

第 1 章

微影照像

- 1.1. 緒 論
- 1.2. ULSI微影技術的延伸與極限
- 1.3. 提升光學微影製程的技術
- 1.4. 深次微米微影照像
- 1.5. 電子束微影技術
- 1.6. 光罩或圖規
- 1.7. 阻劑和抗反射覆蓋
- 1.8. 參考文獻
- 1.9. 習 題

1.1 緒 論

在矽晶圓上製作超大型積體電路（VLSI, very large scale integrated circuits）每個晶片（chip）含 10^5 到 10^6 個電晶體的微影照像有幾種方法，如圖1.1所示。最常用的方法是用電子束曝光系統製作母光罩（master photomask），再用光學照像設備複製影像，如圖1.2所示。曝光輻射穿透光罩（photomask）中透明的部分，電路圖案的不透明部分阻擋部分輻射。阻劑（resist）對輻射敏感，而且對蝕刻有阻抗，塗敷於晶圓（wafer）表面。光罩在要求的公差之內，在晶圓上對準，然後輻射照在晶圓之上，阻劑影像顯影（development），阻劑下層被蝕刻掉。

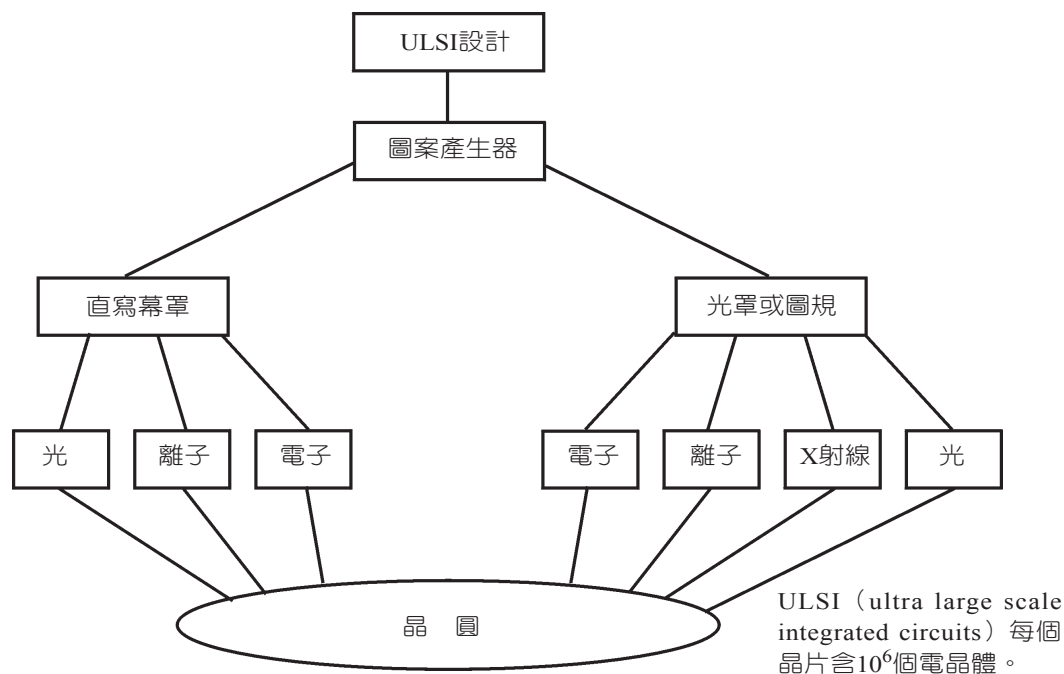


圖1.1 幾種ULSI的微影照像製程

（資料來源：Chang and Sze, ULSI Technology）

註：本書並不強調VLSI或ULSI的區別。

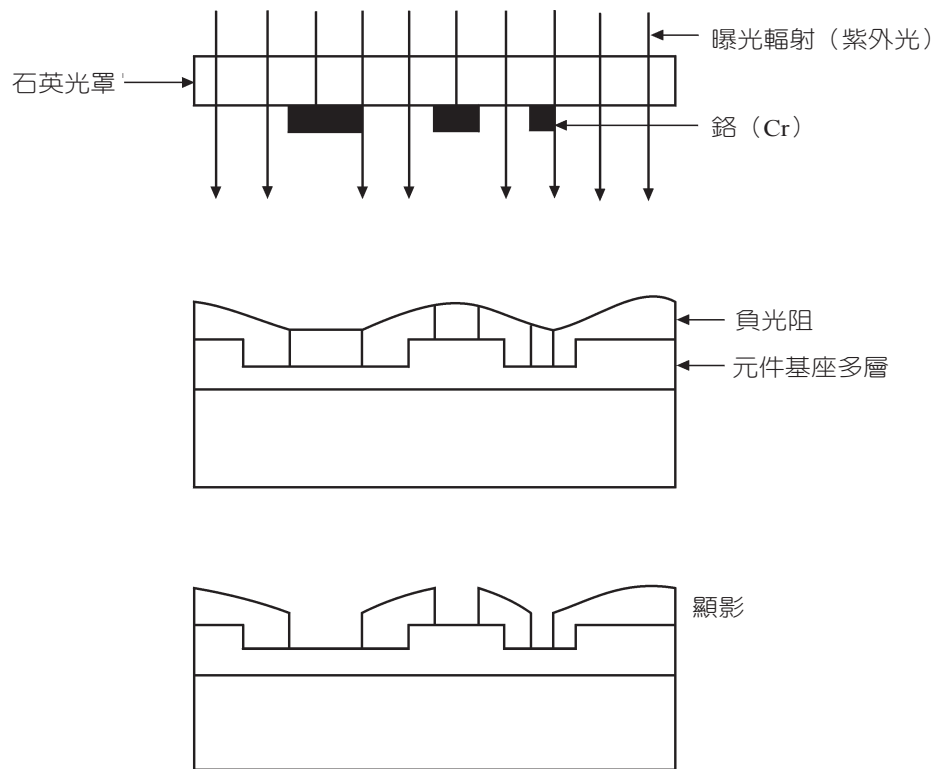


圖1.2 光複製製程

(資料來源：Chang and Sze, ULSI Technology)

曝光時，依光罩和晶圓的放置、遠近和照射方式，又分為接觸（**contact**）、近接（**proximity**）和投影（**projection**）、掃描（**scan**）等數種。光罩上的圖案以1：1成像的稱為**mask**，縮小後成像的稱為**reticle**。

微影照像製作圖案的主要步驟為：

1. 烘烤矽基座以除去表面揮發性污染物如水，稱為去水烘烤（**dehydration bake**），然後塗底（**priming**）用六甲基二矽氮烷（**hexa methyl disilazane**，**HMDS**， $(\text{CH}_3)_6\text{Si}_2\text{NH}$ 或 $\text{Me}_6\text{Si}_2\text{NH}$ ），含 CH_3 端與阻劑中的C、H、O原子產生凡得瓦力（**van der Waals force**，分子間的微弱吸引力），可以提升光阻的附著力（**adhesion promoter**）。矽基座上可能已成長二氧化矽、多晶矽或金屬，如圖1.3所示。**Me**為甲基（**methyl**）即 CH_3 。**DHF**為稀釋的氫氟酸（**diluted HF**）。**BOE**為緩

