



## 微影製程

### Lithography

余志成  
高雄第一科技大學機械系

Department of Mechanical and Automation Engineering  
National Kaohsiung First University of Science and Technology

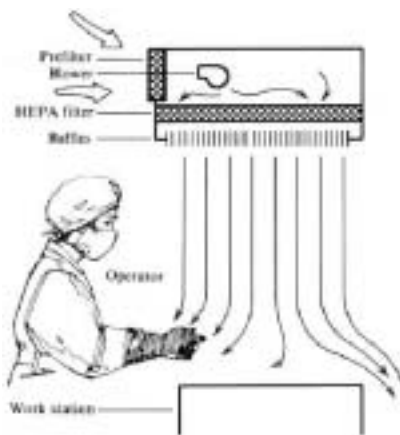
MicroSystem Fabrication Lab.



NKFUST

## Clean Room

- Particles
- Humidity
- Vibration
- Pressure
- Electromagnetic wave
- Static
- De-Ionized water



MEMS Lab.





## 無塵室等級

### ■ 塵粒控制

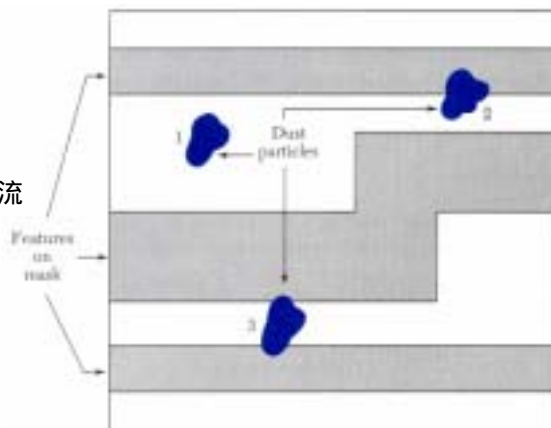
- ▶ HEPA過濾
- ▶ 洗手 戴口罩 戴無塵帽 穿無塵衣 穿無塵鞋 戴塑膠手套 用空氣清洗

日本：每立方英尺室內之空氣所含有大於或等於0.1 μm之微塵粒子顆數		美國：每立方英尺室內之空氣所含有大於或等於0.5 μm之微塵粒子顆數	
級別 1	不超過10 <sup>1</sup> 顆	Class 1	不超過1顆
級別 2	不超過10 <sup>2</sup> 顆	Class 10	不超過10顆
級別 3	不超過10 <sup>3</sup> 顆	Class 100	不超過100顆
級別 4	不超過10 <sup>4</sup> 顆	Class 1000	不超過1000顆



## 粉塵對製程的影響

- 影響晶圓的鍍膜製程
- 影響局部材料電性
- 影響微影圖形
  - ▶ 孔洞
  - ▶ 限制局部導線電流
  - ▶ 短路





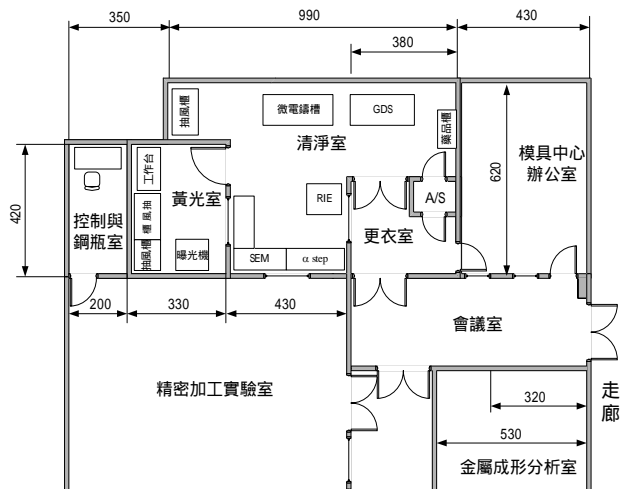
## 無塵室的控制項目

- 溫度： $22^{\circ} \pm 2^{\circ}$ ，濕度 $50 \pm 5\%$
- 振動：增加廠房質量以吸收能量
- 水的控制：去除雜質以避免短路、缺陷，控制水中離子濃度(DI water)以避免與化學藥品或晶圓直接發生反應。
- 氣體控制：製程使用氣體 ( $N_2$ , Ar,  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $SiH_4$ ) 若含有不純物可能造成元件漏電或破壞氧化薄膜。
- 電磁波：可能造成設備功能失常，可採用電磁遮蔽的金屬包覆空間以隔絕電磁波
- 靜電：靜電會吸附顆粒，造成晶圓線路短路，而靜電放電會引爆可燃氣體



