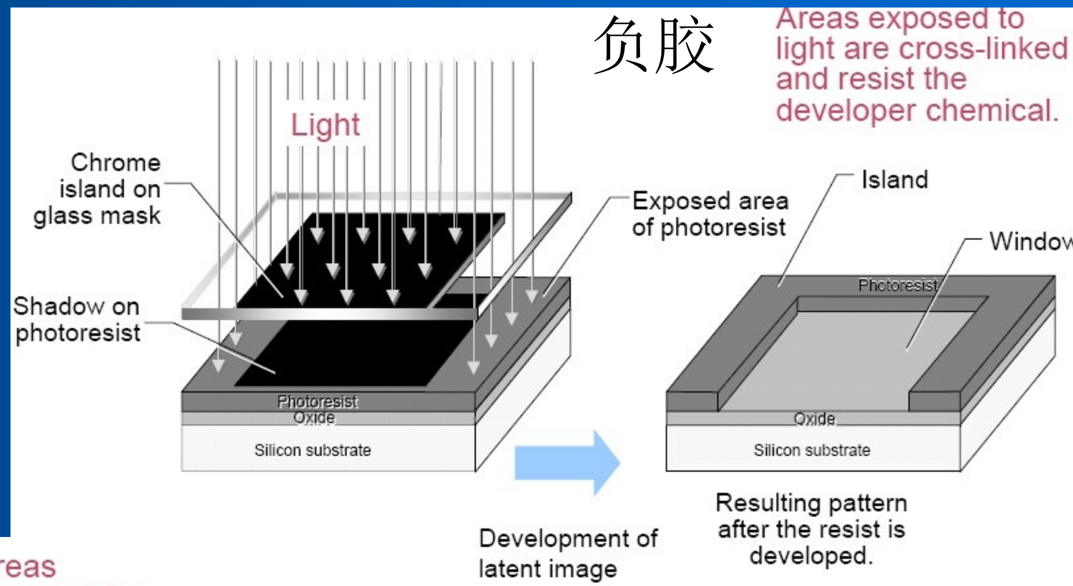
第四章 光刻原理

光刻胶

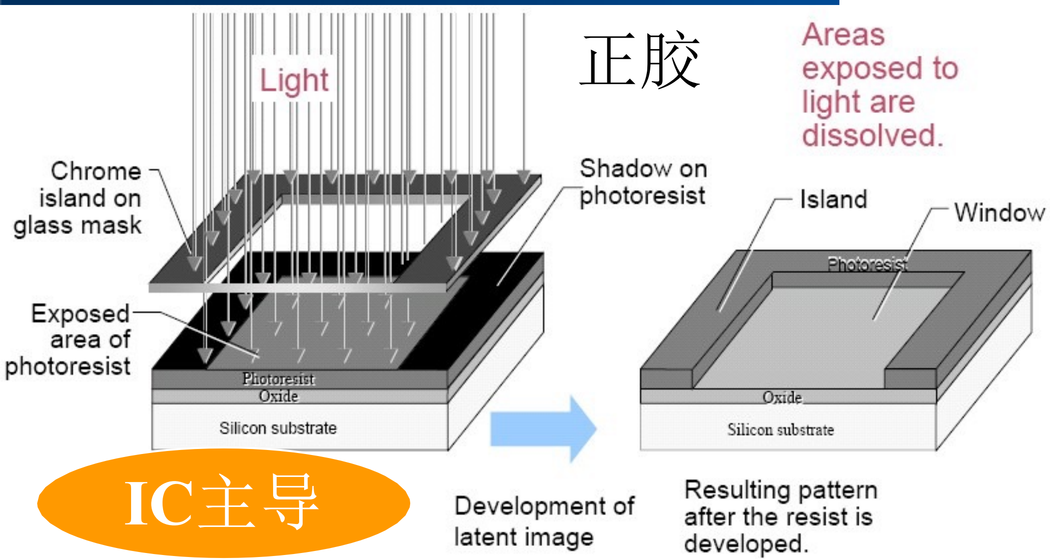
光刻胶的作用：对于入射光子有化学变化，保持潜像至显影，从而实现图形转移。

空间图像—>潜像显影

负胶



正胶



IC主导

灵敏度：单位面积的胶曝光所需的光能量。**mJ/cm²**

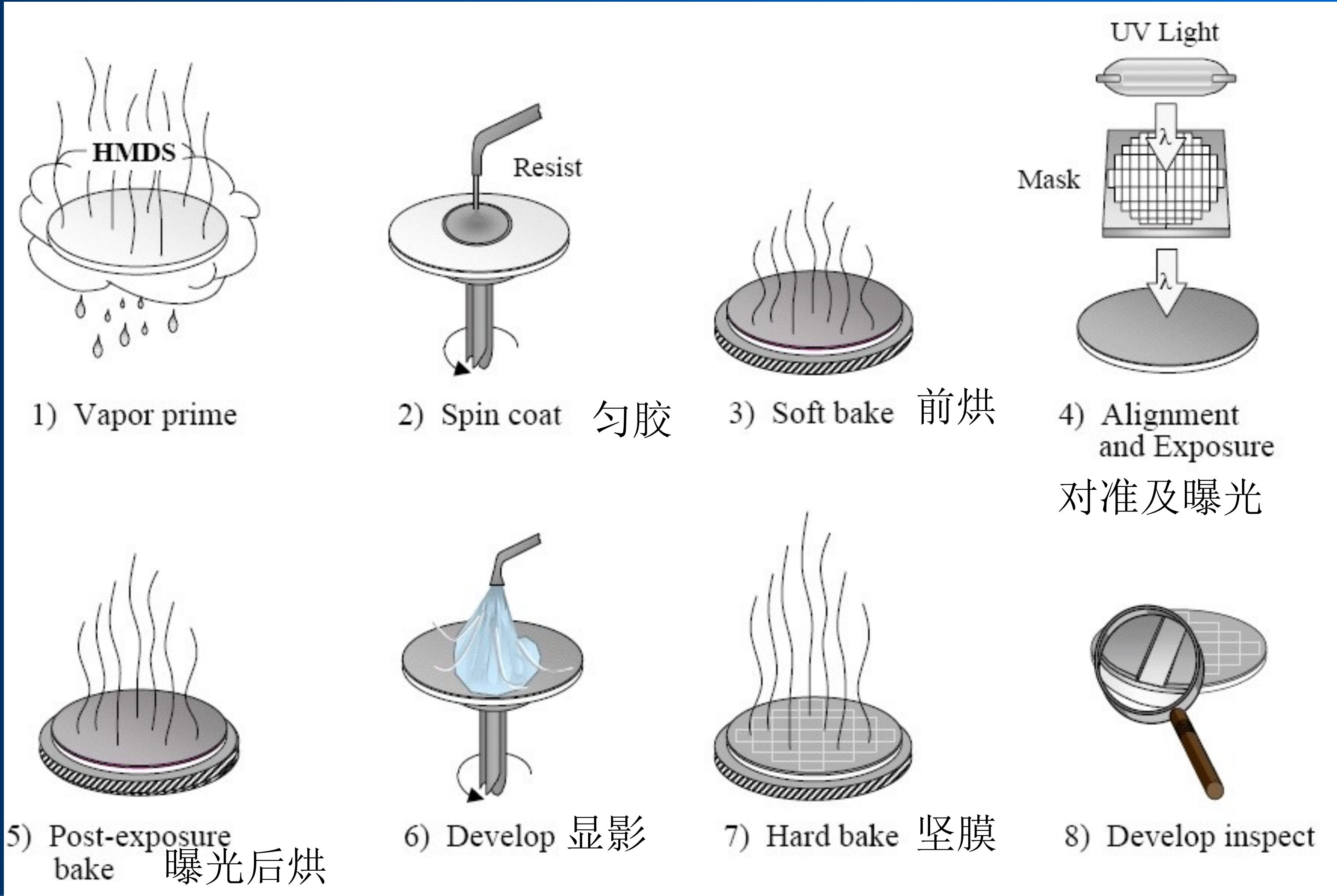
抗蚀性：刻蚀和离子注入

光刻胶基本构成：

树脂+光敏材料PAC+溶剂

第四章 光刻原理

光刻步骤简述



第四章 光刻原理

g线和i线光刻胶的组成
（正胶－positive photoresist）

a) 基底：树脂 是一种低分子量的酚醛树脂 (novolac)
本身溶于显影液，溶解速率为15nm/s。

b)光敏材料（PAC－photoactive compounds)
DNQ 重氮萘醌 (diazonaphthoquinone)
•DNQ不溶于显影液，在显影液中的溶解速率为 1－2 nm/sec
•光照后，DNQ可以自我稳定（Wolff重排列），成为溶于显影液的烃基酸（TMAH四甲基氢氧化铵——典型显影液）
光照后，光刻胶在显影液中的溶解速度为**100－200nm/s**

c)溶剂 是醋酸丁脂、二甲苯、乙酸溶纤剂的混合物，用于调节光刻胶的粘度。

前烘后膜上树脂 : PAC＝1:1

第四章 光刻原理

负胶 (Negative Optical Photoresist)

a) 基底：合成环化橡胶树脂
(cyclized synthetic rubber risin)
对光照不敏感，但在有机溶剂如甲苯和二甲苯中溶解很快

负胶显影液

b) 光敏材料 **PAC**： 双芳化基 (bis-arylazide)
当光照后，产生交联的三维分子网络，使光刻胶在显影液中具有不溶性。

c) 溶剂：芳香族化合物 **(aromatic)**

正胶vs.负胶

当VLSI电路需分辨率达2μm之前，基本上是采用负性光刻胶。负胶在显影时线条会变粗，使其分辨率不能达到很高。→ 正胶分辨率高于负胶

但在分辨率要求不太高的情况，负胶也有其优点：

a）对衬底表面粘附性好
b）抗刻蚀能力强
c）曝光时间短，产量高
d）工艺宽容度较高（显影液稀释度、温度等）
e）价格较低（约正胶的三分之一）

第四章 光刻原理

DUV深紫外光刻胶

传统DNQ胶的问题：

~~1、对于<i线波长的光强烈吸收~~

~~2、DUV光强不如汞灯，因此灵敏度不够~~

~~3、量子效率提高有限（最大为1，一般0.3)~~

化学增强光刻胶

PAG (photo-acid generator)