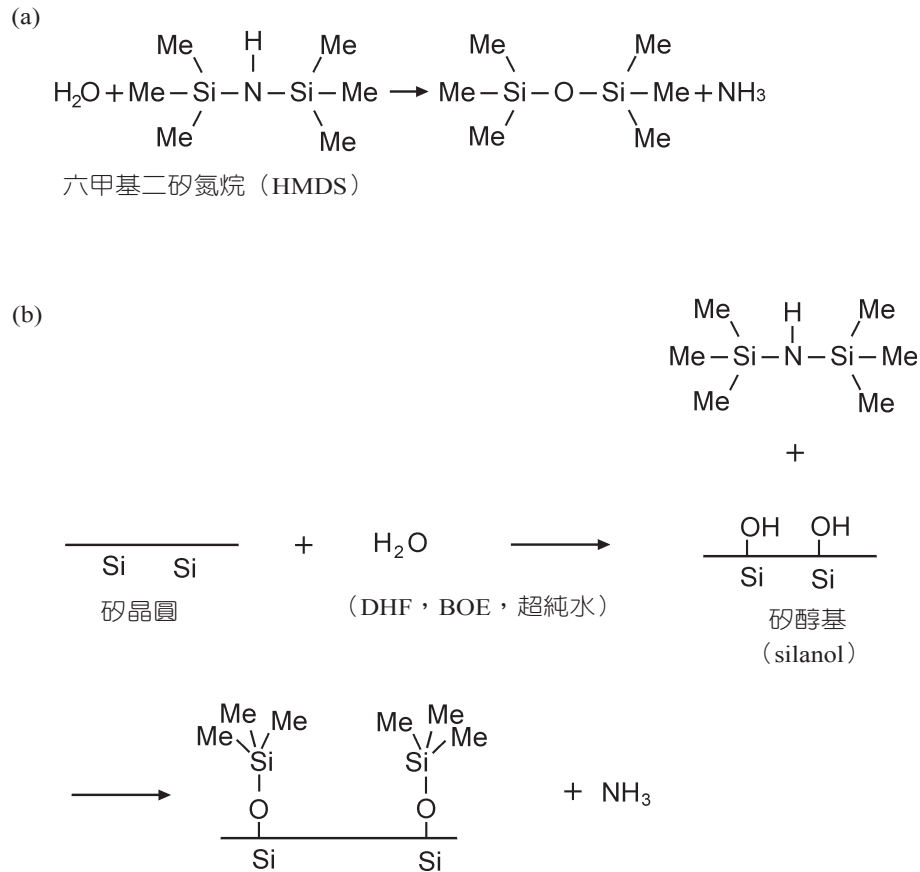


圖1.3 底材HMDS作用，(a)去水，(b)提升晶圓與阻劑間附著力

(資料來源：龍文安，積體電路微影製程)

- 衝氧化物蝕刻 (**buffer oxide etch**)，成份為氟化氫 + 氟化銨 ($\text{HF} + \text{NH}_4\text{F}$)。反應後生成矽醇基 (**silanol**, SiOH)。
2. 上光阻，旋轉使其均勻，並控制光阻厚度，烘烤除去光阻中的殘餘溶劑，此步驟稱為軟烘烤 (**soft bake**)。
 3. 曝光 (**exposure**) 用光罩對準儀 (**mask aligner**) 或步進照像機 (**stepper**)。前者一次曝光一整片晶圓 (**wafer**)，後者以步進重覆方式，一次曝光數個晶片 (**chip**)。更進步的用步進掃描 (**step and scan**)。
 4. 曝光後烘烤 (**post exposure bake**, **PEB**)，亦稱硬烘烤 (**hard bake**)，以消除阻劑膜的駐波 (**standing wave**)。在深紫外光 (**deep ultra-violet**) 製程，硬烤

是必須的製程，否則阻劑化學無法工作。

5. 顯影（development），正光阻以氫氧化鉀（KOH）、氫氧化鈉（NaOH）或四甲基氫氧化銨（tetra methyl ammonium hydroxide，TMAH， $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$ ）顯影，曝光的部分被除去。負光阻以二甲苯（xylene， $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$ ）顯影，未曝光的部分被除去。
6. 光阻結構可供離子植入（ion implantation）的幕罩用以植入摻質。或以濕蝕刻或乾蝕刻除去沒有光阻保護的底層二氧化矽（ SiO_2 ）、多晶矽或金屬，以形成絕緣層、閘極或接線等結構。

