

第一章 緒論

現今半導體產業都不斷地開發新技術，製程技術也遵循著摩爾定律「預測每一晶方電晶體數目每兩年增加一倍」而持續前進。隨著半導體元件尺寸不斷縮小及電路密集度的急遽增加，關鍵之微影(Lithography)製程要求亦日趨嚴格。目前微影技術主流採用 193 nm 之深紫外光(DUV)光源，線寬節點已達到 90 nm 世代並順利量產，更預計在明年少量試產 65 nm 之晶片。此外，在降低成本、提高產率之前提下，晶圓尺寸也由原先的 8 吋發展至 12 吋。美國半導體工業協會(Semiconductor Industry Association, SIA)所展示的國際半導體技術藍圖(International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS)中，預測了半導體工業於西元 2007 年將量產半間距(Half Pitch)僅有 65 nm 之 DRAM，而西元 2016 年將達到 22 nm 以下，見表 1-1[1]。表 1-2[2]為 ITRS 所發表未來數年之微影技術藍圖。

使用極短紫外光微影技術(EUVL)[3]或是電子束投影微影(EPL)等下世代微影技術(Next Generation Lithography, NGL)，可將製程藍圖拓展到 45 nm 技術節點以下。目前 157 nm 微影技術與極短紫外光微影技術相互競爭，但各有其問題急需改善[4]。為延長微影機台的使用壽命，及避免更換機台所需負擔之高額成本，微影製程必須搭配解像度增進技術(Resolution Enhancement Technology, RET)，以增加製程視窗及縮小線寬，因此，發展 193 nm 微影所適用之解像度增進技術乃當務之急。廣義之解像度增進技術不勝枚舉，茲就幾項較重要技術列舉如圖 1-1：

1. 相移圖罩(Phase Shift Mask, PSM)

入射光透過圖罩相移層與非相移層二者之光幅產生 π 相位

差，形成破壞性干涉，如圖 1-2。主要以空間頻率調變與邊端強化二大原理，來增強解像度(Resolution)與焦深(Depth of Focus, DOF)。

2. 偏軸發光(Off-Axis Illumination, OAI)

入射光不從中心出發，而是斜射進入圖罩光柵產生繞射，而以(0, +1)或(0, -1)兩光束干涉成像，理論焦深可為無限長。偏軸發光已為新式掃描機之標準配備。

3. 光瞳濾波片(Pupil Filters)

繞射成像時，0 級繞射光只提供成像時的背景光，若背景光太強會使原本應有之空間影像對比度(像比)下降，可用光瞳濾光片減弱 0 級繞射光，但若 0 級繞射光減弱太多，將會形成較明顯之側葉光強(Side Lobe)，及通過光瞳能量太弱，而需較長之照射時間或需使用感度較高之阻劑，為了提供適當之 0 級繞射光強，發展出數種不同形式之光瞳濾光片，包含環形、鐘形化的環形、共軛等光瞳濾光片。偏軸發光二光束成像時，可修正二光束之光幅。

4. 聚焦寬容度加強照射(Focus Latitude Enhancement Exposure, FLEX)

聚焦寬容度強化照射應用二次照射，改變聚焦平面縱向高低，但水平位置維持不變，可增加焦深，而解像度不受影響。

5. 超聚焦寬容度強化照射(Super-Focus Latitude Enhancement Exposure, Super-FLEX)

於聚焦寬容度強化照射中，必須能準確的控制聚焦平面縱向之位置，於實際上是很難達到。可藉由光瞳濾光片改變光瞳函數，使繞射光之相位得到調制，而達到增進解像度與增加焦深之目的，稱為超聚焦寬容度強化照射。

6. 光學鄰近效應修正(Optical Proximity Correction, OPC)

光學投影系統所造成之成像圖案失真主要原因有二，一為空間低通濾波效應：有限大小之光瞳只能讓較低級(或低頻)，並低於此截止頻率($\nu_{\text{cut-off}}$)之空間頻率通過，而無法讓較高級繞射(高頻)通過，使得投影成像圖案失真；二為光學鄰近效應：光源通過透鏡圖罩後之繞射圖形，其中兩個分開而鄰近的光點會因為互相干涉，而改變了原本各自之振幅強度及相位，甚至原本所在之分布空間，使得投影成像圖案失真。廣義之光學鄰近效應可包含空間低通濾波效應，其修正方式主要以改變圖罩設計為主，包含特徵偏差與特徵輔助等方法。

在阻劑方面解像度增進技術有：

1. 表層成像(Top Surface Imaging, TSI)：

表層成像僅需對阻劑表層成像，此表層如同雙層阻劑系統之上層(影像層)。照射後，經選擇性氣相或液相矽化，再經電漿蝕刻定義阻劑圖案。

2. 抗反射塗佈(Antireflection Coating, ARC)：

降低駐波效應。

在上述之解像度增進技術中，相移圖罩之種類繁多，如圖1-3[5]，因其技術不需改變原有製程與設備，且所需成本較低，深受半導體業界重視。近年發展以嵌附式減光型相移圖罩最被看好，因較其它型易修補、檢測，適用各種圖案與有效增進微影製程寬容度[6]。其單層薄膜兼具減光與相移用途，符合正規透射率4-15%、相移180度、化學穩定度與照射穩定度等需求。本實驗室過去已探討一系列嵌附式減光型相移圖罩所應用之相關性質，研究發現薄膜可藉由改變鍍膜條件而改變其組成和光學性質。

本論文第一部份選擇氮化矽(Si_3N_4)、鉬矽氮(MoSiN)與鈦矽氮(TiSiN)做為193 nm嵌附式減光型相移圖罩之材質，比較薄膜之折射率(Refractive Index, n)與吸收係數或消光係數(Absorption Coefficient or Extinction Coefficient, k)等光學性質之量測方法。變角度橢圓儀(Variable Angle Spectroscopic Ellipsometer, VASE)所測得的 n 、 k 值相當精確，但儀器價格相當昂貴，常用的 n & k 分析儀(n & k Analyzer)雖方便，但缺點為對於不常用材質所做的曲線附合並不理想，即求出的 n 、 k 不甚準確。本實驗室利用反射率-透射率法(Reflectance-Transmittance Method, R-T Method)，對薄膜粗糙表面的散射光所造成之誤差，導入純量散射理論作修正，開發出了修正反射率-透射率法(Modified R-T Method)。目的在於驗證反射率-透射率修正法對薄膜光學性質之測求，其準確性高於 n & k 分析儀且接近橢圓儀之量測結果。

第二部分針對二孔發光(Dipole Illumination)方式，使用美商KLA-Tencor之微影模擬軟體ProLith v. 8.0，設計相移圖罩並調整各項參數進行模擬計算，以探討二孔發光所產生的側葉效應(Side Lobe)、空間影像(Aerial Image)與阻劑輪廓(Resist Profile)等關係。雖然二孔發光之目的與其他偏軸發光方式相同，都在於改善焦深或解像度，但應用至實際圖案時卻有方向性等問題。模擬發現側葉位置與圖罩隙寬呈現指數關係，側葉位置之趨勢可用多項式表示。如調整圖罩上隙與隙距離可將相鄰兩主極大之側葉重疊而使側葉光強達到最大，或控制間距將側葉落於相鄰主極大之內以避免側葉在阻劑上顯影。此外，模擬實驗亦探討 s 偏振光、 p 偏振光與未偏振光搭配二孔垂直位向發光時，對成像品質之影響，並改變各項變因藉電腦模擬一併討論之。

第二章 文獻回顧

2-1 相移圖罩之發展歷程

早期，相移圖罩(Phase-Shifting Mask, PSM)之概念是應用在 X-Ray 微影，美國麻省理工學院 H. I. Smith[7]等人在西元 1979 年提出一新技術 “Spatial Period Division” 可用於 UV/Visible 與 X-Ray 中，即使用碳 K 線 4.5 nm 軟 X-Ray，亦首先提出以相移層相消提高解像度的概念。藉鄰近法照射在 Gap 4.3 nm，線隙比 196.8 nm，隙寬為 40 nm 的週期性相移圖罩，微影於聚甲基丙烯酸甲酯 (Polymethylmethacrylate, PMMA)阻劑上曝出 98.4 nm 的線寬。D. C. Flanders 和 H. I. Smith 兩人並於 1980 年以 X-Ray 微影用之減光型相移圖罩獲得專利。1982 年 M. D. Levenson[8]應用 H. I. Smith 提出消除 0 級光之概念，提出間隔型相移圖罩(Alternate PSM)可改善光學微影解像度的想法，並指出相移圖罩所需的相擾度值較傳統圖罩低，約 0.3 左右，利用破壞性干涉減少或消除光經過圖罩時所產生 0 級(主極大)繞射峰，主要留下+1 與-1 級繞射峰而二光束干涉成像，增加像比，而且相移圖罩均可應用於縮小十倍的投影式或鄰近式照射系統。H. I. Smith 等人[9]於 1987 年提出減光型相移圖罩運用於 X-Ray，藉著鄰近法照射，經過圖罩產生減光及相移 180 度，以增加像比。

