

光刻工艺发展历程与工艺标准

如第4章所述,随着技术节点的不断发展,光刻机中的各个子系统(如光源、照明条件、投影物镜、工件台、测控方式、对准方法等)也在不断更新改进。同时,光刻机各子系统中重要的性能指标规格也在不断地缩紧(如镜头像差、畸变,工件台的平均位置误差、定位误差的移动标准差等),以满足光刻乃至整个制造工艺的要求。反过来,应用准确的光学仿真软件模拟出光刻工艺窗口与工艺各性能参数的模型关系,基于标准化的光刻工艺窗口制定出合适的规格(设备),并根据实际情况对所制定的规格进行必要的调整,这种方式对光刻机以及光刻机设备工业标准化研发有重要的指导意义。

此外,光刻胶也从普通光刻胶发展为化学放大型光刻胶(Chemically Amplified photoResist,CAR),这一类型光刻胶也一直被应用到7nm甚至5nm、3nm等更先进的技术节点中,具体原理见9.1节。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、焦深以及光学邻近效应的表现等,使得光化学反应更加精密可控。光刻胶配方的研发与优化同样也需要遵循标准化的路径:尽量符合物理模型,与基于物理模型的光刻工艺仿真结果尽量匹配,以降低光学邻近效应建模的难度。

可见,无论是光刻机的标准化研发还是光刻胶的标准化研发,全物理模型的、准确的光刻工艺仿真都可以指导研发的方向,其中,光刻工艺仿真结果必须符合光刻工艺标准化要求。如图5.1所示,光刻工艺仿真软件还可以指导标准化的光刻工艺研发。本章首先分析各个技术节点中的工艺细节,然后讨论满足量产需求的光刻工艺标准化规格,最后从理论与仿真两方面来探讨实现标准化的光刻工艺窗口时如何选择合适的照明光瞳。同时,本章还包含先进技术节点关键层次中线端-线端的最小尺寸。

除了曝光设备与光刻材料的发展,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)^[1-2]、离轴照明(Off-Axis Illumination,OAI)^[3-4]、相移掩模版(Phase Shifting Mask,PSM)^[4-5]、亚分辨率辅助图形(Sub-Resolution Assist Feature,SRAF)^[6-10]、光学邻近效应修正(Optical Proximity

Correction, OPC)^[11-12]、偏振成像(Polarized Imaging)^[13]、光源-掩模协同优化(Source-Mask co-Optimization, SMO)^[14-15]、光可分解碱(Photo-Decomposable Base, PDB)^[16-17]、负显影(Negative Toned Developing, NTD)^[18]、聚合物键合的光致产酸剂(Polymer Bound Photo Acid Generator, PBPAG)^[19-20]等技术。本章介绍不同技术节点中引入的新技术种类及其优点,包含部分新技术的原理,剩余多种新技术的具体内容见第9章。

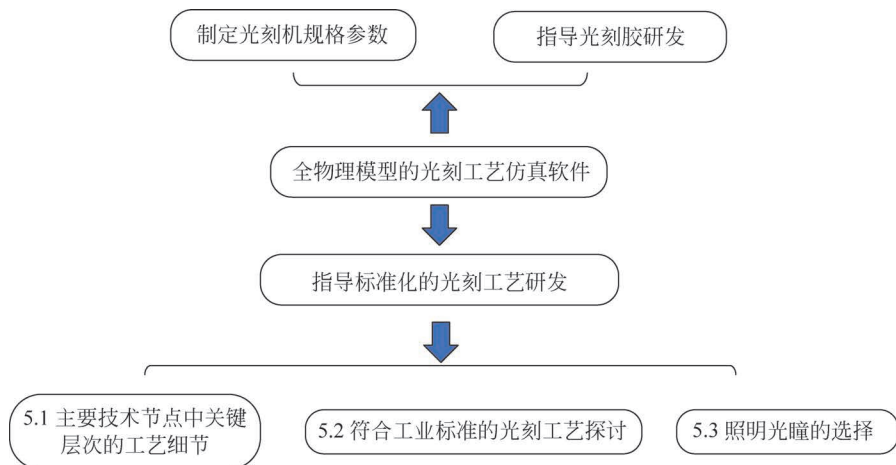


图 5.1 全物理模型光刻工艺仿真软件在光刻工艺、设备以及材料研发过程中的作用

5.1 主要技术节点中关键层次的工艺细节

本节主要总结从 250nm 节点开始,一直到未来的 1nm 技术节点中,前段栅极、中后段金属和通孔这三个关键层次的工艺细节,采用的设备、材料及先进技术的发展变化趋势。其中的光刻工艺参数、基本设计规则以及总结的数据均来自于使用自研的光刻仿真软件建模和团队的技术经验积累,部分数据参考了技术发展路线图^[21-24]以及团队的早期工作^[25-26]。

5.1.1 250~65nm 技术节点的工艺细节

如表 5.1 所示,这一部分先讨论 250~65nm 技术节点中的一些工艺细节,这些节点使用的是 248nm KrF 以及 193nm ArF 干法光刻机。

1. 250nm 技术节点的工艺细节

250nm 技术节点于 20 世纪 90 年代问世,并于 1997 年左右投入量产^[27],使用的硅片尺寸为 8 英寸(200mm 直径),这一节点引入的新技术主要有以下几个。

(1) 深紫外 248nm 氟化氪(KrF)准分子激光的曝光光源: 缩短波长可以提高光学系统的分辨率,同时激光的单色性更好,降低色差对成像的影响。

(2) 化学放大型光刻胶: 提高图形分辨率,优化光刻胶形貌,降低曝光能量。

(3) 抗反射层: 大大降低驻波效应,提高光刻后的线宽均匀性。

(4) 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),尽量减小光刻之后方形角落变圆的现象等。

表 5.1 250nm、180nm、130nm、90nm 和 65nm 技术节点的光刻工艺总结

节点/nm	栅极周期/nm	栅极 CD /nm	光刻机	光刻胶	掩模版	OPC	EL	MEF	DoF/nm	分辨率增强技术	抗反射层	刻蚀	线宽均匀性
250	500	250	248nm	248nm CAR	Binary	Rule Based	19.3%	1.47	500~600	Serif	Single Layer	—	—
180	430	180	248nm	248nm CAR	6% PSM	Rule Based	17.7%	1.39	450	Serif, OAI, CVI	Single Layer	—	—
130	310	130	248nm	248nm CAR, Mid E_a	6% PSM	Model Based	18.9%	1.66	350	Serif, OAI, CVI, SRAF	Single Layer	Linewidth Trim	Wafer
90	240	120	193nm Dry	193nm CAR, High E_a	6% PSM	Model Based	19.7%	1.56	350	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad	Single Layer	Linewidth Trim	Wafer and Shot
65	210	90	193nm Dry	193nm CAR, High E_a	6% PSM	Model Based	18.6%	1.51	250	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad	Single Layer	Linewidth Trim	Wafer and Shot
节点/nm	金属周期/nm	金属 CD /nm	光刻机	光刻胶	掩模版	OPC	EL	MEF	DoF/nm	分辨率增强技术	抗反射层	刻蚀	线宽均匀性
250	640	300	248nm	248nm CAR	Binary	Rule Based	29.3%	1.03	600~800	Serif	Single Layer	—	—
180	460	230	248nm	248nm CAR	6% PSM	Rule Based	18.1%	1.85	600	Serif, OAI, CVI	Single Layer	—	—
130	340	160	248nm	248nm CAR, Low E_a	6% PSM	Model Based	19.8%	1.69	350	Serif, OAI, CVI, SRAF	Single Layer	—	Wafer
90	240	130	193nm Dry	193nm CAR, Low E_a	6% PSM	Model Based	16.9%	2.00	350	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad	Single Layer	—	Wafer and Shot
65	180	90	193nm Dry	193nm CAR, Low E_a	6% PSM	Model Based	13.4%	2.85	200	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad	Single Layer	—	Wafer and Shot

续表

节点/nm	通孔周期/nm	通孔线宽/nm	光刻机	光刻胶	掩模版	OPC	EL	MEF	DoF/nm	分辨率增强技术	抗反射层	刻蚀	线宽均匀性
250	640	300	248nm	248nm CAR	Binary	Rule Based	27.8%	1.68	600~800	Serif	Single Layer	—	—
180	460	230	248nm	248nm CAR	6%PSM	Rule Based	25.0%	2.33	580	Serif, OAI,CVI	Single Layer	—	—
130	340	160	248nm	248nm CAR, Low E_a	6%PSM	Model Based	17.6%	4.12	330	Serif, OAI, CVI,SRAF	Single Layer	—	Wafer
90	240	160	193nm Dry	193nm CAR, Low E_a	6%PSM	Model Based	15.1%	4.82	330	Serif, OAI, CVI,SRAF	Single Layer	—	Wafer and Shot
65	200	130	193nm Dry	193nm CAR, Low E_a	6%PSM	Model Based	15.0%	4.90	230	Serif, OAI, CVI,SRAF	Single Layer	—	Wafer and Shot

注：193nm Dry：193nm 干法（光刻机）。 E_a ：光刻胶的活化能。Binary：二元掩模版。Rule Based OPC：基于规则的掩模版修正。Model Based OPC：基于模型的光学邻近效应修正。EL（Exposure Latitude）：曝光能量宽容度（一般相对于线宽±10%的范围）。MEF（Mask Error Factor）：掩模版误差因子。DoF（Depth of Focus）：焦深。Serif：装饰线。CVI（Continuous angle Varying Illumination）：连续变角度照明。Quad（Quadrupole）：代表 ASML 光刻机中的 Quasar（四极照明）和 Cross-Quasar（交叉四极照明）。Etch Linewidth Trim：线宽刻蚀修正。Single Layer：单层。Wafer：硅片范围。Wafer and Shot：硅片和曝光场范围。

2. 180nm 技术节点的工艺细节

1999 年,180nm 技术节点取代了 250nm 技术节点^[27]。为了满足更高的关键尺寸均匀性/线宽均匀性(Critical Dimension Uniformity,CDU)的要求,180nm 技术节点引入了很多新技术。

(1) 离轴照明:如第 2 章所述,离轴照明可以提高分辨率和空间像对比度或者曝光能量宽容度(Exposure Latitude,EL)。

(2) 透射衰减相移掩模(Attenuated Phase Shifting Mask,Att PSM)^[28]:提高关键光刻层次的成像对比度或者 EL。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之后衰减到只剩 6%,并且光的相位与透光区域相比发生了 180°移动。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%,具体可见 9.5.1 节。

(3) 连续变角度照明(Continuous angle Varying Illumination,CVI):进一步优化光刻工艺窗口,CVI 可以使孤立到密集图形之间的关键尺寸的差值更精确地控制到 10nm 以内,即在整个周期范围内,尽量保持光学邻近效应修正之前、光刻之后有相同或者差异很小的线宽尺寸。具体见 2.10 节,这样可以大大减小半孤立、孤立图形中光学邻近修正量,降低 OPC 修正难度与出错后的影响。

3. 130nm 技术节点的工艺细节

量产于 2001 年的 130nm 技术节点中也引进了一些新的材料或者技术。

(1) 显著改善了光刻胶性能:例如,降低了化学放大型光刻胶的活化的能(E_a),同时其等效光酸扩散长度(Effective Photoacid Diffusion Length,EPDL)也从 180nm 节点的 40~70nm 缩短至 20~30nm。因此,KrF 光刻机仍然适用于 130nm 技术节点。

(2) 基于模型的光学邻近效应修正,添加 SRAF:进一步改进逻辑电路的 CDU(硅片范围内)和焦深。

(3) 刻蚀修身(Trim Etch)工艺:为了实现线条/沟槽 1:1 的高对比度的成像。例如,前段的栅极光刻工艺中,最终需要的物理栅长较短。但是为了提高光刻空间像对比度,需要先将光刻线条尺寸做得较大,再通过后续的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,光刻工艺在掩模版上的线条尺寸会略小于沟槽尺寸。具体需要使用多大的掩模版线宽偏置,需要综合考虑整个周期的光刻工艺窗口和刻蚀与光刻之间的线宽偏置。

一般来说,130nm 技术节点是 248nm KrF 光刻机可以做到的最后一个节点,NA 最大为 0.7。

4. 90nm 技术节点的工艺细节

到了 90nm 技术节点,硅片尺寸增加到 12 英寸(300mm 直径)。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,继续引入新技术。

(1) 193nm 干法光刻机:提高光学系统的分辨率。

(2) 四极(Quasar)^[29-30]照明光瞳:这种照明光瞳除了可以提高密集图形的对比度或者 EL,还可以提高焦深。注意,表 5.1 中的 Quad(Quadrupole)代表 ASML 光刻机中的 Quasar(照明点位于光瞳的 $\pm 45^\circ$ 与 $\pm 135^\circ$ 位置)和 Cross-Quasar(CQ)(交叉四极照明,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,对于四极照明来说,其类似弱偶极照明,针对的主要是距离光刻机衍射极限还有一定距离的、可以同时兼顾两个方向的设计规则。

例如,本节点中前段栅极的设计周期为 240nm,线条尺寸为 120nm,此时使用 193nm 干法光刻机做逻辑工艺的最小周期一般为 140~150nm,可见栅极 240nm 周期距最小周期还有一定的距离。同时,前段栅极又需要较高的 EL 以获得更好的 LWR 和线宽均匀性。因此,在这一节点前段栅极需要采用四极照明代替环形照明,以实现两个方向图形的较大的光刻工艺窗口。

(3) 曝光能量分布测绘(Dose Mapping, DoMa)功能: ASML 在其扫描光刻机上推出了这一功能,在光刻工艺曝光过程中通过调整不同曝光场或者同一曝光场的不同位置的曝光能量来弥补后续工艺可能造成的线宽不均匀,大大提高光刻工艺窗口。

90nm 技术节点于 2002 年首次投入量产^[27]。同样地,193nm 干法光刻工艺已扩展到 65/55nm 节点,其中,NA 已从 90nm 节点的 0.75^[31-32]增加到 0.85~0.93^[33-35],具体 NA 的使用还要兼顾焦深。

5.1.2 45~7nm 技术节点的工艺细节

表 5.2 描述了使用 193nm 浸没式光刻机曝光时,45nm、28nm、16/14nm 一直到 7nm 技术节点中几个关键层次的光刻工艺总结。由于 193nm 干法光刻机的 NA 已经接近 1(0.93),因此不可能再通过增加 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。因此,45~7nm 技术节点继续引入新技术。

1. 45nm 技术节点

193nm 水浸没式光刻: 由 4.1 节可知,提高 NA 的最终方式是在工件台和镜头之间加水,缩短等效曝光波长。水的折射率在 193.368nm 约为 1.436,所以等效波长缩短为 $193.368\text{nm}/1.436 \approx 134.657\text{nm}$ 。此外,光刻机中除了照明系统需要增加偏振,增加水循环之外,其他子系统与干法光刻机的差异不大,无须增加太多额外的研发人力、物力以及迭代的时间。因此,193nm 水浸没式光刻技术被选为 65/55nm 以下技术节点的主力。

2. 28nm 技术节点

偏振照明: 当 NA 超过一定的数值(>0.65)时,横磁波(Transverse Magnetic, TM)偏振光的引入会造成对比度的降低。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(具体见 9.3 节)。原则上,从 65nm 开始就可以引入偏振照明,但是由于更大的数值孔径,如 0.85~0.93 可以满足 65nm 甚至 55nm 节点的光刻工艺需求,相对复杂的偏振照明就没有被使用。到了水浸没式时期,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还是比较小的,如 1.1NA 在水里的实际角度只有 50° (类似干法 0.77NA)。因此,在 45/40nm 技术节点,由于有足够的成像对比度,可以不使用偏振照明。从 32/28nm 技术节点开始,偏振照明成像才被用于光刻工艺中。

3. 16/14nm 技术节点

(1) 两层抗反射层(Bi-layer): 由于使用的 NA 大于 1(1.35),同时鳍型晶体管(FinFET)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,因此,需要采用两层抗反射层,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,另一方面靠下面一层较厚的抗反射层(一般为 SOC)来填平衬底。如果还是只靠一层抗反射层去填平衬底,就需要增加其厚度,而相应的光刻胶厚度也需要增加,而增加光刻胶厚度会大大降低本来就有限的光刻工艺的焦深。更重要的是,没有厚度很大的($>120\text{nm}$)193nm 水浸没式光刻胶。

表 5.2 45nm、28nm、16/14nm、7nm 技术节点的光刻工艺总结

节点/nm	栅极周期/nm	栅极线宽/nm	光刻机	光刻胶	掩模版	OPC	EL	MEF	DoF/nm	分辨率增强技术	抗反射层	刻蚀	线宽均匀性	多次图形技术	设计规则
45	180	70	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low, E_a	6% PSM	Model Based	22.5%	1.51	150	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad	Single Layer	Linewidth Trim	Wafer and Shot	Cut	—
28	117	55	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low, E_a	6% PSM	Model Based	23%	1.40	90	Serif, OAI, CVI, SRAF, DP, Polarized Imaging	Single Layer	Linewidth Trim	Wafer and Shot, 刻蚀 tuning	Cut	单向
16	90	45	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low, E_a	6% PSM	Model Based	22.6%	1.45	60	Serif, OAI, CVI, SRAF, DP, Polarized Imaging SMO	Bi Layer	Linewidth Trim	Wafer and Shot, 刻蚀 tuning	Cut	单向
14	84~90	42~45	同上	同上	同上	同上	23%	1.4	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上

续表

节点/nm	栅极周期/nm	栅极线宽/nm	光刻机	光刻胶	掩模版	OPC	EL	MEF	DoF/nm	分辨率增强技术	抗反射层	刻蚀	线宽均匀性	多次图形技术	设计规则
7	57	28	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low E_a	6% PSM	Model Based	25.4%	1.22	55	Serif, OAI, CVI, SRAF, DP, Polarized Imaging SMO	Bi Layer	Linewidth Trim	Wafer and Shot, 刻蚀 tuning	SADP, Cut	单向
节点/nm	金属周期/nm	金属线宽/nm	光刻机	光刻胶	掩模版	OPC	EL	MEF	DoF/nm	分辨率增强技术	抗反射层	自对准方法	线宽均匀性	多次图形技术	设计规则
45	160	80	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low E_a	6% PSM	Model Based	14.9%	2.63	200	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad	Single Layer	—	Wafer and Shot	—	—
28	90	45	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low E_a	6% PSM	Model Based	13.5%	3.14	80~100	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad, Polarized Imaging	Single Layer	—	Wafer and Shot	—	—

续表

节点/nm	金属周期/nm	金属线宽/nm	光刻机	光刻胶	掩模版	OPC	EL	MEF	DoF/nm	分辨率增强技术	抗反射层	自对准方法	线宽均匀性	多次图形技术	设计规则
16	64	32	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low E _a , PDB	6% PSM, OMOG	Model Based	13.5%	3.14	80~100	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad, Polarized Imaging, SMO	Bi Layer	—	Wafer and Shot	LELE	—
14	64	32	193nm Water Immersion	193nm CAR, Mid E _a , PDB, NTD	6% PSM, OMOG	Model Based	12%	3.3	60~80	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad, Polarized Imaging, SMO, NTD	Bi Layer	—	Wafer and Shot	LELE	—
7	40	20	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low E _a , PDB, NTD	6% PSM	Model Based	13%	3.9	55~70	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad, Polarized Imaging, SMO, NTD	Bi Layer	金属 SALELE	Wafer and Shot	SALELE, Cut	单向

续表

节点/nm	通孔周期/nm	通孔线宽/nm	光刻机	光刻胶	掩模版	OPC	EL	MEF	DoF/nm	分辨率增强技术	抗反射层	刻蚀	线宽均匀性	多次图形技术	自对准方法
45	180	90	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low E_a	6% PSM	Model Based	18.0%	3.53	150	Serif, OAI, CVI, SRAF	Single Layer	—	Wafer and Shot	—	—
28	100	65	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low E_a	6% PSM	Model Based	15.1%	5.20	75	Serif, OAI, CVI, SRAF, Polarized Imaging	Single Layer	Shrink	Wafer and Shot	—	—
16	64	42	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low E_a , 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	193nm Water Immersion	193nm CAR, Mid E_a , 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	—

续表

节点/nm	通孔周期/nm	通孔线宽/nm	光刻机	光刻胶	掩模版	OPC	EL	MEF	DoF/nm	分辨率增强技术	抗反射层	刻蚀	线宽均匀性	多次图形技术	自对准方法
7	57	38	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low E _a , PDB NTD	6% PSM	Model Based	12.9%	6.90	55~70	Serif, OAI, CVI, SRAF, Polarized Imaging, SMO, NTD		Shrink	Wafer and Shot	LE4	—

注：193nm Water Immersion：193nm 水浸没式光刻机。DP(Dipole)：偶极照明。Etch tuning CDU：刻蚀调整线宽均匀性。Etch Shrink：刻蚀缩小线宽(缩孔)。SADP(Self-Aligned Double/Quadruple Patterning)：自对准双重或者四重图形技术。Cut：剪切层。Multiple Patterning：多重图形技术。SALELE(Self-Aligned Litho-Etch Litho-Etch)：自对准光刻-刻蚀、光刻-刻蚀图形方法。LE4：4次光刻-刻蚀方法。Uni-Directional Design：单向设计。

(2) PDB: 到了 16/14nm 技术节点,图形对比度无法满足量产的需求,必须在光刻胶中添加 PDB,以提升光刻工艺窗口(主要是曝光能量宽裕度)。

(3) NTD: 到了 16/14nm 技术节点,由于中后段金属和通孔层次的设计规则较小,因此需要采用多次曝光配合 NTD 工艺来实现更小的光刻沟槽和通孔线宽,降低刻蚀-光刻线宽偏置,从而显著提高产品率,具体可见 9.4 节。

(4) OMOG: 此外,对于 80nm 周期的金属层,由于掩模版的开口尺寸(160~180nm,4 倍率下)与照明波长(193nm)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)^[36-38],又称为掩模版误差增强因子(Mask Error Enhancement Factor,MEEF)会升高 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)^[39]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,从而提高被减少的 EL。

(5) SMO: 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^[40])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平均提高 8%~10%。实际从 22/20nm 节点开始,SMO 就被用于最大限度地提高整个光刻工艺窗口。

4. 7nm 技术节点

极紫外光刻技术: 从 7nm 技术节点开始就可以引入极紫外光刻技术^[41],例如,中国台湾的台积电、韩国的三星、美国的格罗方德以及英特尔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,所以国内芯片代工厂都是用 193nm 水浸没式光刻机多次曝光实现 7nm 逻辑芯片的光刻工艺流程。

由于本节中讲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曾经参与的实际 7nm 节点的研发也是基于 193nm 水浸没式光刻工艺的,因此将 7nm 罗列在 193nm 水浸没式光刻可以实现的各个技术节点中。

5.1.3 5~1.5nm 技术节点的工艺细节

一般来说,从 5nm 技术节点开始,到更先进的 3nm、2.1nm 甚至 1nm 技术节点,除了前段仍然使用 193nm 水浸没式配合自对准双重或者四重图形技术(Self-Aligned Double/Quadruple Patterning,SADP/SAQP)以外,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,193nm 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工艺和较大的刻蚀-光刻线宽偏置。因此,通常从 5nm 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 5.3 所示。

另外,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^[42-43],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对光刻工艺窗口的影响。