原理：入射光子与PAG分子反应，产生酸分子，在后续的烘烤过程中，酸分子起催化剂作用，使曝光区域光刻胶改性

总量子效率>>1，因此DUV胶的灵敏度有很大提高。

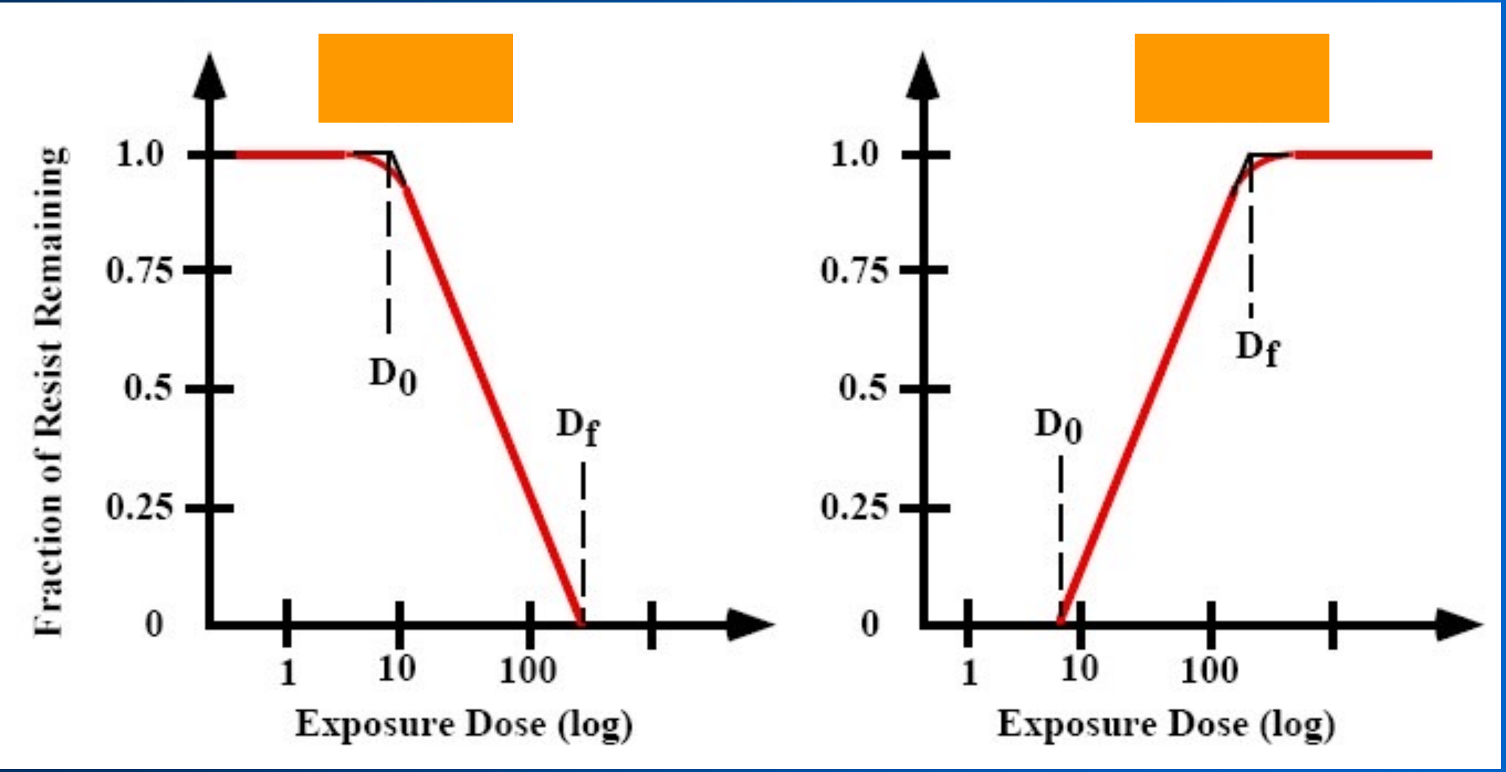
g线、i线光刻胶灵敏度为100mJ/cm^2，DUV胶为20－40mJ/cm^2

第四章 光刻原理

光刻胶的表征参数：

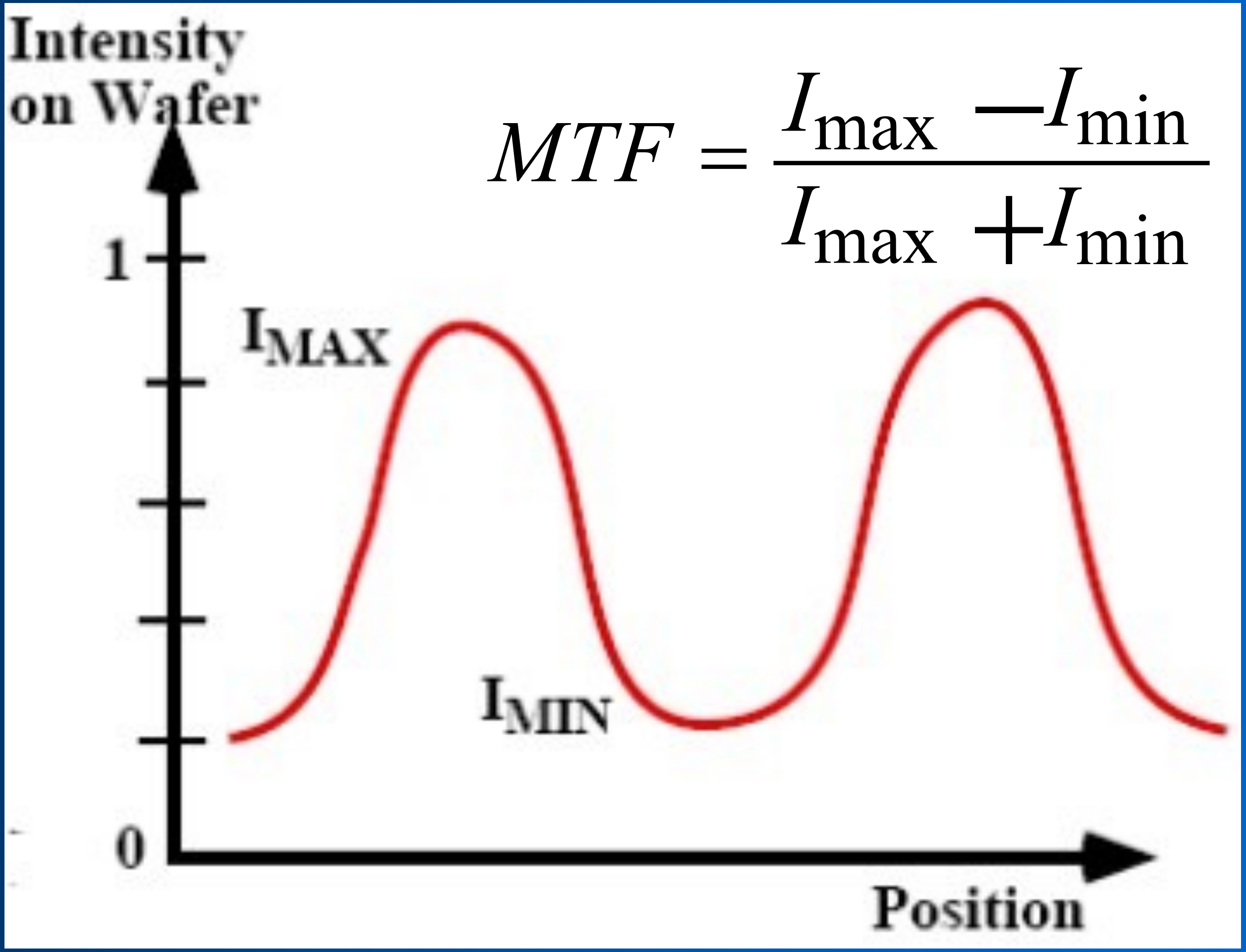
1、对比度：胶区分亮区和暗区的能力

D_f即灵敏度



$mJ/cm^2=mW/cm^2\times sec$

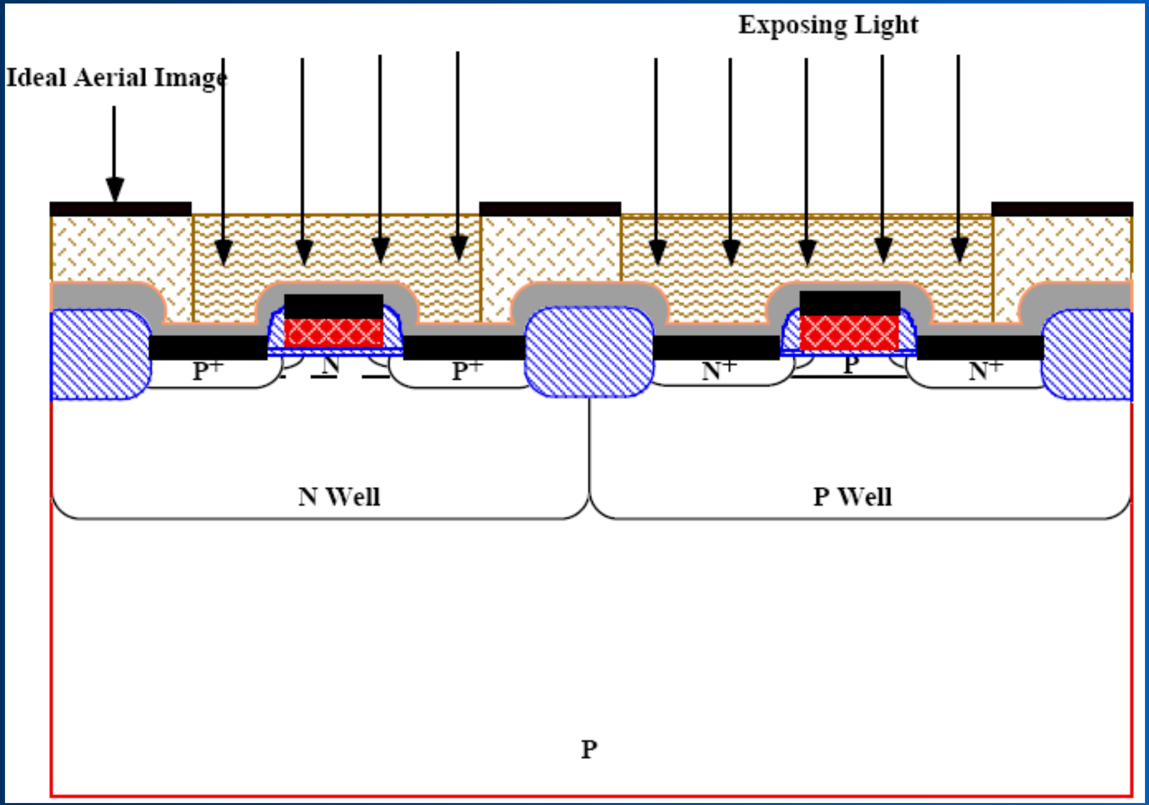
第四章 光刻原理


Intensity
on Wafer
$MTF=\frac{I_{\max}-I_{\min}}{I_{\max}+I_{\min}}$
1
I_{MAX}
I_{MIN}
0
Position