## 高雄科大微系統製造實驗室配置

- 黃光室等級class 5000
  - ▶ 光阻塗佈
  - ▶ 光罩對準曝光
  - ▶ 加熱烤版
  - ▶ 顯影
  - ▶ 顯微鏡
- 清淨室等級class 10000
  - ▶ RIE
  - ▶  $\alpha$  step
  - ▶ 精密電鑄槽
  - ▶ 化學蝕刻槽
  - ▶ SEM





## Lithography

### ■ 微影製程所需之儀器設備與材料

- ▶ 晶片清洗 化學清洗槽、去離子水、氮氣槍
- ▶ 去水烘烤 烤箱
- ▶ 塗底 通常以旋鍍機塗佈HMDS
- ▶ 上光阻 通常以旋鍍機
- ▶ 預烤（軟烤） 軟烤箱或熱墊板
- ▶ 對準及曝光 對準曝光機
- ▶ 顯影 化學清洗槽
- ▶ 硬烤 硬烤箱或熱墊板
- ▶ 蝕刻 化學清洗槽
- ▶ 去除光阻 化學清洗槽、超音波震盪器



Fig. 2.1 Steps of the photolithographic process.

7



## 晶片清洗

### ■ 超潔淨晶圓表面

- ▶ 無微塵
- ▶ 無金屬離子
- ▶ 無有機物
- ▶ 降低表面粗糙度
- ▶ 無氧化層
- ▶ 無濕氣
- ▶ 不帶電

### ■ 標準RCA清洗：離子佈植前使用

### ■ 常見之污染物種類

- ▶ 微塵
- ▶ 有機物、光阻劑
- ▶ 金屬離子
- ▶ 原生化層

### ■ 簡易清洗：每次使用晶圓，先以丙酮去除有機物質與油脂等；再使用異丙醇沖洗，使wafer表面能具親水性，再以純水清洗

### ■ 深層清洗：晶圓拆封後使用 Piranha clean (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>:H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

8



## 水溶液清洗溶劑

- 大部分水溶液清洗液消除了一種污染物之後會額外生成另一類型之污染物。

溶 液	主要優點	主要缺點
SC1(NH <sub>4</sub> OH:H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :H <sub>2</sub> O)	去除塵粒,輕微有機物,金屬離子	沈積金屬離子 成長氧化層
SC2(HCl: H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> :H <sub>2</sub> O)	去除金屬原子及離子	無法去除有機物及塵粒、成長氧化層
HF	去除二氧化矽及金屬離子與氧化物	造成塵粒沈積 無法去除有機物及金屬原子



## 標準RCA清洗流程

步驟	化學溶劑	清洗溫度	清除之污染物
1	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (SPM) (3 : 1) (Piranha clean)	85	有機物
2	D.I. Water	室溫	清洗
3	HF + H <sub>2</sub> O (DHF) (1 : 50)	室溫	原生氧化層
4	D.I. Water	室溫	清洗
5	NH <sub>4</sub> OH + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O (APM)(0.05 : 1 : 5) SC1	85	微塵
6	D.I. Water	室溫	清洗
7	HCl + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + H <sub>2</sub> O (HPM)(1 : 1 : 5) SC2	85	金屬離子
8	D.I. Water	室溫	清洗
9	HF + H <sub>2</sub> O (DHF) (1 : 50)	室溫	原生氧化層
10	D.I. Water	室溫	清洗



## 晶片塗底

- 去水烘烤
  - ▶ 在烤箱烘烤去除晶片表面的水分子
- 塗底
  - ▶ 通常以旋鍍機塗佈HMDS，以增加光阻與晶片表面附著力



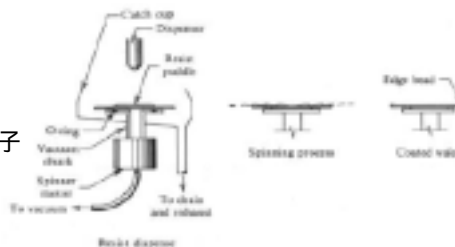
Spin Coater (光阻塗佈機)

MEMS Lab.