表 5.3 5nm 技术节点的光刻工艺总结与 3nm 及以下节点的展望

节点/nm	栅极周期/nm	栅极线宽/nm	光刻机	光刻胶	掩模版	OPC	EL	MEF	DoF/nm	分辨率增强技术	抗反射层	刻蚀 Etch	线宽均匀性 CDU	多次图形技术	设计规则
5	50	25	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low E_a	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	单向
3	48	24	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low E_a	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	单向
2.1	32	16	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low E_a	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	单向

续表

节点/nm	栅极周期/nm	栅极线宽/nm	光刻机	光刻胶	掩模版	OPC	EL	MEF	DoF/nm	分辨率增强技术	抗反射层	刻蚀 Etch	线宽均匀性 CDU	多次图形技术	设计规则
1.5	32	16	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low E_a	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	单向
1	32	16	193nm Water Immersion	193nm CAR, Low E_a	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	单向

节点/nm	金属周期/nm	金属线宽/nm	光刻机	光刻胶	掩模版	OPC	EL	MEF	DoF/nm	分辨率增强技术	底部增强	Etch	CDU	多次图形技术	设计规则
5	30	15	13.5nm 0.33NA EUV	EUV CAR, Low E_a , PDB	EUV Binary	Model Based	18.0%	1.5	55	Serif, OAI, CVI, SRAF, Quad, SMO	Single Layer	—	Wafer and Shot, Etch	SALELE, Cut	单向

续表

节点/nm	金属周期/nm	金属线宽/nm	光刻机	光刻胶	掩模版	OPC	EL	MEF	DoF/nm	分辨率增强技术	底部增感	Etch	CDU	多次图形技术	设计规则
3	24	12	13.5nm 0.33NA EUV	EUV CAR,Low E _a ,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	单向
2.1	16	8	13.5nm 0.55NA EUV	EUV CAR,Low E _a ,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	单向
1.5	14	7	13.5nm 0.55NA EUV	EUV CAR,Low E _a ,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	单向
1	14	7	13.5nm 0.55NA EUV	EUV CAR,Low E _a ,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	单向

续表

节点/nm	通孔周期/nm	通孔线宽/nm	光刻机	光刻胶	掩模版	OPC	EL	MEF	DoF/nm	分辨率增强技术	底部增感	刻蚀 Etch	线宽均匀性 CDU	多次图形技术	自对准方法
5	48	24	13.5nm 0.33NA EUV	EUV CAR,Low E _a ,PDB	EUV Binary	Model Based	18.0%	3	55	Serif, OAI, CVI, SRAF, SMO	Single Layer	Shrink	Wafer and Shot	—	—
3	36	18	13.5nm 0.33NA EUV	EUV CAR,Low E _a ,PDB,Polymer Bound PAG	EUV Binary	Model Based	18.0%	3	55	Serif, OAI, CVI, SRAF, SMO	Single Layer	Shrink	Wafer and Shot	0.33NA LE2	—
2.1	25	12	13.5nm 0.55NA EUV	EUV CAR,Low E _a ,PDB,Polymer Bound PAG	EUV Binary	Model Based	20.0%	3	30~40	Serif, OAI, CVI, SRAF, SMO	Single Layer	Shrink	Wafer and Shot	0.55NA LE3	—
1.5	20	10	13.5nm 0.55NA EUV	EUV CAR,Low E _a ,PDB,Polymer Bound PAG	EUV Binary	Model Based	20.0%	3	30~40	Serif, OAI, CVI, SRAF, SMO	Single Layer	Shrink	Wafer and Shot	0.55NA LE4	—
1	20	10	13.5nm 0.55NA EUV	EUV CAR,Low E _a ,PDB,Polymer Bound PAG	EUV Binary	Model Based	20.0%	3	30~40	Serif, OAI, CVI, SRAF, SMO	Single Layer	Shrink	Wafer and Shot	0.55NA LE4	—

5.1.4 250~1nm 技术节点的光刻工艺实现方式

表 5.4 中展示了从 250nm 开始一直到已经量产的 5nm 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 3nm,2.1nm,1.5nm 以及 1nm 中关键层次的发展路线图,同时列举了每个技术节点中关键层次的光刻工艺实现方式。随着技术节点不断发展,设计规则线宽尺寸不断缩小,需要获得较好的线边粗糙度(Line Edge Roughness,LER)/线宽粗糙度(Line Width Roughness,LWR)和线宽均匀性,同时又要保证较高的成像对比度,最终都是为了提升器件性能。因此,从 28nm 节点开始,前段栅极采用单向设计规则。从 10nm 技术节点开始,连中后段金属连线层次也需要采用单向设计规则,光刻工艺窗口才能满足量产的需求,设计规则方向排布具体可见 6.1 节。到了 7nm 技术节点,193nm 水浸没式光刻机的潜力在中后段基本已经被充分利用,水浸没式光刻工艺支持了从 45/40nm、32/28nm、22/20nm、16/14nm 到 10/7nm 这 5 组主要技术节点,以及后续更先进节点的前段层次。

表 5.4 250nm 一直到 1nm 技术节点中关键光刻层次的设计规则总结

节点/nm	栅极周期/nm	栅极层光刻方法	金属周期/nm	金属层光刻方法	通孔周期/nm	通孔层光刻方法
250	500	248nm	640	248nm	640	248nm
180	430	248nm	460	248nm	460	248nm
130	310	248nm	340	248nm	340	248nm
90	240	193nm Dry	240	193nm Dry	240	193nm Dry
65	210	193nm Dry	180	193nm Dry	200	193nm Dry
45	180	193nm Water immersion	160	193nm Water immersion	180	193nm Water immersion
40	162	193nm Water immersion	120	193nm Water immersion	130	193nm Water immersion
32	130	193nm Water immersion	100	193nm Water immersion	110	193nm Water immersion
28	117	193nm Water immersion	90	193nm Water immersion	100	193nm Water immersion
22	90	193nm Water immersion	80	193nm Water immersion	100	193nm Water immersion
20	90	193nm Water immersion	64	193nm Water immersion LELE	64	193nm Water immersion LE4
16/14	84~90	193nm Water immersion	64	193nm Water immersion LELE	64	193nm Water immersion LE4
10	66	193nm Water immersion SADP	44	193nm Water immersion SALELE	66	193nm Water immersion LE4
7	57	193nm Water immersion SADP	40	193nm Water immersion SALELE	57	193nm Water immersion LE4
5	50	193nm Water immersion SADP	30	0.33NA EUV SALELE	48	0.33NA EUV
3	48	193nm Water immersion SADP	24	0.33NA EUV SALELE	36	0.33NA EUV LE2

续表

节点 /nm	栅极周 期/nm	栅极层光刻方法	金属周 期/nm	金属层光刻方法	通孔周 期/nm	通孔层光刻方法
2.1	32	193nm Water immersion SAQP	16	0.55NA EUV SALELE	25	0.55NA EUV LE3
1.5	32	193nm Water immersion SAQP	14	0.55NA EUV SALELE	20	0.55NA EUV LE4
1	32	193nm Water immersion SAQP	14	0.55NA EUV SALELE	20	0.55NA EUV LE4

从表 5.4 中还可以看出,从 20/16/14nm 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者多重曝光技术。

(1) 前段采用了单向设计规则,目标图形为线条,且图形相对来说更简单。因此可以采用自对准的双重或者多重图形技术,以最大化地实现较小的套刻偏差和较高的线宽均匀性。二次图形的相对位置由光刻(心轴层)的线宽决定,并且可以精确地调整。主图形只需要一次曝光过程,周期、线宽的缩小,线宽均匀性的提高,均通过后续间隔层的生长和刻蚀等工艺实现。

自对准双重或者多重图形技术的缺点在于版图比较难以制作,最终形成的图形是间隔层,而非版图上的图形。版图上的图形是生长间隔层所需的辅助结构,即心轴。生长间隔层之后,心轴的图形两端会产生不必要的边角连线,需要增加至少一块掩模版去切除这些不必要的图形。另外,这种方法只适用于方向单一、周期性强的线条、沟槽图形,不适用于通孔图形。

(2) 中后段包含图形较为复杂的金属沟槽和通孔层次,不宜采用如前述的自对准双重或者多重图形方法,而是需要采用多次光刻-刻蚀图形技术。

① 对于金属层次: 由于在 20/16/14nm 节点时仍然采用双向设计规则,因此只能采用两次光刻-刻蚀工艺(Litho-Etch, Litho-Etch, LELE)^[44]来实现; 从 10nm 和 7nm 节点开始,可以使用自对准的多次光刻-刻蚀工艺(SALEn)^[45]来实现尺寸更小的、单向设计规则图形,以最大化地实现套刻偏差的减小和 CDU 性能的提升。

② 对于通孔层次: 只能采用多次光刻-刻蚀工艺来实现较小的设计规则。

多次光刻-刻蚀图形技术的优点是: 曝光的光刻图形就是电路的设计图形,不需要转换; 这种方法不仅可以用于线条、沟槽图形,还适用于通孔图形。多次图形之间的相对位置由光刻机套刻精度与掩模版图形放置精度决定,无法调整且存在极限。

5.2 符合工业标准的光刻工艺探讨

如前所述,随着技术节点的不断推进,涌现了许多新技术以支持光刻技术的持续发展。在光刻工艺研发过程中,光刻工艺是否合格关系到线宽均匀性是否符合要求,而与线宽均匀性息息相关的三个光刻工艺的重要参数分别是 EL、MEF 和 DoF(见第 2 章)。接下来,我们会根据每个节点在实际量产中采用的光刻方法和光刻胶的特性所建立的物理仿真模型,计算每个节点中关键光刻层次(前段栅极、后段金属和通孔层次)的这三个重要的光刻工艺参数。通过各自的照明条件(与实际量产条件相仿的)仿真得到的从 250nm 到 5nm 逻辑技术节点中的三个关键光刻层次的 EL、MEF 和 DoF,分别如图 5.2~图 5.4 所示。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。

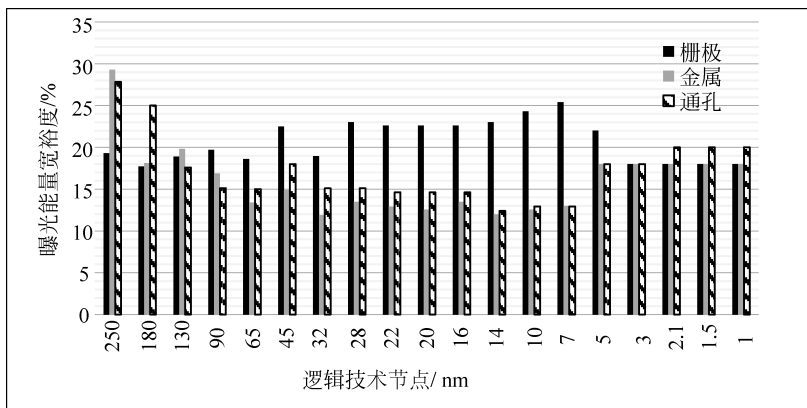


图 5.2 各个技术节点的曝光能量宽裕度仿真结果

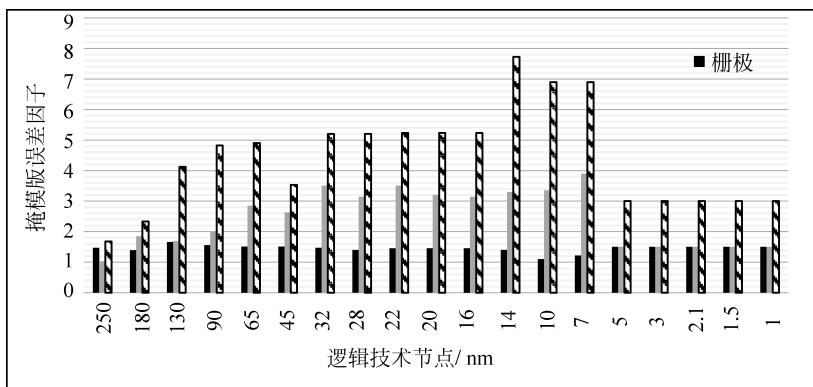


图 5.3 各个技术节点的掩模误差因子仿真结果

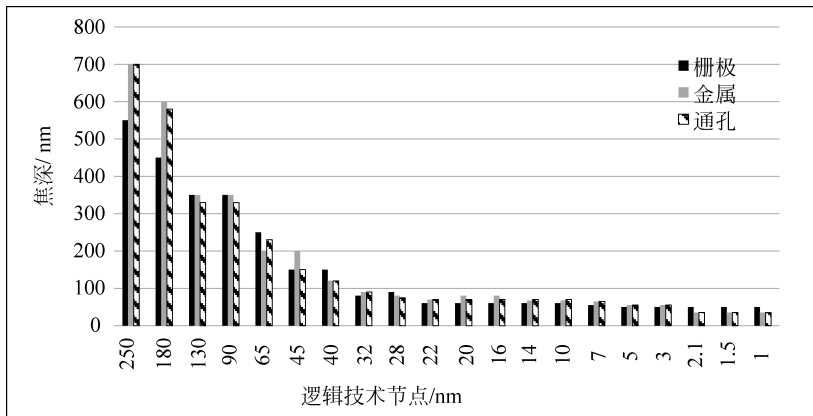


图 5.4 各个技术节点的仿真焦深结果^[25]

从这三张图中可以得出如下结论。

(1) 如图 5.2 所示,一般来说,前段与器件相关的栅极层次需要满足 $EL \geq 18\%$ ^[46] (注意:三星 14nm 节点中与器件无关的栅极周期低至 78nm,无法满足 $EL \geq 18\%$),后段通孔层次需要满足 $EL \geq 15\%$ (对于 14/10/7nm 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 $EL \geq 13\%$ 。对于极紫外光刻工艺,前后段均需满足 $EL \geq 18\%$ 。

可见,对于 193nm 水浸没式光刻工艺中,前段关键光刻层次(栅极、鳍层次)的 EL 比中后段金属和通孔层次的 EL 高,这是因为 EL 会直接影响线宽均匀性(CDU)以及线宽粗糙度(Line Width Roughness, LWR),而 CDU 与 LWR 会直接影响器件性能。所以对于前段与器件性能相关的关键层次,其 EL 要比中后段与器件性能关系不大的金属连线层次的 EL 高。到了 EUV 光刻工艺,由于线宽更小,对 CDU 以及 LWR 的要求更高,同时由于随机效应的存在,为了减小缺陷,需要提高光刻工艺性能(见 9.2 节)。因此,极紫外光刻工艺的前中后段关键层次都需要 $EL \geq 18\%$ 才能符合量产的要求。本章所述 EL 为最大值,如第 2 章所述,离焦时 EL 会有所降低。

(2) 如图 5.3 所示,一般来说,前段栅极需要满足 $MEF < 1.5$,后段通孔层次需要满足 $MEF < 5$ (对于 14/10/7nm 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 $MEF \leq 3.5$ 。对于极紫外光刻工艺,前后段均需满足 $MEF \leq 1.5$ 。

同样地,对于前段与器件性能相关的关键层次,需要更小的 MEF 来达到更好的光刻线宽均匀性。后段层次更多的是需要保证不短路、不断路,因此其对线宽均匀性的要求比前段略低一些,MEF 的要求也相应地低一些。然而,对于后段通孔层次的图形,需要从两个方向考虑线宽的变化,因此 MEF 的要求要更低一些。与 EL 的要求类似,对于 EUV 光刻来说,前中后段层次的 MEF 都需要满足较高的要求。

(3) 如图 5.4 所示,每个节点的每个层次的 DoF 都需要控制在一定的规格以上,保证光刻机曝光过程中的所有因素造成的离焦(见 6.5.3 节)都在这一规格范围内,才能使得线宽与光刻胶形貌在规格范围内,从而顺利完成光刻工艺。由于 DoF 与波长呈正比,与 NA 的平方呈反比。随着技术节点的发展,曝光波长不断缩短,投影物镜镜头 NA 不断增加,DoF 的理论值呈下降趋势。从图 5.4 中可以看出,实际 DoF 值也会随着波长的缩短、NA 的增加而下降。然而,光刻胶厚度等因素会减小 DoF,因此,实际的 DoF 值会比理论值要小。

上述三个重要光刻工艺参数的规律是从几十年的量产条件和经验中总结出来的,这些条件并不一定是最优化的,但是事实证明可以满足量产的需求,也是工业界应该尽量遵循的一条技术路线,也就是我们提议的光刻工艺的工业标准。若对应的光刻工艺不能满足这样的标准,甚至远离这样的标准,会导致严重的后果,例如,由于没有考虑 MEF 的标准导致图形对比度大幅降低,造成掩模版、硅片报废。

5.3 照明光瞳的选择

在光刻工艺研发阶段,需要选取并经过优化后得到合适的照明条件,才能使得各层次光刻工艺窗口符合 5.2 节中标准化的要求,可见照明条件的重要性。由第 2 章照明光瞳与第 4 章光刻机中的照明系统发展趋势可知,为了提高分辨率和成像对比度,需要逐渐引入新的照明条件:离轴照明、连续变角度照明、Quad 照明(Quadrupole)(四极照明与交叉四极照明)以及偶极(DiPole, DP)照明,如图 5.5 所示。除了照明条件的改进,设计规则的排布方式也会发生改变,例如从双向改为单向,具体可以参考 6.1 节。

接下来,从技术节点发展变化来看照明条件的发展趋势。

(1) 250nm 技术节点中还在使用第 2 章所述的部分相干照明,即传统照明(Conventional Illumination)。

(2) 为了提高分辨率以及优化光刻工艺窗口,从 180nm 技术节点开始就需要引入离轴照

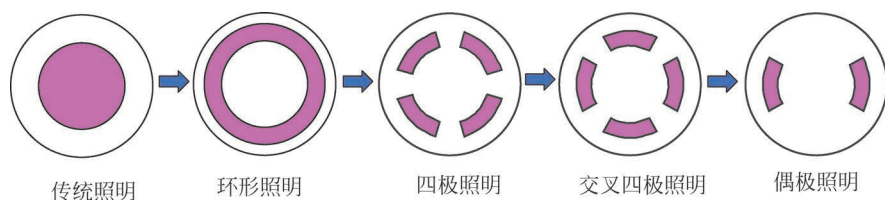


图 5.5 照明光瞳的发展变化趋势示意图

明和连续变角度照明。

(3) 到了 90nm 技术节点,不仅需要引入分辨率更高的 193nm ArF 干法光刻机,同时需要改进光刻机照明系统,利用衍射光学元件实现四极(Quasar)照明光瞳。

(4) 到了 28nm 技术节点,金属层次仍然使用 Quad 中的交叉四极照明实现金属布线的双向设计规则。由于前段与器件性能息息相关的栅极层次在线宽与周期持续缩小的情况下需要维持原有的光刻工艺性能或窗口,如较高的曝光能量宽裕度,较低的掩模误差因子,但是光刻工艺(包括光刻机与光刻胶等)的分辨率相比上一个技术节点(45/40nm)没有提高这么多,所以从这一节点开始前段的栅极层次需要改为单向设计规则,其照明方式也从这一节点开始需要选择合适的偶极照明(DP),以充分利用照明光瞳来最大限度地提高对比度。

(5) 到了 16/14nm 技术节点(也包括 22/20nm),表 5.2 中显示已经采用 SMO,此时光刻机中要有自定义的照明系统。由 4.1.3 节可知,EUV 光刻机中的照明系统直接采用自定义照明系统。

简单来说,随着技术节点的发展,最小设计规则周期逐渐缩小,为了使得对线宽均匀性要求较高的前段栅极层次的对比度仍然满足工艺标准要求,需要采用单向设计规则搭配合适的偶极照明;对于金属层次,其对光刻工艺窗口的要求比前段要低,在 10nm 技术节点之前还可以采用双向设计规则,同时采用交叉四极照明条件。通孔层次自使用离轴照明开始就一直沿用环形照明。即使采用了 SMO,照明条件的大概轮廓仍旧是环形照明。

除了需要知道选取哪种照明条件之外,一个合格的工程师还需要熟知照明条件中的各种参数是如何影响光刻工艺窗口的,这些参数包括照明光瞳中的内径、外径、张角以及数值孔径。当研发某个技术节点中的某一关键层次的光刻工艺时,需要在选定初始照明光瞳的基础上,优化照明光瞳中的这些参数,获得最佳的光刻工艺窗口。

5.3.1 照明光瞳选择的理论基础

1. 先进技术节点中初始照明光瞳的选择

随着先进技术节点的发展,图形的设计规则尺寸越来越小,需要采用离轴照明提高光学系统的分辨率。此外,在成像中,光刻工艺各参数(EL、MEF 和 DoF 等)还需要满足一定的光刻工艺标准,如 5.2 节所示。由第 2 章可知成像对比度(EL)与镜头收集的衍射光的多少息息相关,而衍射光的收集情况与照明光瞳直接相关。因此针对不同周期、不同图形,选择合适的初始照明光瞳也非常重要。本节主要讨论先进技术节点(从 28nm 开始),前段栅极、中后段金属和通孔等层次中离轴的、初始照明光瞳的选择,一般有如下规律。

1) 对于前段栅极层次

为了获得足够的光刻工艺窗口,从 28nm 节点开始的栅极层次改为单向设计规则。同时,需要配合偶极照明才能使得光瞳收集足够多的衍射光,获得足够大的曝光能量宽裕度(对比度)。

(1) 选择 X 方向偶极照明。

一般来说,前段栅极设计规则沿着 Y 方向,如图5.6(a)所示,需要选择沿 X 方向的偶极照明,如图5.6(b)所示。对于 Y 方向图形来说,其衍射级是沿 X 方向展开的,偶极照明中两部分照明光经过掩模版之后的衍射过程如图5.6(c)所示(为了方便阅读,拆解为图5.6(d)和图5.6(e))。对于衍射角度较大的密集图形,只有0级和1级两束光被镜头收集;由于采用偶极照明,镜头可以收集更多的1级衍射光,因此可以获得更高的曝光能量宽裕度。图示中的偶极照明的张角比较小,称为强偶极($0^\circ \sim 60^\circ$ 张角)。一般来说,只有在设计规则尺寸非常接近193nm水浸没式光刻机的衍射极限(72nm)时,如76nm,才会采用强偶极照明(配合大内径、外径)。设计规则尺寸相对来说较大时,弱偶极照明可以兼顾一维图形的曝光能量宽裕度与尽量小的二维线端-线端的尺寸,有关张角对光刻工艺的影响可见5.3.3节。

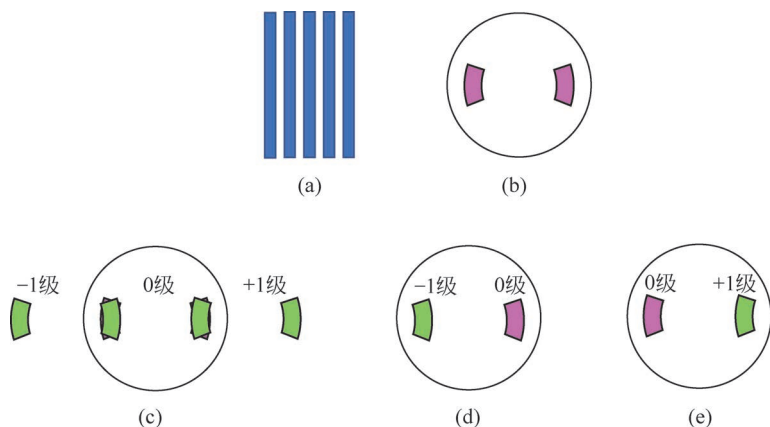


图5.6 28nm及以下技术节点中(a)前段栅极层次的设计规则(Y 方向);(b)初始偶极(X 方向)照明光瞳;(c)衍射级分布;(d)(e)两图组成(c)