第四章 光刻原理

光刻胶的一些问题

1、由于硅片表面高低起伏，可能造成曝光不足或过曝光。光强随胶厚度变化。

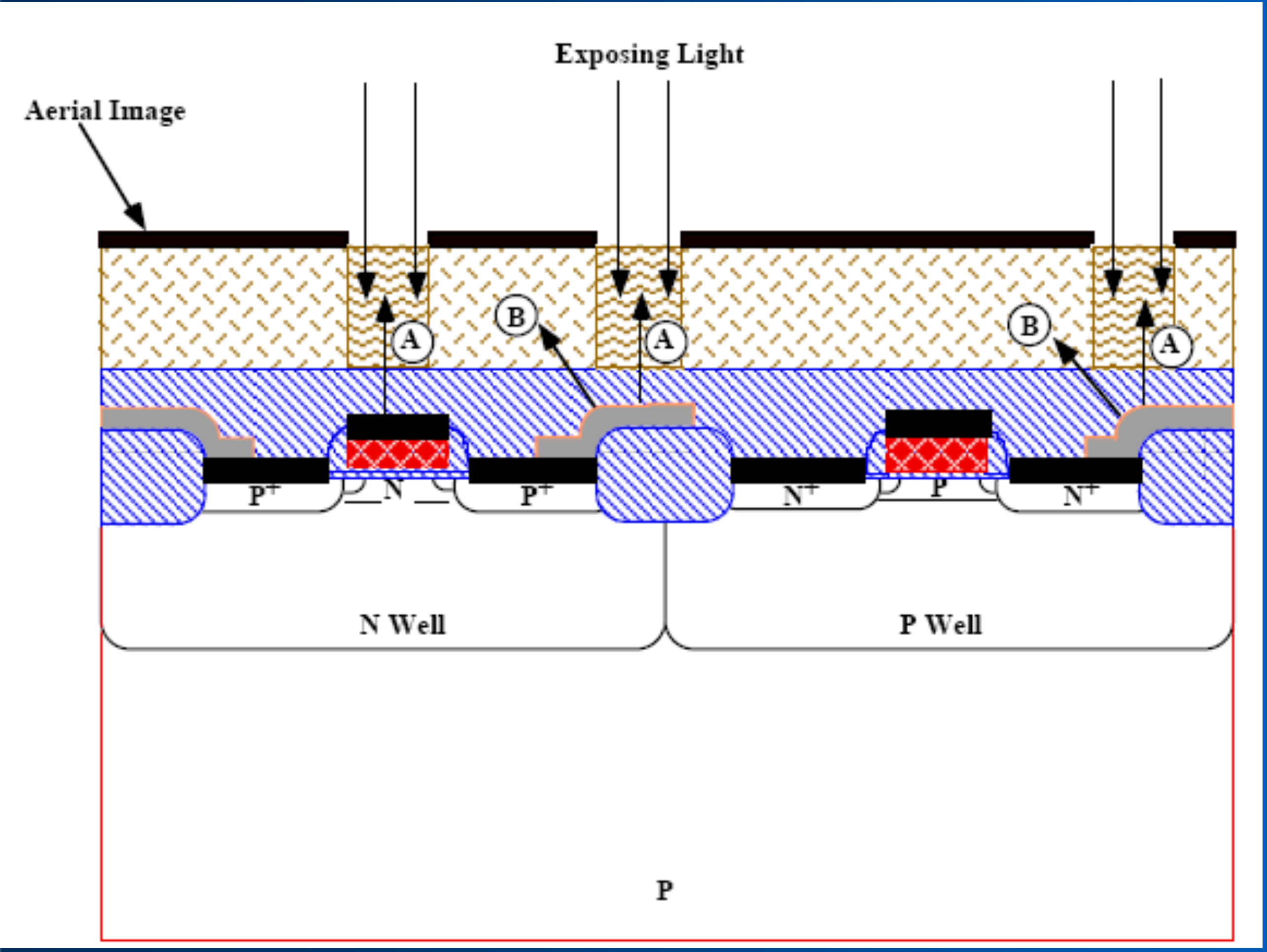


线条宽度改变！

平坦化CMP

第四章 光刻原理

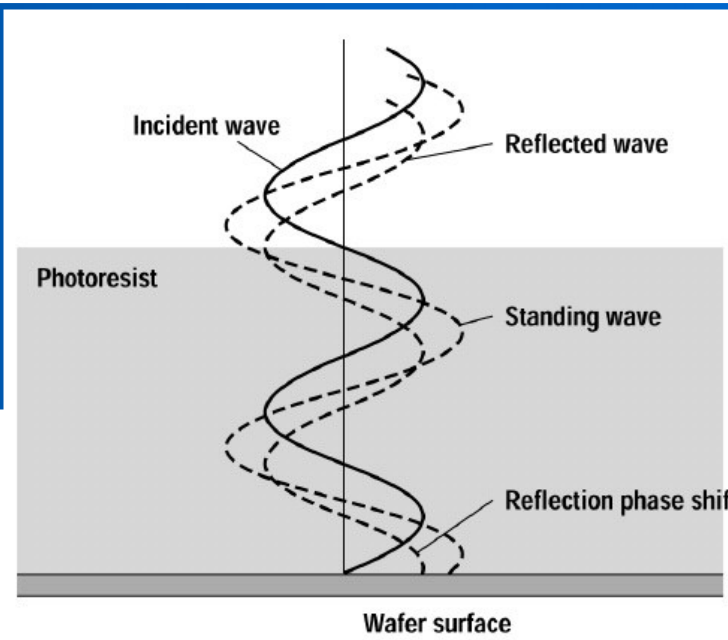
2、下层反射造成驻波，下层散射降低图像分辨率。

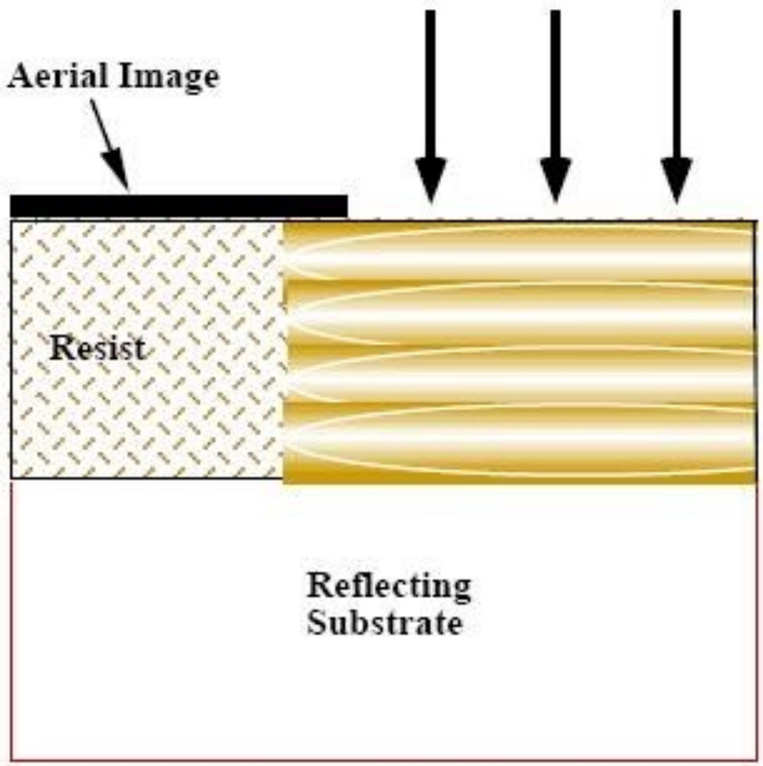


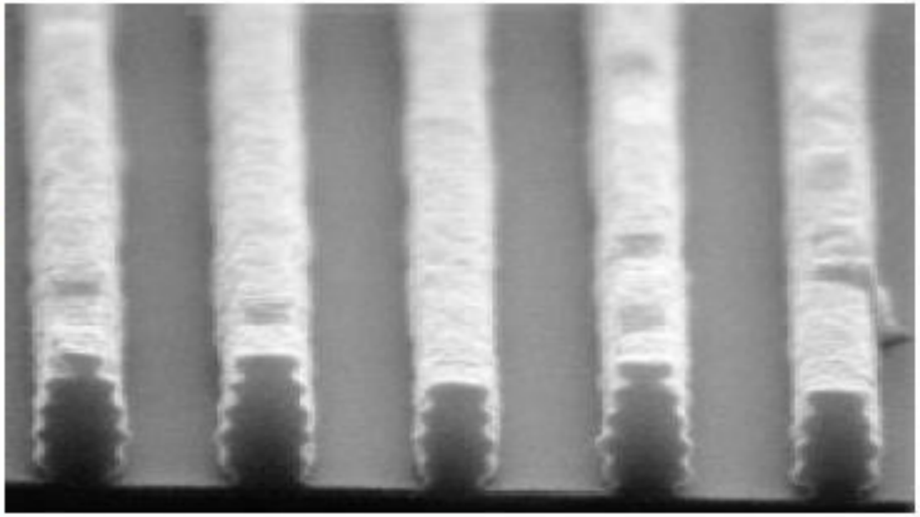
g线和**i**线胶—>使用添加剂，吸光并降低反射，**PEB**也有利于缓解其驻波现象。

第四章 光刻原理

驻波对于光刻图形的影响







(Photo courtesy of A. Vladar and P. Rissman, Hewlett Packard.)