以上製程的簡單流程，如圖1.4所示。

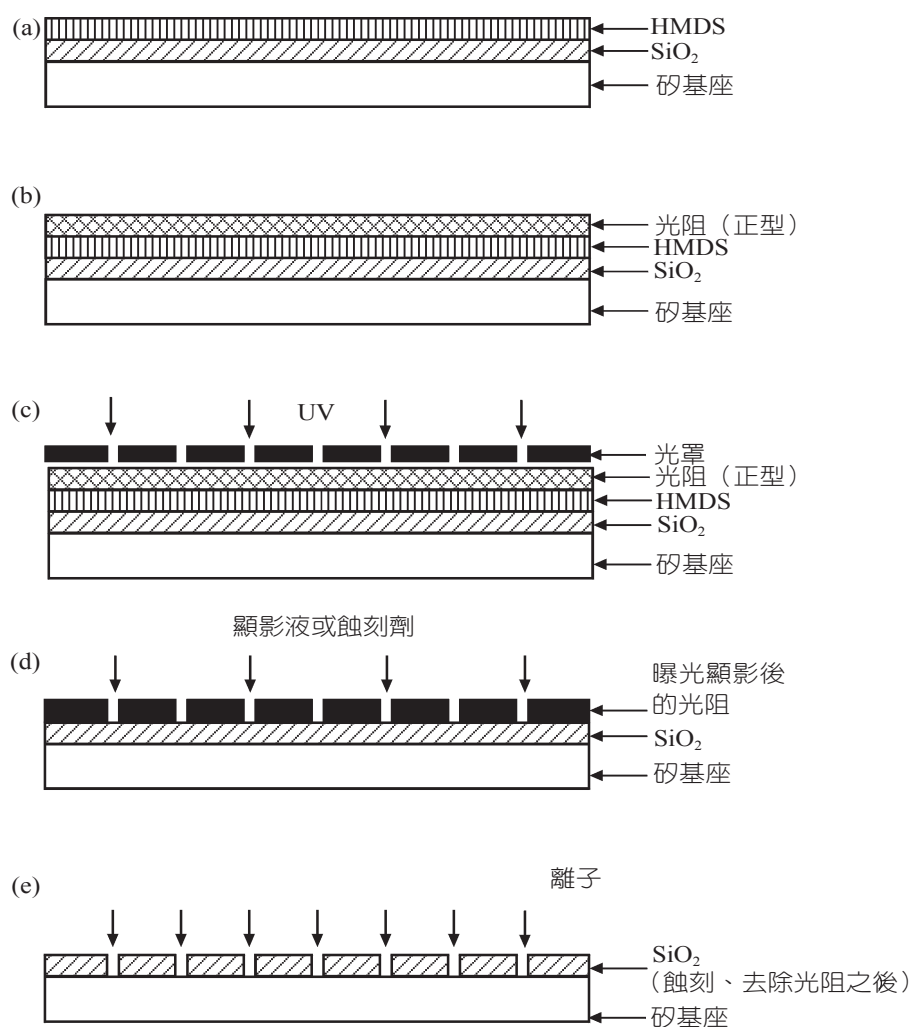


圖1.4 微影顯像複製圖案流程

- (a) 烘烤、塗底 (priming)。
- (b) 旋塗光阻 (此例為正型)、軟烤。
- (c) 曝光、硬烤。
- (d) 顯影、蝕刻。
- (e) 去除阻劑，離子植入 (也可以在(d)以光阻做幕罩進行離子植入)。