由於雷文生型相移圖罩有圖案運用上的限制，故由最初的相移圖罩之設計圖案結構起，陸續有人依據相同的原理提出了多種強型、弱型的相移圖罩結構[10-12]。歷經多年發展至今，已有數種不同類型之相移圖罩被設計出，並且不再侷限於 X-Ray 微影，而是廣泛運用在 DUV 或 EUV 微影上。1990 年 B. J. Lin[13]以

照射-離焦樹狀圖(Exposure-Defocus Tree, E-D Tree)分析多種相移圖罩，其優缺點和構造分述如下：

1. 雷文生(Levenson)型，或稱間隔(Alternate)型(強型)：

原理如圖 2-1，對於解像度與製程寬容度的改善效果甚大，在學術理論上有其價值，但實際製作上較為困難，且僅適用在成對以上圖案。對於孤立圖案，如接觸孔、孤立線、孤立隙等圖案則作用不大。

2. 輔助縫(Assist Slit)型，或稱次解析(Subresolution)型(弱型)：

可用於孤立圖案。但輔助縫圖案甚細，製備困難且不易實用化。

3. 唯相移(Shifter Only)型(強型)：

利用蝕刻與未蝕刻石英之厚度差，形成 180 度的相位移。圖罩上唯相移層之線幅寬度約在 $1.5-0.5\lambda/NA$ 時，可產生倍頻現象。一條唯相移層可得二條光強度趨近於零的暗線，而形成二條正型阻劑的線(Line)，晶圓上線條倍增，適合製備光柵，然而會有蝕刻石英之控制與側壁光散射等問題，對實際 IC 製程則不適用。

4. 緣邊(Rim)型(強型)：

對解析度改善效果甚佳，但因側壁光強度太強，會造成非預期的阻劑曝光。通常分為兩種：

(1) 基材式，或稱蝕刻石英式：

即蝕刻石英造成相位移，但有蝕刻石英與側壁散射問題。

(2) 懸臂式：

懸臂處易損壞，漸遭淘汰。

5. 減光(Attenuated)型(弱型)：

此型簡稱 Att-PSM，原理如圖 2-2。一般指正規透射率之相移圖罩，沒有圖案使用之限制，亦可改善側葉光強(Side Lobe)產生多餘圖案之問題，為目前業界較為重視者。另本實驗室郭貴琦及周岳霖學長率先成功研發出減光-緣邊(Attenuate-Rim)型(強弱混合型)或稱半透-緣邊型(Halftone-Rim Type)。此型結合減光型與緣邊型之優點，減光區可干涉消除離中央極大較遠之第二、三極大以上繞射峰。缺點為製備困難，不易實用化。

1990年 B. J. Lin 以 E-D Tree 分析多種相移圖罩[13]，指出減光型相移圖罩適用於全部圖案，且有較小的鄰近效應(Proximity Effect)，為較佳之選擇。

減光型相移圖罩可再細分為下列三種：

- (1) 旋佈玻璃(Spin-On-Glass, SOG)式
- (2) 蝕刻石英(Etch Quartz)式
- (3) 嵌附(Embedded)式：

全名為嵌附式減光型相移圖罩(Embedded Attenuated PSM, EAPSM)

此三種圖罩之優缺比較，參見表 2-1。

嵌附式減光型圖罩，因相移層厚度較傳統鉻膜圖罩薄，散射光少，側葉光強度獲得改善，焦深較深，解像度較高。此外鄰近效應也較小，故圖罩圖案所需的圖案偏差較小，圖罩可利用面積相對變大，對解像度與焦深改善效果更大，易製造、修補與檢測，加上可以適用於各種圖案等優點，極富實用性。但符合各項要求的嵌附層材料難尋，故發展出同質單層、異質

雙層、同質多層等各種嵌附層結構之減光型相移圖罩，如圖 2-3。單層減光型相移圖罩由 Y. Iwabuchi[14]於 1993 年首先研發出。B. W. Smith[15]指出透射率與相移角度大小為 193 nm 波長減光型相移圖罩能否應用成功之關鍵。G. Dao[16]等人發現，當透射率小於 10%時，線寬並不隨透射率及相移角度之誤差改變而有明顯的改變；但當透射率大於 10%時，線寬隨透射率上升而以 6.5 nm/%速率增加，並發現照射密集線隙圖案，具較低透射率之嵌附層較為適合。而相移角度會產生誤差的原因，可分析如下：

- (1) 嵌附薄膜本身所引起者，如膜厚不均或是因化學清潔而產生之化學組成變化。
- (2) 基材或嵌附層表面粗糙，導致光散射而影響成像品質。
- (3) 電漿蝕刻速率不均勻。

嵌附式減光型相移圖罩又可依嵌附層透射率的高低，分為正規及高透射率兩者。高透射率者可提供較佳的微影製程寬容度。一般常見於文獻中之嵌附層材料，如表 2-2。高透射率相移圖罩之嵌附層材料，如表 2-3。

2-2 相移圖罩之工作原理

相移圖罩之原理可簡單分為：1. 空間頻率調變；2. 邊端強化

1. 空間頻率調變(Spatial Frequency Modulation)

空間頻率即為單位長度上(通常為 1 mm)所能容納之線對數(Line Pairs)。線對寬度一般定義為線(Line)隙(Space)相等時之間距(Pitch)，所以線+隙之寬度等於二線之寬度($d=2b$)。相擾度大於 0 時，成像光束無法完美聚焦於聚焦平面上，聚焦部份重疊；相擾

度為 0 時，當空間頻率增加，間距變小，超過某值即無法成像，像比由 1 降至 0，此值即為截止頻率(Cut-off Frequency, ν_{\max})。

空間頻率調變又可分為光源與圖罩兩方面探討：

(1) 光源

A. 相擾度(σ)增加

σ 由 0 開始增加時，部分入射光可斜射進入聚焦系統經圖罩產生繞射，進入光瞳之(0, +1)或(0, -1)間繞射夾角比 $\sigma = 0$ 之傳統發光還大。當 σ 增加至 1 或 ∞ 時，最大繞射角為 $\sigma = 0$ 時之兩倍，空間頻率亦倍增，是為空間頻率調變。但此時空間影像對比度(Contrast of Aerial Image, C)趨近於零，對成像而言，無實質意義，如圖 2-4。

(考慮空間頻率時，必須兼顧像比 C 值，C 大於 0.5~0.6 為可接受之最低值，能確保成像品質。)

B. 偏軸發光(OAI)

$\sigma = 0$ 或 > 0 時，入射光可完全斜射進入圖罩產生繞射，進入光瞳之(0, +1)或(0, -1)間繞射夾角比傳統發光大。而以(0, +1)或(0, -1)二光束成像，繞射角可變大，使空間頻率增加。

(2) 圖罩

當相擾度改變時，其空間頻率變化之情形，以傳統圖罩和雷文生圖罩做比較來討論。雷文生為強型圖罩，其繞射光偶級數光(0, 2, 4 等)全消。假設兩種圖罩之線隙相等、阻劑相同、曝光製程參數亦相同，當：

A. $\sigma = 0$

設傳統三光束成像圖罩之截止頻率為 ν ；雷文生圖罩則因完美干涉而相消，原三光束(-1, 0, +1)成為二光束(-1, +1)，光幅

亦由 $(1/\pi, 1/2, 1/\pi)$ 變為 $(1/2, 1/2)$ ，繞射角縮減為原有之一半，故截止頻率為 2ν ，是為空間頻率調變。如圖 2-5。