## 光阻旋鍍

- 上光阻
  - ▶ 以旋鍍機(Spin Coating)
  - ▶ 影響旋鍍厚度的因素
    - 滴入的光阻液的量
    - 旋鍍機的轉速與時間
    - 光阻液的性質（黏滯性及粒子含量）
- 轉速與塗佈厚度
  - ▶  $K$ ：校正常數
  - ▶  $C$ ：高分子濃度 g/100 mL 溶劑
  - ▶  $\omega$ ：rpm
  - ▶  $\eta$ ：intrinsic viscosity
  - ▶  $\alpha, \beta, \gamma$ ：材料常數



$$T = \frac{KC^\beta \eta^\gamma}{\omega^\alpha}$$

MEMS Lab.



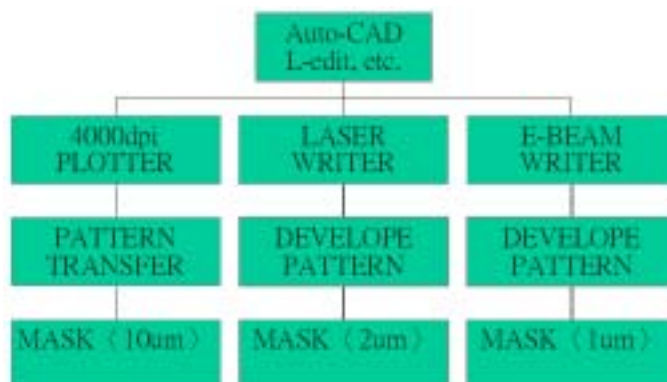
## 光阻預烤

- 預烤 ( Soft bake )
  - ▶ 降低光阻液中的溶劑含量 ( 由20~30%降至4~7% ) , 因而會減少光阻厚度約10~20%
  - ▶ 有回火的效果, 使光阻平坦化
  - ▶ 增加附著
  - ▶ 半導體製程光阻在預烤後的典型厚度為0.5~2 μm, 若以光阻做微結構, 則厚度會高很多 ( 1000 μm in LIGA )



## 光罩(Mask)製作

- 一般以平坦透明之石英、玻璃, 再以鉻 ( ~800Å ) 當作阻擋層



## 曝光方式

- (Hard) Contact : 可達1微米的結構解析, 多用於學校、不適合量產, 因接觸易傷害光罩
- In proximity (Soft contact) : 光罩與晶片保持20-50微米的間隙, 受光繞射影響解析度受限於2微米
- Optical projection : 解析度約0.5微米, 但成本高

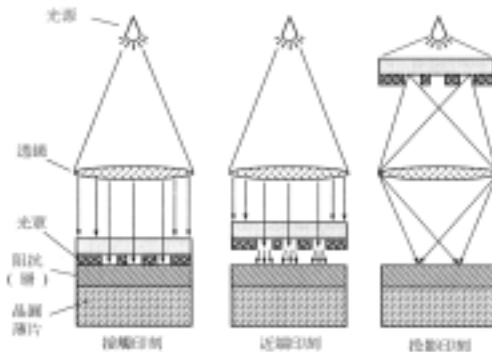
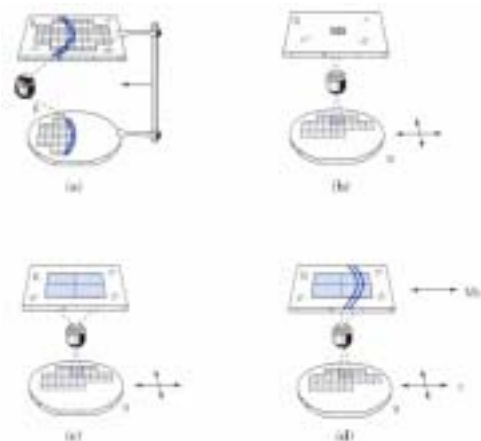


圖 4.1 基本的平版曝光法 - 根據 [Meixner 93]