1.2 ULSI微影技術的延伸與極限

微影技術製程，其資訊傳遞的流程，如圖1.5所示。由設計開始，到晶圓上完成元件圖案結束。每一步驟都受製程穩定性及外在和內在的影響，情形如下：

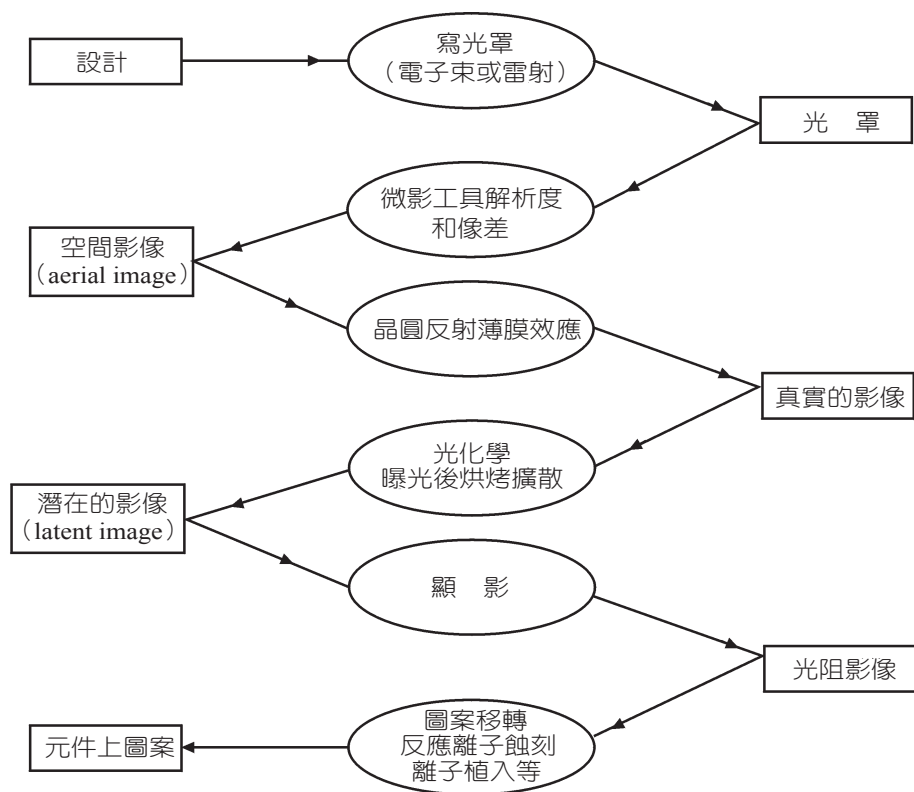


圖1.5 微影技術資訊流程

（資料來源：廖明吉，電子月刊）

1. 光罩製作，受限於各種缺陷，如圖案角落圓化、圖案位移錯誤等。
2. 曝光工具繞射（diffraction）、鏡片色差（achromatic aberration）和其它光學缺失。
3. 晶圓薄膜會引起反射（reflection）、駐波（standing wave）、干擾等，使圖形影像變形。
4. 光阻：光酸化學分子擴散使潛在影像（latent image）的靈敏度降低。
5. 顯影：表面張力效應、濕式顯影限制了最後光阻應用的深寬比（aspect ratio）。
6. 蝕刻：濕式蝕刻會造成底切（undercut），乾式蝕刻也有深寬比限制。

ULSI元件量產用的微影製程技術，必備條件為：

1. 能曝出的解析度（resolution）：

在線寬控制規格範圍內，曝出所想要的圖案的能力。製程窗（process window）即製程參數允許的變化值要夠大，以包含製程中發生的曝光和焦距（focus）變動。由前一層所造成在晶圓表面的變化，也能適當曝光下一層圖案的真實性。

2. 疊對（overlay）能力：

最小可印出的線寬稱為光點（pixel，或稱像素），在0.3光點範圍內將本層疊對到前一界定層的能力。並補償由製造產生的大小改變。

3. 量產能力（throughput），高度準確圖案，合理的設備成本、設備可靠度、合理的罩幕（mask或reticle）和阻劑成本。

目前半導體製程製作動態隨機存取記憶體（DRAM），64M位元或256M位元，需要極小特徵尺寸 $0.35\ \mu\text{m}$ 甚或 $0.25\ \mu\text{m}$ ，必須使用250奈米（nano meter, nm）或更短波長的深紫外光（deep UV, DUV）。主要的技術挑戰為低強度光源和高吸收光阻、高吸收透鏡材料。光阻需要新的樹脂（resin）、新的感光劑（sensitizer），即化學放大光阻（chemically amplified resist, CAR）。CAR有感光劑，在感光後轉為酸，作催化劑（catalyst），在曝光和後烘烤，使共聚高分子樹脂溶於顯影劑（developer），使光阻靈敏度提高。