B. $0 < \sigma < 1$

因光有部份斜射進入圖罩繞射之關係，故傳統圖罩之截止頻率， $> \nu$ ， $< 2\nu$ ，但也因部份斜射所以聚焦不完美，C 值下降；雷文生圖罩偶數級光部分相消，截止頻率 2ν ，C 值同樣下降。

C. $\sigma = 1$

雷文生圖罩之偶數級光相消程度低，與傳統圖罩類似。二者之截止頻率皆為 2ν ；空間影像對比度 C 為 0。此時近似於偏軸發光(OAI)。

2. 邊端強化

嵌附式減光型相移圖罩(Embedded Attenuated Phase-Shifting Mask, EAPSM)之原理即為此類。以接觸孔圖案， $\sigma = 0$ 為例說明，如圖 2-6。光經圖罩非相移層部份產生電場振幅為 $E_1(+1, 0, -1)$ 繞射光；嵌附層部分則因一般嵌附層透射率為 4-10%左右，其電場振幅 $E_2 < E_1$ 。

光瞳上方，相鄰之 E_1 與 E_2 之 0 級光因具 π 相位差，可產生干涉，但因 $E_2 < E_1$ ，故 0 級光僅部份相消。 $E_1(+1, 0, -1)$ 繞射光電場振幅由 $(1/\pi, 1/2, 1/\pi)$ 變為 $((1+E)/\pi, (1-E)/2, (1+E)/\pi)$ ，其繞射角不變，與傳統鉻膜圖罩相同。

再經光瞳後， E_1 之 0 級光波緣某處有與嵌附層電場 E_2 ，如 E_1 、 E_2 大小相等，且有 π 相位差，則可產生完美破壞性干涉而相消。 $E_c = E_1 + E_2 = 0$ ，又 I 正比於 E_c^2 ， $I = 0$ 。故 0 級光電場振幅底部寬度略縮，斜率略增，以邊端強化之方式增進解像度。

當 σ 之範圍為 0-1 時，光強計算需考慮兩光束之夾角 ϕ 及 $\gamma_{12}(t)$ ， $\gamma_{12}(t)$ 習稱同調度(Degree of Coherence)為時間之函數，以指數衰減。其計算公式及 $\gamma_{12}(t)$ 之物理意義，如圖 2-7、圖 2-8 所示。

對於 E_1 的 +1、-1 繞射光，因與 E_2 的電場振幅向量相位同相，電場和向量強度增大，故光強也增加，形成明顯的側葉光強度。此現象隨嵌附層之透射率上升而增加，為 EAPSM 之嚴重缺點。

對於嵌附層透射率而言，低透射率代表其邊端強化之效應不明顯，解像度改善空間有限，但卻可避免側葉光強問題。高透射率則邊端強化明顯，解像度改善的程度相對較高，但是卻有側葉光強過強的問題。接觸孔之側葉光強問題可藉增開輔助孔等方式減少。線隙之側葉光強較難克服，增開輔助縫為可能方式之一。

2-3 理想嵌附式減光型相移圖罩之條件

嵌附式減光型相移圖罩之嵌附層主要功能為控制透射率，並使通過嵌附層與石英兩者之入射光產生 180 度的相位差，則兩光束會發生干涉，可縮小空間影像底寬，達到邊端強化之效果，以改善解像度、提高製程寬容度。

為達到上述目的與圖罩製造、清潔與檢測等需求，嵌附層理想條件需求如下[17]：

1. 正規透射率嵌附層，照射波長下的透射率控制於 4-15% 之內，反射率 $< 20\%$ ，以避免不必要的干涉現象。
2. 厚度均勻，且達到 180 度相移之厚度。
3. 不超過或接近傳統鉻膜之厚度。
4. 應力低與缺陷少。

5. 化學穩定性佳，抗酸鹼能力強，以利阻劑清除與圖罩清潔製程。
6. 適當導電性，以減少電子束製作圖罩時的電荷累積效應(設某嵌附層 180 度相移之厚度為 100 nm，則片電阻(Sheet Resistance, R_s) $< 10^6 \Omega/\text{square}$ 或電阻係數 $< 10 \Omega\text{-cm}$)。
7. 圖罩對準與缺陷檢查之可見光透射率須控制在 30-40% 之下，反射率則應高於 20%。
8. 受曝光光源照射之耐久性佳。
9. 對石英基材與供切割用之遮光鉻膜附著性佳。
10. 環境安定性佳，避免因吸收水氣或氧化而改變其性質。
11. 圖罩製備簡單，修補容易。
12. 對石英基材與阻劑有適當之蝕刻選擇比，以利轉移圖案。

2-4 相移圖罩嵌附層之光學參數量測及原理

西元 1996、1997 年 B. W. Smith[21][22][23] 等人探討數種適用 248 nm 與 193 nm 的嵌附層材質，並計算嵌附層引起的相移角度(忽略界面對角度之影響)，如下：

$$d = m \lambda \theta / 2(n-1)\pi$$

m ：奇數的整數倍

λ ：照射波長

θ ：嵌附層產生的相移角度

n ：相移層在照射波長下的折射率

一般理想情況： $m = 1$ ， $\theta = \pi$ ，則上式可簡化為 $d_{180} = \lambda / 2(n-1)$ 。

如使用 $m=3, 5$ 等，則嵌附層厚度太厚，透射率不足，無實用價值。

由於嵌附層的吸收係數 k 不為零，因此在嵌附層與基材、空氣之界面皆會引起額外的相移角度。當 k 值較大時，界面引起的相移

角度便不宜忽略。其額外相移角度計算公式如附錄一。

目前量測薄膜 n 、 k ，方法可分下列：

一. 斜率法(Slope Method)[24]：

利用所量測的透射度 T 及反射度 R ，計算出 n 、 k 與相移 180° 之厚度(d_{180})。 $\ln T$ 對 d 作坐標圖，由線性關係之斜率可求 k 、截距可求 R (宜使用較精準之實測 R 值)。

$$\ln T = (-4\pi k/\lambda)d + \ln(1-R)$$

$$R = [(n-1)^2 + k^2] / [(n+1)^2 + k^2]$$

$$d_{180} = \lambda/2(n-1)$$

斜率法的優點為容易計算，但不夠精確，只能得知 n 、 k 概值。

二. n 與 k 法(n & k Method)[25][26][27][28][29]：

使用商業性儀器 n & k Analyzer 量測光學性質。其原理為先測出未知膜的反射率光譜，經由 F-B 展開式(Forouhi-Bloomer Dispersion Equation，見附錄二)的複雜計算，得 n 、 k 對波長(範圍：190 nm-900 nm)的曲線，此 n 、 k 曲線再經計算產生一條反射率的光譜曲線，與原先測出之反射率光譜進行曲線附合(Curve Fitting)，若附合度(Good of Fitness) < 0.01 ，則表示 n 、 k 對波長的曲線具有可信度。 n 與 k 法的優點為只需測薄膜之反射率光譜即可求得，且可掃描波長 190 nm-900 nm 之 n 、 k ，缺點為對於不常用之材質所做的曲線附合並不理想，即求出之 n 、 k 值不夠準確。

三. 橢圓儀法(Ellipsometer Method)[30][31][32][33][34]：

橢圓儀能偵測入射光與反射光間不同的極化程度，利用複雜的數學計算求出複數菲涅耳反射係數(Complex Fresnel Reflection Coefficient)，再經計算求出 n 、 k 。

橢圓儀大致分三種：

(1) 單波長橢圓儀：(波長為 632.8 nm 之氦-氖紅光)

所得之 n 、 k 值準確，但只能得到單一波長之 n 、 k 值，某些角度的薄膜資訊可能無法取得。

(2) 變角度光譜橢圓儀：

(Variable Angle Spectroscopic Ellipsometer, VASE)

可改變入射光的角度，獲得薄膜完整資訊，但只能得到單一波長的 n 、 k 值。

(3) 變波長光譜橢圓儀：

(Variable Wavelength Spectroscopic Ellipsometer, VWSE)

(波長範圍為 189-1200 nm)