## Projection Printing



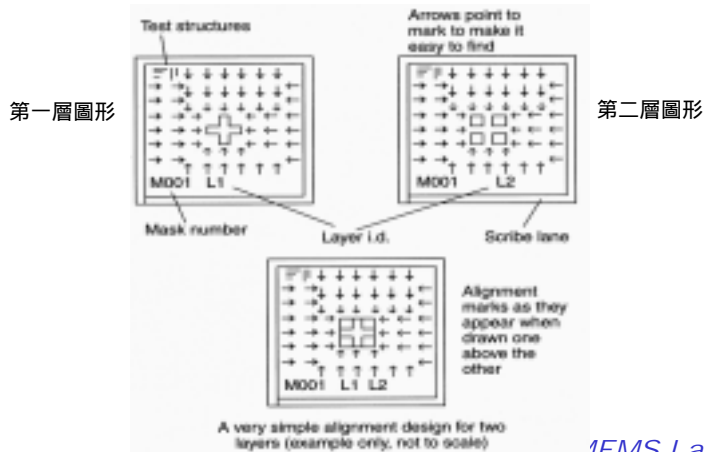
- (a) Annual-field wafer scan
- (b) 1:1 step and repeat (重複步進式)
- (c) M:1 reduction step and repeat
- (d) M:1 reduction step and scan





## 光罩對準記號的設計

- Alignment Key設計於光罩的四個角落



## 光罩的對準

- 雙面對準
  - 儲存晶片背面的對準記號
  - 利用曝光機移動晶圓，直至光罩上的對準記號與背面之記號重合

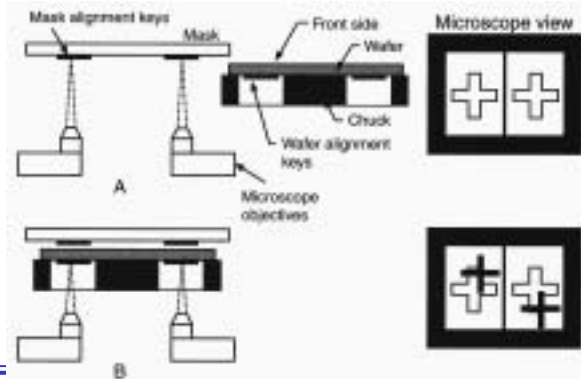


Union PEM800 雙面光罩對準機



## 雙面光罩對準

- 先以CCD攝影機記憶光罩圖形
- 移入晶圓承座(Chuck), 藉由承座上的開孔, 觀看晶圓背面圖形, 再與之前的光罩圖形對準



## 典型曝光光源

- 黃光室照明燈源為0.5 micron, 因多數光阻對此光源不敏感
- 曝光源 : 紫外光 (Ultraviolet)
  - ▶ Extreme UV: 10-14 nm (wavelength)
  - ▶ Deep UV: 150-300 nm
  - ▶ Near UV: 350-500 nm
- 汞燈 (Hg)光源
  - ▶ G-line 波長436 nm (常用於學校)
  - ▶ I-line 波長365 nm (常用於0.35微米的IC製程中)



## Light Source

■ Near UV Lightsource:

- ▶ 436 nm (g-line)
- ▶ 400 nm (h-line)
- ▶ 365 nm (i-line)

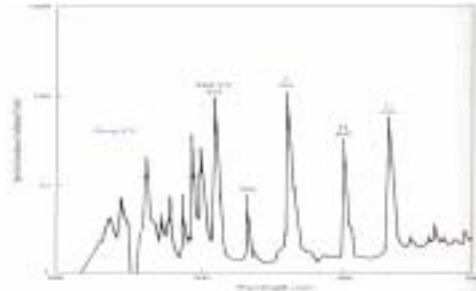
■ Mid UV Lightsource:

- ▶ 310 nm
- ▶ 280 nm

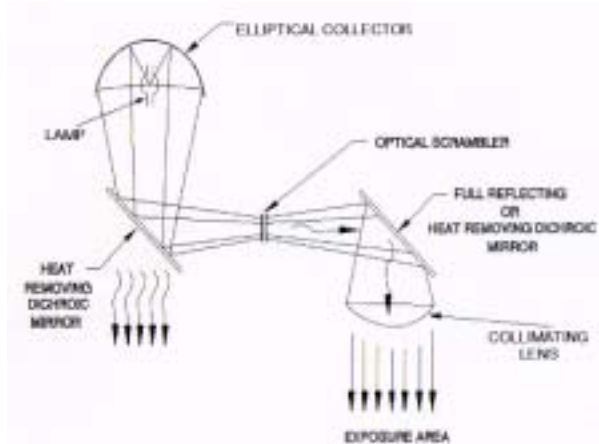
■ Deep UV Lightsource:

- ▶ 260 nm
- ▶ 254 nm
- ▶ 220 nm

■ Typical High Pressure Mercury-Arc Lamp Spectrum



## Exposure System Design





### Exposure System Components



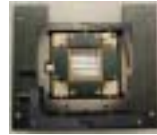
First dichroic mirror  
(濾光鏡)



Elliptical collector, Lamp,  
Heat sink



Collimating lens  
(平行光)



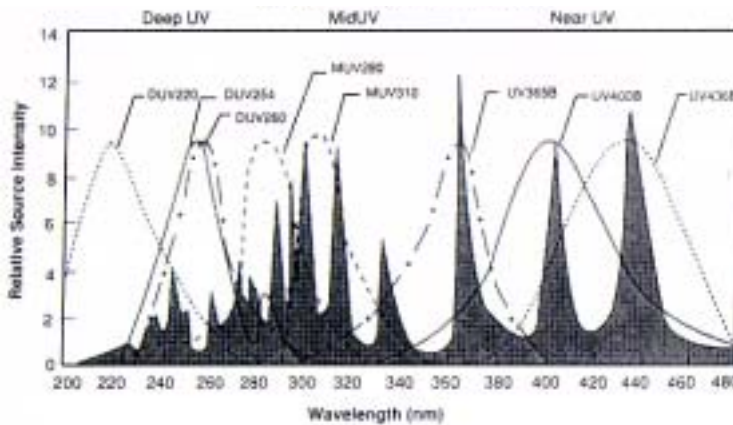
Optical scrambler



Intensity  
detectors and Shutter  
(快門)



### Near, Mid, and Deep UV Source



Shaded area indicates lamp output intensities  
Dashed lines indicate mirror spectral reflectances



## Critical Dimension

### ■ Critical Dimension (CD)

$$CD \propto \sqrt{\lambda g}$$

- ▶  $\lambda$  光源波長
- ▶  $g$  光罩與晶圓間隙

Ex:  $\lambda = 0.4$  micron  
 $g = 50$  micron  
 CD = 4.5 micron

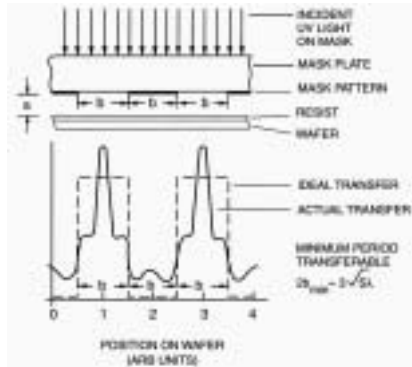


Figure 1.12 Light distribution profiles on a photoresist surface after light passes through a mask containing an equal line and space grating. (From C.G. Wilson in *Introduction to Microphotography*, L. F. Thomas, C.G. Wilson, and M.J. Bowler, Eds., American Chemical Society, Washington, D.C., 1994.) Reprinted with permission.



## 短波長曝光光源

- Excimer laser (準分子雷射) 產生深紫外光(Deep UV range 0.2-0.3 micron)
  - ▶ KrF 波長248 nm：解析度可達0.18  $\mu\text{m}$
  - ▶ ArF 波長193 nm：解析度可達0.10  $\mu\text{m}$
  - ▶ F<sub>2</sub> 波長157 nm：解析度可達0.07  $\mu\text{m}$
- E-beam (電子物質波)：價錢高，量產中
- X光：能量需求高，價錢昂貴，多用於LIGA製程



## 正光阻與負光阻

- 正光阻：分子鍵在曝光後被打斷，在顯影時會被溶去
- 負光阻：分子鍵在曝光後被交鏈固化，在顯影時未曝光部分會被溶去

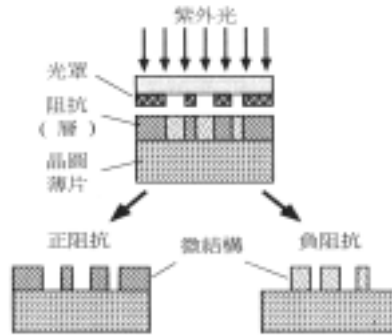
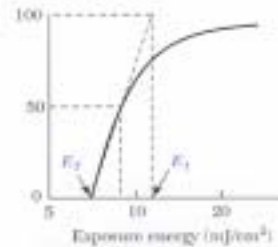
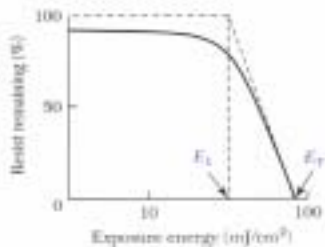