透鏡材料的石英（quartz）必須用體積大、無缺陷，以避免散射損失（scattering

loss) 或輻照傷害 (irradiation damage)，有高數值孔徑 (numerical aperture)、無色差 (chromatic aberration)、光源必須為單色的 (monochromatic)，頻譜寬只有1皮米 (picometer)，因此只有一個選擇－雷射 (laser)。

微影技術的解析度 (resolution)，基本的限制為：

$$R = k_1 \lambda / NA \dots\dots\dots (1.1)$$

上式R表示最小線寬 (解析度)， k_1 為常數，和製程條件、光阻有關，典型值大約為0.5。 λ 為曝光波長，NA為投影鏡片的數值孔徑 (numerical aperture)，

$$\text{聚焦景深 (DOF)} = \pm k_2 \times \lambda / (NA)^2 \dots\dots\dots (1.2)$$

k_2 是另一個常數，可能相依 k_1 。為提高解析度，可以用短波長的光源，但曝光機器昂貴或無量產型機器。提高數值孔徑則會降低景深，使製程不穩定。提高鏡頭的數值孔徑的同時更要減少像差。幾個對光學微影技術的重要波長、解析度和聚焦景深，如表1.1所列。假設 $NA=0.7$ ， $k_1=0.5$ ， $\Delta \lambda / \lambda$ 代表從一個波長跳到特定波長的趨動力。

焦距深度或稱景深 (depth of focus, DOF)，定義為焦距的範圍，使一已知特徵的光阻輪廓保持在規格之內，如線寬、側牆角、光阻損失等，在一特定的曝光範圍。焦距深度是高解析度照像最重要的參數之一，因為圖案薄膜的地形 (topography) 和場區不平坦，已經和焦距窗 (focus window) 差不多了，平坦化 (planarization) 製程是必須的，而且可提高產率。解析度 (resolution) 的定義即為以一特定的焦距深度，可以印製的最小特徵尺寸。

深紫外光唯一可用的透鏡材料是石英 (quartz)，需要大體積，做大透鏡，沒有缺陷以避免在操作時有散射損失或輻射傷害。要有大的數值孔徑使透鏡製作困難。以單一透鏡材料，在完全折射的透鏡設計，無法做色像修正 (chromatic correction)，唯一可行的辦法是「全場區照像」，即一個晶片以一次曝光完成。為

解決此難題，光源必須是單色光（monochromatic light），其造成的色像誤差是可容許的，對應於這種透鏡的設計，光學頻譜寬大約一皮米（picometer, 10^{-12}m ），光源的唯一選擇是雷射。

表1.1 各種微影技術之比較

	波長 λ nm	$\Delta \lambda / \lambda$ %	最小線寬 $R_{\min}$, nm	聚焦景深 (DOF), nm	備 註
G-line	436		311	850	
I-line	365	19	260	730	
KrF	248	47	175	500	鏡片材料，以熔融石英(fused quartz)為主，雷射以2000赫的重覆率，產生10mJ的脈衝，掃描曝光。
ArF	193	28	140	400	鏡片材料以熔融石英為主，學習以改善氟化鈣（ CaF_2 ）消色差材質和製造技術、折射投影光學。
F_2 雷射	157	23	112	320	鏡片材料：氟化鈣、高穿透力，但大塊 CaF_2 尚未可得，有機材料有大的吸收。開發雙層光阻或光阻矽化（silylation）製程。
Ar雷射	126	25	90	257	Ar光源對步進機太弱、穩定度不好，鏡片設備必須是反射性、高難度的曲率表面，NA可能限制在0.55。

（資料來源：廖明吉，電子月刊）DOF: depth of focus NA: numerical aperture

透鏡材料要有以下條件：

1. 折射率（refractive index）均勻。
2. 低應力、雙折射（birefringence, double refraction），即物質對光的折射率隨偏振（polarization）而改變。
3. 能長時間承受輻照、不改變特性、不收縮。
4. 直徑大。
5. 機械化學特性適於加工製作。
6. 尺寸和表面公差（tolerance）嚴謹。