(2) 选择 Y 方向偶极照明。

若是对于 Y 方向的设计规则,采用沿 Y 方向偶极照明会出现什么结果呢?如图5.7所示,衍射级仍然是沿 X 方向展开,由于密集图形的衍射角较大,镜头只能收集0级光,单束光无法完成干涉成像。因此, Y 方向设计规则的照明光瞳必然选择沿 X 方向上的偶极照明,沿 Y 方向上的偶极照明无法对 Y 方向设计规则的成像对比度做出贡献。

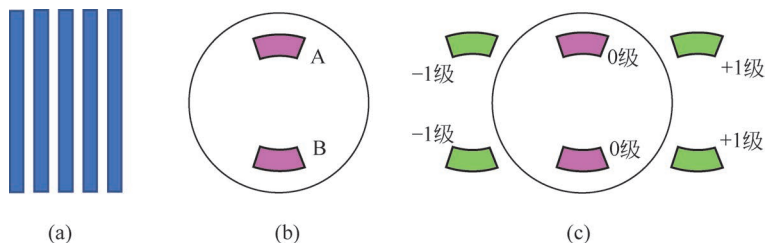


图5.7 28nm及以下技术节点中(a)前段栅极层次的设计规则(Y 方向);(b)初始偶极(Y 方向)照明光瞳;(c)衍射级分布

2) 对于后段通孔层次

作为二维图形,通孔层次在 X 、 Y 方向上均需要有衍射级展开,且被光瞳收集。同时,照明条件还需要能减弱方角处的光学邻近效应影响,增加其光刻工艺窗口。因此,环形照明光瞳是通孔层次的最优选择,可以兼顾通孔层次图形在各个方向的成像,如图5.8所示。正如5.2节所述,自180nm技术节点开始,通孔层次的照明条件就一直是离轴照明中的环形照明。

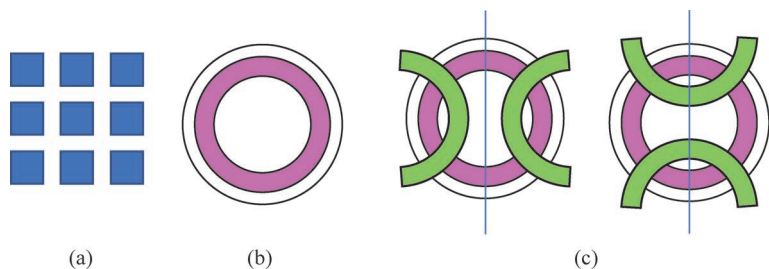


图 5.8 28nm 及以下技术节点中(a)通孔层次设计规则；(b)初始环形照明光瞳；(c)衍射级分布

3) 对于后段金属层次

在 28nm 及更先进的技术节点中,根据金属层次的两种设计规则可以使用两种光瞳类型,如图 5.9 所示,一种是交叉四极照明,另一种是偶极照明。金属层次的设计规则和相应的照明光瞳一般分为以下两种情况。

第一,图形周期距离衍射极限有一定距离,可以采取双向设计规则。例如,最小周期为 90nm 的金属层次,沟槽尺寸为 45nm。其使用的光刻机为 193nm 水浸没式光刻机,衍射极限周期约为 72nm。可见,这一金属层次的最小设计规则周期与衍射极限有一定的距离。此时需要通过使用交叉四极照明条件,也就是两个方向上的偶极照明,实现两个方向上图形的曝光。但是,对于沿 X 方向的图形, X 方向的这部分偶极照明不起作用,此时 X 方向图形的 EL 会小于单独使用 Y 方向偶极照明时的 EL。同理,采用交叉四极照明时, Y 方向图形的 EL 也小于单独使用 X 方向偶极照明的 EL。而从 5.2 节可知,193nm 水浸没式光刻工艺后段对 EL 的要求不高,只要达到 13% 就可以了。因此,交叉四极照明适合设计规则与衍射极限有一定的距离、对光刻工艺窗口要求不高的、采用双向设计规则的层次。

第二,图形周期挑战衍射极限。到了 10/7nm 技术节点,后段金属层次的设计规则逐渐缩小到 44nm 与 40nm,需要采用自对准的光刻-刻蚀方法完成图形。单次曝光的周期分别为 88nm 与 80nm,设计规则改为单向,同时需要配合偶极照明以实现单一方向图形最佳的光刻工艺窗口。图 5.9 中的 X 方向偶极照明针对的是沿 Y 方向的金属图形。

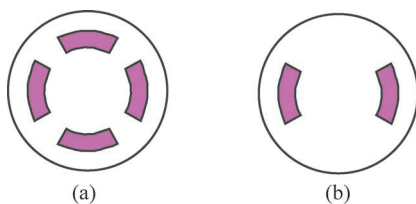


图 5.9 28nm 及以下技术节点中后段金属层次的初始照明光瞳:(a)交叉四极照明;(b)偶极照明

注意,照明条件的选择并非只针对最小设计规则,而是需要兼顾整个周期(Through Pitch, TP)的光刻工艺窗口,参考 5.3.2 节。如 5.2 节所示,每个技术节点中每个层次的 EL、MEF、DoF 都需要满足一定的规格。然而,随着照明条件的优化,光刻工艺中一些参数的性能是此消彼长的,所以需要根据每个节点的工艺标准来优化照明光瞳,使得光刻工艺窗口达到最合适的状态。例如,不能为了优化 LWR 进而得到更好的 CDU,一直提高 EL。因为当 EL 高于一定的数值后,LWR 不再继续变好,但是 EL 过度增加会明显损失 DoF,这是不利的。同时,5.2 节的工艺标准是从几十年的量产中总结出来的、最合适的一种状态,若在这个基础上继续提高整体的光刻工艺窗口,可能需要对工艺、设备进行更深入的优化,会造成大量的人力、

物力损耗,不利于芯片生产的性价比。

此外,从以上讨论中可以清楚地获得以下结论:对于一维线条/沟槽图形,当图形周期逐渐缩小时,环形照明光瞳会损失很多1级衍射光,导致对比度下降。因此,需要将照明条件改为类似偶极照明的四极照明;再改为两个方向的偶极照明:交叉四极照明;最终发展为偶极照明,且张角还需要随设计规则尺寸缩小不断缩小以维持周期持续缩小后的对比度。目的是加强两个方向图形或者单一方向图形的成像,收集更多的1级光,以获得更高的图形对比度。到了非常极端的设计规则,如76nm,不仅需要将照明条件设置成强偶极,还需要加大照明的离轴角,即增加光瞳的内径与外径。

2. 先进技术节点中照明光瞳中参数的设置

根据上面的方法选定初始的照明光瞳之后,如何确定内径(σ_{in})、外径(σ_{out})以及张角等参数也是光瞳优化中的重要一环。本节以双向设计规则的沟槽(金属)层次为例,一般来说,193nm水浸没式光刻工艺中沟槽层次的最小双向设计规则为88~90nm,此处以90nm周期为例。选定交叉四极初始光瞳后,简要介绍确认照明光瞳中各参数的基本步骤。

(1) 首先确认平均半径,即内径外径的平均值 σ_{ave} 。

一般来说, σ_{ave} 主要由设计规则中的最小周期90nm决定。为了获得最大的焦深,最好使得0级和1级衍射光围绕光轴对称,图5.10(a)即为离轴角度较大(图形周期较小)时的0级光与1级光对称的情况。0级与1级光之间的衍射角 θ 与曝光波长(λ)和硅片上图形周期(P)之间的关系如式(5.1)所示。

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{P} \quad (5.1)$$

其中, λ 为193.368nm, P 为90nm,最终 $\sin\theta \approx 2.1485$,这一衍射角针对NA为1.35的镜头。由于光轴平分衍射角 θ ,因此可以将式(5.1)中衍射角换算到最大 σ 为1的光瞳上,获得如式(5.2)所示的 σ_{ave} 。

$$\sigma_{ave} = \frac{\sin\theta}{2NA} \quad (5.2)$$

得到内径与外径的平均值 $\sigma_{ave} \approx 0.8$ 。

(2) 接下来需要定照明光瞳中外径和内径的差值,即离轴照明的宽度。

这一宽度会对整个光刻工艺窗口有很大的影响,尤其是对DoF有较大的影响。已知0级和1级光围绕光轴基本对称时,图形才会有比较大的DoF。不同周期图形的衍射角不同,因此需要根据图形的种类选择合适的光瞳。

① 对于密集图形:由于0级与1级光之间的衍射角度较大,需要较大的离轴角度才能使得0级光与1级光围绕光轴对称。同时,对于单一周期的图形,光瞳中最好是两个点,即内径外径合并在一起。

② 对于周期较大的图形(尤其是无法添加SRAF的禁止周期):0级与1级光之间的衍射角变小,要使两束光围绕光轴对称,需要减小这种比密集图形周期偏大的半密集图形的离轴照明角度,如图5.10(b)所示。

可以看出,密集图形倾向于更大的 σ_{ave} (大离轴角),而半密集图形需要的 σ_{ave} 偏小。在一个光刻层次中,一般会包含密集图形、半密集图形以及孤立图形。尽管密集图形的占比超过70%,也需要适当调整照明光瞳以平衡不同图形的焦深,获得整个周期上最佳的光刻工艺窗口。因此,一般会在密集图形计算得到的 σ_{ave} 的基础上做一些调整:减小 σ_{ave} 。另外,由于设

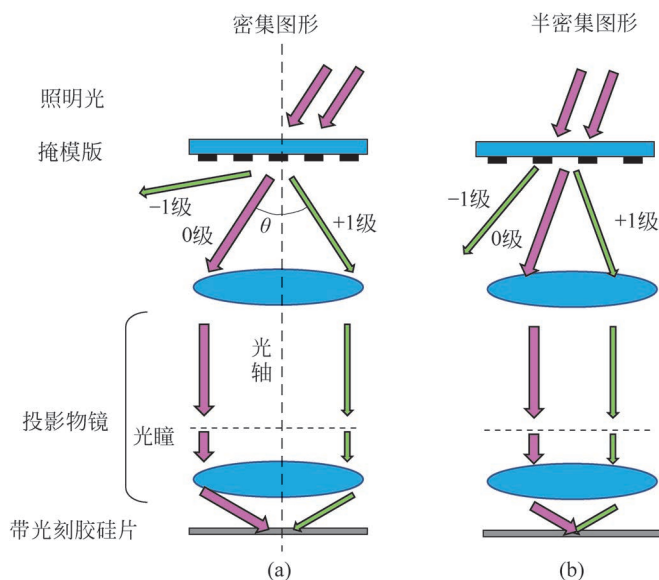


图 5.10 (a) 密集图形(最小周期)需要大离轴角; (b) 半密集图形需要小离轴角

计规则中并不只有一个图形周期,因此必须设置比较宽的外径与内径的差值,以获得整个周期上的较大的公共焦深(Commen DoF)。

一般来说,内外径之间的宽度需要大于或等于 0.16。否则,太小的宽度会使光强集中在镜头较小的范围内。长时间高强度的光不仅会损伤镜头,降低镜头使用寿命;还会造成小范围内镜头可能存在的像差对光刻工艺有较大的影响。另外,太小的宽度是接近相干照明的,会导致图形边缘成像质量变差。一般宽度的初始值可以设置为 0.2,那么 90nm 最小周期金属层次的初始 σ_{out}/σ_{in} 可设置为 0.9/0.7。

(3) 最后,确定张角的范围。

一般来说,将光瞳的初始张角设置一个整数,如 60° ,这一张角的选择会直接影响沿 X、Y 方向图形的对比度,沟槽线端-线端的尺寸和线端的形状。

初步确定交叉四极照明光瞳中的内径外径的数值和张角之后,可以在这个条件附近做一些分组(Split)实验:改变内径外径宽度、离轴角度(σ_{ave})、张角大小等。通过对比各分组光瞳下仿真得到整个周期的光刻工艺窗口,得到最佳的照明条件。相比于偶极照明,交叉四极照明可以得到更小的线端-线端的尺寸以及线端-横线的尺寸,这部分仿真的详细内容见 5.3.3 节。

除了上述这些可以依靠 Zoom Telescope 和 Zoom Axicon 搭配 DOE 实现的照明,我们知道,自从 16/14nm(也包括 22/20nm)技术节点开始,照明光瞳采用自定义系统,SMO 的优势很明显,可以提高整个光刻工艺窗口。但是如果 SMO 过程中图形类型考虑得不周全,会造成光源没有兼顾到某些图形,这样的 SMO 光源是不合格的。在了解了不同照明条件以及内径、外径、张角的作用之后,也可以对 SMO 光源的合理性做初步的判断。

5.3.2 通过简单的仿真结果判断如何选择合适的照明光瞳

前面讨论了符合工业标准化的光刻工艺窗口,以及不同光刻层次选择初步照明光瞳、确定照明光瞳中各参数的规律。本节通过仿真论证 5.3.1 节中推荐的照明光瞳类型是合适的,以及在推荐的照明光瞳下的前段栅极和后段金属层次的工艺窗口可以满足光刻工艺标准化的

要求。

另外,在 5.1 节的工艺总结中提到过,随着技术节点的不断发展,不仅照明方式在发展变化,还引入了很多分辨率增强技术(Resolution Enhancement Technique,RET)^[35,47]来提高各个节点的光刻工艺窗口。一般来说,从 130nm 技术节点开始,RET 中引入亚分辨辅助图形(Sub-Resolution Assist Feature,SRAF),其中就包含散射条(Scattering bar,Sbar)。选择合适的 Sbar 尺寸是一项非常重要的工作,既要能增加光刻工艺窗口,又不能让 Sbar 图形曝光到硅片上(特殊可曝出 Sbar(Printable Sbar)除外)。因此,除了照明光瞳的选择,本节还会讨论 Sbar 对光刻工艺窗口的影响以及如何选择合适的散射条的尺寸。

1. 先进技术节点前段栅极层次照明光瞳与 Sbar 的选择

通常,光刻工艺仿真中需要关注的几个重要的参数包含曝光能量宽裕度、掩模误差因子、焦深以及光学邻近效应修正(Optical Proximity Correction,OPC)的大小。如 5.2 节所述,标准化的光刻工艺窗口一般是指 EL 和 DoF 足够大,MEF 足够小,可以满足量产的要求,同时 OPC 在整个周期上又不能太大,容易加大 OPC 修正的难度。

本节以先进技术节点(如 28nm 技术节点)中的前段栅极为例,光刻工艺形成的主图形是光刻胶线条,SRAM 中最小的栅极周期为 117nm^[27](台积电设计规则),光刻工艺后硅片上线条尺寸可以定为 55nm。5.2 节中提到,当栅极的 $EL \geq 18\%$, $MEF \leq 1.5$ 时,才可以将线宽粗糙度尽可能控制在较低的水平,以得到更好的线宽均匀性,最终得到性能符合工业标准的器件。因此,栅极层次的设计规则也从 28nm 技术节点开始从双向变成单向,同时需要配合使用偶极照明(Dipole,DP)来实现一维栅极图形的高 EL 和低 MEF。接下来,从亚分辨辅助图形的添加、亚分辨辅助图形的尺寸以及照明方式的选择等方面讨论这一前段栅极层次的光刻工艺窗口,并验证单向设计规则的必要性。

1) 先进技术节点前段栅极层次中 Sbar 尺寸的选择

本节讨论在前段栅极光刻工艺中,不同尺寸的亚分辨辅助图形在硅片上的成像表现。如前所述,台积电的 28nm 技术节点中前段栅极在 SRAM 的最小周期为 117nm,但是由于逻辑区有更小的周期,所以这一层次将锚点设置在周期 107nm,掩模版上线条尺寸(Mask Critical Dimension,MCD)为 50nm(1 倍率),硅片上线条尺寸(Wafer Critical Dimension,WCD)定为 55nm。照明条件为 $NA=1.35$, $\sigma_{out}/\sigma_{in}=0.8/0.6$,偶极,张角为 115° ,采用 XY 方向的偏振。掩模版是透光率为 6% 的相移掩模版(Phase Shift Mask,PSM)。光刻胶厚度为 90nm,等效光酸扩散长度为 5nm,显影方式为正显影。本节使用的全物理模型光刻工艺仿真软件(CF Litho)中 Sbar 的最小周期为 110nm,因此从 220nm 周期开始可以在两个主图形中间添加第一根 Sbar。图 5.11(a)表示偶极照明光瞳;图 5.11(b)表示锚点周期(107nm)的空间像;图 5.11(c)表示 Sbar 为 10nm 时,220nm 周期图形的空间像;图 5.11(d)表示 Sbar 为 15nm 时,220nm 周期图形的空间像;图 5.11(e)表示 Sbar 为 20nm 时,220nm 周期图形的空间像;图 5.11(f)表示 Sbar 为 25nm 时,220nm 周期图形的空间像。其中,图 5.11(c)~图 5.11(f)中的空间像仿真需要通过调整掩模版线宽,使得硅片线宽均为 55nm,即保持与锚点相同的阈值。

从图 5.11 中可以看出:

(1) 当 Sbar 线宽为 10nm 时,其最低空间像强度完全在阈值之上,由于 Sbar 与主图形一致,为线条(6%透光区)图形,所以 Sbar 并不会在硅片上出现。

(2) 当 Sbar 线宽为 15nm 时,其最低空间像强度刚刚低于阈值,所以 Sbar 线条会出现在硅片上。由于尺寸非常小,可以通过调整显影程序增加显影液冲击力度或者通过后续的刻蚀

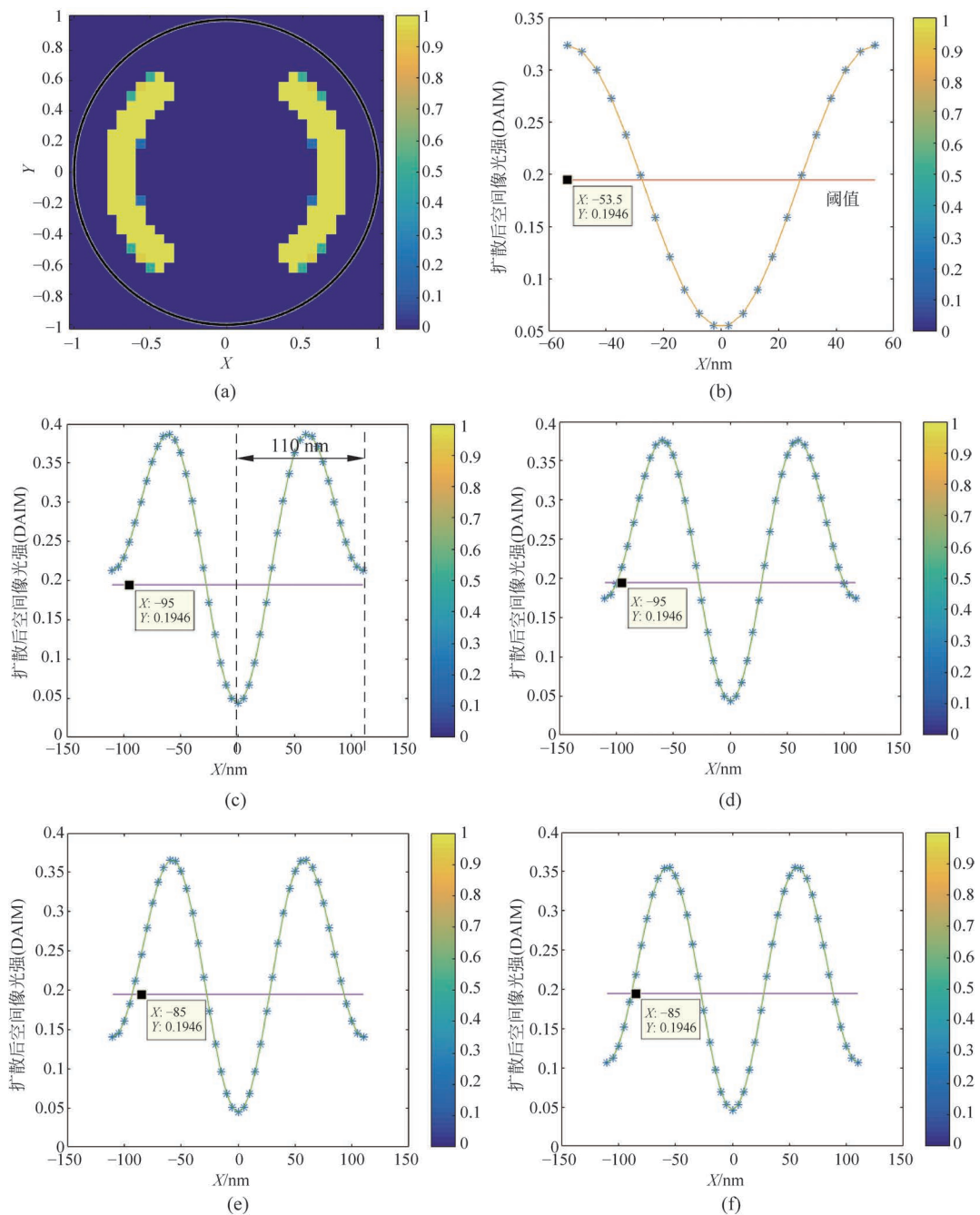


图 5.11 前段栅极层次中不同 Sbar 线宽时, 220nm 周期的空间像示意图: (a) 照明光瞳; (b) 锚点周期 (107nm); 220nm 周期, 不同的 Sbar 尺寸: (c) Sbar 线宽 10nm; (d) Sbar 线宽 15nm; (e) Sbar 线宽 20nm; (f) Sbar 线宽 25nm

工艺, 将这点类似光刻胶残留 (Scum) 的曝光在硅片上的 Sbar 线条去掉。即使不能通过显影或者刻蚀完全去除, 栅极剪切层次也可以将此曝光到硅片上的 Sbar 完全去掉。

(3) 当 Sbar 线宽为 20nm 和 25nm 时, 其最低空间像强度已经远低于阈值, 所以硅片上会留下较大尺寸的 Sbar。

Sbar 被曝光到硅片上的这种现象称为散射条曝出 (Sbar Printing), 一般来说, 亚分辨辅助

图形不能曝光在硅片上,这就需要预先知道 Sbar 的设计规则(尺寸、周期或者与主图形的距离等)。通常来说,在 28nm 逻辑技术节点中,前段栅极层次允许散射条曝出,只需通过后续的剪切层将多余的 Sbar 线条去除即可。一般来说,剪切 Printable Sbar 和剪切栅极的图形方向是相互垂直的,这就需要根据实际的设计规则情况来判断是否需要将剪切层次分到不同的掩模版中。

此外,锚点处掩模版上线宽(1 倍率)与硅片上线宽之间的差值称为掩模版线宽偏置(Mask Bias)。在上述栅极层次中,锚点处掩模版上的线宽为 50nm,要小于硅片上的线宽 55nm。这是因为在存在明显的衍射现象时,需要尽量将掩模版上能透光部分的线宽(4 倍率)做大($>$ 曝光波长),使得光更容易穿过掩模版,降低掩模三维效应,提高光刻工艺窗口,例如,降低掩模误差因子,具体锚点和掩模版线宽偏置的选择见 6.7.4 节。因此,对于先进技术节点的前段线条层次(正显影)来说,一般都是掩模版上偏小的线条线宽,曝光到硅片上变成较大的线条线宽,也就是常说的“小曝大”,又称为曝光不足(Under Exposure)。

