩模版误差增强因子 (Mask error enhancement factor, MEEF) 升高 12%~20%。曝光能量太高, 会造成掩模版和镜头发热, 造成光刻工艺的套刻偏差变大、镜头寿命缩短以及工艺不稳定等一系列的不良影响。幸运的是, 这个问题可以通过使用不透明的硅化钼-玻璃掩模版 (Opaque-MoSi-on-glass, OMOG)^[33] 来解决, 但代价是 EL 会降低 15%~20%。更幸运的是, 可以通过在光刻胶中添加光可分解碱来减少成像背景, 从而提高 EL。

从 28 nm 节点开始, 由于需要保持良好的线宽均匀性和成像对比度, 从而产生较小的线边粗糙度 (Line edge roughness, LER)/线宽粗糙度 (Line width roughness, LWR), 从而提升器件性能, 因此前段开始采用单向设计规则。到了 7 nm 技术节点, 193 nm 水浸没式光刻机的潜力已经被充分利用, 水浸没式光刻工艺支持了 45 nm/40 nm、32 nm/28 nm、20 nm/16 nm/14 nm、10 nm 和 7 nm 这五个主要的技术节点。

从 5 nm 技术节点开始, 到更先进的 3 nm、2.1 nm 甚至 1 nm 技术节点, 除了前段仍然使用 193 nm 水浸没式配合自对准双重或四重图形技术 (SADP/SAQP) 外, 对于前段鳍和栅极沟槽尺寸较小的剪切层以及中-后段的金属、通孔层次, 193 nm 水浸没式光刻工艺不再适用。这是因为这些层次可能需要 6~8 次曝光, 一方面掩模版数目增多, 大大增加了工艺成本, 另一方面, 太多的曝光次数使得本就不够的套刻精度更加难以控制, 同时还伴随着复杂的薄膜和刻蚀工艺。因此, 从 5 nm 技术节点开始, 大多数中-后段层次和前段的鳍和栅极的剪切层次都采用极紫外光刻工艺来实现。光刻工艺总结如表 4

所示, 同时, 由于所有材料都对极紫外光有很强的吸收, 所以极紫外光刻工艺的一个特点是不需要抗反射层, 但是需要使用底部增感层^[34-35], 使得光刻胶对极紫外光的吸收增加约 30%, 以减小光子吸收的随机涨落效应。

上述所有光刻工艺是基于作者团队多年的工作经验, 以及结合实际产品的设计规则、工况等, 通过 CF Litho 和 CF Litho-EUV 自研仿真软件总结出来的。目前, 国内台积电已经完成了 5 nm 逻辑技术节点的量产, 其他多家先进芯片代工工厂已经完成了与 28 nm 以及 14 nm 配套的光刻工艺研发, 正在利用 193 nm 水浸没式多重曝光研发更先进技术节点 (10 nm、7 nm) 的光刻工艺流程。

3 支持光刻技术发展而开发的关键技术

3.1 化学放大型光刻胶

光刻胶的发展经历了 20 世纪六七十年代的负性光刻胶, 曝光后的光刻胶发生交联反应不溶于显影液, 未曝光部分光刻胶溶于显影液, 负胶主要用于汞灯的 i 线 (365 nm) 和 h 线 (405 nm) 的接触式光刻机时代。随后, 在汞灯的 g 线 (436 nm)、h 线以及 i 线光刻时代, 重氮萘醌 (Diaz naphtho quinone, DNQ)/酚醛树脂 (Novolac) 光刻胶 (正胶) 占主导地位。曝光前重氮萘醌磺酸酯里的磺酸基与酚醛树脂里的羟基形成一定强度的氢键, 阻碍其溶于碱性的四甲基氢氧化铵 (Tetra methyl ammonium hydroxide, TMAH) 显影液; 曝光后, 光化学反应使得 DNQ 变成茛菪酸 (Indene acid), 与酚醛树脂的氢键消失, 同时增加酸度, 使得其在 TMAH 显影液里的溶解率大大增加。由于未曝光部分光刻胶不溶于显影液, 且没有负胶的溶胀特性, 分辨率相比负胶更高。随着技术节点的进一步发展, 光刻尺寸越来越小, 此种普通光刻胶由于上层对光吸收剧烈, 下层光强明显变弱, 光化学反应在整个光刻胶厚度上不均匀, 造成梯形光刻胶断面形貌^[1]。CAR 应运而生, 其发明于 20 世纪 80 年代, 旨在提高光刻胶对曝光能量的灵敏度和空间分辨率。表征 CAR 的关键参数之一是等效光酸扩散长度。光刻胶主要由成膜树脂、溶剂、光致产酸剂、添加剂等组成。曝光后光致产酸剂会产生光酸, 光酸在曝光后烘焙过程中催化光刻胶中被曝光部分中的树脂完成脱保护 (Deprotection) 反应, 大大增加曝光后的光刻胶在

表 4 5 nm 技术节点的光刻工艺总结与未来 3 nm, 2.1 nm, 1.5 nm 和 1 nm 节点的展望
 Table 4 Summary of photolithography process of 5 nm and outlook for the future 3 nm, 2.1 nm, 1.5 nm and 1 nm technology nodes