可測得所有波長之準確 n 、 k 值，但價格相當昂貴，一般實驗室負擔不起。

四. 反射率-透射率法(R-T Method)[35][36][37][38]：

假設所沉積的嵌附層為均勻似鏡面的薄膜。此法考慮嵌附層-空氣、基材間的多重反射，見圖 2-9，利用一般 UV/Visible 光譜儀測得薄膜之 T 、 R 與測厚儀測出之膜厚，一併輸入電腦計算作圖可求出 n 、 k 值，見圖 2-10，計算公式見附錄三。反射率-透射率法求出的值有相當的準確性，且與其它方法的大型設備及昂貴光源相形之下既便宜又方便。然而缺點為求出之 n 、 k 值有多組解，不過搭配斜率法可決定出一組正確解。

五. 修正反射率-透射率法(Modified R-T Method)[36][37][39][40]：

反射率-透射率法是假設所沉積的嵌附層為一均勻光滑似鏡面的薄膜，然而反射率與透射率曲線卻有可能不相交而無解，原因或許是實驗上的誤差。事實上薄膜表面應該是粗糙的，若粗糙度過大，則會產生嚴重的散射光(Scattering Light)而降低光譜儀所量測 R 、 T 之準確性，所以適當的修正是必須的。西元 1998

年，本實驗室林政旻[41]學長發表所研製的 TiSiN_x 、 AlSiO_x 嵌附層材質，便是利用修正反射率-透射率法求出 n 、 k 值。反射率、透射率的修正公式如圖 2-11，式中參數 δ 為方均根表面粗糙度(Root-mean-square Surface Roughness)，可經由原子力顯微鏡(Atomic Force Microscopy, AFM)觀測得知。為了驗證反射率-透射率修正法的正確性，將此修正法求得的 n 、 k 值、商業性儀器 $n\&k$ Analyzer 以及 VASE 測出的 n 、 k 值做比較，發現到修正反射率-透射率法的結果相當接近 VASE 並優於 $n\&k$ Analyzer 之結果。足見修正反射率-透射率法之價值，對於求得薄膜光學性質有頗高之可信度，也證明此修正是正確且必須的。

2-5 嵌附式減光型相移圖罩之優缺點

1. 優點：

- (a) 可增進微影之製程寬容度、解像度及焦深。
- (b) 可使用與傳統鉻膜圖罩相同之製備、檢查及修補技術。
- (c) 製備、檢查及修補相較於其他類型圖罩來得容易。
- (d) 耐用性相較於 SOG 型式為高。
- (e) 適用於任何圖案之設計，無雷文生型之線對限制。
- (f) 嵌附層厚度甚薄，一般為 80-100 nm，與傳統鉻膜圖罩厚度相近，光散射情況少，像比佳，光學鄰近效應較小，故所需之圖案偏差小，電子束直寫所需時間短，可降低成本。

2. 缺點：

- (a) 相較於強型相移圖罩如雷文生型，所增進的焦深及解像度有限。故 EAPSM 須搭配 OAI，才能同時增進解像度與焦深。

- (b) 嵌附層因須同時符合多項性質要求，不易開發合適材質，故衍生出同質單層、同質雙層、異質雙層或其他多層結構設計，然而此舉只會使得製程更為繁複。
- (c) 使用較高透射率之嵌附層可獲得較大之焦深與解像度，然而側葉光強(Side Lode)也會隨之提高，尤其是面對密集圖案，側葉光強互相重疊產生建設性干涉，導致多餘圖案生成。改善方式如下：
1. 如圖案為接觸窗時，可在會形成側葉光強之處，開一較小之輔助孔，此孔可產生與原接觸窗中央主極大同相但幅度較低之電場，進而干涉破壞側葉光強。但定位輔助孔位置為首要問題。如圖 2-12。
 2. 在欲開輔助孔之處加上鉻膜或散條，使如圖 2-12 中之 E_1 與 E_2 無加成作用，而只有 E_1 存在。
 3. 於阻劑表面加上對比加強層(Contrast Enhancement Layer)，使得上層阻劑具較強之吸光性，可避免下層阻劑不會超過門檻劑量，而產生多餘圖案。
 4. 控制圖案之相對位置，使側葉光強落於鄰峰的中央主極大之中。此法較適用於等線隙圖案，對於其他形式圖案，由於需改變圖案相對位置，是其不便處。
 5. 使用弱顯影液，使側葉光強對應之圖案不易顯影，但此法效果有限。
 6. 提高阻劑之門檻劑量，理論類似第五點。
 7. 控制嵌附層透射率在 6% 以下，但此舉會損失相移圖罩邊端強化的優勢。

2-6 相移圖罩之未來趨勢[42][43][44]

在現今微影主流 193 nm 波長下，單一材質之嵌附層不易滿足各項條件與要求，於是發展出雙層或多層(Multilayer)結構之嵌附層。常見方法是選用兩不同材料作交互沉積，一為吸收膜(減光用)；一為透射膜(相移用)，這樣的設計可以較容易符合各項性質。這類多層結構嵌附層之圖罩具有下列特色：

1. 可調變之光學、物理與化學性質。
2. 可控制光學性質使 n 、 k 維持定值，且光學性質與多層膜之層數有線性關係。
3. 使用超晶格沉積之多層膜結構，其光學性質可比擬單一材質之嵌附層薄膜。
4. 多層結構嵌附層之化學穩定度、機械性質等，可藉由選用適當材料或是改變層數來加以控制。

過去受限於成膜機台性能，不易精確控制多層膜之厚度，所以實用性有限。但隨著新式機台之開發及技術之不斷突破下，製程問題已逐漸克服，因此，擁有許多優點之多層膜形式嵌附層又漸受重視。

雷文生型相移圖罩因蝕刻石英，會有側壁光散射造成光強不均之效應，故成像品質不佳。針對此缺點，現已發展出三種改良型雷文生圖罩[45][46][47][48]，如 SCAA (Sidewall chrome Alternating Aperture)、Dual Trench 和 Undercut 三種。其構造與優缺點如圖 2-13 所示。如同強型圖罩，其對解像度及像比有顯著之改善，其中以底切+偏差混合型最實用，預測將是未來發展趨勢。但此型圖罩製備較減光型相移圖罩困難，故目前圖罩仍以減光型為主流。

Chromeless Phase Lithography (CPL)即是使用唯相移層相移圖罩，原理是利用蝕刻石英造成 π 相位差，不需開發新嵌附層材質，故成本較低。此型圖罩應用範圍廣，不限特定圖案，也是將來熱門方向。

比較唯相移層-雙光強成像、唯相移層-邊端成像、減光型相移圖罩與雷文生相移圖罩，其相擾度與成像方式之關係如下表：

	$\sigma=0$ (傳統發光)	$\sigma=1$ (傳統發光)
唯相移層-雙光強成像	三光束成像	二光束成像
唯相移層-邊端成像	二光束成像	二光束成像
減光型相移圖罩	三光束成像	二光束成像
雷文生相移圖罩	二光束成像	二光束成像

唯相移層-邊端成像、唯相移層-雙光強成像、減光型相移圖罩與雷文生相移圖罩之空間影像如圖 2-14 所示。

$\sigma=1$ 與 OAI 之主要差異在於像比。 $\sigma=1$ 時主要光強為背景光，對比度低；OAI 則對比度高。

CPL 圖罩可有效增進解像度與焦深，換言之可降低 k_1 ，即增加製程之照射寬容度(Exposure Latitude, EL)。但 CPL 圖罩尚需搭配 OAI 及高聚光當量(Numerical Aperture, NA)之微影機台，方能形成較佳之空間影像。然而整體而言，由於具有成本低、製程簡單與應用範圍廣等優點，未來隨著線寬縮小與條件日趨嚴格，CPL 圖罩在半導體製程領域上必將佔有一席之地。

由於線寬不斷縮水的關係，故若要延續使用傳統製程，微影成像將會遭遇困難。依據微影解像度通用規範： $R = k_1 \lambda / NA$ ，當微影機台之 λ 、 NA 皆固定，仍需縮小線寬時，唯有減少 k_1 方為可行。 k_1 為整體製程參數，與阻劑、光源、圖罩等皆有關連。如將 RETs 做適當搭配，如 OAI+PSM+TSI，便能有效減低 k_1 值。

2-7 偏軸發光之型式與原理

現行的解像度增進技術不少，其中偏軸發光(OAI)不須改變圖罩設計，僅以原有製程便能達到改善解像度、照射寬容度與增加焦深之目的。光源發光根據其形狀可分為：(1) 傳統發光(Conventional Illumination)；(2) 環形發光(Annular Illumination)；(3) 四孔發光(Quadrupole Illumination)；(4) 二孔發光(Dipole Illumination)；(5) 無偏軸遮板之偏軸發光。就上述發光方式，各別討論如下：