除了 220nm,继续通过仿真查看另一个周期(250nm)不同 Sbar 尺寸对应的空间像情况,如图 5.12 所示。从图中可以看出,15nm 的 Sbar 尺寸仍然是一个临界值:高于这一线宽,较大尺寸的 Sbar 会被曝光到硅片上,需要剪切层次去除;小于或等于这一线宽,即使硅片上有较小尺寸的 Sbar,也可以通过显影或者刻蚀去除。

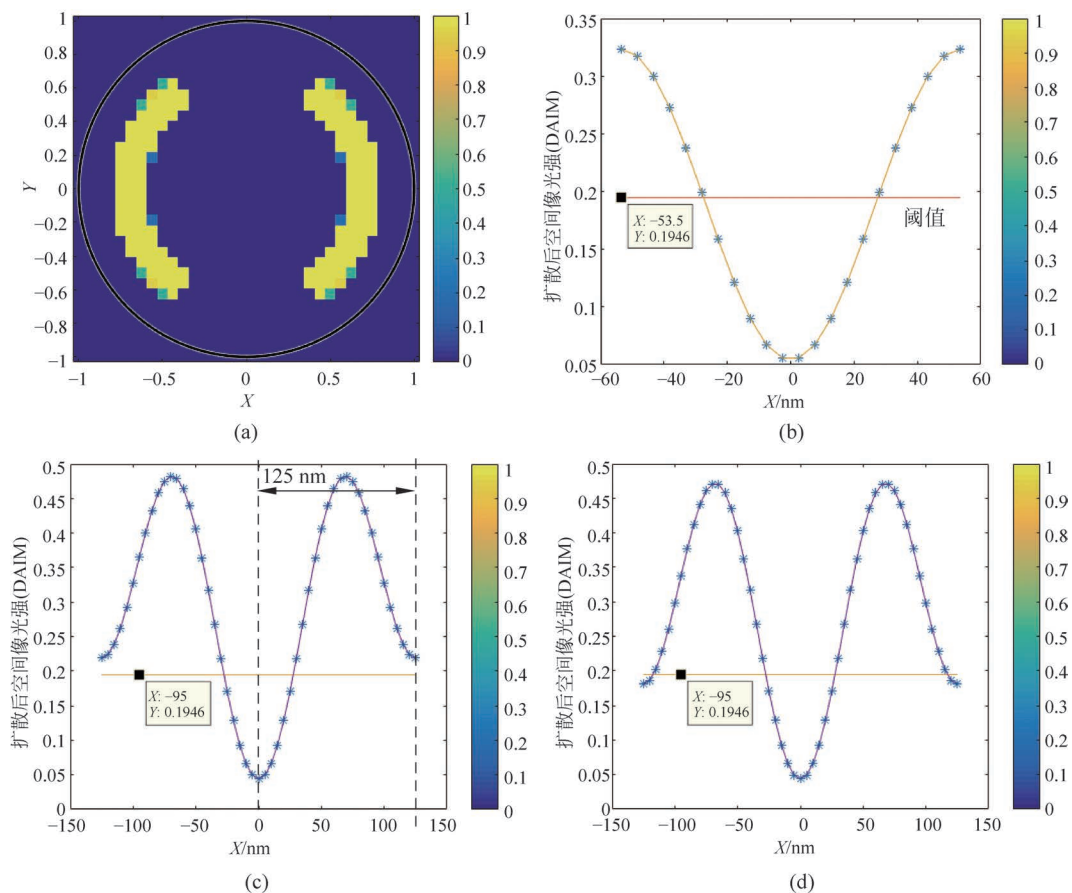


图 5.12 前段栅极层次中不同 Sbar 线宽时,250nm 周期的空间像示意图:(a) 照明光瞳;(b) 锚点周期(107nm);250nm 周期,不同的 Sbar 尺寸:(c) Sbar 线宽 10nm;(d) Sbar 线宽 15nm;(e) Sbar 线宽 20nm;(f) Sbar 线宽 25nm

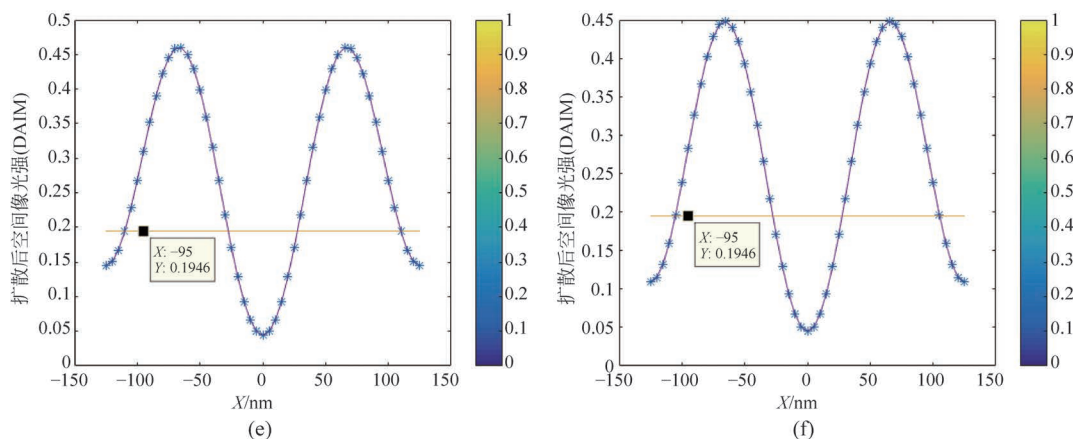


图 5.12 (续)

从图 5.11 中还可以看出, Sbar 空间像的谷值约为 $\pm 110\text{nm}$, 也就是说, 从 220nm 周期开始在两个主图形中间添加 Sbar。只有当主图形周期增加到三倍的最小 Sbar 周期 330nm 时, 才会开始添加两根 Sbar。而图 5.12 中的周期为 250nm , 所以这唯一的一根 Sbar 仍然需要添加在两个主图形之间, 以公平优化相邻两个主图形的工艺窗口, 因此 Sbar 空间像的谷值约为 $\pm 125\text{nm}$ 。随着技术节点从 28nm 继续推进到更先进的节点, 如果明场环境下的设计规则尺寸更小, 则需要更强(小张角)的偶极照明条件, 这会增大 Sbar 曝光到硅片上的概率。因此, Sbar 的线宽也需要随之减小到掩模版制作的极限 $10\sim 12\text{nm}$ (1 倍率)。

2) Sbar 对光刻工艺窗口的影响

上面探讨了不同 Sbar 尺寸的成像情况, 下面讨论 Sbar 的存在对光刻工艺窗口的影响。图 5.13 展示的是未添加 Sbar 时, 照明光瞳与整个周期上光刻工艺窗口的仿真结果。仿真条件与上面相同: 锚点周期为 107nm , 线条的 MCD 为 50nm , 线条的 WCD 为 55nm ; 照明条件为偶极照明: $\text{NA}=1.35$, $\sigma_{\text{out}}/\sigma_{\text{in}}=0.8/0.6$, 张角为 115° ; 掩模版是透光率为 6% 的 PSM, 采用 XY 方向的偏振。光刻胶厚度为 90nm , 等效光酸扩散长度为 5nm , 显影方式为正显影。需要注意的是, 栅极在整个周期上的 WCD 均为 55nm 。其中, 仿真结果中蓝色曲线为 OPC 之后的光刻工艺仿真数据(焦深曲线除外)。

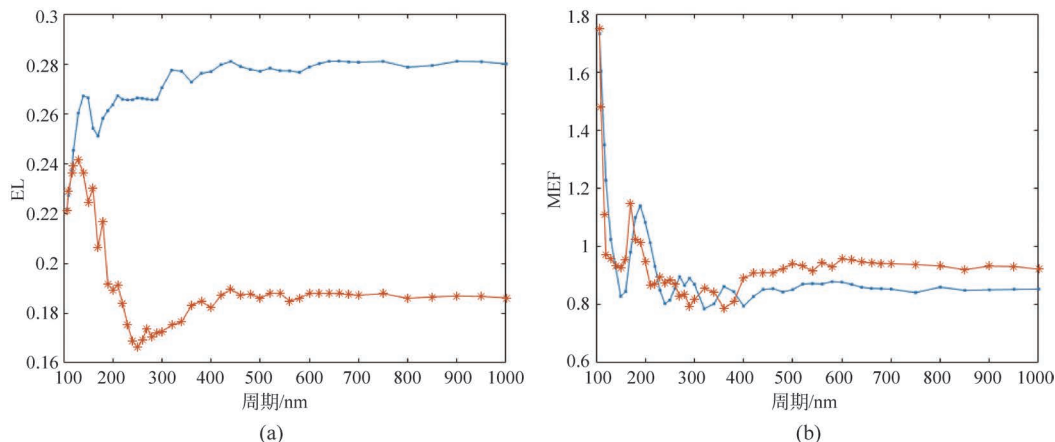


图 5.13 前段栅极层次未添加 Sbar 时, 光刻工艺仿真结果示意图: (a) OPC 前后曝光能量宽裕度随周期变化; (b) OPC 前后掩模误差因子随周期变化; (c) 焦深随周期变化; (d) 照明光瞳; (e) OPC 前后硅片上线宽随周期变化; (f) OPC 前后掩模版线宽(1 倍率)随周期变化

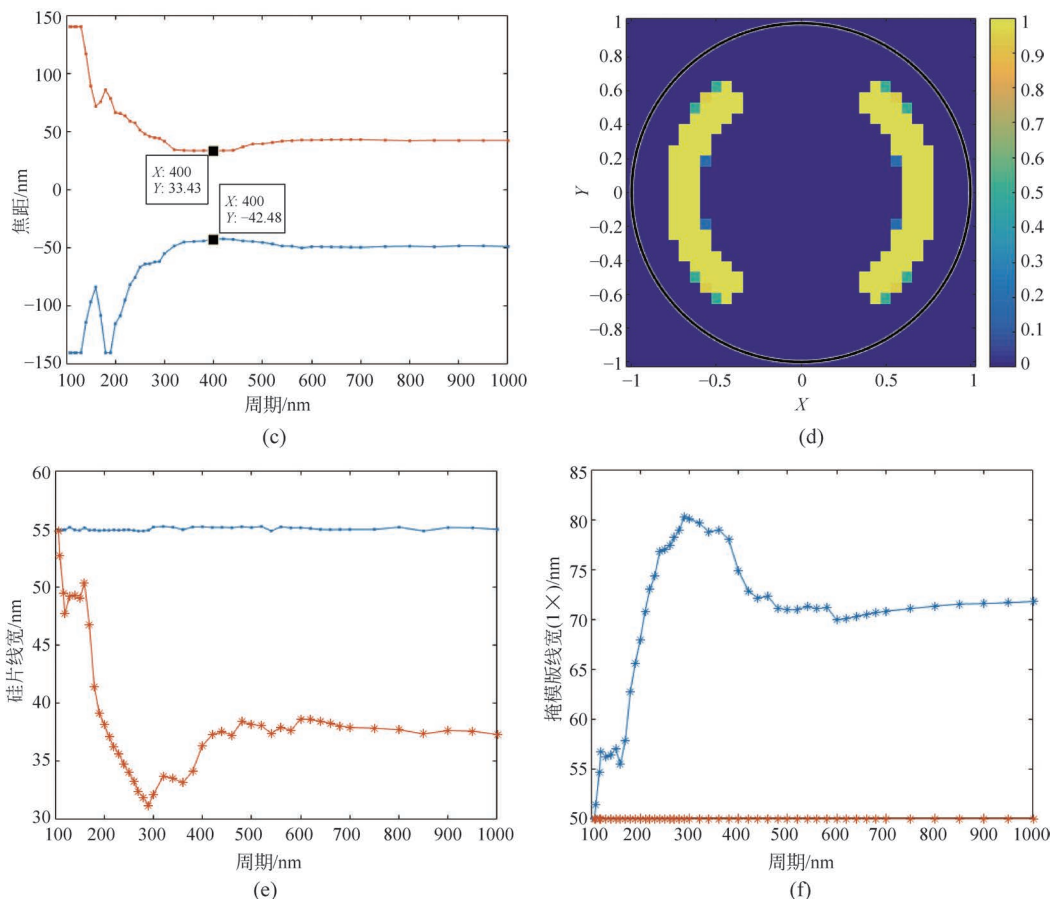


图 5.13 (续)

图 5.13(a)~图 5.13(c)分别为光刻工艺中的三个重要参数: EL、MEF 和 DoF。其中, EL 和 MEF 展示的是在 OPC 前后(蓝色为 OPC 之后)随周期的变化趋势, DoF 只有 OPC 之后随周期变化的趋势; 图 5.13(d)为照明光瞳; 图 5.13(e)为硅片上线条的线宽在 OPC 前后随周期的变化趋势, 可以看到, OPC 之后 WCD 在整个周期上均为 55nm; 图 5.13(f)为掩模版线宽(1 倍率)在 OPC 前后随周期的变化趋势, 可以看到, MCD 在 OPC 之前均为锚点的 MCD, 即 50nm, 在整个周期上最大的 OPC 补偿值约为 30nm。接下来, 按照 5.2 节所述的光刻工艺标准, 对以上 OPC 之后的仿真结果进行分析。

(1) EL 在整个周期上都满足光刻工艺标准: $EL \geq 18\%$ 。

(2) 对于 MEF: 只有周期 107nm 以及 110nm 的 MEF 略高于 1.5, 从第三个周期即 SRAM 区域的最小周期 117nm 开始一直到孤立图形(1000nm), MEF 均小于 1.5。

(3) 图 5.13(c)中显示的是 OPC 后根据光刻胶形貌与线宽(目标线宽的 $\pm 10\%$ 范围)共同确定的焦深随周期的变化, 图中位于上方的曲线是正离焦, 而位于下方的曲线是负离焦, 公共焦深取正负离焦之间最小的差值。从图中可以看出, DoF 只有 70nm 左右, 未达到 28nm 节点(见 6.5.3 节)所需要的至少 80nm(前段对焦深要求会更高一些)焦深的要求。

也就是说, 在不添加 Sbar 时, 栅极层次的 EL、MEF 基本可以满足光刻工艺的要求, 但是焦深无法满足量产的最低需求。

接下来讨论添加了 Sbar 之后的栅极层次的光刻工艺窗口, 如图 5.14 所示。其中, 光刻工

艺条件均与未添加 Sbar 的相同, Sbar 的最小周期为 110nm, Sbar 线条尺寸采用 15nm。同样基于 5.2 节所述的光刻工艺标准, 对以上 OPC 之后的仿真结果进行分析。

(1) EL 在整个周期上都满足光刻工艺标准: $EL \geq 18\%$ 。

(2) 对于 MEF: 从逻辑区的最小周期 117nm 开始都小于 1.5。

(3) 基于线宽以及光刻胶形貌的公共焦深也达到了 95nm。注意, 由于前段涉及晶体管器件的性能, 因此其 DoF 需要比相应节点后段金属层次中 80nm 的 DoF 高, 才能得到更好的线宽均匀性。

(4) 由图 5.14(f) 中 OPC 之后掩模版线宽随周期的变化结果可看出, 添加 Sbar 之后, 某些周期的 OPC 修正量有所降低。

从仿真结果来看, EL、MEF 以及 DoF 都已经符合量产对光刻工艺窗口的要求。因此, 作为分辨率增强技术, Sbar 的添加是必然的。若继续增加 Sbar 尺寸, 例如, 从 15nm 增加到 20nm, 焦深可以继续提高一些。

另外, 从 DoF 图中还可以看出, 无论是否添加 Sbar, 对于前段主图形为线条的栅极层次, 焦距在整个周期上向负向偏移, 这与掩模版的三维(Mask 3 Dimension, M3D)^[48] 散射效应有关。若主图形是沟槽, 则 M3D 会造成整个周期上的焦距向正向偏移, 与主图形为线条的栅极层次中的现象正好相反。一般来说, 从 28nm 节点开始必须考虑 M3D 效应对光刻工艺窗口的影响。

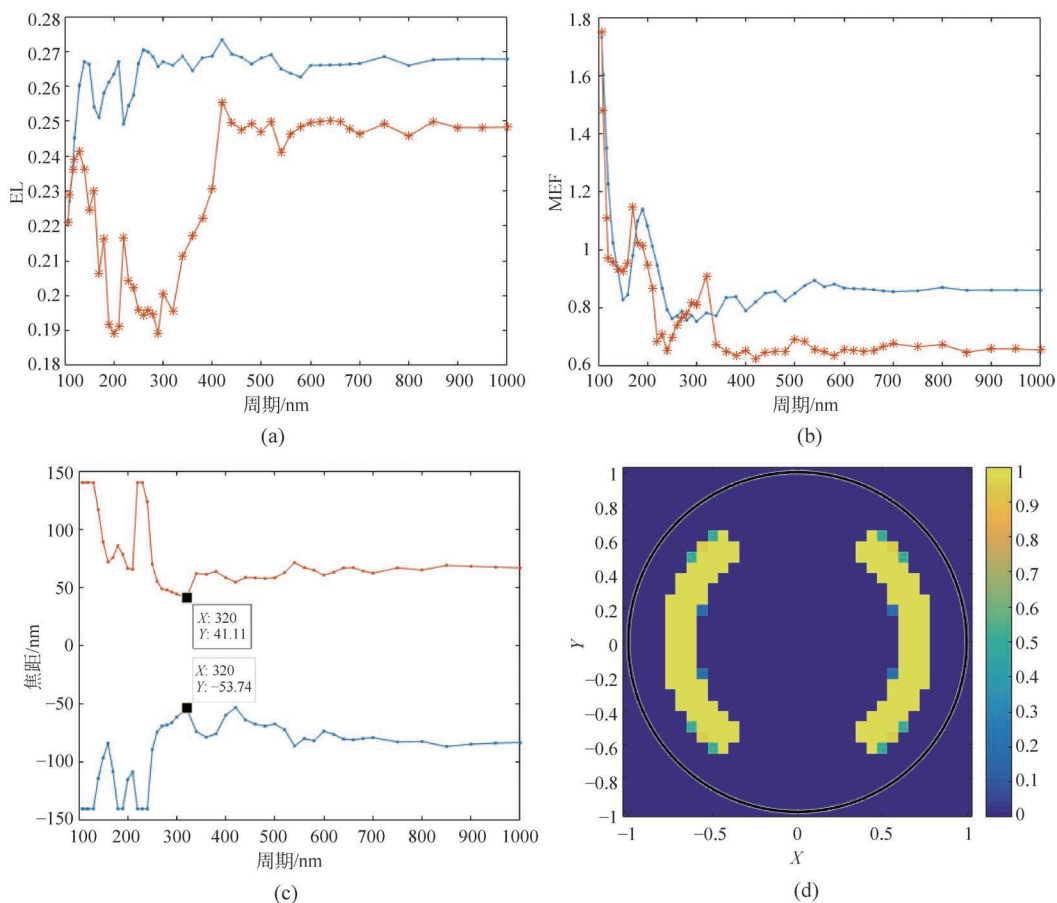


图 5.14 前段栅极层次添加 Sbar 时, 光刻工艺仿真结果示意图: (a) OPC 前后曝光能量宽裕度随周期变化; (b) OPC 前后掩模误差因子随周期变化; (c) 焦深随周期变化; (d) 照明光瞳; (e) OPC 前后硅片上线宽随周期变化; (f) OPC 前后掩模版线宽(1 倍率)随周期变化

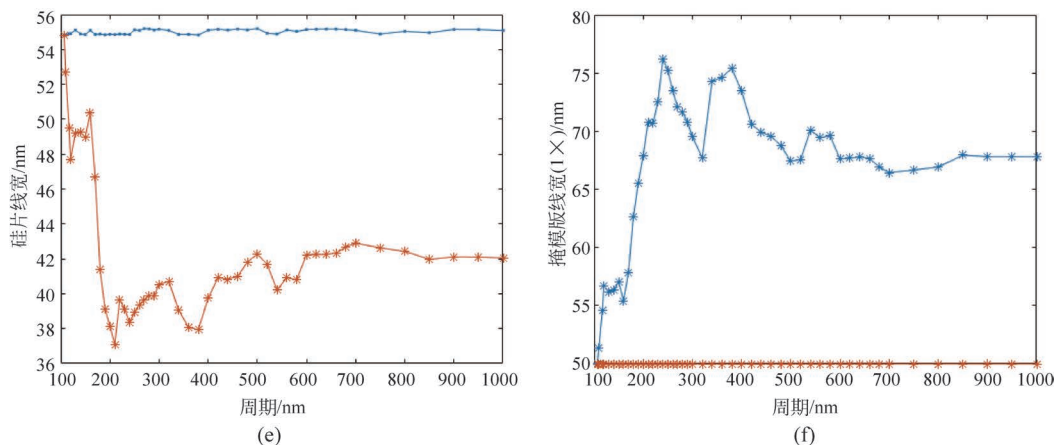


图 5.14 (续)

3) 不同照明光瞳对前段栅极层次光刻工艺窗口的影响

接下来继续讨论不同照明光瞳对前段栅极层次光刻工艺窗口的影响,同时讨论 28nm 前段栅极为何需要单向设计规则。图 5.14 中是偶极照明条件下光刻工艺窗口的仿真结果,接下来分别使用另外两种照明光瞳进行仿真: 0.85/0.65 CQ60°(交叉四极)照明以及 0.9/0.7 Quasar(四极)照明。其余仿真条件与前面相同: 锚点周期为 107nm,线条的 MCD 为 50nm,线条的 WCD 为 55nm; NA 为 1.35; 掩模版是透光率为 6% 的 PSM,采用 XY 方向的偏振。光刻胶厚度为 90nm,等效光酸扩散长度为 5nm,显影方式为正显影。

(1) 交叉四极照明条件下的仿真结果。

对于 NA 为 1.35、 $\sigma_{\text{out}}/\sigma_{\text{in}}=0.85/0.65$ CQ60°的照明方式,线条 Sbar 的线宽可以比偶极照明的更大一些。图 5.15(a)为照明光瞳,图 5.15(b)为锚点周期(107nm 周期)的空间像;图 5.15(c)是 Sbar 为 25nm 时,周期为 220nm 图形的空间像;图 5.15(d)是 Sbar 为 30nm 时,周期为 220nm 图形的空间像。对于图 5.15(c)和图 5.15(d),通过调整掩模版尺寸,使得线条线宽达到 55nm 时的阈值与锚点阈值保持一致。

从图 5.15 中可以看出: 当 Sbar 线宽为 30nm 时才刚会被曝光到硅片上。如 5.3.1 节所述,(X 方向)偶极照明会加强一维(Y 方向)图形的成像,增加其光刻工艺窗口,因此偶极照明条件下的 Sbar 更容易被曝光到硅片上。而在交叉四极照明条件下,对于一维图形来说,至少有一半的光是无法被利用的,所以 Sbar 不容易被曝光到硅片上。

因此,在交叉四极(CQ)的照明方式中,Sbar 最小周期为 110nm,线宽尺寸选择 30nm,以最大限度地提高光刻工艺焦深,仿真结果如图 5.16 所示。同样,基于 5.2 节所述的光刻工艺标准,分析交叉四极照明条件下、OPC 之后的仿真结果。