Node / nm	Gate pitch / nm	Gate CD / nm	Exposure tool	Photoresist	Mask	OPC	EL / %	MEF	DoF / nm	RET	ARC	Etch	CDU	Multiple patterning	Design regularization
5	50	25	193 nm	193 nm	6% PSM	Model based	22.0	1.5	50	Serif, OAI, CVI, SRAF, DP, Polarized imaging, SMO	Bi layer	Linewidth trim	Wafer and shot, Etch tuning	SADP, Cut	Uni-directional
			Water immersion	CAR, Low Ea											
3	42	21	193 nm	193 nm	6% PSM, OMOG	Model based	18.0	1.5	50	Serif, OAI, CVI, SRAF, DP, Polarized imaging, SMO	Bi layer	Linewidth trim	Wafer and shot, Etch tuning	SADP, Cut	Uni-directional
			Water immersion	CAR, Low Ea											
2.1	32	16	193 nm	193 nm	6% PSM	Model based	18.0	1.5	50	Serif, OAI, CVI, SRAF, DP, Polarized imaging, SMO	Bi layer	Linewidth trim	Wafer and shot, Etch tuning	SAQP, Cut	Uni-directional
			Water immersion	CAR, Low Ea											
1.5	32	16	193 nm	193 nm	6% PSM	Model based	18.0	1.5	50	Serif, OAI, CVI, SRAF, DP, Polarized imaging, SMO	Bi layer	Linewidth trim	Wafer and shot, Etch tuning	SAQP, Cut	Uni-directional
			Water immersion	CAR, Low Ea											
1	32	16	193 nm	193 nm	6% PSM	Model based	18.0	1.5	50	Serif, OAI, CVI, SRAF, DP, Polarized imaging, SMO	Bi layer	Linewidth trim	Wafer and shot, Etch tuning	SAQP, Cut	Uni-directional
			Water immersion	CAR, Low Ea											
Node / nm	Metal pitch / nm	Metal CD / nm	Exposure tool	Photoresist	Mask	OPC	EL / %	MEF	DoF / nm	RET	Under Layer	Etch	CDU	Multiple patterning	Design regularization
5	30	15	13.5 nm	EUV CAR, Low Ea, PDB	EUV binary	Model based	18.0	1.5	55	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad, SMO	Single layer	—	Wafer and shot	SALELE, Cut	Uni-directional
			0.33 NA EUV												
3	22	11	13.5 nm	EUV CAR, Low Ea, PDB, Polymer bound PAG	EUV binary	Model based	18.0	1.5	55	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad, SMO	Single layer	—	Wafer and shot	SALELE, Cut	Uni-directional
			0.33 NA EUV												
2.1	16	8	13.5 nm	EUV CAR, Low Ea, PDB, Polymer bound PAG	EUV binary	Model based	18.0	1.5	30-40	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad, SMO	Single layer	—	Wafer and shot	SALELE, Cut	Uni-directional
			0.55 NA EUV												

表 4(续)

Node / nm	Via pitch / nm	Via CD / nm	Exposure tool	Photoresist	Mask	OPC	EL / %	MEF	DoF / nm	RET	Under Layer	Etch	CDU	Multiple patterning	Self-aligned method	
1.5	14	7	13.5 nm 0.55 NA EUV	EUV CAR, Low Ea, PDB, Polymer bound PAG	EUV binary	Model based	18.0	1.5	30-40	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad, SMO	Single layer	—	Wafer and shot	SALELE, Cut	Uni- directional	
1	14	7	13.5 nm 0.55 NA EUV	EUV CAR, Low Ea, PDB, Polymer bound PAG	EUV binary	Model based	18.0	1.5	30-40	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad, SMO	Single layer	—	Wafer and shot	SALELE, Cut	Uni- directional	
Node / nm																
Via pitch / nm																
Via CD / nm																
Exposure tool																
Photoresist																
Mask																
OPC																
EL / %																
MEF																
DoF / nm																
RET																
Under Layer																
Etch																
CDU																
Multiple patterning																
Self-aligned method																
5	48	24	13.5 nm 0.33 NA EUV	EUV CAR, Low Ea, PDB, Polymer bound PAG	EUV binary	Model based	18.0	3	55	Serif, OAI, CVI, SRAF, SMO	Single layer	Shrink	Wafer and shot	—	—	
3	36	18	13.5 nm 0.33 NA EUV	EUV CAR, Low Ea, PDB, Polymer bound PAG	EUV binary	Model based	18.0	3	55	Serif, OAI, CVI, SRAF, SMO	Single layer	Shrink	Wafer and shot	0.33 NA LE2	—	
2.1	25	12	13.5 nm 0.55 NA EUV	EUV CAR, Low Ea, PDB, Polymer bound PAG	EUV binary	Model based	20.0	3	30-40	Serif, OAI, CVI, SRAF, SMO	Single layer	Shrink	Wafer and shot	0.55 NA LE3	—	
1.5	20	10	13.5 nm 0.55 NA EUV	EUV CAR, Low Ea, PDB, Polymer bound PAG	EUV binary	Model based	20.0	3	30-40	Serif, OAI, CVI, SRAF, SMO	Single layer	Shrink	Wafer and shot	0.55 NA LE4	—	
1	20	10	13.5 nm 0.55 NA EUV	EUV CAR, Low Ea, PDB, Polymer bound PAG	EUV binary	Model based	20.0	3	30-40	Serif, OAI, CVI, SRAF, SMO	Single layer	Shrink	Wafer and shot	0.55 NA LE4	—	

TMAH 显影液中的溶解速率。通过扩散,光酸可以催化多个分子的化学反应,因此提高了光刻胶的灵敏度。但是,过度的扩散可能会影响成像对比度或曝光能量宽裕度。对于 250 nm 逻辑技术节点的逻辑层,其等效光酸扩散长度为 70~100 nm;对于

193 nm 水浸没式光刻胶,等效光酸扩散长度为 5~10 nm;对于极紫外光刻胶,分辨率进一步提高,线宽进一步缩小,所以等效光酸扩散长度也相应进一步降低至小于 4 nm,如图 1^[36]所示。