光刻步骤详述

硅片增粘处理
- 高温烘培
- 增粘剂处理：六甲基二硅胺烷（HDMS）

涂胶：3000～6000rpm，0.5μm

前烘：10～30min，90～100°C

去除光刻胶中的溶剂，改善胶与衬底的粘附性，增加抗蚀性，防止显影时浮胶和钻蚀。

匀胶机

热板

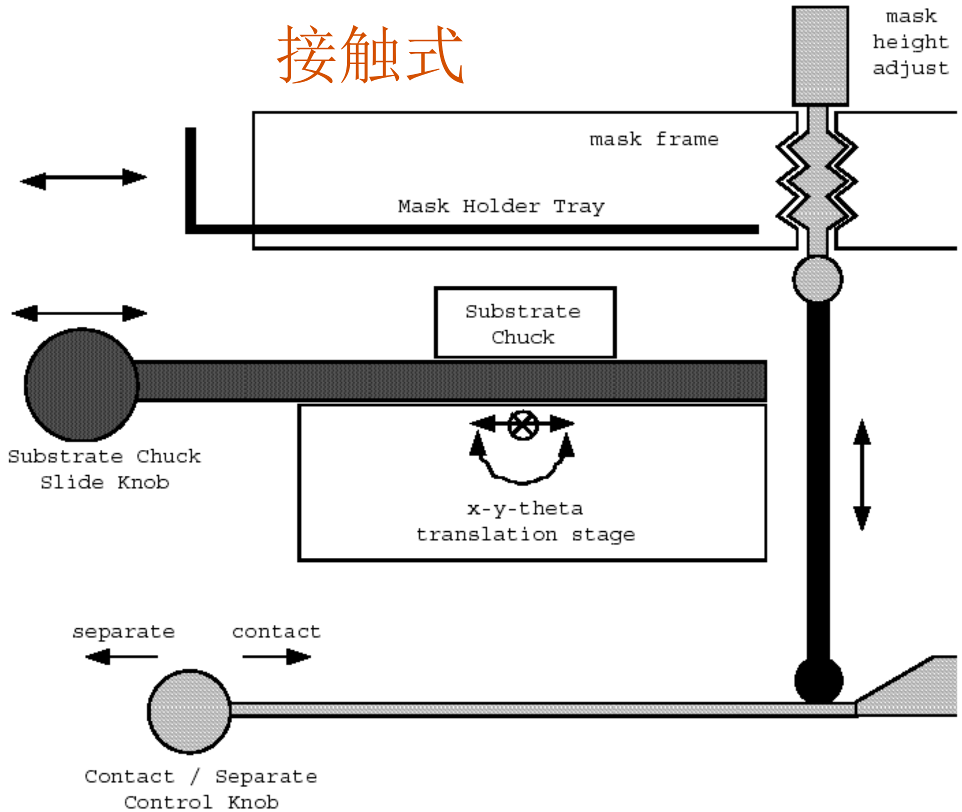
第四章 光刻原理

硅片对准，曝光

每个视场对准
例如：曝光剂量
150mJ/cm²

RA-reticle alignment
GA-global alignment
FA-fine alignment

接触式



第四章 光刻原理

曝光后烘烤（PEB）：10min，120 °C

显影：30～60s

浸泡显影或
喷雾显影
干法显影

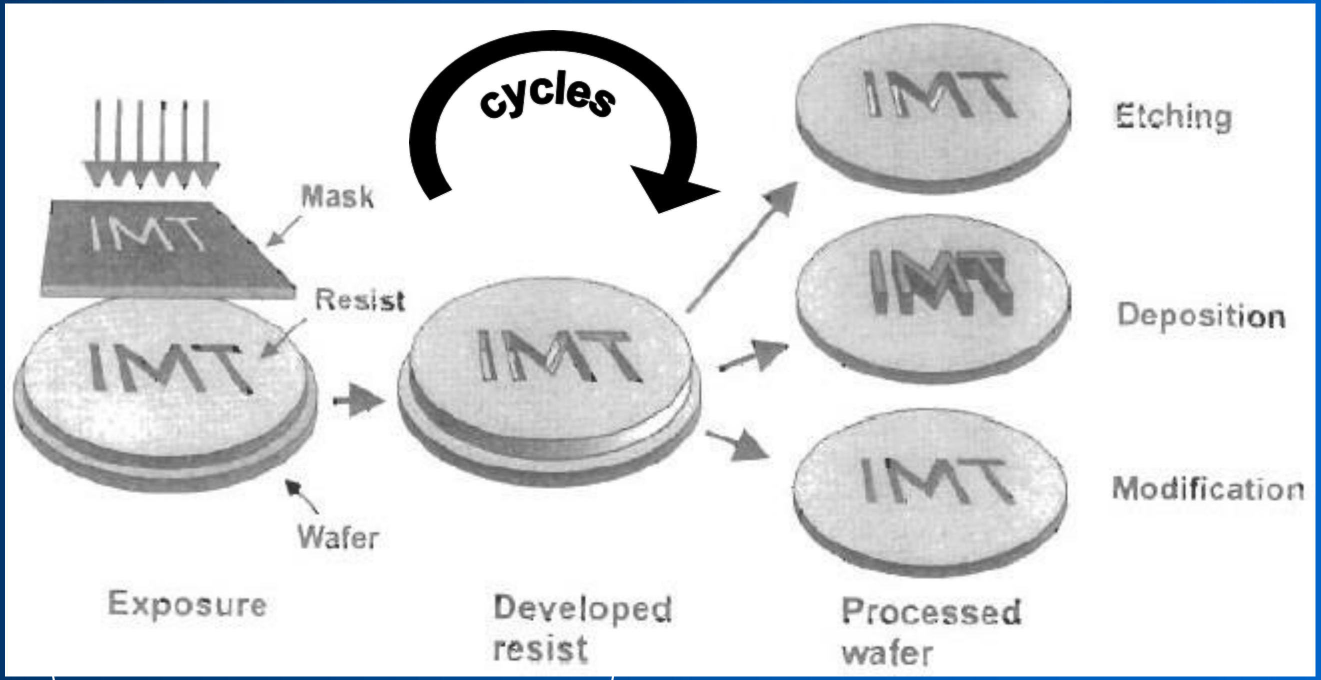
坚膜：10～30min，
100～140 °C

去除残余溶剂、显影时胶膜所吸收的显影液和残留水分，改善光刻胶的粘附性和抗蚀能力

显影检查：缺陷、玷污、关键尺寸、对准精度等，不合格则去胶返工。

第四章 光刻原理

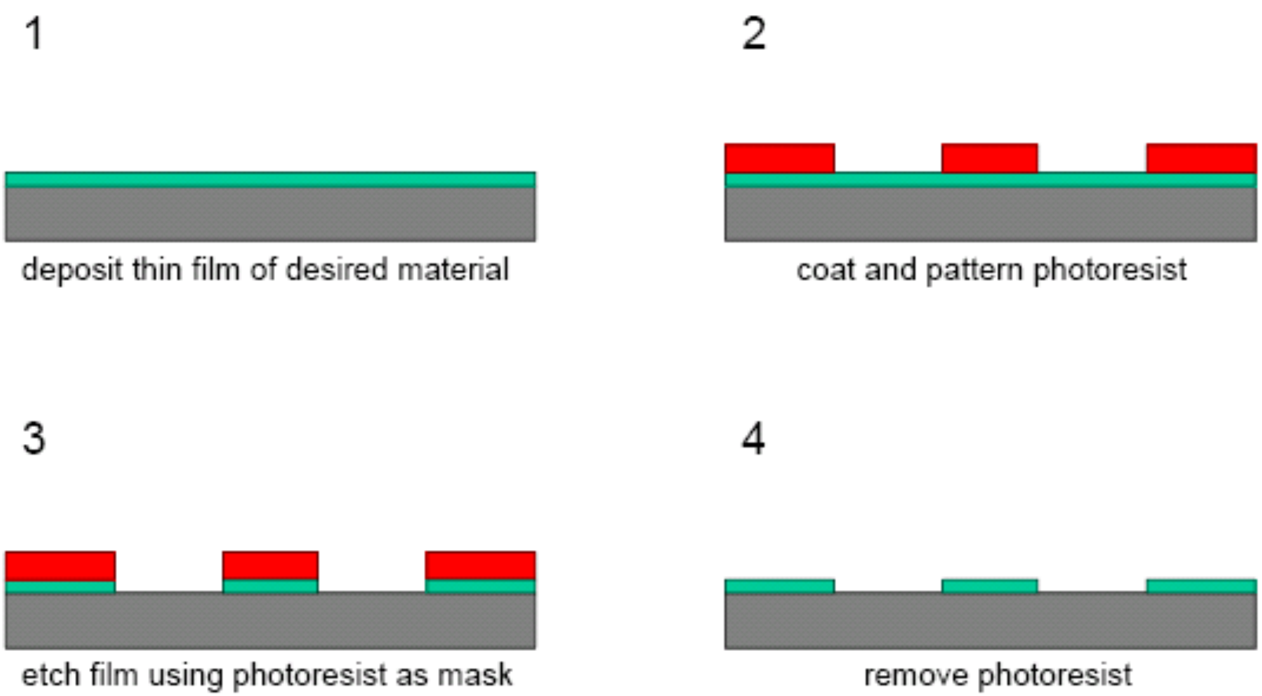
工艺过程回顾



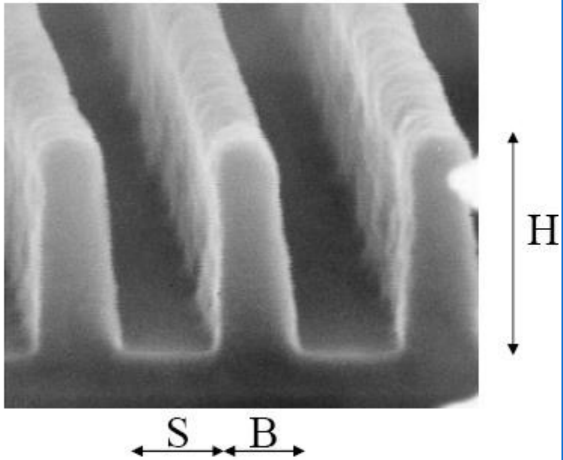
Lithography

图形转移——刻蚀

Etch-back



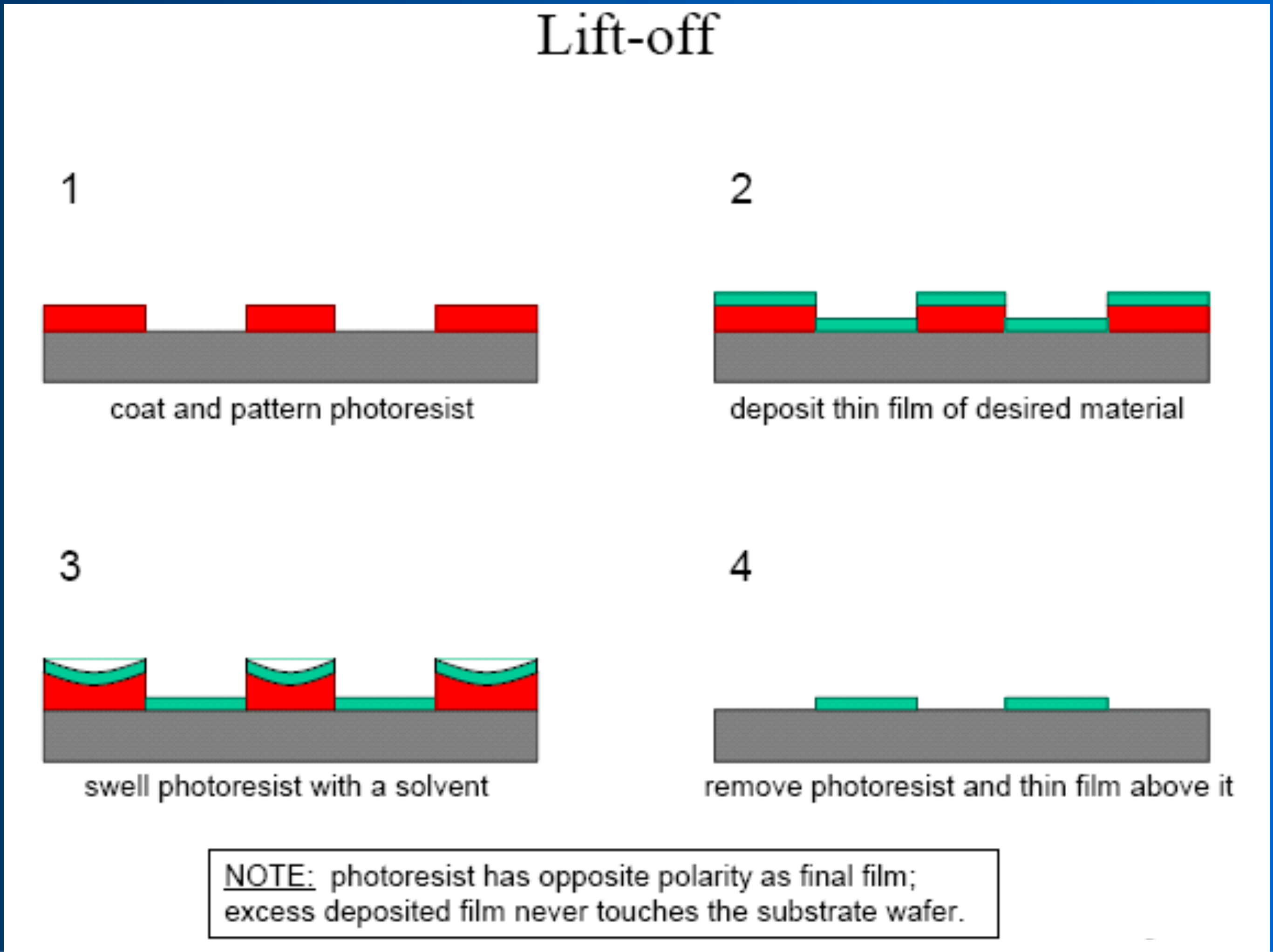
NOTE: photoresist has same polarity as final film; photoresist never touches the substrate wafer.