- ① 密集图形的 EL 只有约 15%,无法达到工艺标准的 18%。
- ② 密集图形的 MEF 超过 3,超过工艺标准要求($\text{MEF} \leq 1.5$)的两倍。
- ③ 公共焦深只有约 60nm,与量产需要的 $\text{DoF} \geq 80\text{nm}$ 的光刻工艺窗口差距很大。

这说明,可以兼顾两个方向设计规则的交叉四极照明条件已经无法满足这一节点栅极层次对光刻工艺窗口的要求。另外,从图 5.16(f)中还可以看出,随着周期增加,OPC 修正量逐渐增加;从可以开始添加 Sbar 时(220nm 周期开始添加第一根 Sbar),每新增一根 Sbar,OPC 补偿量会有明显下降;到达孤立图形之后,OPC 补偿量基本保持不变。

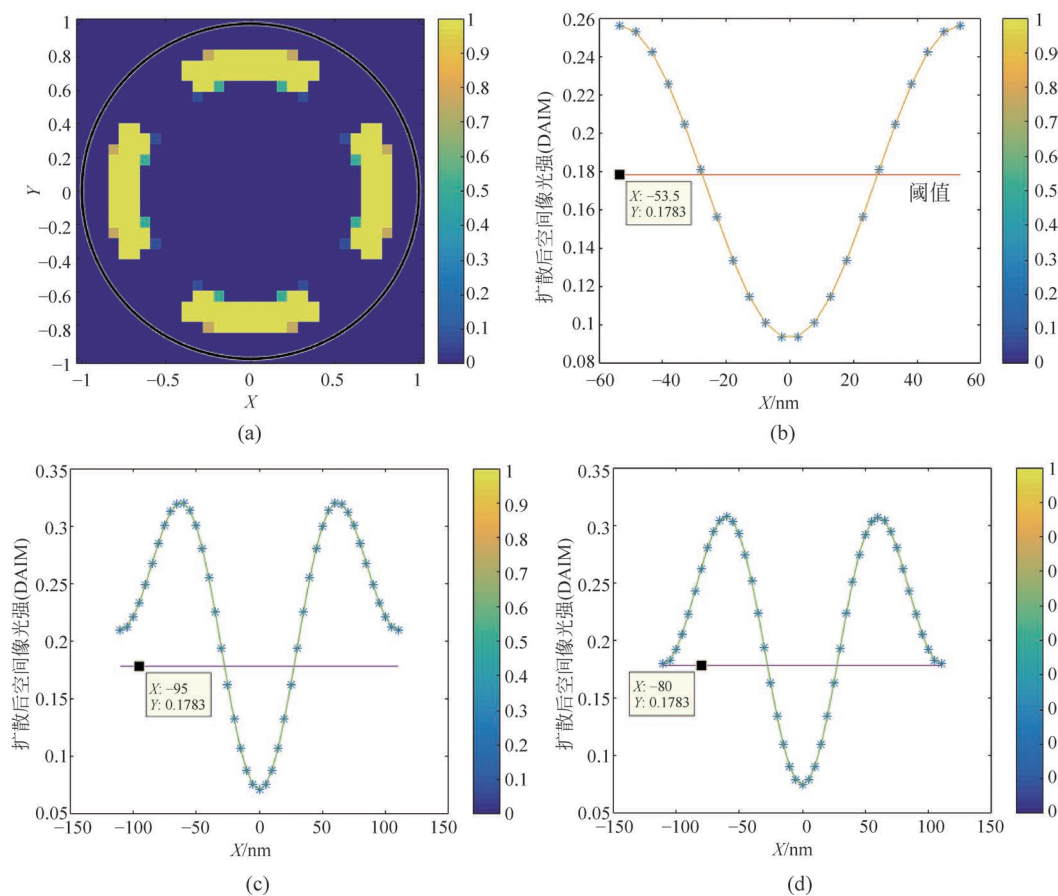


图 5.15 前段栅极层次中不同 Sbar 线宽时,220nm 周期的空间像示意图:(a) 交叉四极照明光瞳;(b) 锚点周期(107nm);(c) 220nm 周期,Sbar 线宽 25nm;(d) 220nm 周期,Sbar 线宽 30nm

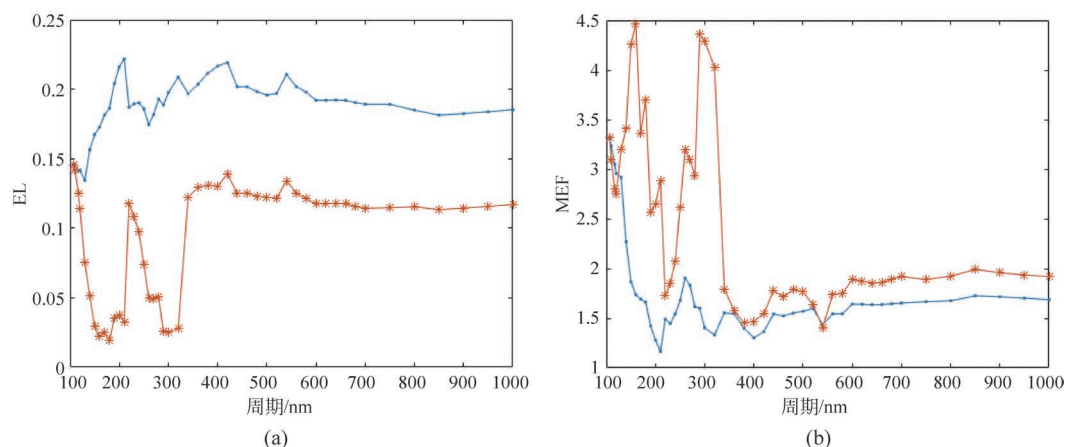


图 5.16 前段栅极层次在交叉四极照明条件下,添加 Sbar 时,光刻工艺仿真结果示意图:(a) OPC 前后曝光能量宽裕度随周期变化;(b) OPC 前后掩模误差因子随周期变化;(c) 焦深随周期变化;(d) 照明光瞳;(e) OPC 前后硅片上线宽随周期变化;(f) OPC 前后掩模版线宽(1 倍率)随周期变化

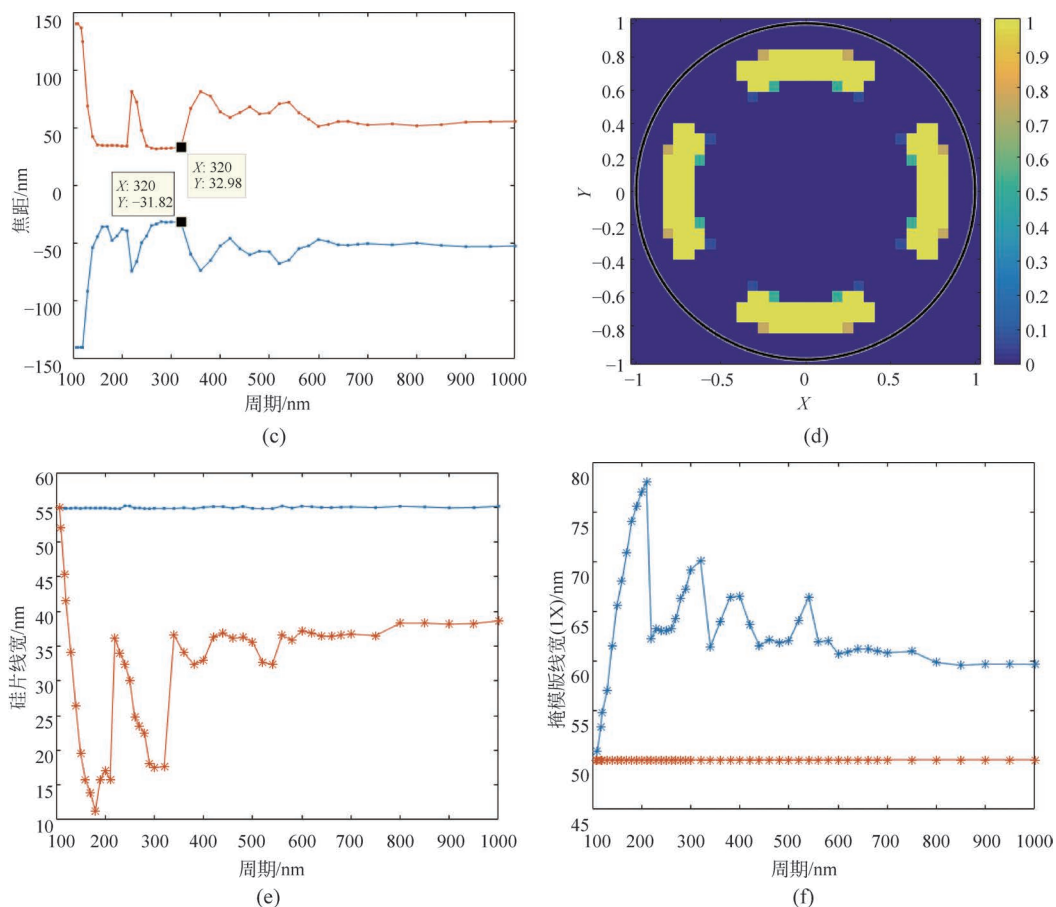


图 5.16 (续)

(2) 四极照明条件下的仿真结果。

接下来是上述栅极层次(锚点 107nm)在 0.9/0.7 Quasar45°照明条件下的仿真结果。首先,还是先选取合适的 Sbar 线条尺寸,图 5.17(a)为照明光瞳,图 5.17(b)为锚点周期的空间像;图 5.17(c)是 Sbar 为 25nm 时,周期为 220nm 图形的空间像;图 5.17(d)是 Sbar 为 30nm 时,周期为 220nm 图形的空间像。对于图 5.17(c)和图 5.17(d),通过调整掩模版尺寸,使得线条线宽达到 55nm 时的阈值与锚点阈值保持一致。

与交叉四极照明方式相比,四极照明方式在 Sbar 为 30nm 时,曝光到硅片上之后的 Sbar 尺寸明显增大(处于阈值以下的部分增多)。这是因为四极照明类似弱偶极照明,会加强一维 Sbar 图形的成像。通过上述讨论,从 Sbar 在硅片上曝出图形的难易程度这一角度,可以对三种照明条件排序如下:偶极照明>Quasar(四极照明)>CQ(交叉四极照明)。可见,相同 Sbar 尺寸时,偶极照明最容易将 Sbar 曝光到硅片上,交叉四极照明需要兼顾两个方向上的图形,最不容易将 Sbar 曝出来。

图 5.18 为采用类似弱偶极照明的四极照明条件时,光刻工艺仿真结果与照明光瞳示意图。其中采用的 Sbar 最小周期为 110nm,线宽尺寸选择 25nm,以最大限度地提高光刻工艺焦深,其余仿真结果与图 5.16 中相同。同样基于 5.2 节所述的光刻工艺标准,分析四极照明条件下、OPC 之后的仿真结果。

① 与交叉四极照明条件下的仿真结果类似,密集图形的 EL 只有约 15%,无法达到工艺

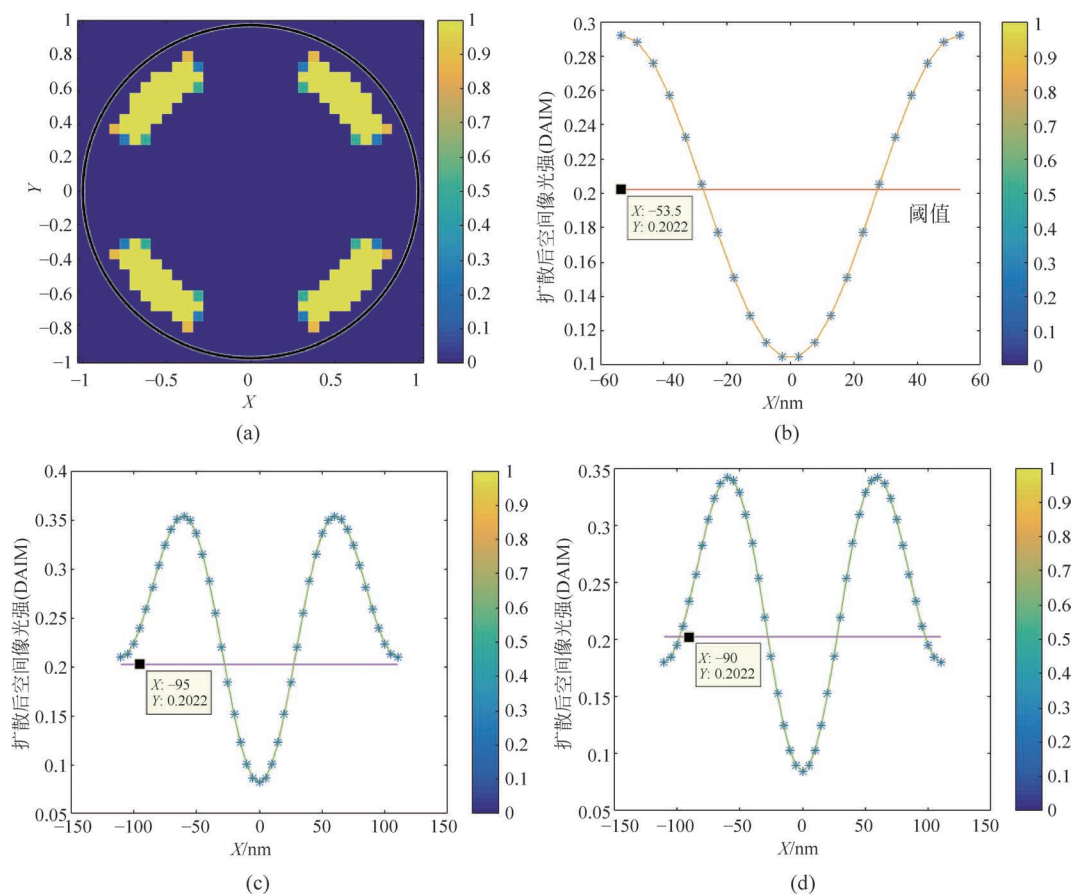


图 5.17 前段栅极层次中不同 Sbar 线宽时,220nm 周期的空间像示意图:(a) 四极照明光瞳;(b) 锚点周期 (107nm);(c) 220nm 周期,Sbar 线宽 25nm;(d) 220nm 周期,Sbar 线宽 30nm

标准的 18%。

② 类似地,密集图形的 MEF 也超过 3,超过工艺标准要求($MEF \leq 1.5$)的两倍。

③ 公共焦深超过 80nm,基本满足工艺需求。

尽管焦深基本符合量产需求,但是在设计规则中占比超过 70%的密集图形的 EL、MEF 均与标准相差较大。这说明,四极照明条件也无法满足栅极层次对光刻工艺窗口的要求。

综上,只能最大程度上优化一个方向上图形的偶极照明条件,才能使得此节点前段栅极层次的工艺窗口在整个周期上基本满足 $EL \geq 18\%$ 、 $MEF \leq 1.5$ 以及 DoF 超过 80nm(甚至超过 90nm)。这也证明了 28nm 节点前段栅极层次的设计规则必须改成单向,并采用偶极照明条件才能完成这一层次的光刻工艺。随着图形周期逐渐接近衍射极限,偶极照明需要从弱偶极(大张角)发展到强偶极(小张角)照明。但是越强的偶极照明,单次曝光形成的线端-线端的尺寸越大,这就需要后续的栅极剪切层次完成较小的线端-线端的尺寸,具体见 5.3.3 节。Quasar 照明类似弱偶极照明,但是又可以兼顾周期较大时的两个方向的设计规则。如果需要兼顾两个方向的、周期较小的设计规则,则必须采用交叉四极(CQ)照明。

本节通过三个不同的照明条件仿真得到 28nm 技术节点前段栅极的光刻工艺窗口,通过与标准化的窗口对比,最终确定最合适的照明方式是偶极照明。随着对光刻知识学习的深入,确定设计规则之后,有经验的工程师马上可以给出合适的初始照明光瞳。如果使用 SMO 自

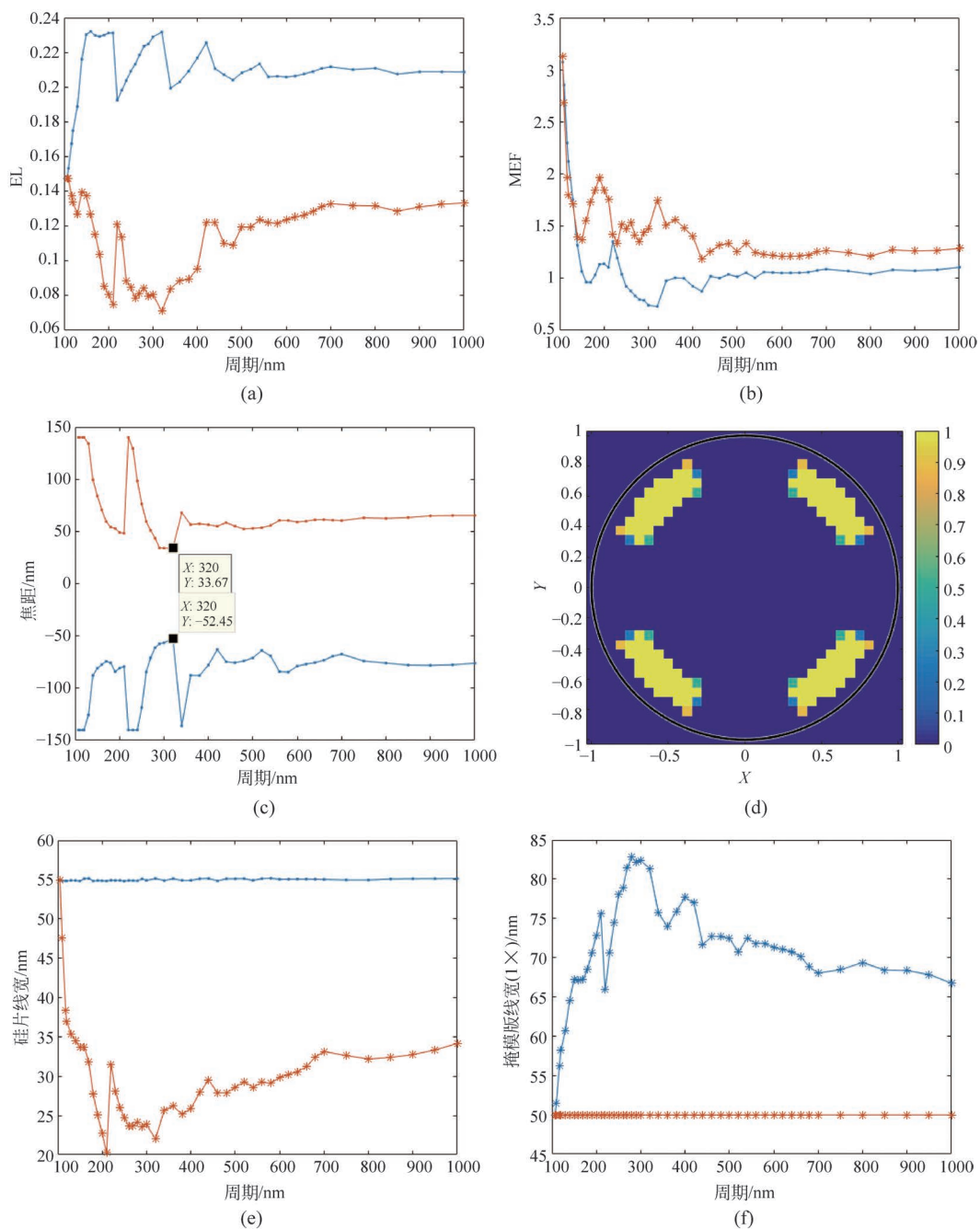


图 5.18 前段栅极层次在四极照明条件下、添加 Sbar 时,光刻工艺仿真结果示意图: (a) OPC 前后曝光能量宽裕度随周期变化; (b) OPC 前后掩模误差因子随周期变化; (c) 焦深随周期变化; (d) 照明光瞳; (e) OPC 前后硅片上线宽随周期变化; (f) OPC 前后掩模版线宽(1 倍率)随周期变化

由光瞳,也可以判断自由光瞳中的各个部分是为了优化哪些特定的图形。

2. 先进技术节点后段金属层次照明光瞳与 Sbar 的选择

1) 先进技术节点后段金属层次中 Sbar 尺寸的选择

从前面可知,Sbar 是必须要添加的,不仅可以提高公共焦深,还可以降低某些周期的 OPC 修正量。本节讨论双向设计规则沟槽(金属)层次 Sbar 的添加,一般来说,193nm 水浸没式光

刻工艺中沟槽层次的最小双向设计规则为 $88\sim 90\text{nm}$, 此处以 90nm 周期为例, 同时也是曝光的锚点。通过光学仿真和硅片数据确认, 最佳的掩模版线宽为 50nm , 硅片线宽(沟槽)为 45nm 。掩模版是透光率为 6% 的 PSM, 采用 XY 方向的偏振。光刻胶厚度为 90nm , 等效光酸扩散长度为 5nm , 显影方式为正显影。照明光瞳的 NA 为 1.35 , 初始照明光瞳的类型以及参数的设置见 5.3.1 节, 经过优化确认后的照明条件为 $\sigma_{\text{out}}/\sigma_{\text{in}} = 0.84/0.68$, Cross-Quasar (CQ)(交叉四极照明) 60° 。

本节讨论主图形为沟槽时, 沟槽型 Sbar 线宽的选择, Sbar 的最小周期设置为 90nm , 同时做了 180nm 和 200nm 这两个周期随着沟槽 Sbar 线宽变化的空间像仿真, 如图 5.19 和图 5.20 所示。其中, 图 5.19 对应的是周期为 180nm 图形的空间像随着 Sbar 线宽的变化, 图 5.20 对应的是周期为 200nm 图形的空间像随着 Sbar 线宽的变化。两图中的 4 幅图分别为交叉四极照明光瞳; 锚点周期(90nm)的空间像; Sbar 为 25nm 时的空间像; Sbar 为 30nm 时的空间像。对于后段金属层次, 为了增加光刻工艺窗口, 需要添加选择性线宽偏置(Selective Sizing Adjustment, SSA)^[49], 也就是随着周期增加, 需要增大硅片上沟槽的线宽值。对于 180nm 周期, 其硅片上沟槽线宽为 60nm , 因此图 5.19(c)和图 5.19(d)中的空间像在达到 60nm 沟槽线宽时的阈值应保持与锚点的阈值一致。对于 200nm 周期, 其沟槽线宽为 65nm , 因此图 5.20(c)和图 5.20(d)中的空间像在达到 65nm 线宽时的阈值应保持与锚点的阈值一致。