圖 4.3 不同的顯像步驟。

## 光阻特性

- 正光阻
  - ▶  $E_T$ : 臨界能量值 (Threshold energy)
  - ▶ 正光阻敏感度 =  $E_T$
- 負光阻
  - ▶ 圖形會膨脹，因而影響負光阻的圖形解析度
  - ▶ 負光阻敏感度定義為50%光阻厚度固化所需的能量





## 光阻特性

- 因光阻曝光時，光罩邊緣會有折射效應(Diffraction)，因此顯影後的光阻斷面圖形並非垂直於基材

- 正光阻Contrast Ratio

- ▶  $E_1$ : 正光阻曝光開始溶化所需之臨界能源
- ▶  $E_T$ : 光阻分子鏈完全被打斷所需之能源值
- ▶ Larger  $\gamma$  implies sharper image

$$\gamma_p \equiv \left[ \ln \left( \frac{E_T}{E_1} \right) \right]^{-1}$$

- 負光阻Contrast Ratio

- ▶  $E_1$ : 負光阻曝光開始固化所需之臨界能源
- ▶ Larger  $\gamma$  implies sharper image

$$\gamma_n \equiv \left[ \ln \left( \frac{E_1}{E_T} \right) \right]^{-1}$$



## 不同光阻對光波長的敏感度

雕像術	光阻名稱	正/負光阻	敏感度或感光度
光學	AZ-1350	正光阻	90 mJ/cm <sup>2</sup>
	PR102	正光阻	140 mJ/cm <sup>2</sup>
	SU8-2(1.5 μm)	負光阻	85-100 mJ/cm <sup>2</sup>
	SU8-5(5 μm)	負光阻	120-130 mJ/cm <sup>2</sup>
電子束	GeSe	負光阻	80 μcJ/cm <sup>2</sup>
	PBS	正光阻	1 μcJ/cm <sup>2</sup>
	PMMA	正光阻	50 μcJ/cm <sup>2</sup>
X 光	COP	負光阻	175 mJ/cm <sup>2</sup>
	PBS	正光阻	95 mJ/cm <sup>2</sup>
	PMMA	正光阻	1000 mJ/cm <sup>2</sup>





## 正光阻與負光阻的比較

Characteristic	Resist type	
	Positive	Negative
Adhesion to Si	Fair	Excellent
Available compositions	Many	Vast
Contrast $\gamma$	Higher, e.g., 2.2	Lower, e.g., 1.5
Cost	More expensive	Less expensive
Developer	Aqueous based (ecologically sound)	Organic solvent
Developer process window	Small	Very wide, insensitive to overdeveloping
Influence of oxygen	No	Yes
Lift-off	Yes (usually with multiple-layer resist (MLR))	Yes, with new types of negative resists (single-layer resist (SLR))
Minimum feature	0.5 $\mu\text{m}$ and below	$\pm 2 \mu\text{m}$
Opaque dirt on clear portion of mask	Not very sensitive to it	Causes printing of pinholes
Photospread	Slower	Faster
Pinhole count	Higher	Lower
Pinholes in mask	Prints mask pinholes	Not so sensitive to mask pinholes



## 正光阻與負光阻的比較 (續)

Characteristic	Resist type	
	Positive	Negative
Plasma etch resistance	Very good	Not very good
Proximity effect	Prints isolated holes or trenches better	Prints isolated lines better
Residue after development	Mostly at $<1 \mu\text{m}$ and high aspect ratio	Often a problem
Sensitizer quantum yield $\Phi$	0.2 to 0.3	0.5 to 1
Step coverage	Better	Lower
Strippers of resist over		
Oxide strips	Acid	Acid
Metal strips	Simple solvents	Chlorinated solvent compounds
Swelling in developer	No	Yes
Thermal stability	Good	Fair
Wet chemical resistance	Fair	Excellent

\*Newer resist systems are discussed under *Photolithography Resolution Enhancement Technology*, page 32.