一. 傳統發光：

傳統發光原理見圖 2-15，形狀如圖 2-16 (A)，對任何圖案均可使用，無方向性，對解像度與焦深無改善效果，解像能力中等。

二. 環形發光：

環形發光[49][50]形狀如圖 2-16 (B)，環形對圖罩上任何方向之圖案皆較傳統發光適用，無方向性，對解像度與焦深改善效果中上，實用性甚佳。

三. 四孔發光：

四孔發光[49][50]形狀如圖 2-16 (C)(D)，又分為 Normal 與 Cross 兩型，因其具有方向性，故對於垂直與水平方向圖案之解像度、焦深與照射寬容度改善效果均不同。整體而言，Normal 型四孔之改善效果遠勝於 Cross 型四孔。

其他類似四孔發光之方式尚有 Quasar (四扇形)[50][51]與 SHRINC (Super High Resolution by IllumiNation Control)，發光形狀如圖 2-17 (A)(B)。四扇形發光方式的開發，乃是考量圖罩設計之難易，及環形與四孔發光系統的限制，綜合兩者的優點，改良而成。

四. 二孔發光：

二孔發光 [52]形狀如圖 2-16 (E)(F)，又分為與圖罩上線條垂直(X 位向)或平行(Y 位向)兩型。二孔發光對於解像度與焦深的改善與圖案方向性有關，對於與光源方向垂直的圖案有卓越之改善效果，但對於平行方向的圖案則無改善效果，甚至比傳統發光還差。

其他類似二孔發光之方式尚有 Slit (狹縫形)，發光形狀如圖 2-17 (C)，運作原理與二孔發光相接近。

2-8 偏軸發光之相關模擬[53][54][55]

本實驗室使用美商 KLA-Tencor 之微影軟體 ProLith v. 8.0 為模擬工具(Simulation Tool)，進行相移圖罩與偏軸發光相關之模擬實驗。

此模擬軟體可設定或調變之參數甚多，如：光源發光方式、光源相擾度(σ)、光源波長(λ)、系統 NA 值、圖罩設計、阻劑類型、阻劑相關參數、阻劑烘烤相關參數、照射能量(Exposure Energy)與門檻光強(Threshold)等。可進行觀測之選項亦不少，如：空間影像(Aerial Image)、阻劑輪廓(Resist Profile)、側壁角度(Sidewall Angle)、阻劑線寬(Line Width)、照射能量計算結果、阻劑損失程度(Resist Lost)、歸一化影像斜率對數(NILS)與製程視窗(Process Window)等。

ProLith v. 8.0 除了能夠模擬基本微影製程外，尚有外掛模擬軟體如 ProBeam 與 ProMask。ProBeam 之功能為模擬電子束(E-Beam)相關微影製程，允許設定與調變之參數與 ProLith 相類似，但 ProBeam 可額外觀測曝光後阻劑之三維圖形。ProMask 之功能在於可以隨意自行設計圖罩上的二維圖案，圖罩設計完成後儲存參數，便可代入 ProBeam 執行微影程序以計算模擬結果。

雖然 ProLith 與 ProBeam 等模擬工具之介面簡單、操作方便，模擬結果也有相當之準確性，然而實際製程之複雜性甚高，需考慮之變因與參數極多，嚴格說來，其結果並非一般電腦軟體能夠輕易預測。但是在理想條件下，基本的微影模擬仍有相當高的指標性作用，對於實驗室之研究頗富參考價值。在現今半導體產業上，模擬工具是不可或缺的一項利器，藉由實際生產前的電腦模擬，如使用光學鄰近效應修正改善架橋(Bridging)，便可避免不必要的風險或誤差，進而節省成本與促進產率。相信不論是現在或未來，微影模擬軟體都將扮演著晶片設計(IC Design)與晶片製程(IC Process)上的重要角色。

第三章 實驗方法

3-1 實驗物品

1. 熔融氧化矽(Fused Silica)基材

(a) 型號：GE Type-214 東方玻璃

(b) 尺寸：20(長) x 14(寬) x 1(厚)mm

(c) 熱性質(Thermal Properties)：

1. 熱膨脹係數： $5 \times 10^{-7} \text{ cm/cm}^\circ\text{C}$

2. 退火點： 1215°C

3. 耐熱溫度： 1683°C

(d) 光學性質：

1. 折射率：

1.560(入射波長為 193 nm)

1.514(入射波長為 248 nm)

1.475(入射波長為 365 nm)

1.463(入射波長為 488 nm)

1.459(入射波長為 632.8 nm)

2. 透射率：

82% (入射波長為 193 nm)

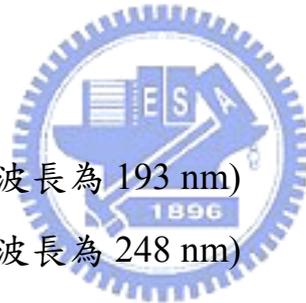
92% (入射波長為 400 nm)

(e) 電性(Electrical Properties)：

電阻係數(Resistivity, $\Omega\text{-cm}$)

2×10^{14} (20°C)

2×10^{10} (800°C)



2. 矽(Silicon)基材

昇美達公司

竹齊科技

純度 99.999%，p-type，晶格方向(1 0 0)

直徑 4 吋

3. 鍍膜靶材

氮化矽(Si_3N_4)

鉬(Mo)：純度 99.99%

鈦(Ti)：純度 99.99%

鉭(Ta)：純度 99.99%

4. 鍍膜氣體

氬氣(Ar)、氧氣(O_2)、氮氣(N_2)

5. 真空膠布

(a) 型號：Scotch Brand No. 5413 Plastic Film Tape

(b) 厚度：0.07 mm

(c) 使用溫度範圍：-73°C 至 260°C



3-2 實驗儀器

1. 雙電子槍蒸鍍系統(Dual E-Gun Evaporation System)：

ULVAC EBX-10C

2. 真空濺鍍系統(Sputtering System)：

Ion Tech Microvac 450 CB

3. 原子力顯微鏡(Atomic Force Microscope, AFM)：

Digital Instruments MMAFM-1

4. 紫外光-可見光光譜儀(UV-VIS Spectrophotometer)：

Shimadzu UV-2501PC

5. 變角度光譜橢圓儀
(Variable Angle Spectroscopic Ellipsometer, VASE) :
Woollam V-VASE
6. 應力量測儀(Thin Film Stress) :
TENCOR FLX-2320
7. 傅利葉轉換紅外線光譜儀
(Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) :
Shimadzu FT-IR 8300
8. 電子能譜化學分析儀
(Electron Spectroscopy for Chemical Analysis, ESCA) :
Physical Electronics PHI1600

3-3 儀器原理

1. 原子力顯微鏡 (AFM)



利用特製的微小探針，來偵測表面(Sample)與探針之間的某種交互作用。如穿隧電流、原子力、磁力等。AFM的探針是由針尖附在懸樑前端所組成。當探針與樣品表面接觸時，由於懸臂能夠反應針尖在表面所受到的作用力，即紀錄懸臂的垂直擺動，就能測知表面之樣品特性。AFM的操作模式可大略分為三種：

(1) 接觸式(Contact Mode)：

探針與樣品間的作用力是原子間的排斥力，解析度由於排斥力對距離非常敏感，所以易得原子級解析度。

(2) 非接觸式(Non-contact Mode)：

因接觸式 AFM 可能損壞樣品的缺點。於是利用原子間的長距離吸引力(凡得瓦力)來運作，但解像度較接觸式 AFM 差。

(3) 輕敲式(Tapping Mode)：

非接觸式之改良，解析度較非接觸式高，但較接觸式低。但其破壞樣品之機率卻大大的降低。

2. 紫外光/可見光譜儀 (UV/VIS Spectrophotometer)

當光的能量達到化合物外層軌域電子躍遷的能量，電子將自化合物基態分子軌域躍遷自高能量之分子軌域，此波長的光被化合物分子吸收，而有吸收光譜出現，故又稱電子吸收光譜，偵測光波長的範圍為 190-1100 nm。