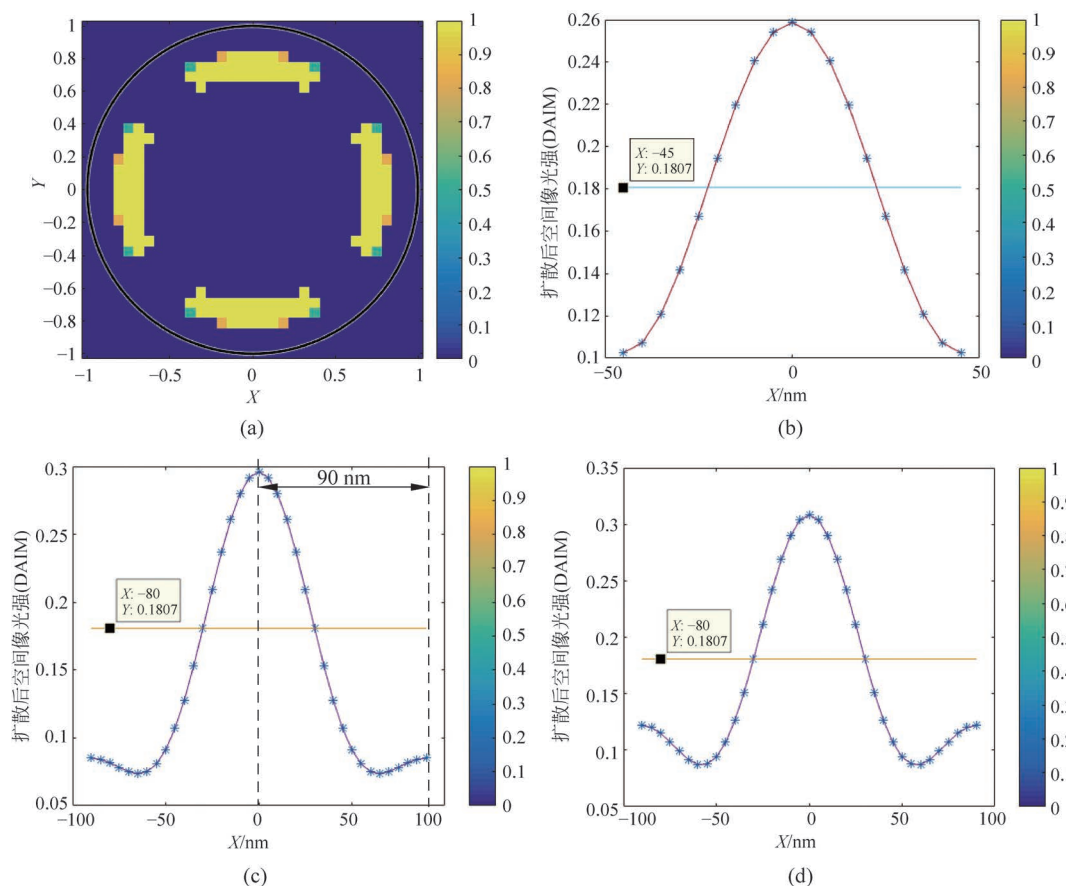


图 5.19 后段金属层次中不同 Sbar 线宽时, 180nm 周期的空间像示意图: (a) 交叉四极照明光瞳; (b) 锚点周期(90nm); (c) 180nm 周期, Sbar 线宽 25nm ; (d) 180nm 周期, Sbar 线宽 30nm

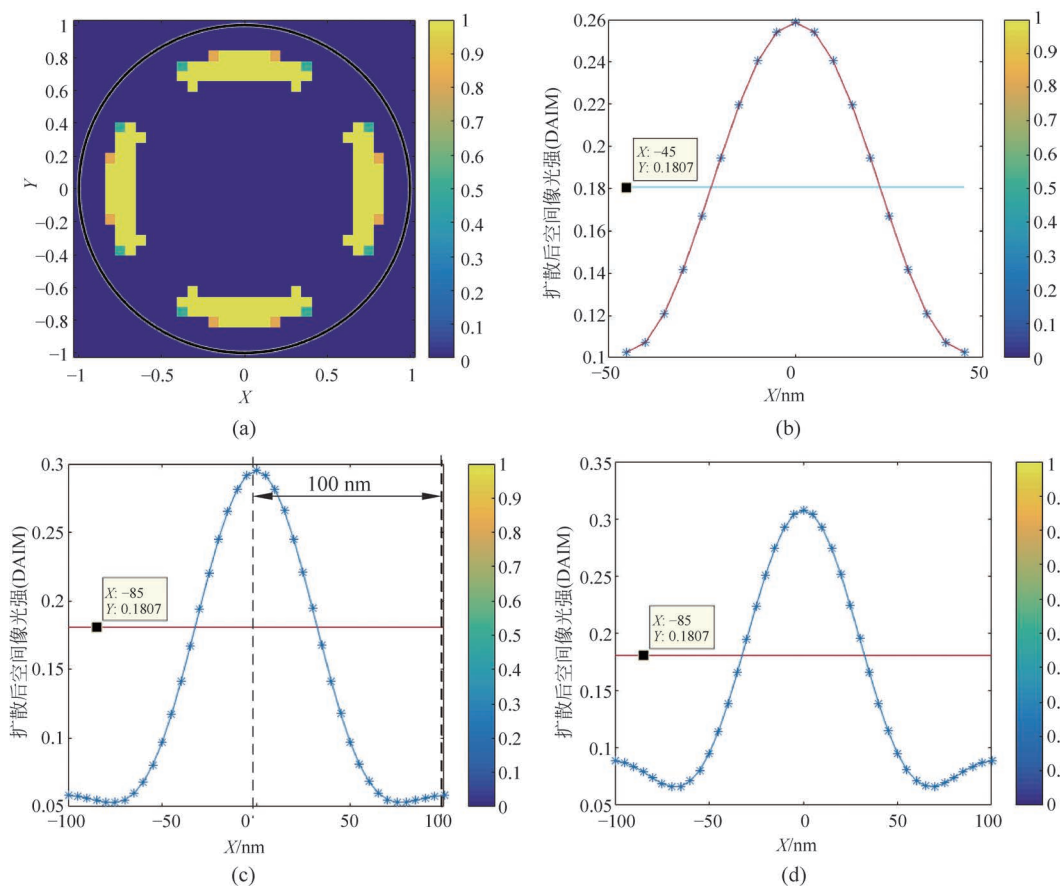


图 5.20 后段金属层次中不同 Sbar 线宽时,200nm 周期的空间像示意图:(a) 交叉四极照明光瞳;(b) 锚点周期(90nm);(c) 200nm 周期,Sbar 线宽 25nm;(d) 200nm 周期,Sbar 线宽 30nm

另外,第一根 Sbar 从 180nm 周期开始添加在两个主图形中间,在周期小于 270nm(三倍锚点/最小周期)时只能在两个主图形中间添加一根 Sbar,以便同时提高相邻两个主图形的工艺窗口。

(1) 从图 5.19(c)和图 5.19(d)中可以看出,Sbar 图形中心(峰值)距离主图形中心(峰值)的周期即为 Sbar 的最小周期 90nm。

(2) 从图 5.20(c)和图 5.20(d)中可以看出,Sbar 图形中心(峰值)距离主图形中心(峰值)的周期也为主图形周期的一半即为 100nm。

(3) 另外,即使 Sbar 的沟槽尺寸增加到 35nm,也完全不会被曝光到硅片上(Sbar 光强在阈值之下,此处未列图)。而对于前段明场、主图形为线条的栅极层次,当采用偶极照明时,15nm 的 Sbar 就已经开始被曝光到硅片上;当采用 CQ 或者 Quasar 照明时,Sbar 在 30nm 时也会被曝光在硅片上。显然,主图形为沟槽时,沟槽 Sbar 更不容易被曝光到硅片上。这是因为,PSM 掩模版会加强线条图形成像,导致相同尺寸时,线条比沟槽更容易曝光到硅片上。这需要工程师根据实际情况,减小某些线条图形的掩模版线宽尺寸。

2) 选择性线宽偏置(SSA)对光刻工艺窗口的影响

(1) 整个周期上线宽保持一致。

由上述可知,对于前段栅极层次来说,整个周期的线条线宽是一致的,均为 55nm。对于后段金属层次,若整个周期的沟槽线宽均为 45nm,仿真结果如图 5.21 所示。仿真条件如下:

锚点周期为 90nm, MCD 为 50nm, WCD 为 45nm。掩模版是透光率为 6% 的 PSM, 采用 XY 方向的偏振。光刻胶厚度为 90nm, 等效光酸扩散长度为 5nm, 显影方式为正显影。照明条件为 $NA=1.35$, $\sigma_{out}/\sigma_{in}=0.84/0.68$, Cross-Quasar(CQ)(交叉四极照明) 60° 。添加 Sbar, 最小周期为 90nm, Sbar 沟槽尺寸为 25nm。

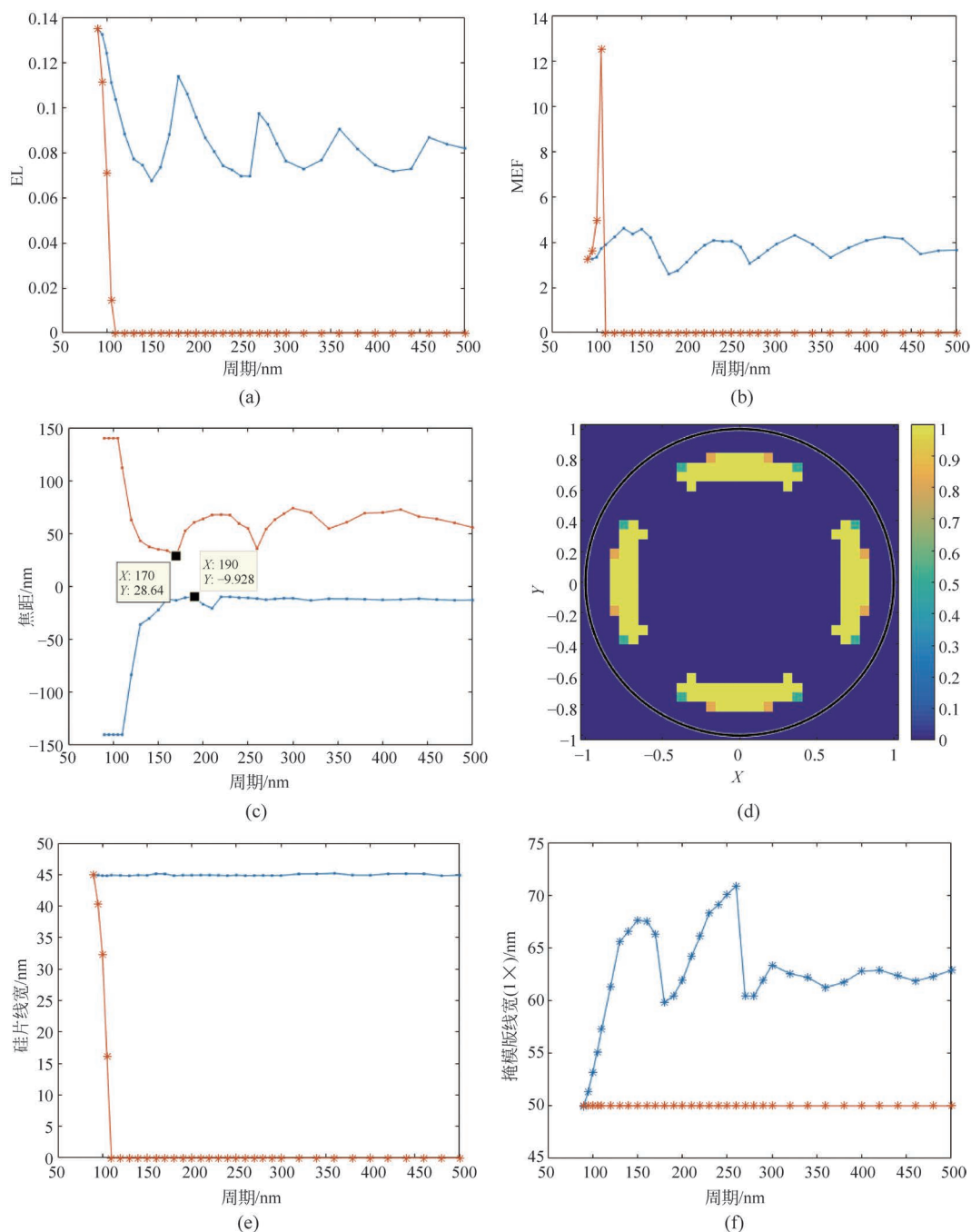


图 5.21 后段金属层次在交叉四极照明条件下、添加 Sbar、整个周期上线宽一致时,光刻工艺仿真结果示意图: (a) OPC 前后曝光能量宽裕度随周期变化; (b) OPC 前后掩模误差因子随周期变化; (c) 焦深随周期变化; (d) 照明光瞳; (e) OPC 前后硅片上线宽随周期变化; (f) OPC 前后掩模版线宽(1 倍率)随周期变化

图 5.21(a)~图 5.21(c)分别为光刻工艺中的三个重要的参数: EL、MEF 和 DoF。其中, EL 和 MEF 展示的是在 OPC 前后(蓝色为 OPC 之后)随周期的变化趋势, DoF 只有 OPC 之后随周期变化的趋势; 图 5.21(d)为照明光瞳; 图 5.21(e)为硅片上沟槽的线宽在 OPC 前后随周期的变化趋势, 可以看到, OPC 之后 WCD 在整个周期上均为 45nm; 图 5.21(f)为掩模版线宽(1 倍率)在 OPC 前后随周期的变化趋势, 可以看到, MCD 在 OPC 之前均为锚点的 MCD, 即 50nm, 在整个周期上最大的 OPC 补偿值约为 20nm。

基于 5.2 节所述的光刻工艺标准, 分析图 5.21 中的后段金属层次光刻工艺窗口。

① 只有在密集图形附近 EL 才勉强达到 13%, 从周期 120nm 开始一直到孤立图形的 EL 均低于 10%, 完全不能满足光刻工艺 $EL \geq 13\%$ 的要求。

② 对于 MEF: 在包含禁止周期在内的多个周期上都超过 4, 超出标准化 $MEF \leq 3.5$ 的要求。

③ 考虑了光刻胶形貌和线宽之后的公共焦深只有约 40nm, 这远不能达到图 5.21 中设计规则对应节点所需要的至少 80nm 的焦深的要求。

如前文所述, 从 180nm 周期可以添加第一根 Sbar, 每当周期增加 90nm, 就可以再多添加一根 Sbar。从图 5.21(a)、图 5.21(b)、图 5.21(f)中还可以看出, 每次添加 Sbar 之后, EL 都会有所上升, MEF 都会有所下降, OPC 修正量也会有所降低, 但是最终结果仍然不能满足量产对光刻工艺窗口的要求。

(2) 随着周期增加线宽不断增大。

当整个周期采用相同的线宽, 光刻工艺窗口无法满足量产需求时, 需要添加选择性线宽偏置(Selective Sizing Adjustment, SSA), 仿真结果如图 5.22 所示。仿真条件与图 5.21 完全一致, 只是随着周期的增加, 硅片上沟槽线宽也在不断增加, 其中一种 SSA 规则如下: 从 120nm 周期开始将硅片上沟槽线宽增加到 50nm, 从 140nm 周期开始将线宽增加到 55nm, 从 160nm 周期开始将线宽增加到 60nm, 从 200nm 周期开始将线宽增加到 65nm, 从 250nm 周期开始将线宽增加到 70nm, 从 300nm 周期开始一直到孤立图形将线宽增加到 75nm。

图 5.22(a)~图 5.22(c)分别为光刻工艺中的三个重要的参数: EL、MEF 和 DoF。其中, EL 和 MEF 展示在 OPC 前后(蓝色为 OPC 之后)随周期的变化趋势, DoF 只有 OPC 之后随周期变化的趋势; 图 5.22(d)为照明光瞳; 图 5.22(e)为硅片上沟槽的线宽在 OPC 前后随周期的变化趋势, 可以看到, OPC 之后 WCD 在整个周期上按照上述 SSA 规则逐渐增加(台阶式); 图 5.22(f)为掩模版线宽(1 倍率)在 OPC 前后随周期的变化趋势, 可以看到, 在 OPC 之前的 MCD 是在硅片沟槽目标(添加了 SSA)的基础上增加了掩模线宽偏置(5nm)。

基于 5.2 节所述的光刻工艺标准, 分析图 5.22 中添加 SSA 之后的光刻工艺窗口。

① 只有在没有办法添加 Sbar 的禁止周期附近 EL 小于 13%(约为 10%), 其余周期均能满足 $EL \geq 13\%$ 的要求。

② 对于 MEF: 只有在禁止周期附近略大于 3.5(<4), 其余周期均能满足 $MEF \leq 3.5$ 的要求。

③ 公共焦深 DoF 也达到 80nm, 完全满足光刻工艺的要求。

可见, 在添加了 SSA 之后, 后段金属层次的光刻工艺窗口(EL、MEF 以及 DoF)得到了大幅提升, 后段金属层次无法像前段栅极层次一样获得一个统一的硅片目标线宽。

图 5.23 展示了 OPC 后有无 SSA 时线宽随周期变化的对比, 可见添加了 SSA 后, OPC 之后的硅片线宽随着周期呈现出台阶式的变化, 证明成功添加了 SSA。同样地, 对于后段的通

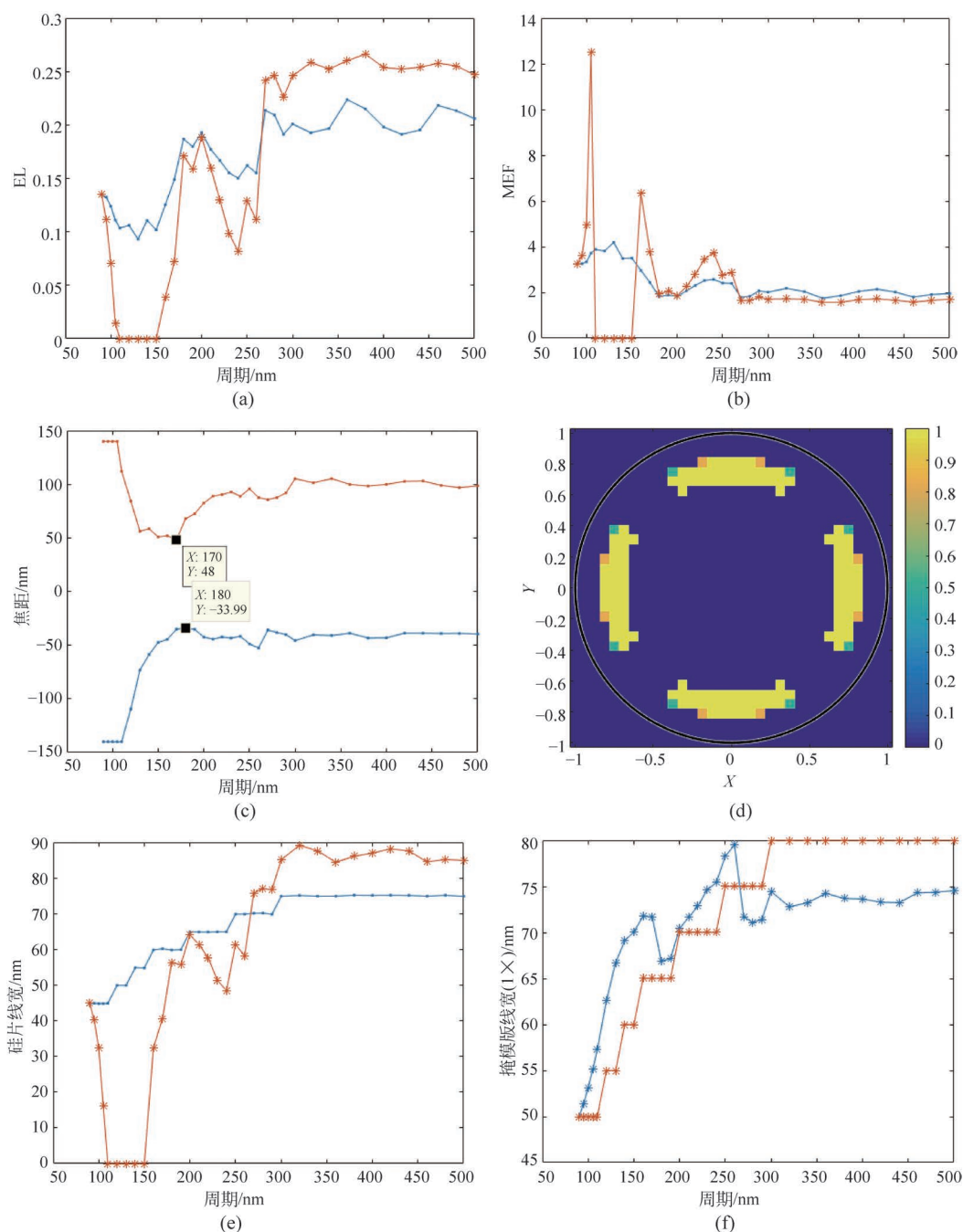


图 5.22 后段金属层次在交叉四极照明条件下、添加 Sbar、SSA 时,光刻工艺仿真结果示意图:(a) OPC 前后曝光能量宽裕度随周期变化;(b) OPC 前后掩模误差因子随周期变化;(c) 焦深随周期变化;(d) 照明光瞳;(e) OPC 前后硅片上线宽随周期变化;(f) OPC 前后掩模版线宽(1 倍率)随周期变化

孔层次,也需要添加合适的 SSA,以提升光刻工艺窗口。

另外,无论是否添加 SSA,从 DoF 图中都可以看出后段主图形为沟槽的金属层次,焦距在整个周期上向正向偏移,这与掩模版的三维散射效应有关。前面讨论主图形为线条的栅极层次时提到过,其焦距向负向偏移,与沟槽的焦距偏移方向相反。同时,在半密集到孤立图形这一范围(以添加 Sbar 的对比),沟槽的焦距偏移量要大于线条的焦距偏移量,这是因为线条图

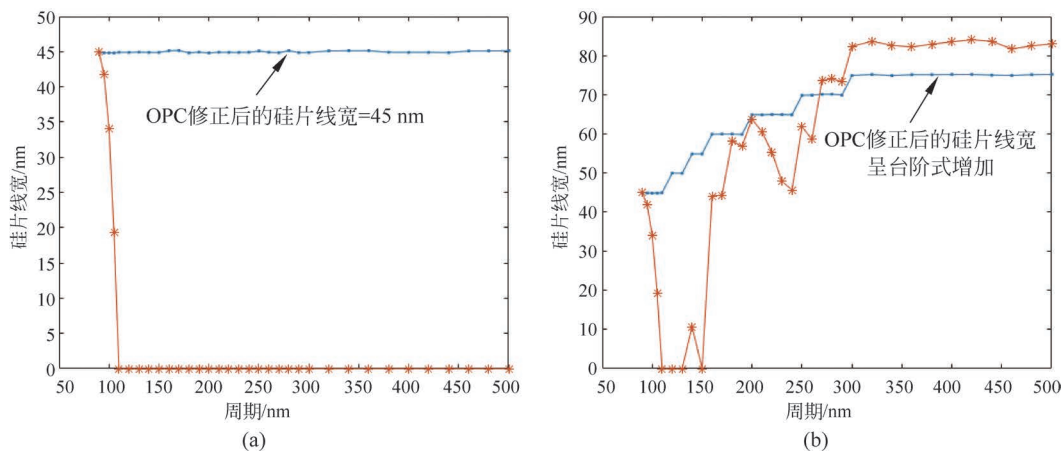


图 5.23 一维光刻空间像仿真结果中“线宽随周期变化”的对比：(a) 无 SSA；(b) 有 SSA

形到了大周期是明场照明,掩模三维效应变弱。

3) 不同照明光瞳对后段金属层次光刻工艺窗口的影响

前面讨论过,光刻工艺仿真过程中,照明光瞳的选择也至关重要。不同的设计规则,需要选择合适的照明光瞳,以获得满足要求的光刻工艺窗口。本节多次提到,交叉四极照明(CQ)可以兼顾两个方向上的设计规则。如图 5.22 所示,对于后段金属(沟槽)层次,当最小双向设计规则周期为 90nm 时,除了禁止周期附近,CQ 照明完全可以使得光刻工艺的重要参数 EL、MEF、DoF 在其他周期上均能满足量产的需求。由于是双向设计规则,只对一个方向图形的光刻工艺窗口有利的偶极照明肯定不适用在本层次。因此,本节会采用另外两种照明方式:环形照明和四极照明,来说明为什么 CQ 照明对于周期较小的双向设计规则的后段金属层次来说是最佳选择。其中,环形照明的光瞳为 $NA=1.35, 0.9/0.7$, CQ 照明的光瞳为 $NA=1.35, 0.9/0.7, Quasar 45^\circ$ 。在这两种光瞳照明下,即使沟槽 Sbar 线宽为 30nm 时,也不会有曝光到硅片上的风险(未列出)。在这两种光瞳仿真过程中,选择添加的 Sbar 沟槽线宽为 25nm,最小周期为 90nm。