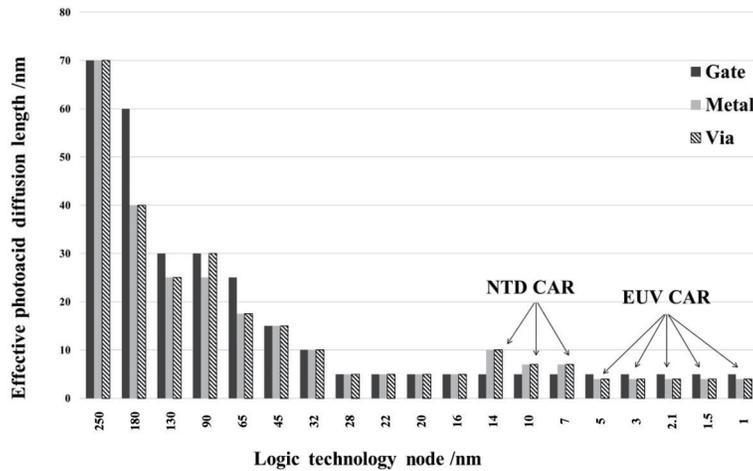


图 1 栅极层、金属层、通孔层的等效光酸扩散长度的演变^[36]

Fig. 1 Evolution of the EPDL for gate, metal and via layers^[36]

在极紫外光刻工艺中,扩散长度也会影响线宽粗糙度,如图 2^[37]所示,较短的扩散长度虽然可以获得较大的对比度或 EL,但是也会导致光刻胶的颗粒度增大,光子吸收随机效应变得明显;扩散长度较长,虽然可以在空间上使光刻胶的颗粒度均匀,减小光子吸收随机效应,但是也会影响对比度或 EL,导致粗糙度增加。所以,对于极紫外光刻,需要根据实际情况选择合适的扩散长度。

3.2 光源掩模协同优化

即使使用离轴照明和连续变角度照明来进一步优化照明光瞳,他们仍然是在照明光瞳中具有固定形状的参数化的改进方式。这种方式在 32/28 nm 以及以前的逻辑技术节点中是够用的,但是到了后续更先进的节点时就显得力不从心。经验表明,采用自定义的照明方式,通过使用几千个(ASML 使用 4096 个^[38])转镜来实现照明光瞳的自由定义,充分挖掘部分相干照明的潜力,可以将整个光刻工艺窗口的性能提高 8%~10%。从 22 nm/20 nm 节点开始,SMO 被用于最大限度地提高整个光刻工艺窗口。

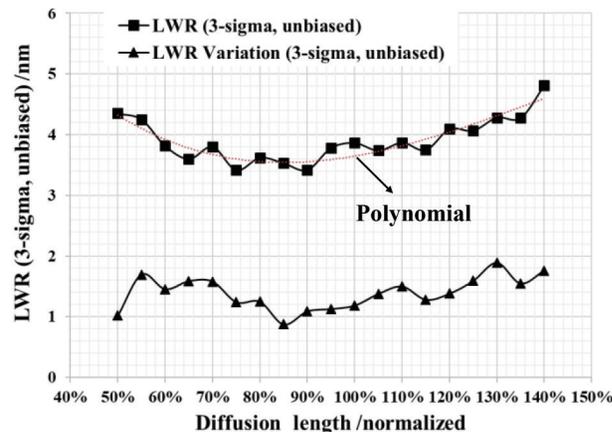


图 2 仿真(CF Litho-EUV)得到 LWR 随等效光酸扩散长度的变化(曝光条件:NA=0.33 偶极照明,周期为 27 nm,光刻后沟槽尺寸为 15 nm)^[37]

Fig. 2 Simulated LWR as a function of EPDL with CF Litho-EUV (exposure condition: dipole illumination with NA of 0.33, pitch of 27 nm, trench CD of 15 nm)^[37]

3.3 负显影(NTD)

与正显影(Positive tone developing, PTD)对应的光刻工艺中发生的光化学反应相同,NTD 对应的光刻工艺中的光化学反应也通过曝光产生光酸,光酸在曝光后烘焙过程中催化光刻胶中被曝光部分中的树脂完成脱保护反应,大大减小曝光后的光刻胶在极性不强的显影液(有机溶剂)中的溶解速率,形成与 PTD 相反的光刻图形。NTD 并不是为了提高光刻工艺的分辨率,相反,由于其等效光酸扩散长度较 PTD 的长(NTD 为 10/7 nm, PTD 为 5 nm),造成它在最小周期下的 EL 明显比 PTD 的差。然而,由于使用了明场照明以及 PSM,NTD 光刻工艺可以得到较小的沟槽和通孔,尤其是在半密集到孤

立的图形上,且有较大的曝光能量宽裕度,这样可以显著降低 OPC 的补值以及刻蚀和光刻之间的线宽偏置(etch bias)。

3.4 极紫外光刻

从 5 nm 逻辑技术节点开始,极紫外光刻技术已经被广泛使用,极紫外光波长为 13.5 nm。像差造成的图形位置偏移与 NA 成反比^[39],因此与 193 nm 水浸没式光刻相比($NA=1.35$),极紫外光刻工艺对像差更加灵敏(低数值孔径 low $NA=0.33$,高数值孔径 high $NA=0.55$)。由于几乎所有的物质都能吸收极紫外光,所以光学成像装置必须使用全反射,包括照明系统、掩模版、投影物镜系统。反射镜