3. 傅利葉轉換紅外線光譜儀 (FT-IR)

紅外光的吸收侷限於分子內原子與原子間的振動模式，可以光激發，而產生原子與原子不同振動能階(Vibration Levels)間的躍遷。分子內原子的相對位置並不固定，會藉由不同型態的振動而改變，振動型式主要分為伸張(Stretching)及彎曲(Bending)，伸張振動指二原子間之距離沿鍵軸不斷改變；彎曲振動指分子內二鍵結夾角改變。

欲有紅外光吸收，分子振動時必須同時有偶極矩(Dipole Moment)的改變，若偶極矩之變化為零，則測得的是拉曼光譜，因此同核雙原子分子，如 O₂、N₂ 等便無法觀察到紅外光光譜。當偶極矩改變時，紅外光之電場與分子作用導致分子振動之振幅隨之改變，此時光能為分子吸收。FT-IR 便是分析這些吸收光譜，以了解薄膜化學組成，探討嵌附層化學組成與光學性質之關聯。

4. 變角度光譜橢圓儀 (VASE)

橢圓儀運作之原理如圖 3-1。當一束光線傾斜入射到一表面或薄膜上時，平行於入射面振動的 p 偏振分量和垂直於入射面振動的 s 偏振分量在滿足切向分量連續的邊界條件下，因入射媒質、基片和薄膜材料對於 p 偏振和 s 偏振有不同的光學反射係數，在表面或薄膜上反射時，p 偏振和 s 偏振的反射振幅和反射位相也各不相同。當入射光是一束線偏振光時，在一般情況下，從表面或薄膜上反射後，p 偏振和 s 偏振之間產生了不同的振幅衰減和相對位相差 $\Delta = \delta_p - \delta_s$ (δ_p 和 δ_s 別是 p 偏振和 s 偏振的位相差)。反射光電矢量終端的軌跡是一橢圓，稱為橢圓偏振光，見圖 3-2。其軌跡方程式參照圖 3-2 (A)。

如入射光的 p 偏振和 s 偏振有相同的並為 1 的振幅，則 α_1 、 α_2 分別為沿水平和垂直方向的分振動振幅。可見表徵橢圓偏振必須要三個獨立的量，例如振幅 α_1 、 α_2 和位相差 Δ ，也可以用物理因次全一樣的參量—斯托克斯參量等來表徵偏振態。一個平面單色波的斯托克斯參量為四個量，見圖 3-2 (B)。其中只有三個量是獨立的，因為它們之間存在著一種恆等式關係，如圖 3-2 (C)。

在傳統的補償式橢圓儀中實際測量的是樣品的 p 偏振和 s 偏振的複數振幅反射係數的比值 ρ ，見圖 3-2 (D)。稱 ψ 和 Δ 為表面或薄膜與基片組合的橢圓參量。因為參量 ψ 和 Δ 是表面或薄膜的光學常量的函數，從而通過測量橢圓參量，便可確定表面或薄膜的光學性質。在近代光度式橢圓儀中，實際測量的是反射光強度隨旋轉檢偏器(或其他元件)的方位的變化，通過傅利葉分析得到斯托克斯參量。假定入射的線偏振光對於入射面有 45° 的方位，則斯托克斯參量和傳統的橢圓參量 ψ 和 Δ 有相互關係如圖 3-2 (E)。

3-4 實驗步驟

1. 靶材與基材清洗：

(1) 靶材：

使用 IPA 擦拭靶材以去除灰塵粒子及污染。

(2) 石英基材：

先以去離子水沖洗，在以濃硫酸與雙氧水(3：1)及去離子水沖洗各五分鐘。

(3) 矽晶圓基材：

以 RCA 清潔程序清洗。

2. 沉積嵌附層薄膜：

(1) 雙電子槍蒸鍍方式：

設定兩個靶材個別之功率，金屬與氮化矽之比例為 1：3，Density：2.02，Z-ratio：1.07，並設定欲鍍之厚度。

(2) 電漿濺鍍方式：

設定兩個靶材個別之功率，背景壓力為 2×10^{-6} Torr，工作壓力為 7.6×10^{-3} Torr，以時間控制所需沉積之厚度。

3. 以薄膜測厚儀(n&k Analyzer)量測樣品薄膜之厚度。

4. 以薄膜測厚儀(n&k Analyzer)量測樣品薄膜之折射率與吸收係數。

5. 以變角度光譜橢圓儀(VASE)量測樣品薄膜之折射率與吸收係數。

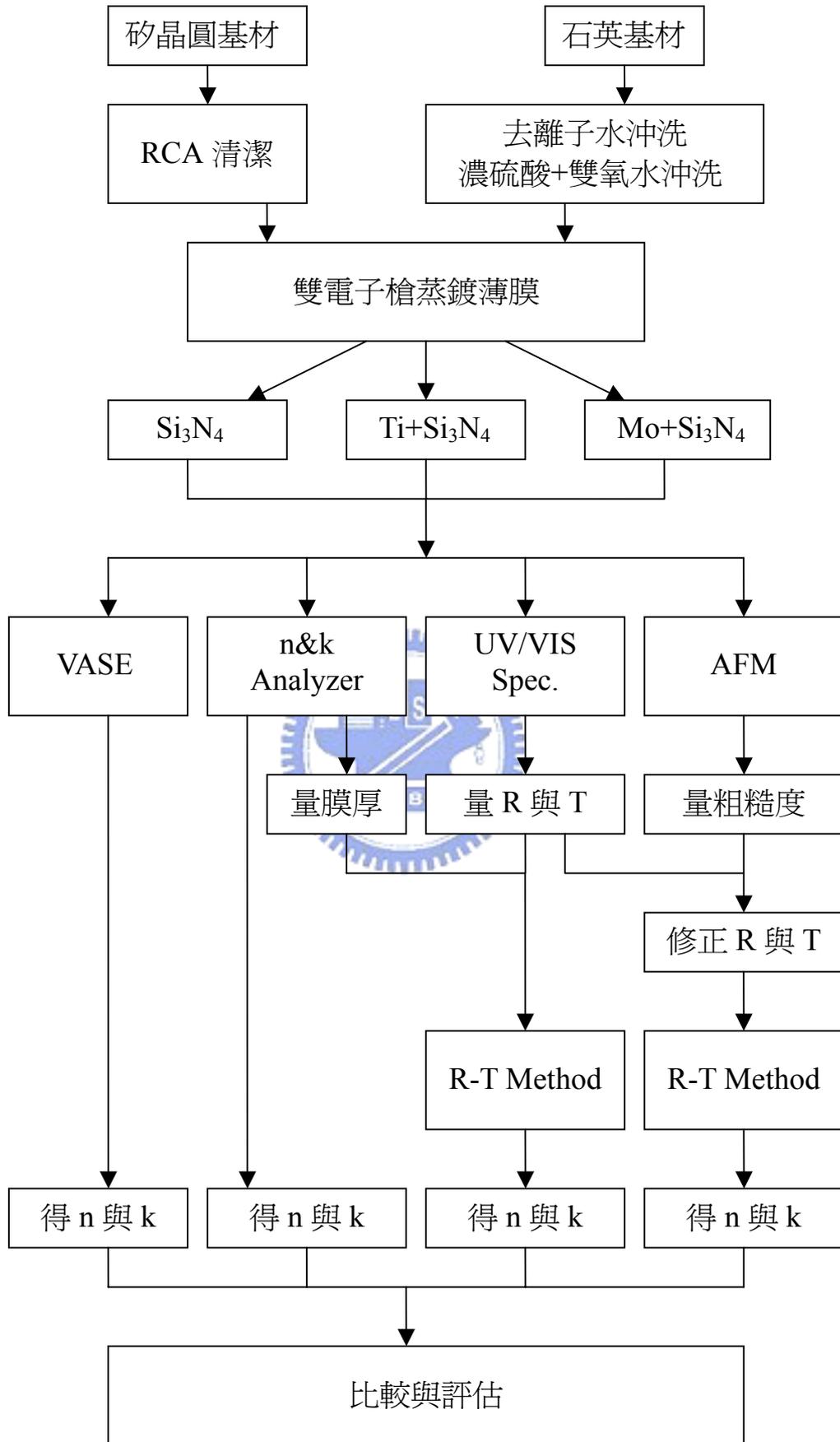
6. 以原子力顯微鏡(AFM)量測樣品薄膜之表面粗糙度。

7. 以紫外光-可見光光譜儀(UV/VIS Spectrophotometer)量測樣品薄膜之透射率與反射率。

8. 將已知薄膜厚度、反射率、透射率、工作波長與基材折射率代入反射率-透射率法(R-T Method)，計算薄膜之折射率與吸收係數。

9. 將已知薄膜表面粗糙度、反射率、透射率與工作波長代入修正反射率-透射率方程式(Modified R-T Method)，計算出薄膜之修正反射率與修正透射率。
 10. 將已知薄膜厚度、修正反射率、修正透射率、工作波長與基材折射率代入反射率-透射率法(R-T Method)，計算出樣品薄膜之修正折射率與修正吸收係數。
 11. 比較反射率-透射率法、薄膜測厚儀、修正反射率-透射率法與變角度光譜橢圓儀之結果，探討四種量測方法的準確性。
- 完整實驗步驟流程圖如下頁：