(1) 环形照明条件下的仿真结果。

首先是环形照明条件下,后段金属层次的仿真结果,如图 5.24 所示。环形照明条件为 $NA=1.35, 0.9/0.7$,除照明光瞳外,其余仿真条件与图 5.22 中的均相同。基于 5.2 节所述的光刻工艺标准,分析图 5.24 中环形照明条件下的光刻工艺窗口。

- ① 密集图形的 EL 只有约 10%,禁止周期的 EL 也明显小于 13%。
- ② 对于 MEF: 密集与禁止周期附近的 MEF 超过 4,大于光刻工艺的标准($MEF \leq 3.5$)。
- ③ 公共焦深刚刚满足这一层次需要达到的 80nm 的要求。

以上仿真结果说明,NA 为 1.35, σ_{out}/σ_{in} 为 0.9/0.7 的环形的照明方式无法满足最小周期为 90nm 的双向设计规则的金属层次对光刻工艺窗口的要求。

(2) 四极照明条件下的仿真结果。

图 5.25 中是四极照明条件($NA=1.35, 0.9/0.7, Quasar 45^\circ$)下光刻工艺窗口的仿真结果和照明光瞳,除照明光瞳外,其余仿真条件与图 5.22 中的均相同。基于 5.2 节所述的光刻工艺标准,分析图 5.25 中四极照明条件下的光刻工艺窗口。

- ① 密集图形的 EL 远小于 13%(约为 5%),禁止周期的 EL 也明显小于 13%。

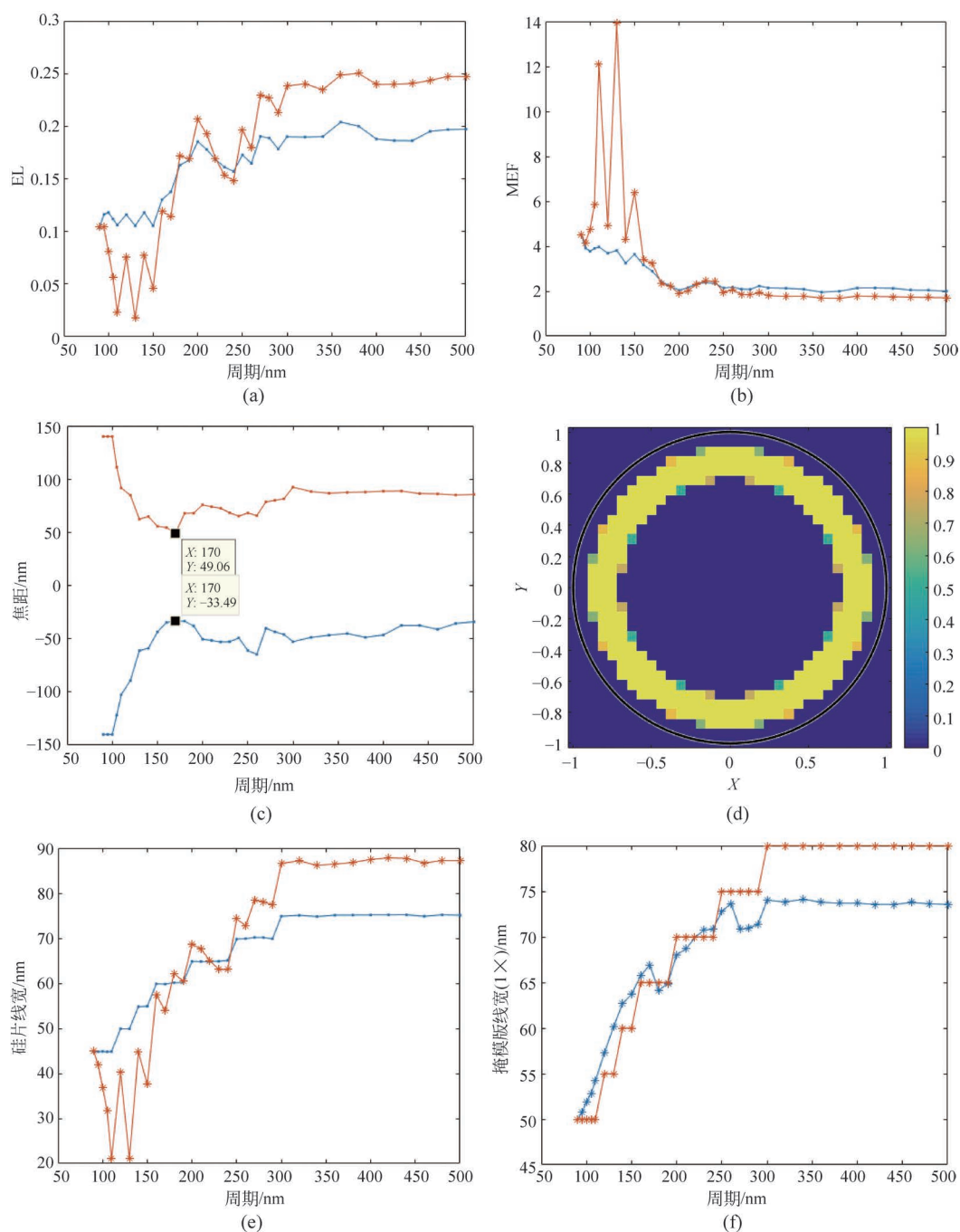


图 5.24 后段金属层次在环形照明条件下、添加 Sbar、SSA 时,光刻工艺仿真结果示意图:(a) OPC 前后曝光能量宽裕度随周期变化;(b) OPC 前后掩模误差因子随周期变化;(c) 焦深随周期变化;(d) 照明光瞳;(e) OPC 前后硅片上线宽随周期变化;(f) OPC 前后掩模版线宽(1 倍率)随周期变化

② 对于 MEF: 密集图形的 MEF 远超工艺标准的 3.5 (约为 10), 禁止周期附近的 MEF 也超过 4。

③ 公共焦深超过工艺标准的 80nm (约为 90nm)。

尽管 DoF 超过工艺标准, EL 与 MEF 与工艺标准差距较大, 这说明四极的照明方式也无法满足最小周期为 90nm 的双向设计规则的金属层次对光刻工艺窗口的要求。

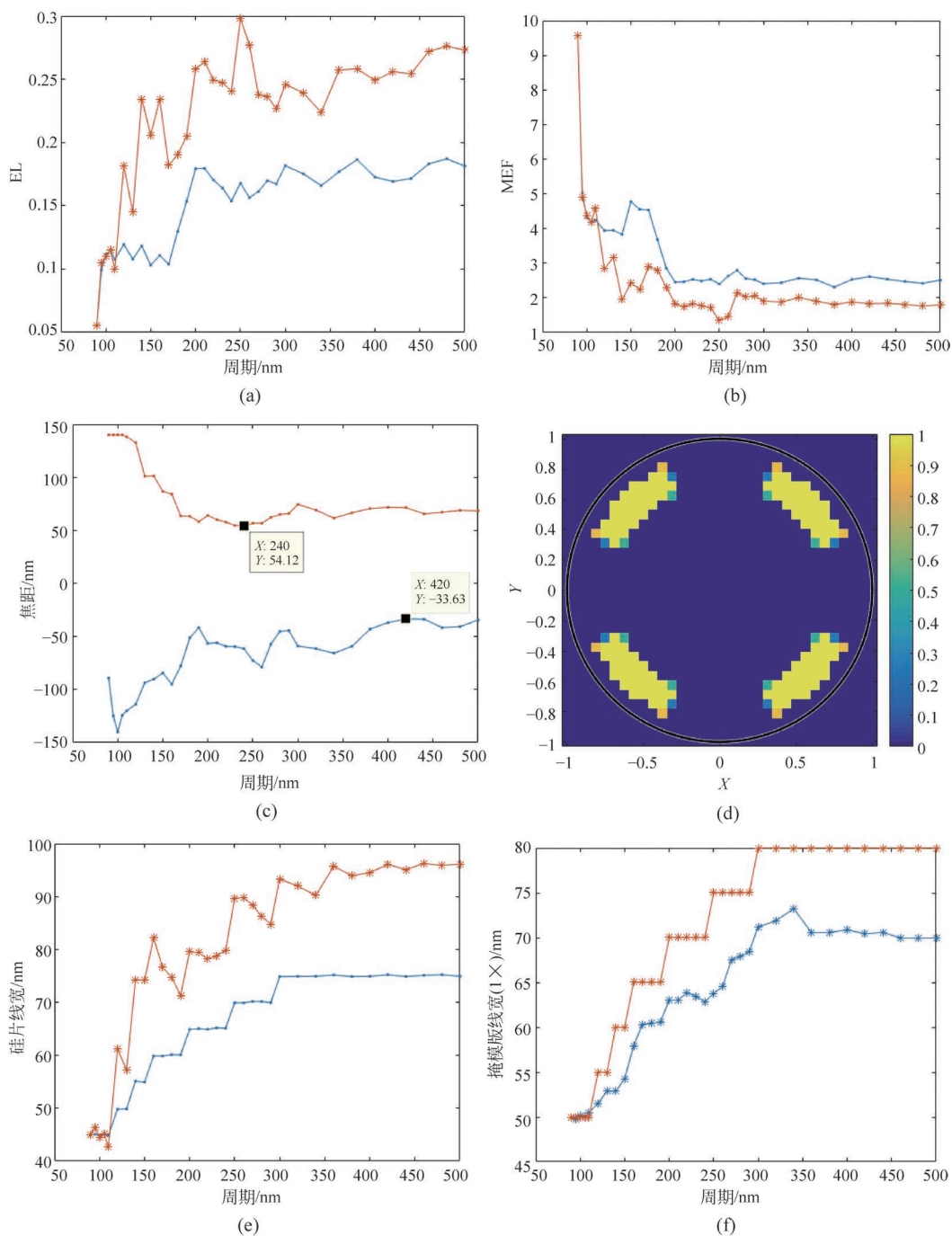


图 5.25 后段金属层次在四极照明条件下、添加 Sbar、SSA 时,光刻工艺仿真结果示意图: (a) OPC 前后曝光能量宽裕度随周期变化; (b) OPC 前后掩模误差因子随周期变化; (c) 焦深随周期变化; (d) 照明光瞳; (e) OPC 前后硅片上线宽随周期变化; (f) OPC 前后掩模版线宽(1 倍率)随周期变化

由第 2 章可知,随着设计规则中最小周期的不断缩小,照明条件由传统的部分相干照明,依次发展到离轴的环形照明、四极照明、交叉四极照明与偶极照明。对于环形照明和四极照明,只有在设计规则(双向)比衍射极限大得多的情况下才适用。对于较为接近(有一定距离)衍射极限的(如 90nm 最小周期)、采用双向设计规则的后段金属层次,交叉四极照明中两组偶

极照明可以分别加强两个方向设计规则的成像对比度,使得光刻工艺窗口满足工业标准。

5.3.3 仿真举例照明光瞳对线端-线端的影响

5.3.2 节中的仿真主要针对一维整个周期的图形,对于不同的设计规则,需要选择不同的照明条件。例如,28nm 节点中对工艺窗口要求较高的前段栅极,采用的是单向设计规则配合偶极照明条件;而对工艺窗口要求低一些的后段金属层次(例如,最小设计规则周期为 90nm 的节点),仍然可以采用双向设计规则配合交叉四极照明。在先进技术节点前段栅极中,还会引入一层剪切层次,用来切开会不能相连的晶体管和曝光到硅片上的 Sbar。那么,什么时候开始采用剪切层切开会不能相连的晶体管呢?当单次曝光形成的线端-线端的尺寸较大,无法满足设计规则的要求时,就需要引入额外的剪切层,实现不相连晶体管的断开,且断开的距离较小。

本节主要针对二维线端-线端图形,通过仿真讨论偶极照明条件中的张角对线端-线端的影响。另外,本节还会讨论 28nm 技术节点中前段栅极和最小设计规则为 90nm 周期的后段金属层次中,通过一次曝光可以实现的最小线端-线端的尺寸(光刻后)。若设计规则继续缩小,无法通过单次曝光实现线条或者沟槽的短距离分隔,则需要引入额外的剪切层次。

1. 照明条件中张角的作用

首先讨论照明条件中张角的作用,先以采用偶极照明条件的 28nm 技术节点前段栅极层次为例。前面提到,这一层次的锚点周期设置在 107nm, MCD 为 50nm(1 倍率), WCD 为 55nm。照明条件为 NA 1.35,采用 XY 方向的偏振。掩模版是透光率为 6% 的相移掩模版。光刻胶厚度为 90nm,等效光酸扩散长度为 5nm,显影方式为正显影。仿真结果如图 5.26 所示。仿真采用 X 方向的偶极照明条件,其中, σ_{out}/σ_{in} 为 0.8/0.6,张角分别为 115°、90°、60°、30°,即偶极照明由弱到强。图 5.26(e)中总结了切线 1 以及切线 2 的线宽以及曝光能量宽裕度。具体结果如下。

(1) 对于切线 1 处的密集线条图形来说:从图 5.26(e)中可以看出,随着照明条件从弱偶极(115°)变成强偶极(30°)照明,曝光能量宽裕度不断增加,且都超过工艺窗口要求的 18%。这也验证了前面提到的,对于 Y 方向图形, X 方向偶极照明越强,镜头收入的 1 级衍射光越多,成像对比度越高。

(2) 对于切线 2 处线条的线端-线端来说:只要 $EL \geq 10\%$ 即可满足量产的需求。因此,在这一标准工艺窗口下(通过调整掩模版上线端-线端尺寸,偶极照明张角越小,掩模版线端-线端尺寸越大),随着照明条件从弱偶极变成强偶极,仿真后线端-线端的尺寸在不断增加,并且光刻胶线端处也变得有点尖锐。

由仿真结果可以看出, X 方向的偶极照明有利于 Y 方向图形的工艺窗口。根据经验表明,对于同样的掩模版间隙宽度,偶极照明张角越小,线端-线端尺寸也越小,但是会损失线端对比度。在保证线端-线端对比度达到工艺标准(如 10%)的情况下,偶极照明张角越大,线端-线端尺寸可以做得越小。另外,较小的张角不仅会造成线端-线端尺寸(线端工艺窗口达到要求时)变大,且形貌也变尖锐,这样的光刻胶线条形貌经过后续的刻蚀之后,会造成更多的线端缩短,导致最终断开的栅极之间的间隙更大。

前面以周期 107nm 为例时,线条的线端-线端的尺寸以及形貌随着偶极照明的强弱变化并没有非常明显的变化。接下来,以周期 84nm 为例观察偶极照明张角对线条线端-线端尺寸和形貌的影响,这一周期为某些代工厂 14nm 技术节点前段栅极层次的最小设计规则。具体仿真条件如下:周期为 84nm, MCD 为 39nm(1 倍率), WCD 为 39nm。照明条件为 NA 1.35,

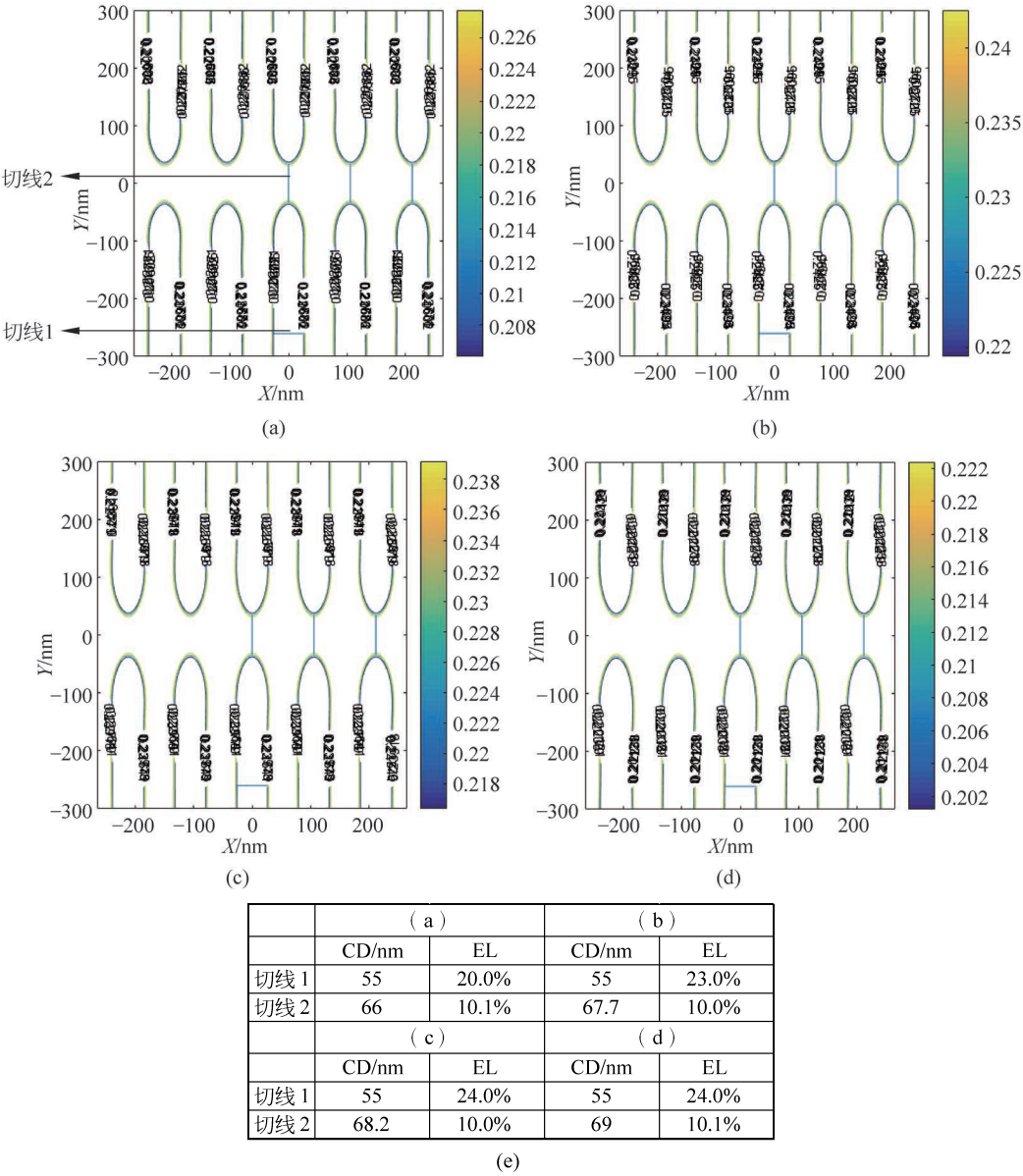


图 5.26 前段栅极层次中周期为 107nm 的图形,偶极照明张角对线端-线端的影响: (a) 偶极 115°; (b) 偶极 90°; (c) 偶极 60°; (d) 偶极 30°; (e) 切线 1 与切线 2 处的线宽与曝光能量宽裕度总结。

采用 XY 方向的偏振。掩模版是透光率为 6% 的相移掩模版。光刻胶厚度为 90nm, 等效光酸扩散长度为 5nm, 显影方式为正显影。仿真结果如图 5.27 所示。仿真采用 X 方向的偶极照明条件, 由于锚点周期较小, 因此需要采用较大的 σ_{out}/σ_{in} : 0.97/0.81。偶极张角分别为 115°、90°、60°、30°。图 5.27(e) 中同样总结了切线 1 以及切线 2 处的线宽以及曝光能量宽裕度。具体结果如下。

(1) 对于切线 1 处的密集线条图形来说: 随着照明条件从弱偶极(115°)变成强偶极(30°)照明, 曝光能量宽裕度不断增加, 且变化非常明显。由于周期太小, 一定需要强偶极照明(张角接近 60°)才能实现 $EL \geq 18\%$ 。对于周期非常接近衍射极限的图形, 可以更好地验证: 偶极照明越强, 镜头收入的衍射级越多, 成像对比度越高这一结论, 同时内径外径的平均值(离轴角)

需要更大才能保证 1 级(或者-1 级)光被投影物镜有效地收集。

(2) 对于切线 2 处线条的线端-线端来说: 只要 $EL \geq 10\%$ 即可满足量产的需求。因此, 在这一标准工艺窗口下(通过调整掩模版上线端-线端尺寸, 偶极照明张角越小, 掩模版线端-线端尺寸越大), 随着照明条件从弱偶极变成强偶极, 线条线端-线端的尺寸从 82nm 左右增加到 100nm 以上, 并且光刻胶线端处明显变得非常尖锐。这样的光刻胶线条形貌经过后续的刻蚀之后, 会造成额外的几十纳米的线端缩短。