熔合矽石（fused silica）和氟化鈣（ CaF_2 ）適於193 nm，氟化鈣是唯一適用於157 nm的透鏡材料。在193奈米，融合矽石的吸收係數（absorption coefficient）為

$0.001 \sim 0.004 \text{ cm}^{-1}$ ，氟化鈣的吸收係數為 $0.002 \sim 0.0005 \text{ cm}^{-1}$ 。在157奈米，氟化鈣的吸收係數大約為 0.004 cm^{-1} 。透鏡材料只有氟化鈣，色像差（chromatic aberration）就無法修正了；因此雷射源要用窄線寬（narrow linewidth），或光學系統要全反射（catadioptric）或全反射（all reflective）式的。

準分子雷射（excimer laser）有氟化氬（KrF）和氟化氬（ArF）兩種，是驅動微影製程進入深次微米（deep submicron），使解析度小於0.5微米的曝光光源。一準分子雷射的曝光系統，如圖1.6所示。

增加解析度的另一個方法是增加數值孔徑（numerical aperture），但聚焦景深（depth of focus, DOF）因而減少。改進方法有鏡片聚焦平面的偏移，以化學機械研磨（chemical mechanical polishing, CMP）提升晶圓的平坦度，自動對焦或自動齊平，以低色像差的鏡片使曝光影像區域加大。數值孔徑的實際限制大約在0.7~0.8。當 $NA=0.71$ 時，DOF只有二倍的波長。降低 k_1 也可提高解析度。指示曝光困難度的 k_1 ，其發展趨勢（NA值為0.6）如圖1.7所示。當 $k_1 < 0.5$ 時，必須使用增加解析的技術，如相移式光罩（phase shift mask, PSM）、偏軸式

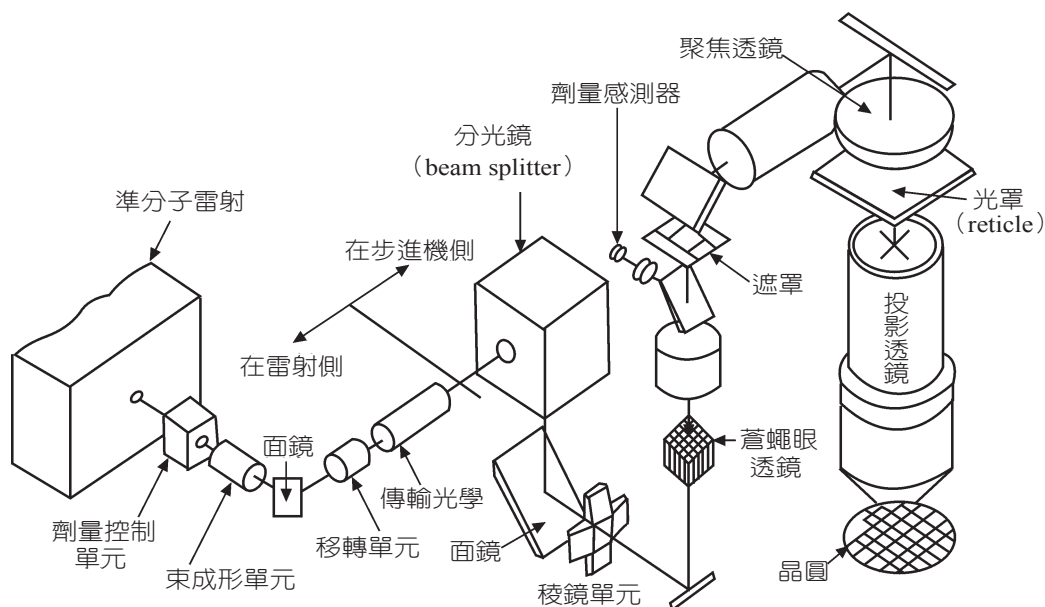


圖1.6 準分子雷射曝光系統

（資料來源：龍文安，積體電路微影製程）