3-5 模擬設計

1. 設計欲模擬之減光型相移圖罩：
 - (1) 110 nm 孤立隙：石英基材透射率為 100%，嵌附層透射率為 10%，嵌附層相移角度為 180 度，線隙比大於 1：5。
 - (2) 110 nm 密集隙：石英基材透射率為 100%，嵌附層透射率為 10%，嵌附層相移角度為 180 度，線隙比為 1：1。
 - (3) 90 nm 孤立線隙：石英基材透射率為 100%，嵌附層透射率為 10%，嵌附層相移角度為 180 度，線隙比大於 1：5。
 - (4) 90 nm 密集線隙：石英基材透射率為 100%，嵌附層透射率為 10%，嵌附層相移角度為 180 度，線隙比為 1：1。
2. 選擇發光型式：二孔垂直位向(X-orientation)發光或平行位向(Y-orientation)發光。
3. 選擇並設定適用工作波長之阻劑，阻劑型式為正型。
4. 選擇並設定適用之抗反射層(ARC)，抗反射層型式為底部抗反射層(BARC)。
5. 設定其他參數：光源相擾度(σ)、光源波長(λ)、系統聚光當量值(NA)、目標線寬(Target Width)與門檻光強(Threshold)等。
6. 進行模擬計算求出最適化後所需之照射能量(Exposure Energy)。
7. 觀察模擬結果：空間影像(Aerial Image)、影像對比度(Image Contrast)、阻劑輪廓(Resist Profile)、側壁角度(Sidewall Angle)與阻劑線寬(Line Width)等。比較二孔發光垂直與平行位向交叉面對 110 nm 孤立隙、110 nm 密集線隙、90 nm 孤立隙與 90 nm 密集線隙之結果。

8. (1) 使用二孔平行位向發光，孔距 $\sigma_{\text{center}} = 0.6$ ，孔徑 $\sigma_{\text{radius}} = 0.3$ ， $\text{NA} = 0.8$ ，設計圖罩為孤立隙，從隙/線為 200/1000 nm 到 80/1000 nm，減光處透射率為 10%，在 193 nm 波長下每 10 nm 做一次模擬，觀察側葉光強位置之變化趨勢。
- (2) 使用二孔平行位向發光，孔距 $\sigma_{\text{center}} = 0.6$ ，孔徑 $\sigma_{\text{radius}} = 0.3$ ， $\text{NA} = 0.8$ ，固定圖罩之隙為 90 或 110 nm，減光處透射率為 10%，改變線寬，在 193 nm 波長下觀察相鄰兩主極大的側葉合併時之機制與空間影像。
9. (1) 改變聚光當量值從 0.6 到 0.9，搭配孔距 $\sigma_{\text{center}} = 0.6$ 及孔徑 $\sigma_{\text{radius}} = 0.3$ ，觀察側葉光強位置之趨勢與空間影像之變化。
- (2) 改變發光孔距 σ_{center} 從 0.5 到 0.7，搭配孔徑 $\sigma_{\text{radius}} = 0.3$ 及 $\text{NA} = 0.8$ ，觀察側葉光強位置之趨勢與空間影像之變化。
- (3) 改變發光孔徑 σ_{radius} 從 0.2 到 0.4，搭配孔距 $\sigma_{\text{center}} = 0.6$ 及 $\text{NA} = 0.8$ ，觀察側葉光強位置之趨勢與空間影像之變化。
10. 使用二孔垂直位向發光，搭配未偏振光(Unpolarized)、p 偏振光(X-polarized)與 s 偏振光(Y-polarized)三種光源種類，在聚光當量、孔距、孔徑、隙寬與線寬等各種變因下，觀察像比之變化。

3-6 應用公式

一. 符號說明：

λ ：照射波長

R%：反射率

T%：透射率

n：折射率

k：吸收係數(消光係數)

n_1 ：空氣之折射率

n_2 ：基材(石英)之折射率

d：嵌附層之厚度

d_{180} ：相移 180 度所需之嵌附層厚度

NA：數值孔徑

k_1 ：與解像度相關之製程參數

k_2 ：與焦深相關之製程參數

Contrast：空間影像對比度

I_{\max} ：光強極大值

I_{\min} ：光強極小值

σ ：相擾度



二. 重要公式：

1. 解像度

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

2. 總焦深

$$TDOF = \pm k_2 \frac{\lambda}{(NA)^2}$$

3. 空間影像對比度

$$Contrast = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

4. 透射率

$$T = (1 - R)\exp(-4\pi kd/\lambda)$$

5. 反射率

$$R = [(n-1)^2 + k^2]/[(n+1)^2 + k^2]$$

6. 相移厚度

$$d = m\lambda\theta/2(n-1)\pi, (m = 1,3,5,\dots)$$

7. 相移角度

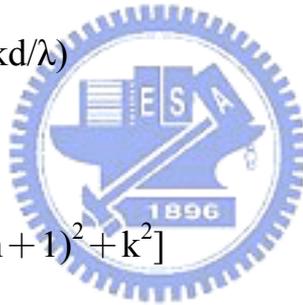
$$\theta = 2\lambda d(n-1)/m\lambda, (m = 1,3,5,\dots)$$

8. 吸收係數

$$k = \lambda \ln[(1 - R)/T]/4\pi d$$

9. 透射率與相移厚度之關係

$$\ln T = \ln(1 - R) - (4\pi kd/\lambda)$$



第四章 結果與討論

4-1 光學性質之線上計算

在實驗進行之前，利用美國羅徹斯特理工學院(RIT)微影研究中心 B. W. Smith 教授之網站，輸入目標材料比例、光源波長、基材與介質種類，如圖 4-1，先對光源波長及薄膜材料做線上計算，可得 π 相移所需之嵌附層厚度(d_{180})、折射率、消光係數、反射率與透射率等相關數據，以做為實驗之參考指標。193 nm 與 248 nm 下，薄膜材料 Si_3N_4 、TiSiN 與 MoSiN 之光學性質計算結果各別為圖 4-2、圖 4-3 與圖 4-4。各項線上計算結果整理如表 4-1。

4-2 光學性質量測方法之比較

針對嵌附式減光型相移圖罩之嵌附層光學性質，可用之量測方法常見有反射率-透射率法(R-T Method)、薄膜測厚儀(n&k Analyzer)與變角度光譜橢圓儀(VASE)，其中以變角度光譜橢圓儀量測結果之準確性最高，然而橢圓儀之價格昂貴，一般實驗室不便購置。如考慮薄膜實際為粗糙表面，將表面粗糙度代入修正反射率-透射率方程式，並以修正後之反射率及透射率重新計算薄膜之 n 與 k 值，則理論上會提高量測之準確性，更接近薄膜之真實情況。

四種量測方法所得之實驗結果如下：

一. n&k Analyzer：

先測出未知膜的反射率光譜，並得 n、k 對波長(190 nm-900 nm)之曲線，此 n、k 曲線再經計算產生一條反射率的光譜曲線，與原先測出之反射率光譜進行曲線附合，如圖 4-5。

193 nm 與 248 nm 下，薄膜材料 Si_3N_4 、TiSiN 與 MoSiN 之光學性質量測結果各別為圖 4-6、圖 4-7 與圖 4-8。各項 n&k Analyzer 量測結果整理如表 4-2。

二. R-T Method :