多层膜由钼硅薄膜相间组成,最高反射率约为 70%,如图 3(a)所示,其中浅色线条代表的是理想的 40 对钼硅多层膜随波长变化的反射率曲线。入射光与反射镜表面法线的夹角也会影响极紫外光的反射率,如图 3(b)所示。对于入射到掩模版上的光线,太大的入射角(incidence angle,在 yz 平面,入射光与 z 轴的夹角)不仅会造成反射率的损失,还会造成阴影效应(shadowing effect),使得沿 x 方向放置的图形有位置移动(pattern shift)^[40]。目前,低数值孔径极紫外光刻机在掩模版上的入射角为 6° ,高数值孔径极紫外光刻机在掩模版上的入射角为 5.3° ^[41]。

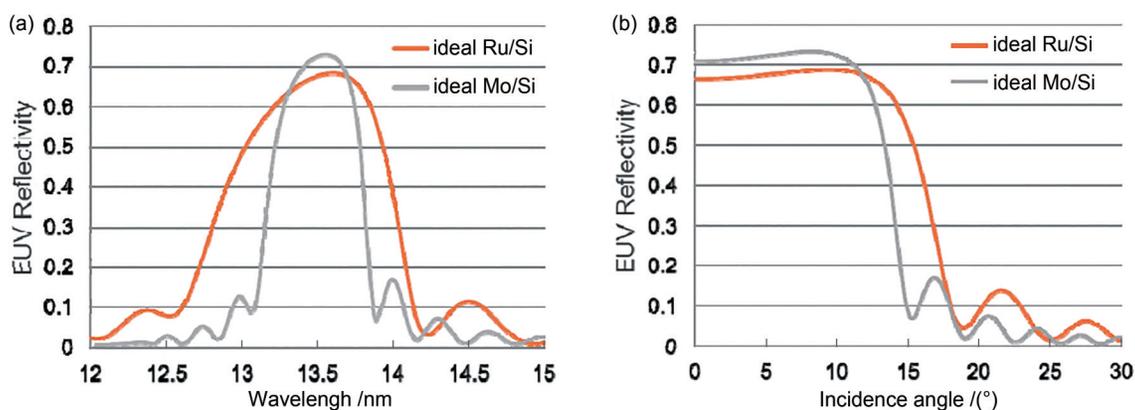


图 3 理想的 40 对 Mo-Si 和 20 对 Ru-Si 多层膜随波长和入射角变化的反射率曲线^[42]。(a) 反射率随波长变化; (b) 反射率随入射角变化

Fig. 3 Plots of reflectivity versus EUV and incident angle for an ideal Mo/Si multilayer (40 bilayers) and an ideal Ru/Si multilayer (20 bilayers). (a) Reflectivity versus wavelength; (b) reflectivity versus incident angle

极紫外光从中间焦点(Intermediate focus, IF)发出之后,会经过包含掩模版在内的至少 11 片反射镜,最终到达硅片上的能量只有 2% 左右。相比 193 nm 波长,采用 13.5 nm 的极紫外波长意味着对于同样的曝光能量或剂量,光子数只有 193 nm 的 1/14。显著减少的光子数量会造成较大的光子分布统计涨落,也即光刻胶的光子吸收随机效应^[43]。光子吸收随机效应会导致光刻胶桥接或断线等缺陷,并导致更高的 LER/LWR。所以为保证成像的质量,先进技术节点后段使用极紫外光刻的各关键层次需要满足 EL 大于等于 18%,这导致在 $NA=0.33$ 的极紫外光刻工艺中,一维线条/沟槽图形最小周期为 36~40 nm,通孔的最小周期为 48~50 nm ($\geq 18%$)^[44]。也就是说,衍射极限的最小周期在实际曝光中并不实用。一方面由于极紫外光源功率的限制,另外一方面由于反射系统对极紫外光的损耗,极紫外光刻机的硅片产率相对较低,只有 193 nm 水浸没式光刻

机(300 Wafer per hour, WPH)的 50%~60%。目前,ASML 公司的 NXE3400D 平台每小时已经可以完成 160 片硅片曝光(曝光能量 $30 \text{ mJ}/\text{cm}^2$)^[45];该公司正在研发阶段的 $NA=0.33$ 的光刻机预计每小时产量可超过 200 片(曝光能量 $30 \text{ mJ}/\text{cm}^2$),已经在规划中的高数值孔径光刻机产能预计每小时也可以超过 200 片(曝光能量 $30 \text{ mJ}/\text{cm}^2$)^[46]。

4 光刻工艺标准讨论

表 3 总结了从 250 nm 到当前 5 nm 的工艺节点推荐的光刻方法,以及未来的 3、2.1、1.5、1 nm 等先进技术节点中关键层次最小周期的估计值和光刻方法。尽管已经发明了许多新技术来支持光刻技术的持续发展,但判断光刻工艺是否合格的标准与 CDU 有关,而与 CDU 息息相关的三个光刻工艺的重要参数分别是 EL、MEF 和 DoF。图 4、5 和 6^[36]是通过各自的照明条件(与实际量产条件相仿)仿真得到的从 250 nm

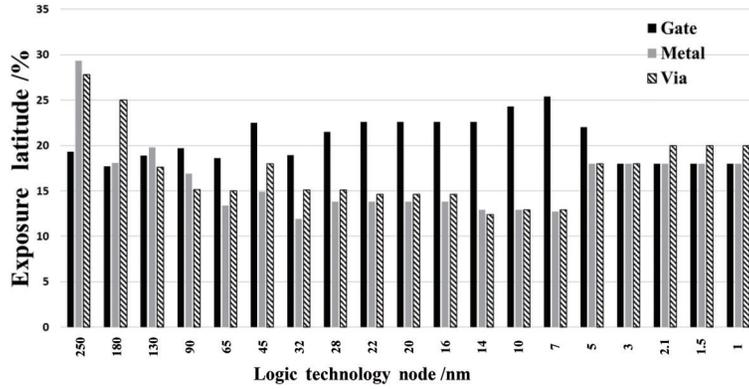


图 4 各个技术节点的仿真曝光能量宽裕度结果^[36]
Fig. 4 Simulated EL for various technology nodes^[36]