* Pitch = S+B
* Duty ratio = B/S
* Aspect ratio = H/B

第四章 光刻原理

图形转移——剥离（**lift-off**）



第四章 光刻原理

去胶

溶剂去胶（**strip**）：SPM。
正胶：丙酮

干法去胶
（**Ash)**

氧化去胶 450°C O_2+胶→CO_2↑+H_2O↑

等离子去胶
高频电场 O_2→电离O^-+O^+
O^+活性基与胶反应 CO_2↑，CO↑，H_2O↑。

第四章 光刻原理

增加光刻分辨率的途径

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

(RET)增强技术

↓ $\mathbf{k_1}$

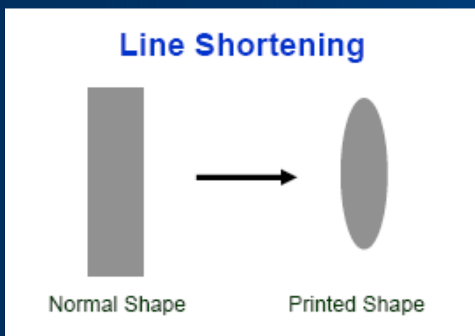
λ → 短波长光源

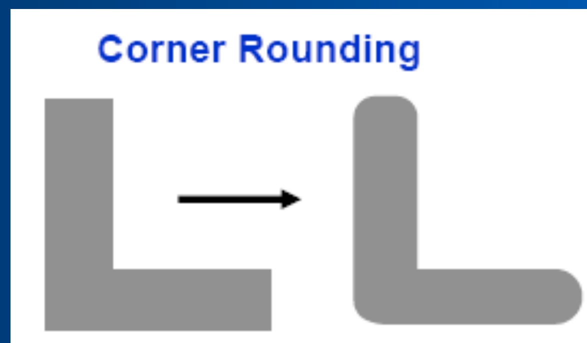
↑ **NA**

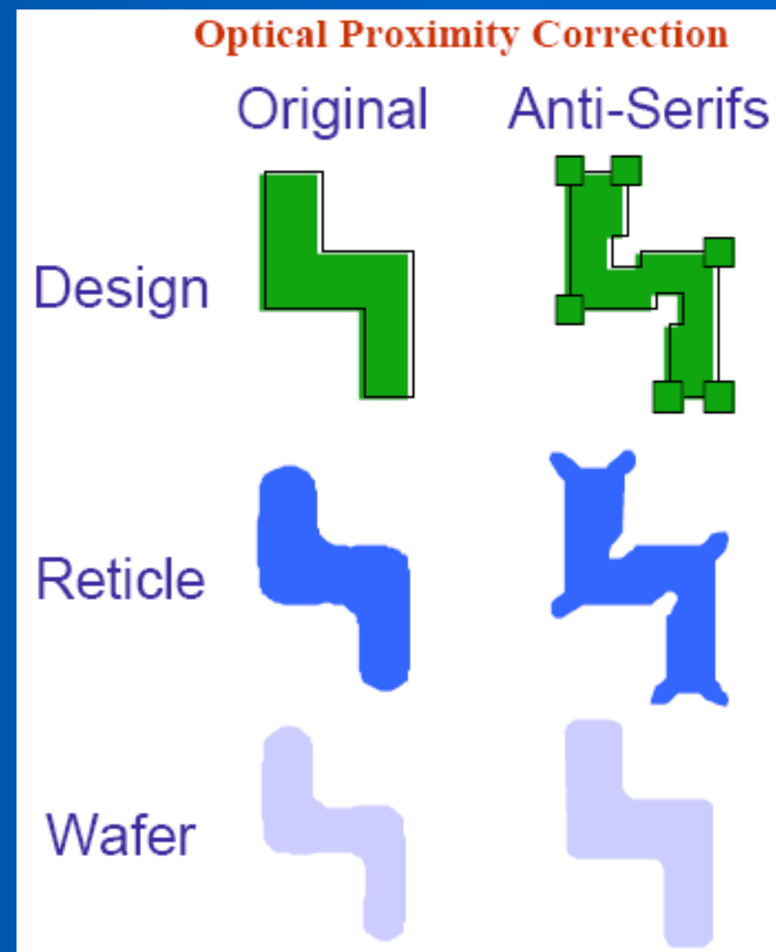
$$NA = n \sin \alpha$$

RET

1、光学临近修正OPC (optical proximity correction)







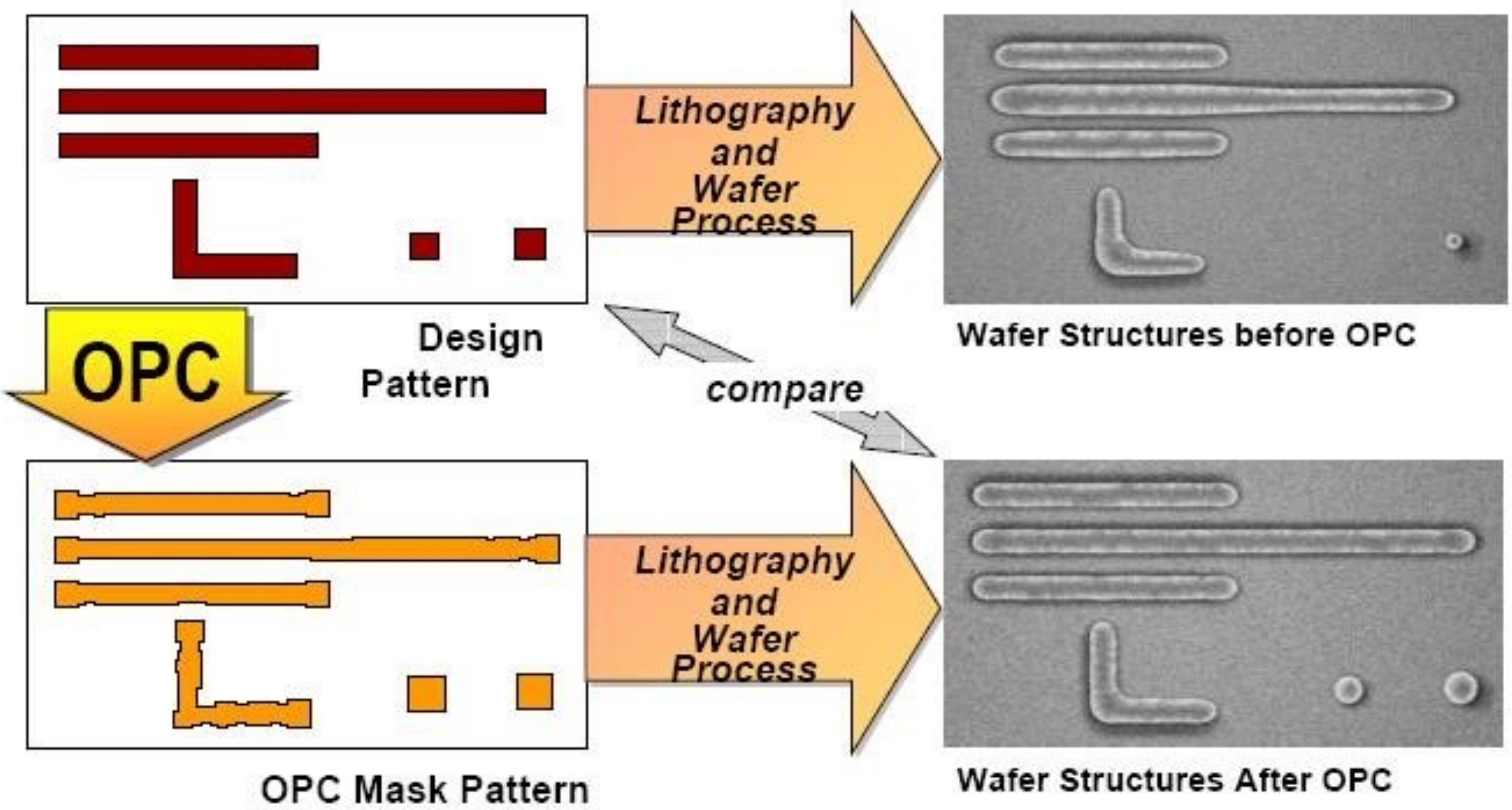
在光刻版上进行图形修正，来补偿衍射带来的光刻图形变形

- Rule-based OPC
- Model-based OPC

DFM

第四章 光刻原理

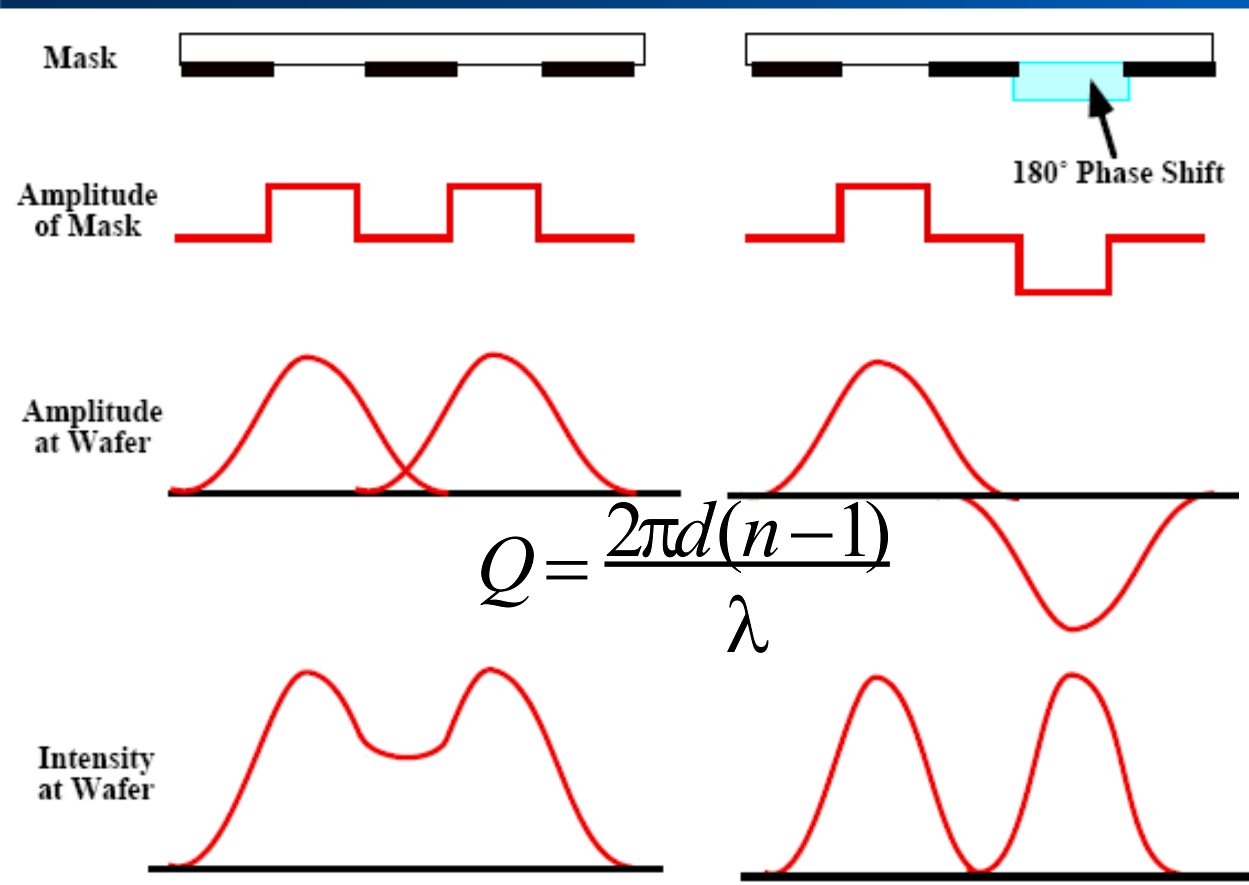
OPC实例



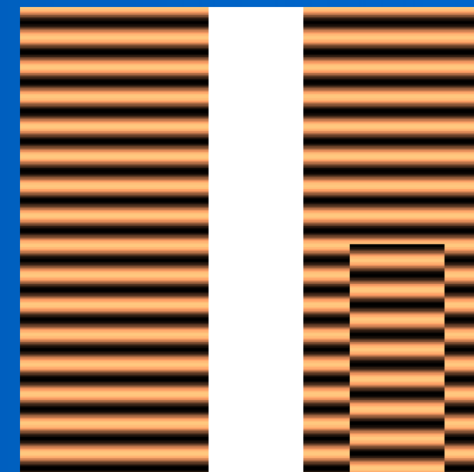
RET

1982 IBM

2、相移掩模技术 PSM (phase shift mask)