## 顯影

### ■ 常用光阻與其對應的顯影液

- ▶ 一般正光阻以鹼性溶液，負光阻以有機溶液顯影

光 阻	顯 影 液
S1813	MF319
SJR5700	MP450
AZ5214E	AZ300MIF
XP SU-8	PGMEA
Pyralin PI2721 (Photosensitive Polyimide)	DE6180
Pyralux PC105 Dry resist film	1% K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
Riston 4600 Dry resisit film	1% K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>



## 硬烤

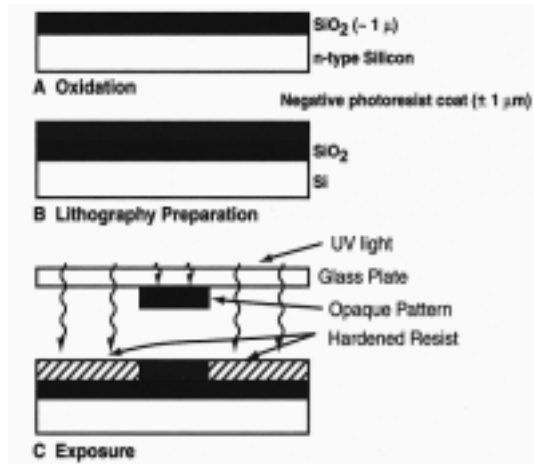
### ■ 以高於光阻的玻態轉變溫度(Glass transition)加熱 (120~200°C)

- ▶ 降低光阻的溶劑含量
- ▶ 增加附著
- ▶ 增加對酸的抵抗
- ▶ 使邊緣平坦化、減少缺陷孔隙。



## Lithography of Silica Pattern - 1

- 氧化層
- 上光阻
- 對準曝光



## Lithography of Silica Pattern - 2

- 光阻顯影 (正光阻)
- 蝕刻裸露之二氧化矽圖形
- 去除光阻

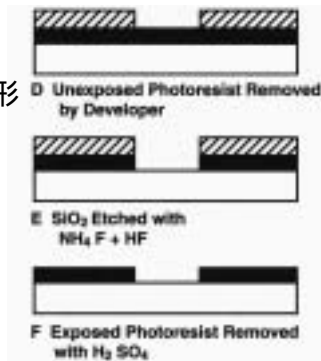
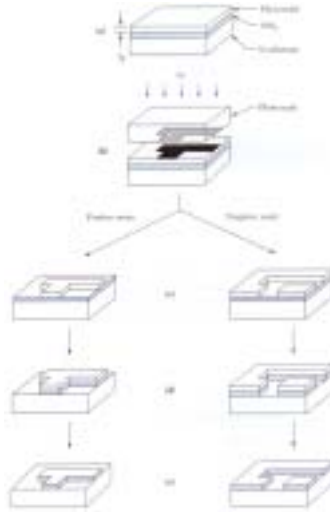


Figure 1.1 Basic photolithography and pattern transfer. Example uses an oxidized Si wafer and a negative photoresist system. Process steps include exposure, development, oxide etching, and resist stripping. Steps A through F are explained in the text.

## 微影後的微加工

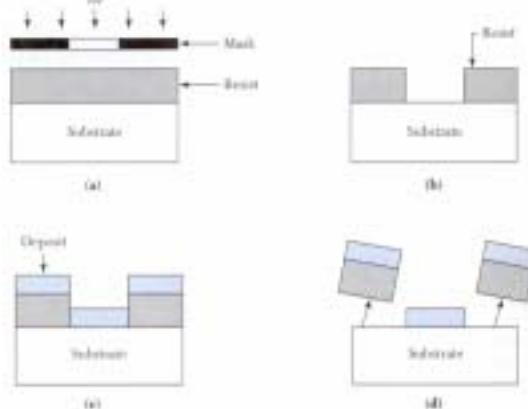
### ■ 微影與蝕刻誤差

- ▶ 圖形由光罩轉移至光阻，過程會產生成像偏差，偏差量與曝光方式、光源、光阻特性有關。
- ▶ 而以光阻作為阻擋層所蝕刻出的薄膜結構，因為底切(undercut)的緣故，會產生蝕刻偏差，尤其是等向性蝕刻如二氧化矽。



## 微影後的微加工

### ■ 掀去法 (Lift-Off)





## *Reference*

- *Fundamentals of Microfabrication*, Marc Madou, 2nd Ed., CRC Press (2002) – Chapter 1
- *Microsystem Technology and Microrobotics*, Fatikow and Rembold, Springer, (1997) – Chapter 3
- *Semiconductor Devices*, S.M. Sze, 2nd Ed., John Wiley & Sons (2002) – Chapter 12
- 微機電系統，陳炳輝，五南，（2001）- 第二章