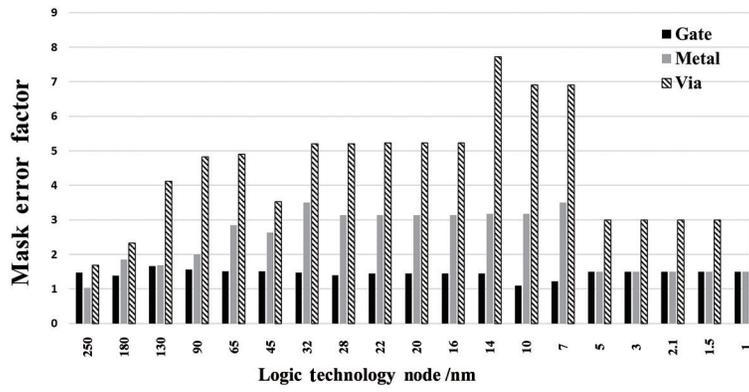


图 5 各个技术节点的仿真掩模误差因子结果^[36]
Fig. 5 Simulated MEF for various technology nodes^[36]

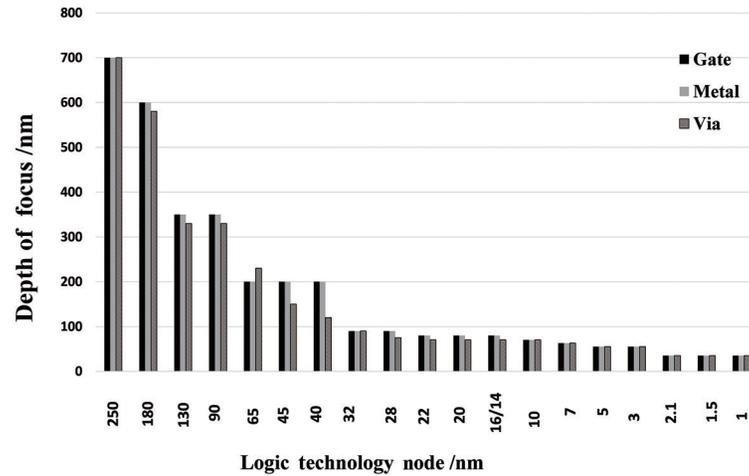


图 6 各个技术节点的仿真对焦深度结果^[36]
Fig. 6 DoF for various technology nodes^[36]

到 5 nm 逻辑技术节点的 EL、MEF 和 DoF,同时对于更先进的技术节点,根据以往的经验给定仿真条件。

从中可以得出如下结论:

1) 前段栅极需要满足 EL 大于等于 18%,后段通孔层次需要满足 EL 大于等于 15%(对于 14 nm/10 nm/7 nm 的通孔,EL 只有 13%,这是因为采用了

NTD,对比度由于等效光酸扩散长度增加而有所降低),后段金属层次需要满足 EL 大于等于 13%(对极紫外光刻,前后段均需满足 EL 大于等于 18%)。

2) 前段栅极需要满足 MEF 小于 1.5,后段通孔层次需要满足 MEF 小于 5(对于 14 nm/10 nm/7 nm 的通孔,因为采用了 NTD 使得对比度降低,从而增

加了 MEF), 后段金属层次需要满足 MEF 小于等于 3.5 (对极紫外光刻, 前后段均需满足 MEF 小于等于 1.5)。

3) 随着波长的缩短和 NA 的增加, DoF 呈下降趋势, 而光刻机的所有因素造成的离焦都必须在 DoF 范围内, 才能完成正常的光刻。从仿真结果来看, 后段金属层和通孔层次的 DoF 水平相当。

上述三个重要光刻工艺参数的规律是对几十年的量产条件总结得来的, 这些条件并不一定最优, 但是事实证明可以满足量产需求, 也是工业界应该尽量遵循的一条技术路线, 也就是作者团队提议的工业标准。

5 光刻工艺相关最新进展

从表 3 可以看出, 当逻辑技术节点到达 5 nm 时, 后段必须引入极紫外光刻工艺, 一方面可以减小掩模版数目, 节省成本, 另一方面可以提高套刻精度和可靠性。目前台积电已经通过 $NA=0.33$ 极紫外光刻机实现了 5 nm 逻辑芯片的量产, 对于 $NA=0.33$ 极紫外光刻机, 虽然其光学分辨率可以达到 13 nm 半周期^[41], 考虑到极紫外光刻中的光子吸收随机效应, 单次曝光最小线条/沟槽周期为 36~40 nm^[44]。对于更先进的技术节点, 可能需要引入 $NA=0.55$ 极紫外光刻机。蔡司早在 2015 年^[47]就提出了使用变形镜头 (x 方向 4:1 成像, y 方向 8:1 成像) 来实现高数值孔径, 其分辨率为 8 nm 半周期, 镜片数目仍然保持 $NA=0.33$ 的 6 片, 以保证尽量多的极紫外光入射到硅片上。同样考虑到极紫外光刻中的随机效应以及技术路线图中的最小金属周期, $NA=0.55$ 单次曝光最小线条/沟槽周期被认为是 28 nm^[44]。由于 $NA=0.55$ 极紫外光刻机的高分辨率, 从技术路线图中可以看出, 即使在 1 nm 的先进节点, 也可以分别通过两次和四次图形技术轻松实现后段金属层和通孔层次的曝光。