$$Q=\frac{2\pi d(n-1)}{\lambda}$$

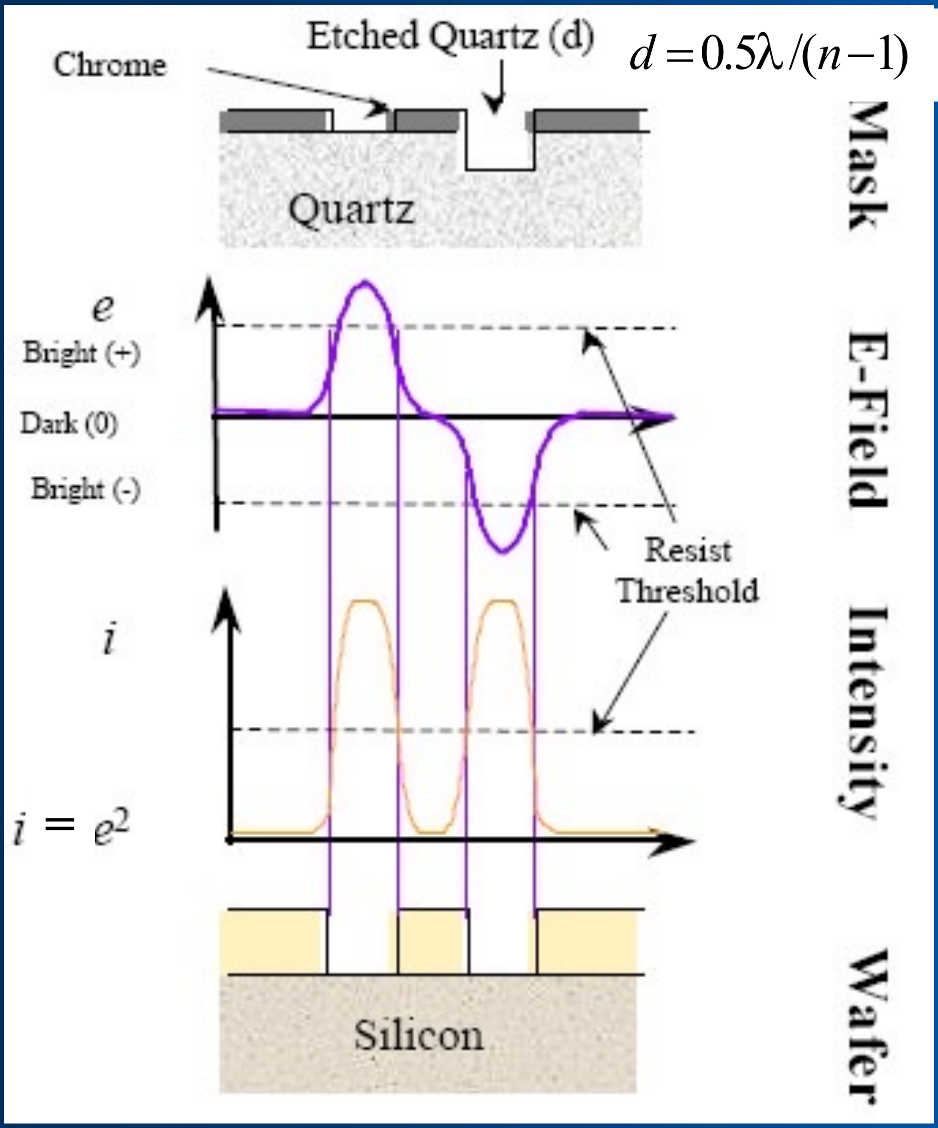


$$\mathbf{E}=\overline{\mathbf{E}}(\overline{\mathbf{r}},\mathbf{t})=\overline{\mathbf{A}}\cos\left(\omega\mathbf{t}-\overline{\mathbf{k}}\bullet\overline{\mathbf{r}}\right)$$

$$\mathbf{E}=\mathrm{Re}\left\{\overline{\mathbf{A}}\exp\left[\mathbf{i}\left(\omega\mathbf{t}-\overline{\mathbf{k}}\bullet\overline{\mathbf{r}}\right)\right]\right\}$$

$$\mathbf{I}=\left|\mathbf{E}\right|^2$$

附加材料造成光学路迳差异，达到反相



选择性腐蚀石英基板造成光学路迳差异，达到反相

作业

Alternating PSM
Attenuated PSM
……

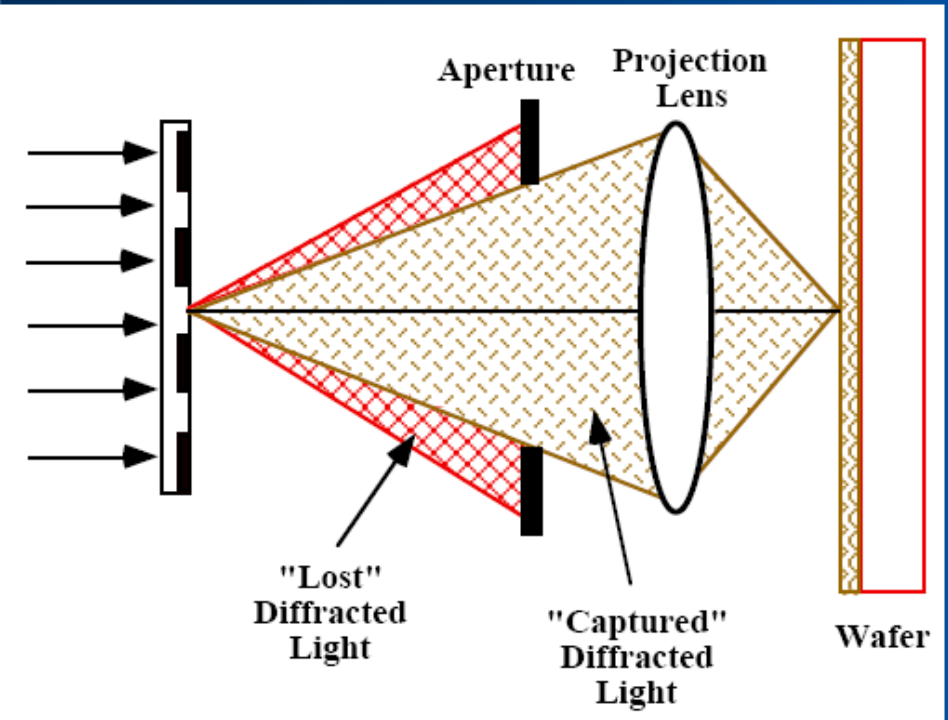
OPC和PSM
使得k_1下降

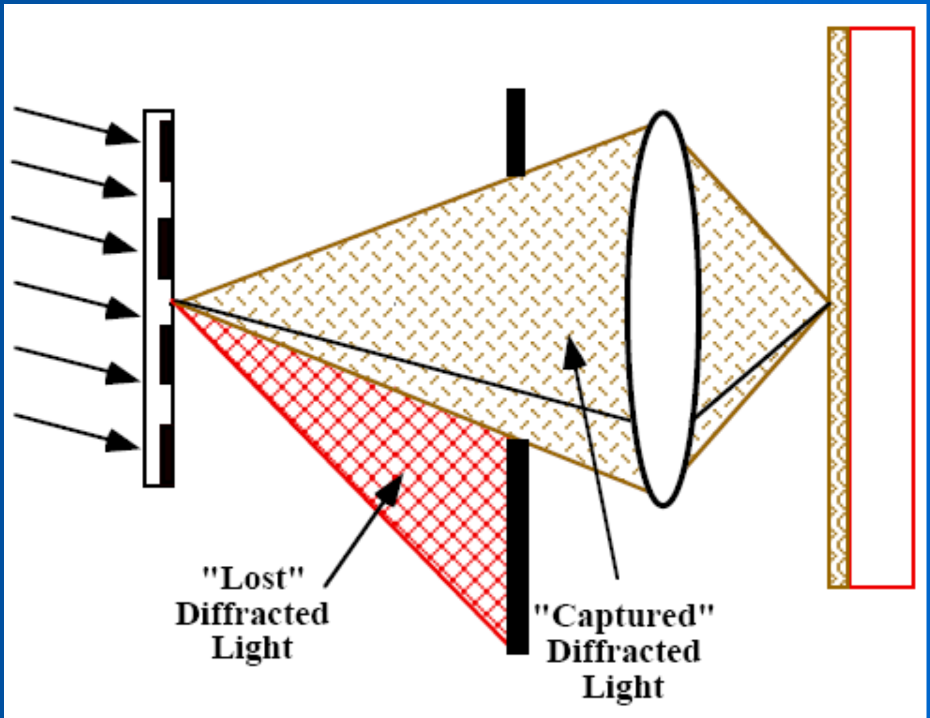
第四章 光刻原理

RET

3、离轴照明技术 **OAI (off-axis illunimation)**

- 减小对分辨率的限制
- 增加成像的焦深（用不大的**NA**）
- 提高**MTF**





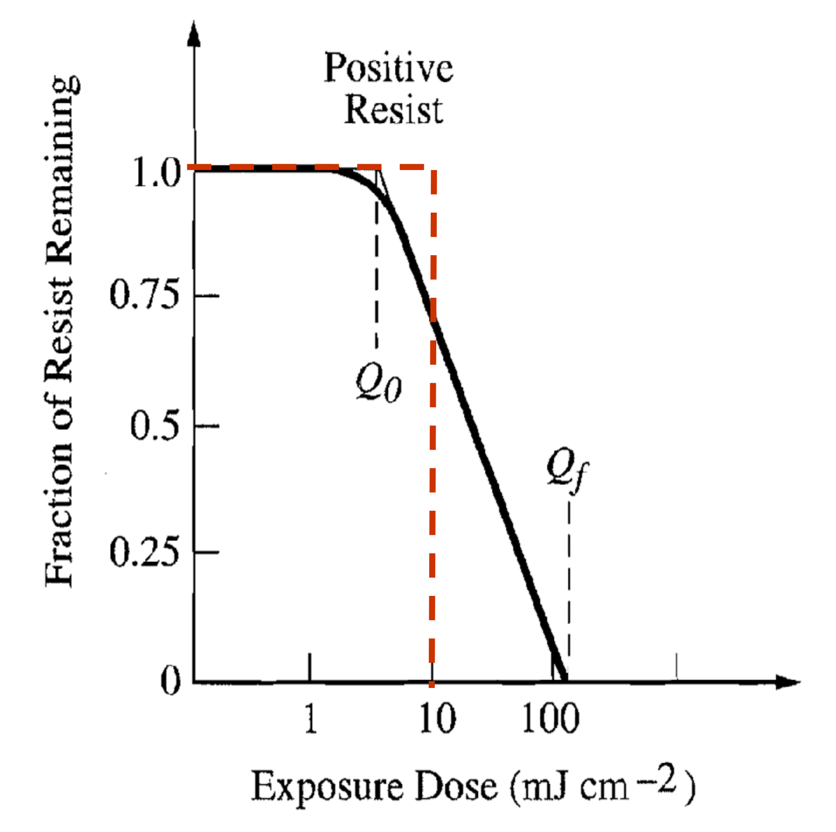
4、光刻胶对比度改进

$$R = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

Resist chemistry

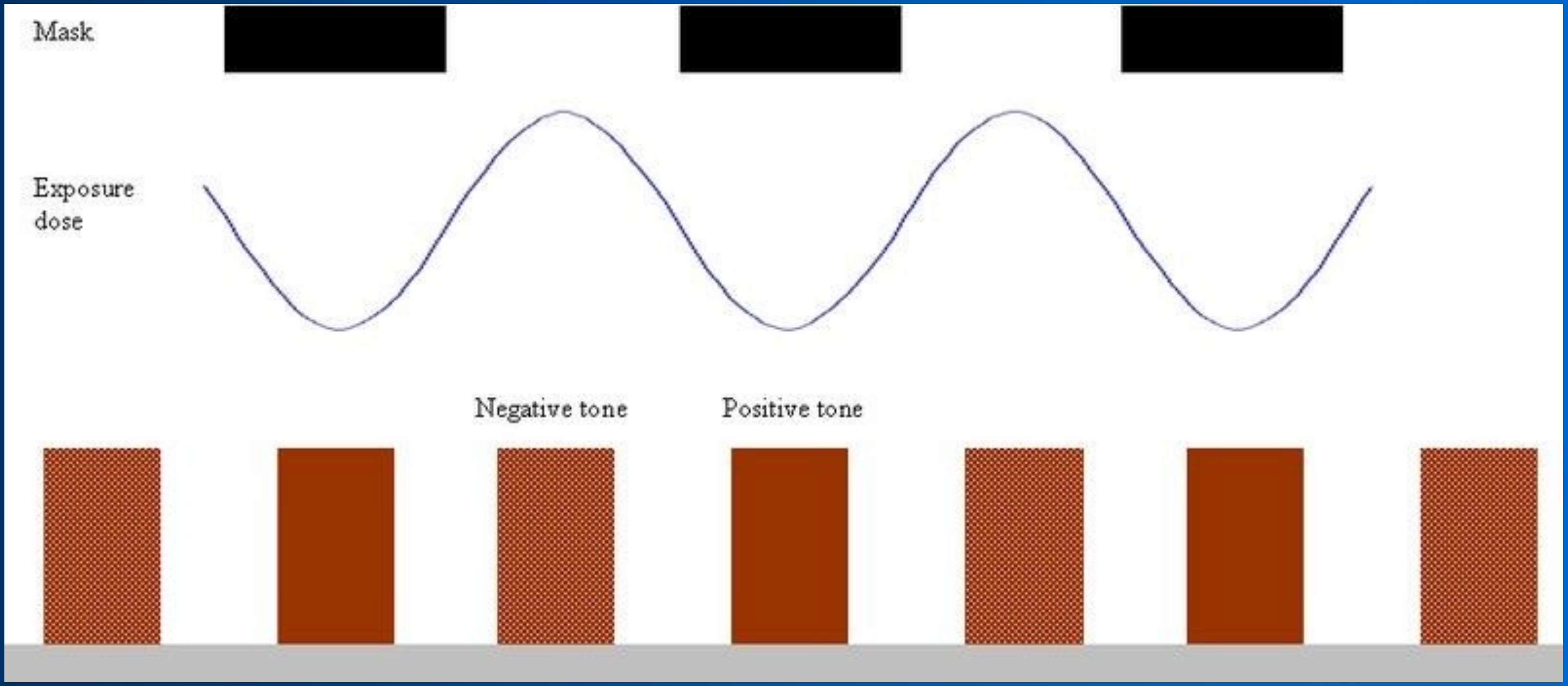
436,365 nm: Photo-Active-Component (PAC)
248,193 nm: Photo-Acid-Generator (PAG)