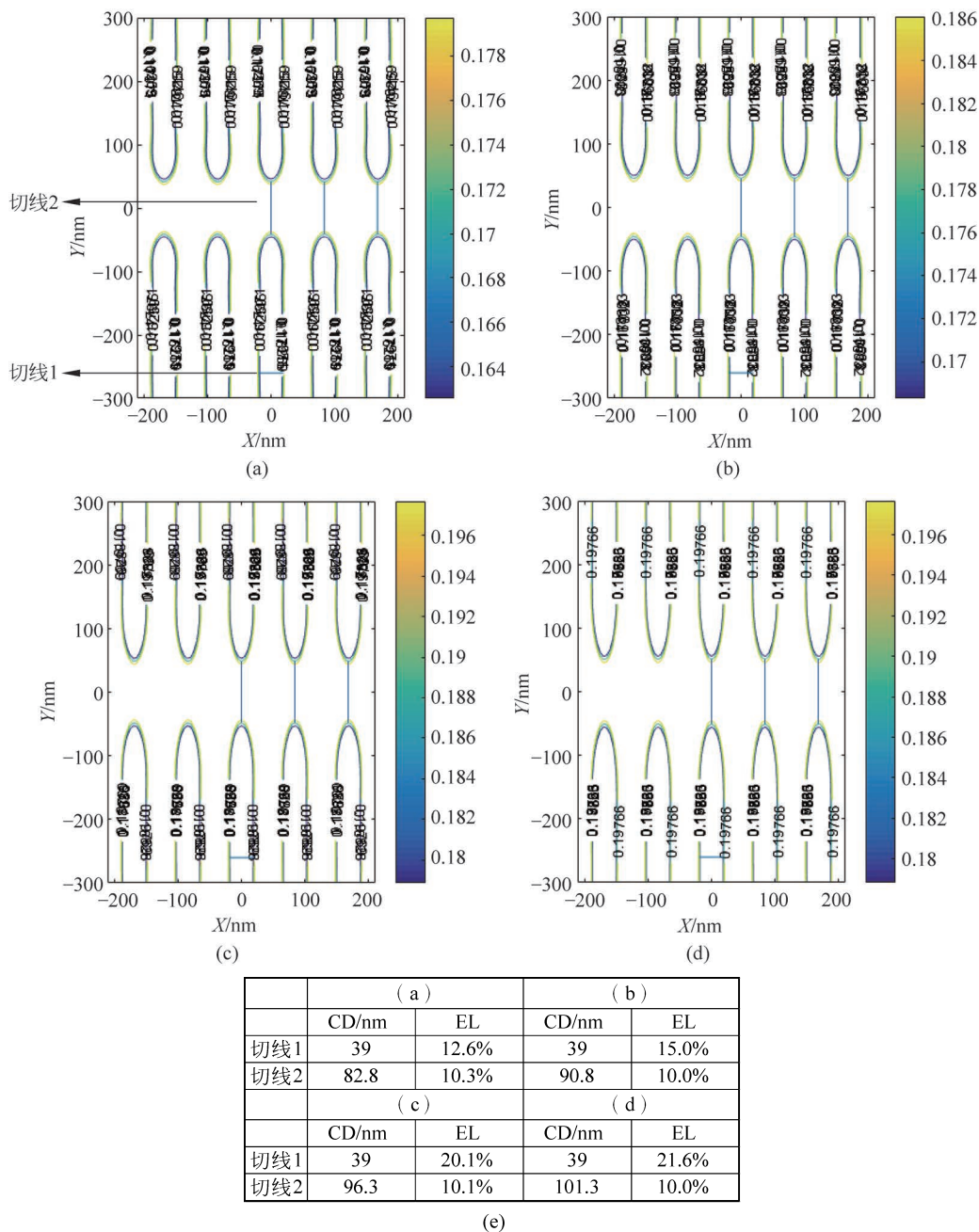


图 5.27 对于周期为 84nm 的前段线条图形, 偶极照明张角对图形的影响: (a) 偶极 115° ; (b) 偶极 90° ; (c) 偶极 60° ; (d) 偶极 30° ; (e) 切线 1 与切线 2 处的线宽与曝光能量宽裕度总结。

因此,如果主图形的周期太小,需要采用强偶极照明以获取足够的主图形的光刻工艺窗口,当需要获得较小的线端-线端尺寸时,则需要通过增加额外的剪切层次来实现。由于光学邻近效应,通过曝光自然形成的线端是圆角(甚至尖角),而通过剪切层形成的线端是直边,且可以做到很小的线端-线端尺寸。自然形成的线端与剪切形成的线端示意图可以分别参考图 3.28(b)和图 3.28(a)。

2. 先进技术节点前段栅极层次最小线端-线端尺寸讨论

1) 偶极照明条件下的仿真结果

讨论完张角对线端-线端尺寸的影响之后,继续讨论周期为 117nm 的前段栅极通过一次曝光可以实现的最小线端-线端的仿真实况。其中,MCD 为 50nm(1 倍率),WCD 为 55nm。照明条件为 NA 1.35, $\sigma_{\text{out}}/\sigma_{\text{in}}=0.8/0.6$,偶极照明,张角为 115° ,采用 XY 方向的偏振。掩模版是透光率为 6% 的相移掩模版。光刻胶厚度为 90nm,等效光酸扩散长度为 5nm,显影方式为正显影。通过对线端添加合适的榔头(Hammer)并调整掩模版上线端-线端的距离,在保证线端-线端的 EL 达到 10% 的情况下,得到最终的仿真结果,如图 5.28 所示。图 5.28(a)为偶极

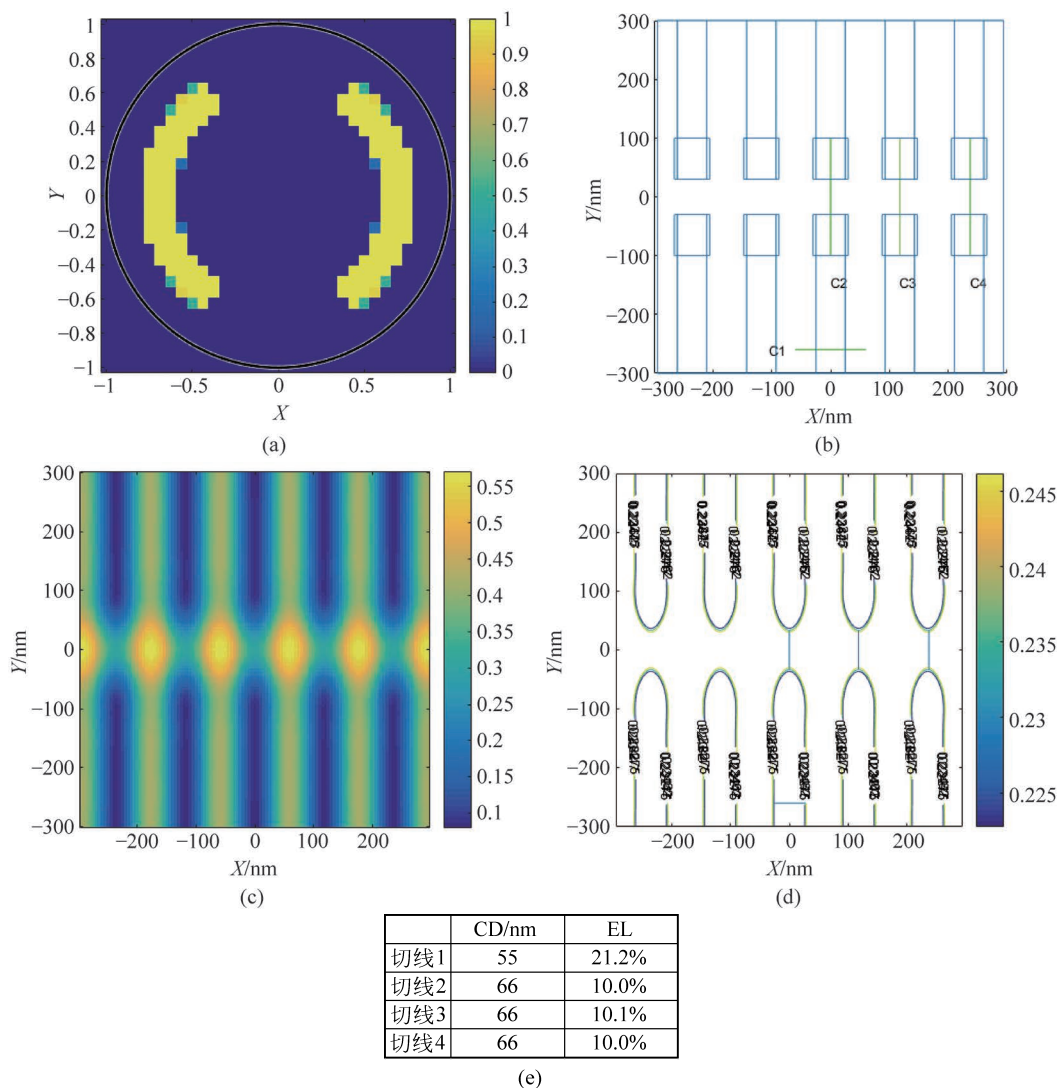


图 5.28 前段栅极层次,周期 117nm 图形,在弱偶极照明条件下最小线端-线端尺寸仿真结果示意图:
(a) 偶极照明光瞳;(b) 掩模版;(c) 空间像光强仿真结果;(d) 轮廓图(Contour image);(e) CD 和 EL 数据总结。

照明光瞳；图 5.28(b)为掩模版，其中标记了切线的 4 个位置，切线 1(C1)为密集线条图形处，切线 2~4(C2~C4)为线条的线端-线端图形处；图 5.28(c)为空间像光强仿真结果；图 5.28(d)为以 C1 处为锚点(线条线宽为 55nm)时的轮廓图(Contour Image)；图 5.28(e)为 4 个切线处的 CD 和 EL 数据。具体结果如下。

(1) 当密集线条图形线宽做到 55nm 时，其 EL 可以满足工艺标准的要求，即达到 18%。

(2) 当线端-线端的 EL 达到 10%的最低工艺标准时，弱偶极照明条件(115°张角)下可以做到的最小线端-线端尺寸约为 66nm。

(3) 由于采用正显影工艺，掩模版中的图形需要变成硅片上的光刻胶线条，此部分在曝光过程中仅有 6%的光通过，这部分很少的光还会被隔壁沟槽衍射过来的光中和一部分。因此，此部分在如图 5.28(c)所示的空间像分布中的光强很弱。

2) 环形照明条件下的仿真结果

由于偶极张角已经很大(115°)，如果想继续减小线端-线端的尺寸，则可以采用环形或者交叉四极照明，此处以环形照明为例。其中，掩模版中的榔头(Hammer)尺寸(长、突出主图形的宽)与图 5.28 中所示相同，同时根据环形照明调整了掩模版上线端-线端的距离。除照明条件采用环形之外，其余所有设置均与图 5.28 中弱偶极照明条件下的仿真设置相同，仿真结果如图 5.29 所示，其中，图 5.29(a)为照明光瞳，图 5.29(b)为掩模版，图 5.29(c)为空间像，图 5.29(d)为轮廓图，图 5.29(e)为数据总结。具体结果如下。

(1) 采用环形照明时，周期为 117nm 的密集图形的 EL(约为 15%)已经无法满足光刻工艺标准的需求($EL \geq 18\%$)。

(2) 最小的线端-线端尺寸也仅仅缩小到了约 61nm，但是，线端显然比图 5.28 中所示的更圆滑(更趋向于方形)。

由 5.3.2 节可知，对于 28nm 节点前段栅极层次，必须采用偶极照明才能使得光刻工艺窗口符合量产要求。其他照明条件，如交叉四极照明、四极照明以及本节所述环形照明均不能满足要求，尽管这些照明条件中的有些可以获得更小的线端-线端尺寸和更圆滑的线端形貌。

由 5.3.3 节可知，对于周期在 107nm 左右的栅极，在保证密集图形的 EL 达到 18%的前提下，其光刻之后最小线端-线端的尺寸也在 66nm 左右。若有更小尺寸的线端-线端的需要，则只能在更大的周期中实现，或者通过剪切层实现。

3. 先进技术节点后段金属层次最小线端-线端尺寸讨论

这一部分讨论先进技术节点后段金属层次沟槽线端-线端的最小尺寸，越小的周期越不容易做到更小尺寸的线端-线端。因此，针对金属层次中最小周期 90nm 的图形，讨论这一周期下最小沟槽的线端-线端尺寸。其中，密集的主图形在掩模版上的沟槽尺寸为 50nm(1 倍率)，需要做到的 WCD 为 45nm。由 5.3.2 节可知，由于 90nm 周期时的设计规则仍然是双向设计规则，所以照明条件必须选择交叉四极照明，具体仿真条件如下：掩模版是透光率为 6%的 PSM，光刻胶厚度为 90nm，等效光酸扩散长度为 5nm，显影方式为正显影。照明条件为 $NA = 1.35$, $\sigma_{out}/\sigma_{in} = 0.84/0.68$, Cross-Quasar(CQ)(交叉四极照明)60°。通过对线端添加合适的榔头(Hammer)并调整掩模版上线端-线端的距离，在保证线端-线端的 EL 达到 10%的情况下，得到最终的仿真结果，如图 5.30 所示。图 5.30(a)为照明光瞳；图 5.30(b)为掩模版，其中标记了切线的 4 个位置，切线 1(C1)为密集沟槽图形处，切线 2~4(C2~C4)为沟槽的线端-线端图形处；图 5.30(c)为空间像仿真结果；图 5.30(d)为以 C1 处为锚点(沟槽线宽为 45nm)时的轮廓图(Contour Image)；图 5.30(e)为 4 个切线处的 CD 和 EL 数据。具体结果如下。

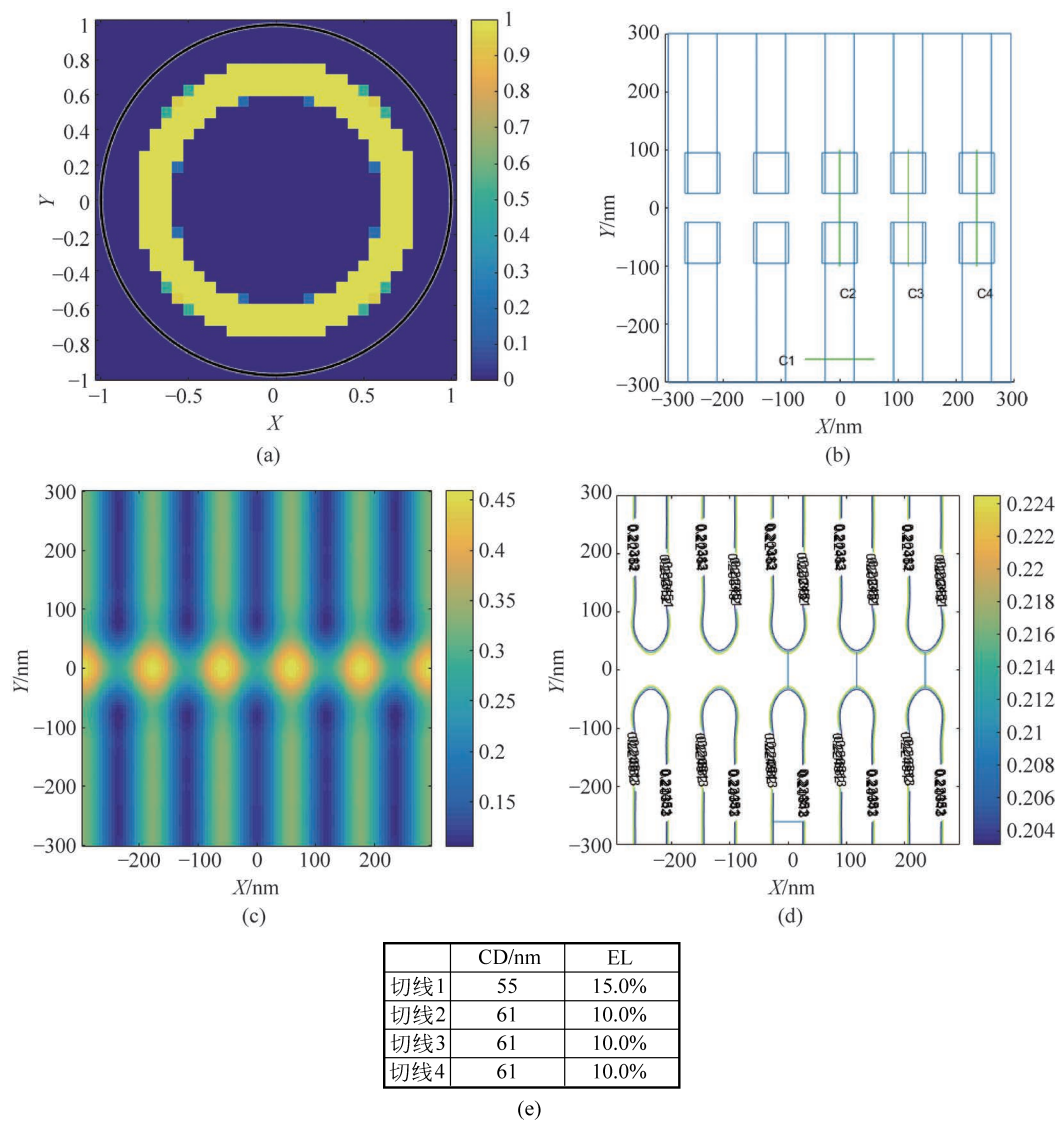


图 5.29 前段栅极层次,周期 117nm 图形,在环形照明条件下最小线端-线端尺寸仿真结果示意图:(a) 环形照明光瞳;(b) 掩模版;(c) 空间像光强仿真结果;(d) 轮廓图(Contour image);(e) CD 和 EL 数据总结。

(1) 当密集沟槽图形做到 45nm 时,其 EL 可以满足工艺标准的要求,即达到 13%。

(2) 当线端-线端的 EL 达到 10%的工艺最低标准时,交叉四极照明可以做到的最小尺寸约为 60nm,且线端处较圆滑。

(3) 由于采用正显影工艺,掩模版中的图形需要变成硅片上光刻胶被显影去掉的沟槽图形(后续填充金属),因此此部分在如图 5.30(c)所示的空间像中是透光部分,光强很强。

由前面可知,强偶极照明对缩小线端-线端尺寸非常不利,而环形或者交叉四极照明有利于缩小线端-线端的尺寸。由图 5.30(e)可知,对于考虑双向设计规则的后段金属层次,90nm 周期可以做到的最小沟槽线端-线端尺寸约为 60nm。

综上所述,在以上仿真结果的基础上,若需要进一步减小主图形的周期时,在保证主图形以及线端-线端工艺窗口达到工艺标准的情况下,对应线端-线端的尺寸(尤其是刻蚀后)会有所增加,需要工程师根据实际设计规则来确定是否需要增加剪切层次。

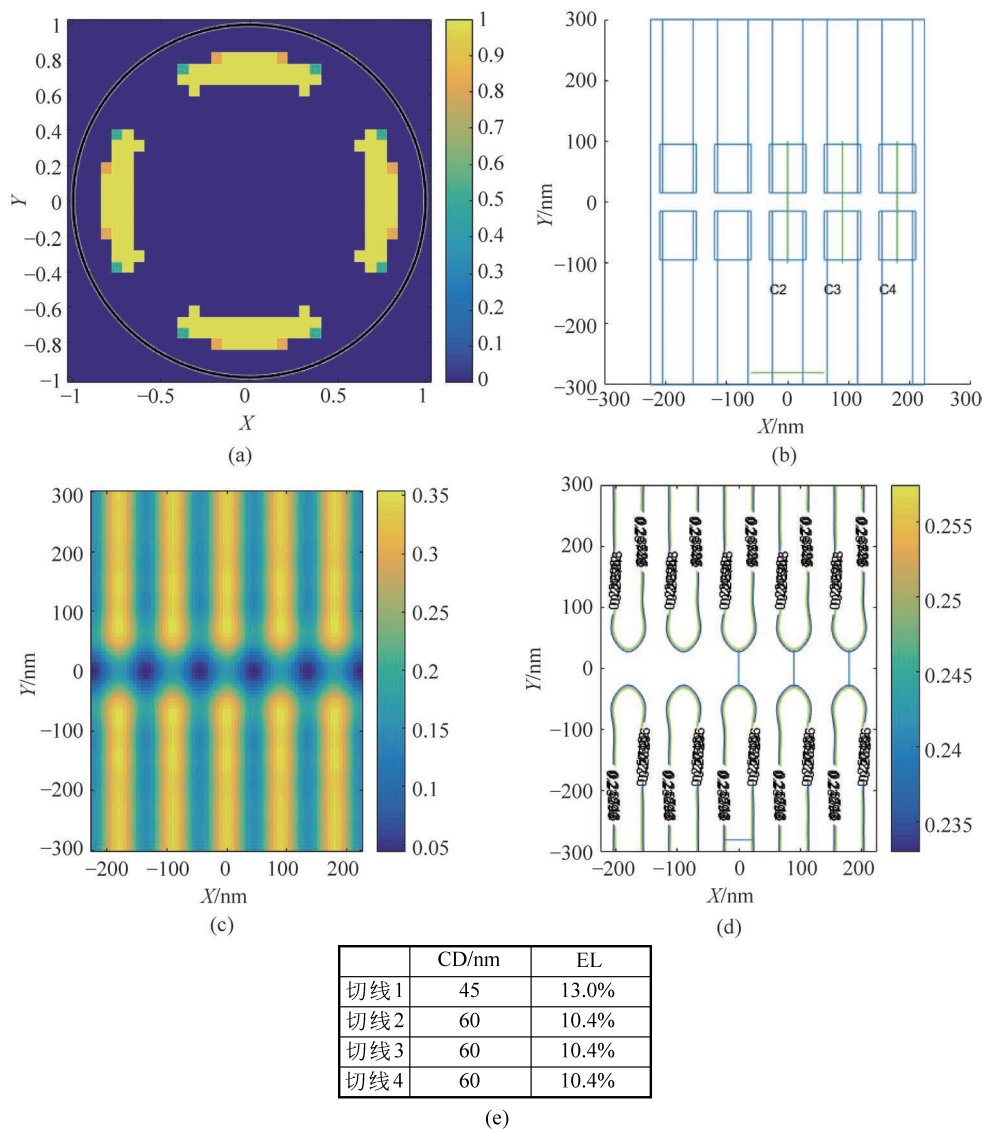


图 5.30 后段金属层次,周期 90nm 图形,在交叉四极照明条件下最小线端-线端尺寸仿真结果示意图:(a)交叉四极照明光瞳;(b)掩模版;(c)空间像光强仿真结果;(d)轮廓图(Contour image);(e)CD 和 EL 数据总结。

(1) 对于周期约为 100nm 的前段线条图形,如果线端-线端尺寸需要小于 65nm(光刻),一般都需要通过增加剪切层来实现。

(2) 对于 14nm 技术节点栅极层次来说,其单次曝光实现的最小周期一般为 78~90nm,根据如图 5.27 所示的仿真结果,这么小的栅极周期在刻蚀后的线端-线端的尺寸可能要大于 150nm。因此,必须要配合额外的剪切层次。

(3) 周期继续缩小到小于光刻机的衍射极限时,一般通过 SADP 和 SAQP 配合必要的剪切层实现前段线条层次的工艺。

从 28nm 技术节点开始,前段栅极开始采用单向设计规则,需要通过选择合适的偶极照明条件的张角,既能保证整个周期上的光刻工艺窗口(如 EL、MEF、DoF 等)满足量产需要,又能兼顾较小的线端-线端的尺寸。而到了 10nm 技术节点,后段第一层金属(M1)也开始需要采

用单向设计规则,沟槽的线端-线端随着偶极张角的变化规律与线条的类似。因此,当周期较小的时候,还是尽量通过选择合适的偶极照明的张角,在保证主图形的 EL 达到要求的前提下,采用单次曝光实现最小的沟槽线端-线端尺寸,以期尽量减少金属层次剪切层次数目,节省掩模版以及工艺成本。

本章小结

本章通过各技术节点的工艺细节,介绍各技术节点中引入的提高工艺窗口的新技术。对于任意一个技术节点,各光刻层次的工艺窗口都需要满足量产的需求,即标准化的光刻工艺。本章以先进技术节点的前段栅极以及后段金属层次为例,说明研发过程中可能碰到的问题以及解决的方法,例如,添加合适的 Sbar、SSA 以提高光刻工艺窗口,选择合适的照明光瞳类型、确认光瞳中各项参数等。本章还着重讨论了不同照明光瞳和其中参数对线端-线端尺寸、形貌的影响。另外,本章涉及很多工艺仿真,仿真结果是为了说明针对已有设计规则,如何选择光刻工艺条件的一般方法,仿真条件与结果并不一定是对应设计规则的最优化的仿真条件和结果,仅供参考。通过以上内容的讨论,期望读者可以了解各技术节点的基本工艺性能,可以根据实际碰到的具体问题找出提高工艺窗口的方案。

参考文献



参考文献