van Schoot^[41]在 2020 年提到, 由于 NA 的增大, 镜片的直径也大大增加, 镜头的加工也更困难, 与其配套的设备, 例如镜片多层反射膜镀膜机, 也需要重新设计。同时为了减小最后两片镜片的入射光角度以提高极紫外光的反射率, 需要将 $NA=0.5$ 的镜头设计成卡塞格林 (Cassegrain) 的构型, 也就是在最后一面反射镜上钻孔的结构。高数值孔径不仅可以提高分辨率, 在同一周期时, $NA=0.55$ 光刻工艺中的线条/沟槽的 LWR 更低, 通孔的局域 CDU 更小。因为使用了变形镜头, 掩模版尺寸仍旧保持以前的 104 mm×132 mm, 掩模版保护膜 (pellicle) 也没有变化, 但是在硅片上的曝光场缩小到原来的一半。为了保证产量, 将掩模台和硅片台的加速度分别提高到 $NA=0.55$ 光刻机的 4 倍和 2 倍。未来, 高数值孔径光刻机的产能可以达到每小时 150 片 (曝光能量 30 mJ/cm²), 甚至超过 200 片 (曝光能量 30 mJ/cm²)^[46]。

目前极紫外光刻中的掩模版还是二元掩模版, 如图 7(a) 所示, 在低热膨胀的玻璃上生长 40 对钼-硅 (Mo-Si) 多层膜, 钼的厚度为 2.8 nm, 硅的厚度为 4.2 nm。上面继续生长一层 2.5 nm 厚的钌 (Ru) 作为保护层, 保护层上是一层厚度约为 60 nm 的氮化钽 (TaN) 形成的掩模图案, TaN 作为吸收层, 将入射的极紫外光完全吸收。Ahn 等^[48]在 2021 年提到, 选择合适的相移材料 (Shifter) 替代极紫外二元掩模版中的吸收层, 使得极紫外光通过这一物质可以实现相位反转, 膜层结构如图 7(b) 所示。如果 Shifter 材料具有低吸收、高折射率, 那么相移的效果会更好。可选的材料包括单组分材料如 Mo、Ru, 化合物材料如 Si₃N₄。通过仿真可知, 相移掩模版可以进一步提高极紫外光刻工艺窗口, 如增加对比度、降低掩模误差因子等。ASML 公司的 van Schoot^[41]也提到将衰减相移掩模版纳入未来 10 年的计划中。

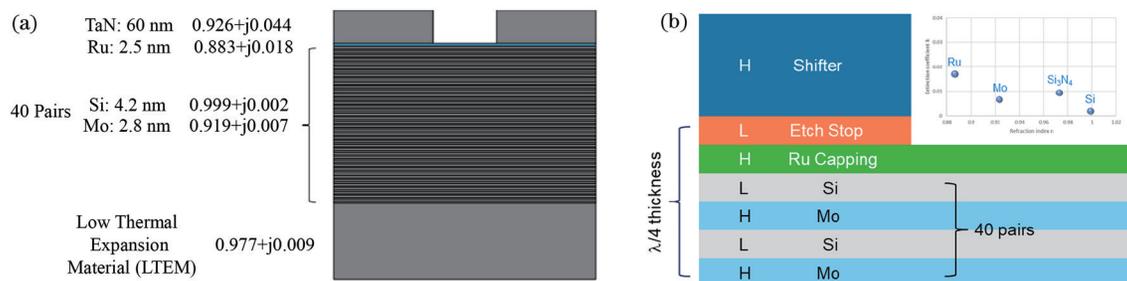


图 7 极紫外二元掩模版和相移掩模版截面示意图。(a)极紫外二元掩模版^[39]; (b)极紫外相移掩模版^[48]

Fig. 7 Cross section structure of EUV binary mask and EUV PSM. (a) EUV binary mask^[39]; (b) EUV PSM^[48]

由于 NA 增大, 焦深相应减小, 相应的光刻胶厚度需要减薄, 这会影响到极紫外光的利用效率, 因此极紫外光刻胶也需要进一步改进以满足高数值孔径光刻工艺的要求。光刻胶的性能可以用 Z 因子来衡量, 可表示为

$$Z = P_H^3 \times R_{LW}^2 \times E, \quad (1)$$

式中: P_H 是半周期 (HP); R_{LW} 是线宽粗糙度 (LWR); E 是曝光能量密度, mJ/cm^2 , 一般工作中称其为曝光能量。同步对半周期、线宽粗糙度以及光刻胶对光的灵敏度改善才能提高光刻胶的整体性能。Wang 等^[49]在 2020 年提到, 通过使用不同图形的光栅实现线条/沟槽 (line/space) 图形、通孔 (contact holes) 以及凸起 (pillars) 图形的曝光, 评价各种光刻胶的性能, 包括分子胶、无机光刻胶、化学放大型光刻胶以及含金属的化学放大型光刻胶。他们从 120 种不同组分光刻胶中筛选出 4 种性能最好的线条/沟槽光刻胶。当线条/沟槽的半周期做到 16 nm 时, 分子胶 (负胶) 的 Z 因子可以优化到 $0.86 \times 10^{-8} \text{ nm}^3 \cdot \text{mJ}$, 化学放大型光刻胶 (正胶) 的 Z 因子可以优化到 $1.1 \times 10^{-8} \text{ nm}^3 \cdot \text{mJ}$, 两种光刻胶的线宽粗糙度都可以降低到 2.7 nm; 当线条/沟槽的半周期做到 14 nm 时, 前者的 Z 因子可以继续降低到 $0.82 \times 10^{-8} \text{ nm}^3 \cdot \text{mJ}$, 而后者的 Z 因子还是保持在 $1.1 \times 10^{-8} \text{ nm}^3 \cdot \text{mJ}$, 同时两者的线宽粗糙度均有所升高, 分别为 3.1 nm 和 3.3 nm。