Mask design and resist process	
λ [nm]	k_1
436	0.8
365	0.6
248	0.3-0.4
193	0.3-0.4



Contrast
436,365 nm: γ=2-3, ($Q_f/Q_0 \approx 2.5$)
248,193 nm: γ=5-10 ($Q_f/Q_0 \approx 1.3$)

第四章 光刻原理



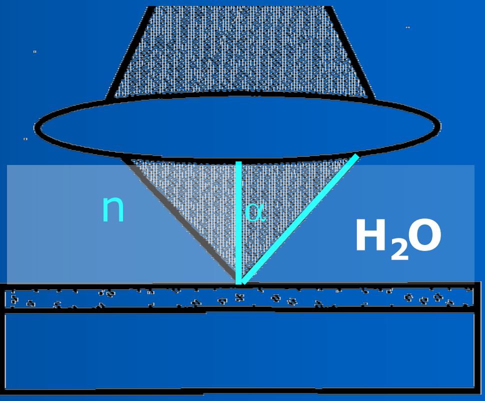
Dual-Tone Photoresist

第四章 光刻原理

5、增加数值孔径

Immersion Lithography

用水替代空气



***NA*=*n*sinα**

Lens fabrication	
λ [nm]	*NA*
436	0.15-0.45
365	0.35-0.60
248	0.35-0.82
193	0.60-0.93

$$n_{H_2O}=1.44\Rightarrow NA\approx 1.36$$

→ **45nm,32nm,22nm,14nm…**

第四章 光刻原理

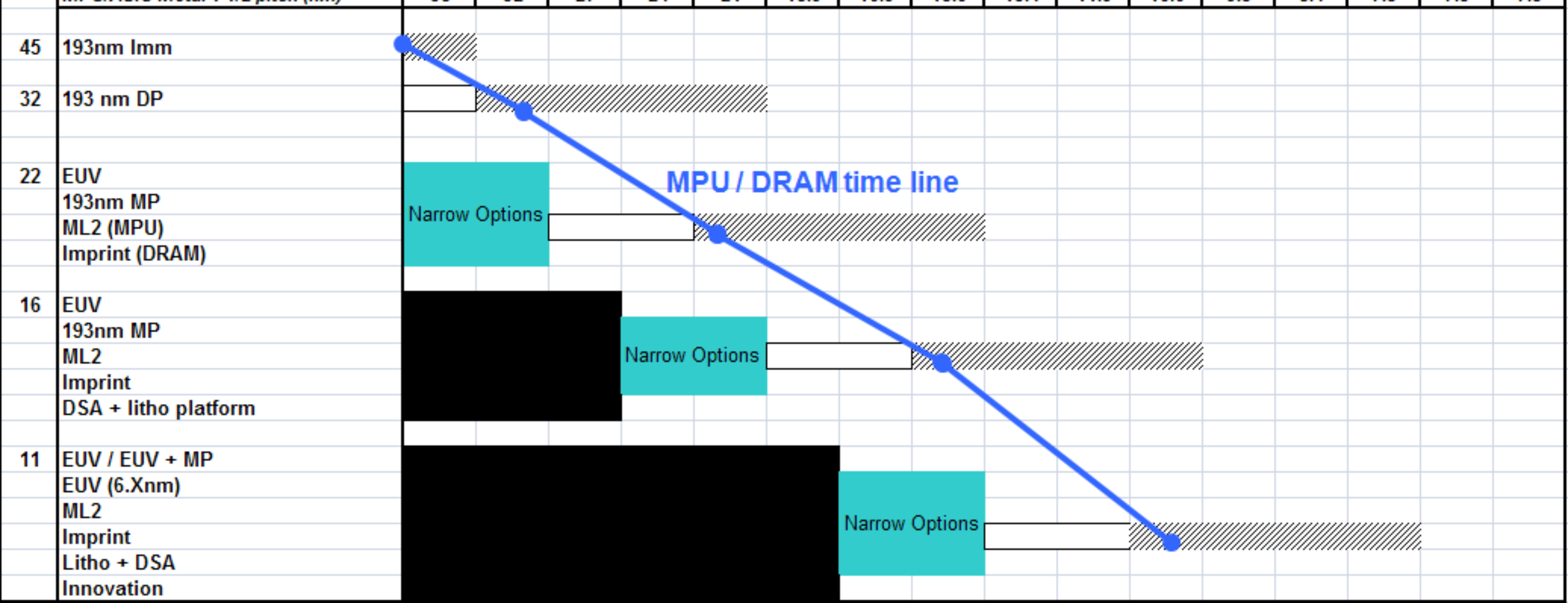
6、短波长光源

The Big Jump from 193nm to 13.5nm

<10nm使用EUV？？ → **EUV**

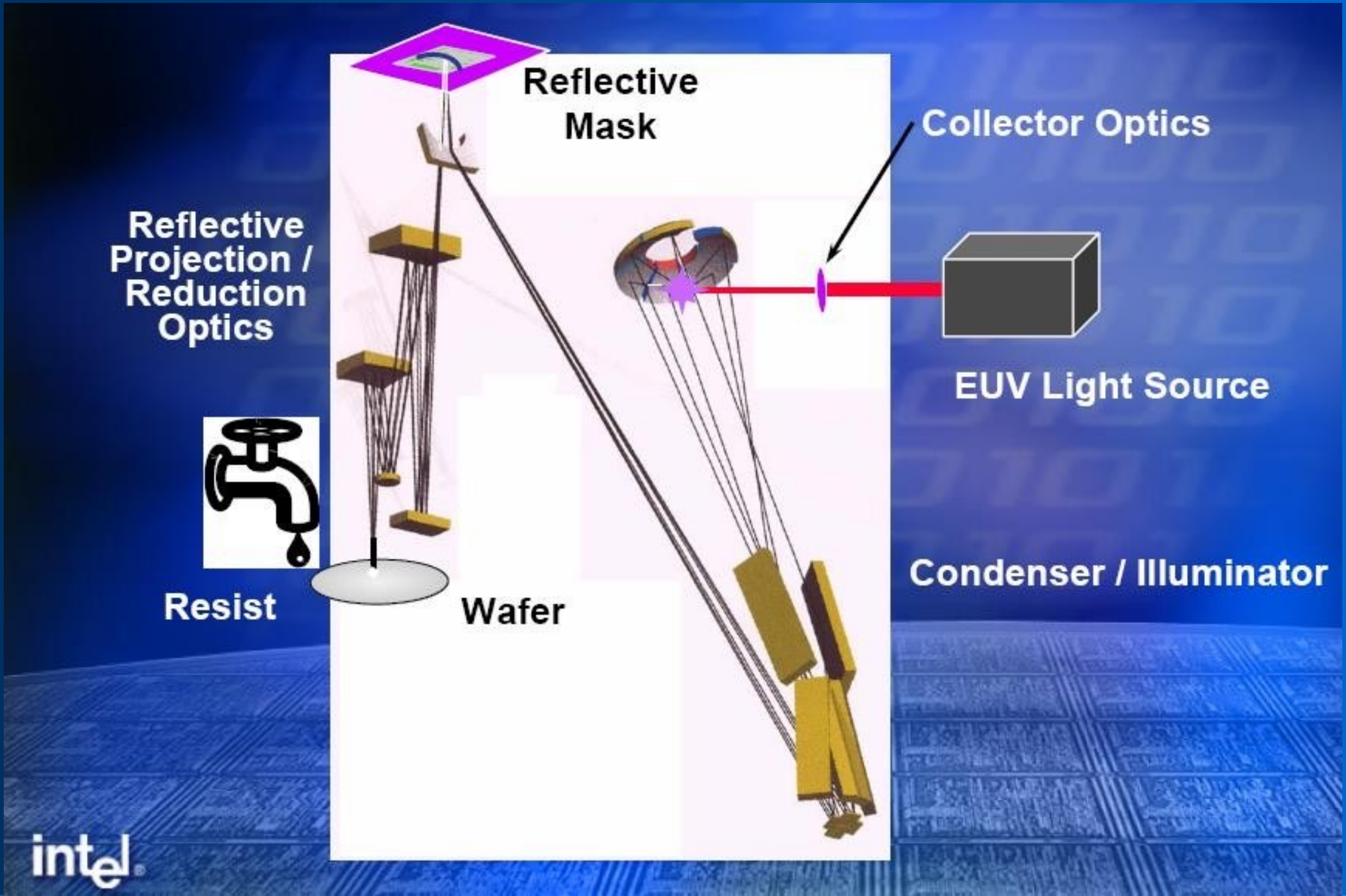
Figure LITH3A DRAM and MPU Potential Solutions **ITRS2011**

First Year of IC Production	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
DRAM ½ pitch (nm) (contacted)	36	32	28	25	23	20.0	17.9	15.9	14.2	12.6	11.3	10.0	8.9	8.0	7.1	6.3
MPU/ASIC Metal 1 1/2 pitch (nm)	38	32	27	24	21	18.9	16.9	15.0	13.4	11.9	10.6	9.5	8.4	7.5	7.5	7.5



第四章 光刻原理

EUV（Extreme ultra violet)