作为参考, 现在量产的极紫外光刻胶的 Z 因子可以做如下估算: 对于 5 nm 逻辑技术节点的金属层 (周期为 30 nm), 采用自对准光刻-刻蚀、光刻-刻蚀的光刻半周期为 30 nm, 线宽粗糙度估算为 3 nm, 曝光能量密度为 $30 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, 其 Z 因子为 $7.3 \times 10^{-8} \text{ nm}^3 \cdot \text{mJ}$ 。当然, 现代极紫外光刻胶已经验证到 14 nm 半周期, 如果线宽粗糙度为 2.2 nm, 曝光能量为 $60 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, 其 Z 因子为 $0.8 \times 10^{-8} \text{ nm}^3 \cdot \text{mJ}$ 。

文献^[49]也表明, 如果想提升分辨率, 减小线宽粗糙度, 就需要通过降低 Z 因子来提升整个光刻胶的性能。本文作者认为, 极紫外分子胶高灵敏度、低线宽粗糙度和高分辨率的特性让其可能应用在未来先进技术节点的光刻工艺中。本文还提到, 化学放大型光刻胶的通孔半周期可以减小到 20 nm, 无机光刻胶的凸起图形半周期可以减小到 18 nm。作者认为, 在没有极紫外光刻机时, 利用光栅干涉形成曝光条纹, 这是一种评价光刻胶极为方便有效的手段。

6 结 论

总结了从 250 nm 逻辑技术节点开始, 从光刻机, 到照明条件、仿真软件 (OPC、SMO 等)、分辨率增强技术、光刻材料 (光刻胶、抗反射层、掩模版、增感层), 再到光刻工艺方法等方面各个节点的发展历程。并总结了 5 nm 和 5 nm 之前量产时的光刻工艺窗口, 以及量产需要满足的光刻工艺条件。展望了未来更先进技术节点中关键层次的最小设计规则、光刻工艺方法和光刻工艺窗口的标准。还对极紫外光刻工艺的现状进行了总结, 变形镜头的 NA=0.55 极紫外光刻机是未来先进技术节点的基础。仿真发现, PSM 可以增加光刻工艺对比度, 减小掩模误差因子。为进一步优化光刻工艺窗口, 需要提升光刻胶的整体性能。因此, 优化配方得到 Z 因子更小的光刻胶材料是未来先进技术节点的目标。

参 考 文 献

- [1] 伍强, 胡华勇, 何伟明, 等. 衍射极限附近的光刻工艺[M]. 北京: 清华大学出版社, 2020.
Wu Q, Hu H Y, He W M, et al. Photolithography process near the diffraction limit[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020.
- [2] Markle D. A new projection printer[J]. Solid State Technology, 1974, 17(6): 50-53.
- [3] Offner A. New concepts in projection mask aligners [J]. Optical Engineering, 1975, 14(2): 130-132.
- [4] ASML. ASML Official website[EB/OL]. [2021-04-02]. <https://www.asml.com/en/products/duv-lithography-systems/twincan-nxt1970ci>.
- [5] Teruyoshi Y, Eiichi K. Novel optimization method for antireflection coating[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2726: 564-572.
- [6] Lucas K D, Cook C, Lee K, et al. Antireflective coating optimization techniques for sub-0.2- μm geometries[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3677: 457-467.
- [7] Sakaguchi T, Enomoto T, Nakajima Y. Bottom anti-reflective coatings for 193-nm bilayer system[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5753: 619-626.
- [8] Lin B J. Off-axis illumination: working principles and comparison with alternating phase-shifting masks[J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1927: 89-100.
- [9] Kim B, Park C H, Ryoo M, et al. Application of phase-edge PSM for narrow logic gate[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3873: 943-952.
- [10] Gabor A H, Bruce J A, Chu W, et al. Subresolution

- assist feature implementation for high-performance logic gate-level lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2002, 4691: 418-425.
- [11] Chen J F, Laidig T L, Wampler K E, et al. Practical method for full-chip optical proximity correction[J]. Proceedings of SPIE, 1997, 3051: 790-803.
- [12] Kling M E, Lucas K D, Reich A J, et al. 0.25- μm logic manufacturability using practical 2D optical proximity correction[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3334: 204-214.
- [13] Ozawa K, Thunnakart B, Kaneguchi T, et al. Effect of azimuthally polarized illumination imaging on device patterns beyond 45 nm node[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6154: 61540C.
- [14] Burnett J H, Kaplan S G, Shirley E L, et al. High-index materials for 193 nm immersion lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5754: 611-621.
- [15] Benndorf M, Warrick S, Conley W, et al. Integrating immersion lithography in 45-nm logic manufacturing [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6520: 652007.
- [16] Hsu S, Chen L Q, Li Z P, et al. An innovative source-mask co-optimization (SMO) method for extending low k1 imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7140: 714010.
- [17] Yoshimochi K, Nagahara S, Takeda K, et al. Challenges for low-k1 lithography in logic devices by source mask co-optimization[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 76401K.
- [18] Funato S, Kawasaki N, Kinoshita Y, et al. Application of photodecomposable base concept to two-component deep-UV chemically amplified resists [J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2724: 186-195.
- [19] Padmanaban M, Bae J B, Cook M M, et al. Application of photodecomposable base concept to 193-nm resists[J]. Proceedings of SPIE, 2000, 3999: 1136-1146.
- [20] Robertson S A, Reilly M, Biafore J J, et al. Negative tone development: gaining insight through physical simulation[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7972: 79720Y.
- [21] Gonsalves K E, Thiyagarajan M, Dean K. Newly developed polymer bound photoacid generator resist for sub-100-nm pattern by EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5753: 771-777.
- [22] Cho Y, Gu X Y, Hagiwara Y, et al. Polymer-bound photobase generators and photoacid generators for pitch division lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7972: 797221.
- [23] Semiconductor Industry Association[EB/OL]. (2001-08-21)[2021-02-05]. <https://www.semiconductors.org/resources/2001-international-technology-roadmap-for-semiconductors-itrs/>.
- [24] Semiconductor Industry Association[EB/OL]. (2005-08-21)[2021-02-05]. <https://www.semiconductors.org/resources/2005-international-technology-roadmap-for-semiconductors-itrs/>.
- [25] Semiconductor Industry Association[EB/OL]. (2013-08-21)[2021-02-05]. <https://www.semiconductors.org/resources/2013-international-technology-roadmap-for-semiconductors-itrs/>.
- [26] Semiconductor Industry Association[EB/OL]. (2015-06-05) [2021-02-05]. <https://www.semiconductors.org/resources/2015-international-technology-roadmap-for-semiconductors-itrs/>.
- [27] Wu Q, Li Y L, Zhao Y H. The evolution of photolithography technology, process standards, and future outlook[C]//2020 IEEE 15th International Conference on Solid-State & Integrated Circuit Technology, November 3-6, 2020, Kunming, China. New York: IEEE Press, 2020.
- [28] Wiki official website[EB/OL]. [2021-02-05]. <https://en.wikichip.org/>.
- [29] Trouiller Y, Belledent J, Chapon J D, et al. Gate imaging for 0.09- μm logic technology: comparison of single exposure with assist bars and the CODE approach [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5040: 1231-1240.
- [30] Brist T E, Bailey G E. Effective multicutline QUASAR illumination optimization for SRAM and logic[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5042: 153-159.
- [31] LaPedus M. Intel drops 157-nm tools from lithography roadmap[EB/OL]. (2003-05-23) [2021-02-05]. <https://www.eetimes.com/intel-drops-157-nm-tools-from-lithography-roadmap/>.
- [32] Lin Q, Hisamura T, Chong N, et al. Optimization of the EUV contact layer process for 7 nm FPGA production[J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11609: 116090V.
- [33] Zhang S J, Shen M H, Xu Y, et al. Performance comparison between attenuated PSM and opaque MoSi on glass (OMOG) mask in sub-32 nm litho process[J]. ECS Transactions, 2012, 44(1): 249-256.
- [34] Sakamoto R, Ho B C, Fujitani N, et al. Development of under layer material for EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7969: 79692F.

- [35] Wu A W, Bayana H, Foubert P, et al. Improving EUV underlayer coating defectivity using point-of-use filtration[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11326: 113261Z.
- [36] Wu Q, Li Y L, Yang Y S, et al. The law that guides the development of photolithography technology and the methodology in the design of photolithographic process[C]//2020 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), June 26-July 17, 2020, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2020.
- [37] Wu Q, Li Y L, Yang Y S, et al. A study of image contrast, stochastic defectivity, and optical proximity effect in EUV photolithographic process under typical 5 nm logic design rules[C]//2020 China Semiconductor Technology International Conference (CSTIC), June 26-July 17, 2020, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2020.
- [38] Cornelissen S A, Bierden P A, Bifano T G. Development of a 4096 element MEMS continuous membrane deformable mirror for high contrast astronomical imaging[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6306: 630606.
- [39] Li Y L, Wu Q, Chen S M. A simulation study for typical design rule patterns in 5 nm logic process with EUV photolithographic process[J]. Journal of Microelectronic Manufacturing, 2019, 2(4): 1-8.
- [40] Civay D, Hosler E, Chauhan V, et al. EUV telecentricity and shadowing errors impact on process margins[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9422: 94220Z.
- [41] van Schoot J, van Setten E, Troost K, et al. High-NA EUV lithography exposure tool: program progress [J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11323: 1132307.
- [42] Ii O W, Wong K, Parks V, et al. Improved Ru/Si multilayer reflective coatings for advanced extreme-ultraviolet lithography photomasks[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9776: 977619.
- [43] de Bisschop P, Hendrickx E. Stochastic printing failures in EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10957: 109570E.
- [44] Li Y L, Zhu X N, Yu S F, et al. A study of the advantages to the photolithography process brought by the high NA EUV exposure tool in advanced logic design rules[C]//2021 International Workshop on Advanced Patterning Solutions (IWAPS), December 12-13, 2021. Foshan, China. New York: IEEE Press, 2021.
- [45] ASML. ASML Official website[EB/OL]. [2021-04-05]. <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems/twincan-nxe-3600d>.
- [46] Christophe F. EUV products and business opportunity[EB/OL]. [2021-04-05]. https://www.asml.com/-/media/asml/files/investors/investor-days/2021/asml-investor-day-2021_business-line-euv---christophe-fouquet.pdf?rev=d2ada06e13964241a3cf69d0d758f1722021.
- [47] van Schoot J, van Ingen Schenau K, Valentin C, et al. EUV lithography scanner for sub-8 nm resolution[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9422: 94221F.
- [48] Ahn C N, Nam D S, Seong N, et al. Optical design of EUV attenuated PSM for contact-hole applications [J]. Proceedings of SPIE, 2021, 11609: 116090D.
- [49] Wang X L, Tasdemir Z, Mochi I, et al. Progress in EUV resists towards high-NA EUV lithography[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10957: 109570A.