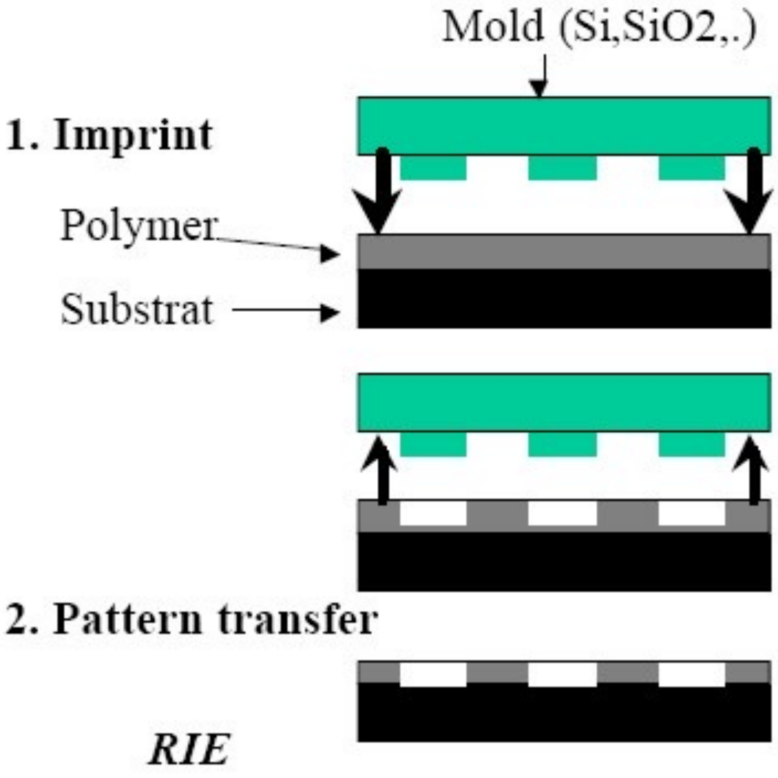
其它可能的下一代光刻技术

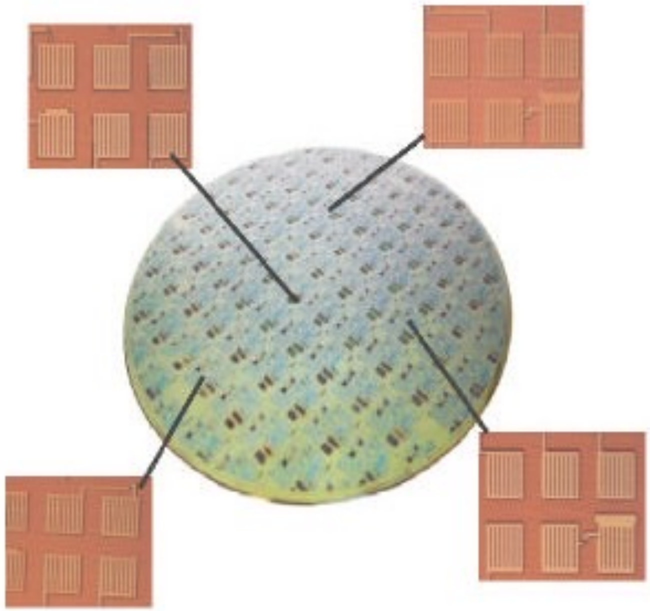
- ✓纳米压印（**Nanoimprint**）
- ✓基于材料和工艺革新的“侧墙转移”技术（**Sidewall/Spacer transfer lithography**）
- ✓X射线光刻技术（**XRL**）
- ✓离子束光刻技术（**IBL**）
- ✓无掩模光刻——电子束（**Shaped Beam / Multi-Column / Multi-Beams**）

无光源

第四章 光刻原理

纳米压印（Nanoimprint)

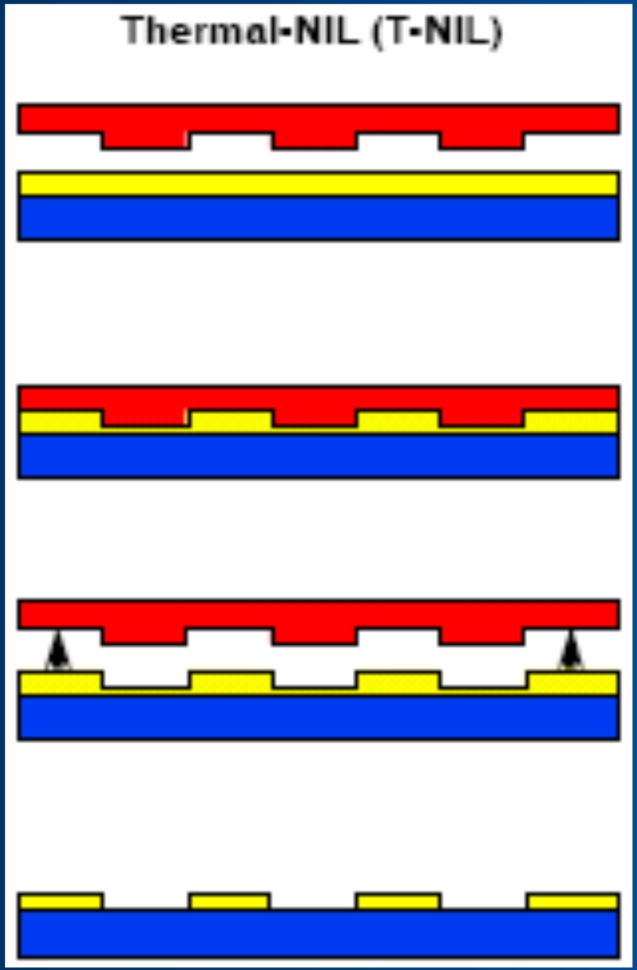




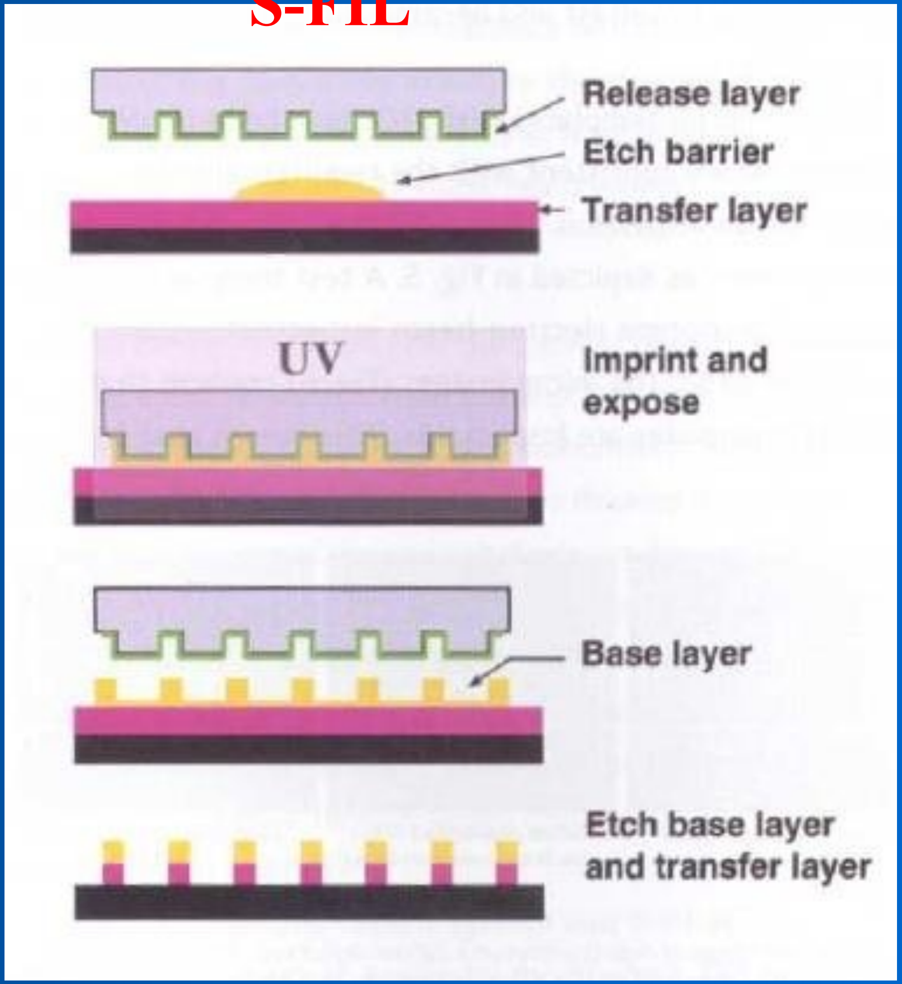
200 mm inprinted wafer

Interest of this technology : low cost transfert of nano structures (10-20 nm) on large area (200 mm)

第四章 光刻原理



S-FIL



SFIL $5million/tool, EUV $0.4billion/tool

第四章 光刻原理

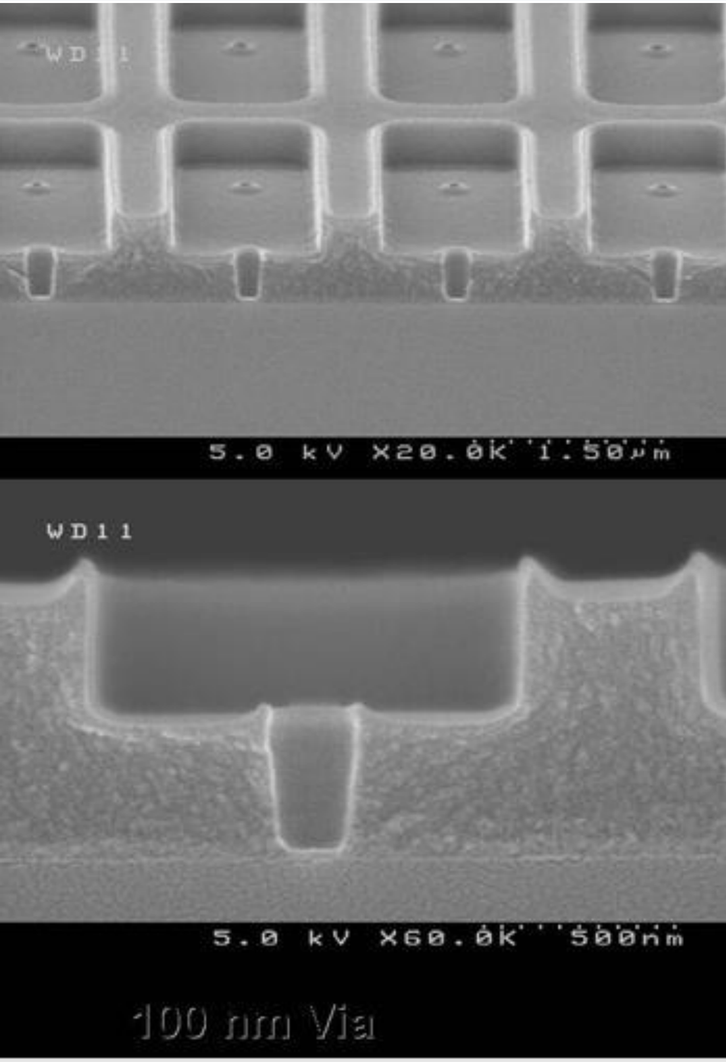
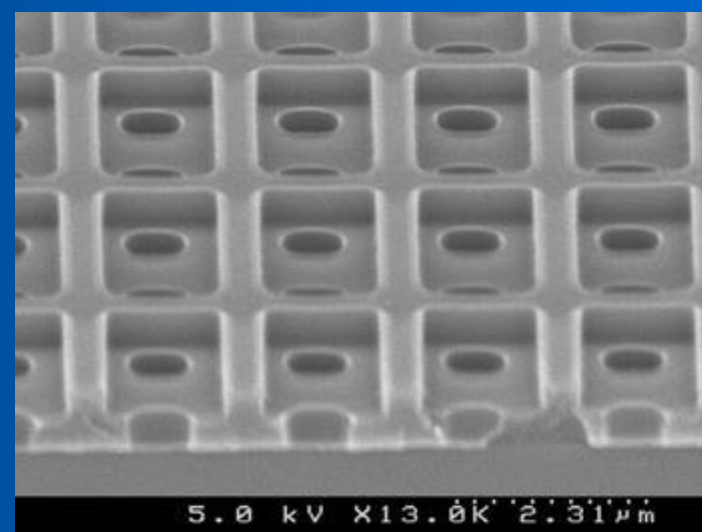


图3 上图展示了双大马士革纳米压印技术的研究成果，这项技术是在德克萨斯州立大学教授Grant Willson指导下进行的。图形结构由Sematech先进技术研发中心（ATDF）制作。

S-FIL制作的互连双大马士革结构。
制作步骤有望减少**123**步。



第四章 光刻原理

光刻总结

理论分辨率：$R = k_1 \frac{\lambda}{NA}$

短波长光源

大**NA**：透镜系统、浸润

小$\mathbf{k_1}$：**RET**（**光刻版**）及工艺和光刻胶改进

PSM
OPC
OAI

实际分辨率：**MTF**，**S**——光刻胶、曝光系统、光源