假設所沉積的嵌附層為均勻光滑似鏡面的薄膜，然而有可能因為反射率與透射率曲線不相交而無解。先使用一般 UV/Visible 光譜儀測得薄膜之 R 與 T。193 nm 與 248 nm 下，薄膜材料 Si_3N_4 、TiSiN 與 MoSiN 之 R、T 與膜厚參見表 4-3。再將 R、T、工作波長與測厚儀測出之膜厚，一併輸入 R-T Method 以電腦計算作圖可求出 n、k 值。193 nm 與 248 nm 下，薄膜材料 Si_3N_4 、TiSiN 與 MoSiN 之光學性質計算結果各別為圖 4-9、圖 4-10 與圖 4-11。各項 R-T Method 計算結果整理如表 4-4。

三. Modified R-T Method :

薄膜表面之粗糙情況會導致散射光的產生，使得 UV/Visible 光譜儀所得之 R、T 量測值較小，故須導入粗糙度對 R 與 T 進行適當修正。經由原子力顯微鏡(AFM)觀測薄膜表面，可得方均根表面粗糙度 δ ，再將 δ 、R、T 與工作波長代入 Modified R-T 方程式，計算出薄膜材料 Si_3N_4 、TiSiN 與 MoSiN 之修正反射率與修正透射率，見表 4-5。再將修正值輸入 R-T Method 以電腦計算作圖可求出 n、k 值。193 nm 與 248 nm 下，薄膜材料 Si_3N_4 、TiSiN 與 MoSiN 之修正後光學性質計算結果各別為圖 4-12、圖 4-13 與圖 4-14。各項 Modified R-T Method 計算結果整理如表 4-6。

四. VASE :

橢圓儀能偵測入射光與反射光間不同的極化程度，利用複雜的數學計算求出複數菲涅耳反射係數，再經計算求出 n 、 k ，所得之光學性質極為精準。由於橢圓儀造價昂貴，故委託台灣積體電路製造公司(Taiwan Semiconductor Manufacturing Company, TSMC)彭經理與林經理代為量測，TSMC 度量衡校正中心所使用之儀器為 Woollam V-VASE。193 nm 與 248 nm 下，薄膜材料 Si_3N_4 、 TiSiN 與 MoSiN 之光學性質量測結果見表 4-7。

最後將上述四種方法在目前微影主流波長 193nm 與 248nm 下，量測光學性質之所有結果列表逕行比較之，並以 VASE 為標準，計算其他方法之百分比誤差，參見表 4-8。

從表中結果能夠看出，三種材質之 n 值不論在 193 nm 或 248 nm 下使用哪種量測方式，其與 VASE 結果比較之誤差百分比均為個位數以內，不過仍能看出 Modified R-T Method 之結果最接近 VASE，其次為 $n\&k$ Analyzer 或 R-T Method；至於三種材質之 k 值在 193 nm 或 248 nm 下，量測方式不同會使測量結果差異性較大，明顯發現 Modified R-T Method 之結果最接近 VASE，其次為 $n\&k$ Analyzer，R-T Method 最差。在 Si_3N_4 量測 k 值的實驗部分，R-T Method 的誤差甚至高達 20% 以上，由此可知， Si_3N_4 薄膜之表面粗糙度比 MoSiN 或 TiSiN 大，可能是 Si_3N_4 薄膜沉積之控制不佳所造成，因此在考慮表面粗糙度時，Modified R-T Method 所獲得的改善效果會較大。

4-3 相移圖罩搭配二孔平行位向發光之側葉模擬

相移圖罩搭配偏軸發光可有效增進解像度與焦深。相移圖罩之設計如圖 4-15。可調整之參數如：圖 4-16 為預設阻劑 ArF Clariant AX1020P、圖 4-17 為預烤溫度/時間、圖 4-18 為照後烤溫度/時間、圖 4-19 為顯影時間、以及其他相關之製程參數，之後再進行模擬算出最佳之照射劑量，見圖 4-20。可設定參數甚繁，在此不予詳述。

一. 使用二孔平行位向發光，固定中央隙寬為 110 nm 或 90nm，改變線寬進行模擬，預測線寬縮小至某程度時，兩相鄰主極大之側葉會合併，模擬結果如圖 4-21。

二. 使用二孔平行位向發光，相移圖罩減光層之透射率=10%，設計孤立隙為 $x/1000$ nm (x 為中央隙寬)，將 x 從 200 nm 縮小到 80 nm，以模擬觀察隙與側葉兩中心點之距離關係：

(1) 孔徑=0.3，孔距=0.6，相移圖罩減光層之透射率=10%，改變聚光當量值為 0.6、0.7 與 0.8 進行模擬，令”隙寬”與”隙與側葉中心點距離”為 X 與 Y 座標作圖，如圖 4-22。

(2) 孔徑=0.3，聚光當量=0.8，相移圖罩減光層之透射率=10%，改變孔距為 0.5、0.6 與 0.7 進行模擬，令”隙寬”與”隙與側葉中心點距離”為 X 與 Y 座標作圖，如圖 4-23。

(3) 孔距=0.6，聚光當量=0.8，相移圖罩減光層之透射率=10%，改變孔徑為 0.2、0.3 與 0.4 進行模擬，令”隙寬”與”隙與側葉中心點距離”為 X 與 Y 座標作圖，如圖 4-24。

相移圖罩上中央隙寬逐漸縮小時，經過中央隙之光通量亦隨之減少，導致主極大光強高度降低、主極大光強底寬內縮以及隙與側葉中心點距離變小。

單狹縫繞射之物理公式為 $\sin\theta = \pm m(\lambda/d)$ ，而聚光當量值理論上類似單狹縫之寬度 d ，故提高聚光當量值會降低 θ ，使主極大光強高度上升、主極大光強底寬收縮以及隙與側葉中心點距離變小。

發光孔距逐漸提高時，由於斜射角變大，導致主極大光強高度下降、主極大光強底寬擴大以及隙與側葉中心點距離變大，光強整體波形趨向和緩。

模擬結果發現”隙寬”與”隙與側葉中心點距離”兩者之關係，可計算導出指數公式，然而聚光當量或發光孔距改變時，公式計算會產生偏差，故以聚光當量與孔距為修正因子 a 與 b ，可使計算結果更貼近真實值：

$$y = 0.001x^2 - 0.0883x + 221.27 - 306.7(a - 0.8) + 174.5(b - 0.6)$$

a ：聚光當量之修正項， b ：發光孔距之修正項

如固定中央隙寬，改變圖罩上之線寬時，可發現線寬縮小至某程度時，兩相鄰主極大之側葉會合併，使側葉光強達到一極大值。假設中央隙寬為 x ，將 x 、 a 與 b 代入指數公式可求出隙與側葉兩中心點之距離 y ，而側葉最大値之機制為 $2y = x + z$ (線寬)，即可預測得知側葉合併時之 z 值。

4-4 二孔發光方向性影響成像品質之模擬

二孔發光對圖案而言，具有嚴重的方向性問題，二孔平行位向發光對於圖案具有破壞性影響；二孔垂直位向發光對圖案則有建設性影響。已有文獻報導，常用的偏軸發光型式中，以二孔垂直位向發光之成像能力較佳，在最適化的情況下可曝出 45 nm 節點以下的密集線隙，但二孔發光的方向性問題使得製程面臨考驗，常見的解決方法為使用雙圖罩(Double Exposure)之方式，將單片圖罩上之圖

案分解為 X 與 Y 方向兩片圖罩，以利於二孔偏軸成像。即使會有製程複雜化的問題，也要獲得二孔發光的成像能力，參見圖 4-25。

一. 相移圖罩減光層之透射率 = 10%，設計孤立隙為 110/1000 nm，

改變發光方式為二孔垂直或平行位向，比較兩者之空間影像。

再將孤立隙換成 90/1000 nm 進行觀察，如圖 4-26 與圖 4-27。

二. 設計四種線寬型式圖罩為 110/1000 nm、110/110、90/1000 nm 與

90/90 nm，分別使用兩種位向之二孔發光進行模擬：

(1) 在相同顯影條件下，觀察二孔發光方向性對阻劑輪廓之影響，如圖 4-28 與圖 4-29。

(2) 改變顯影條件並計算照射劑量，使兩種位向之發光方式均在阻劑上曝出相同尺寸之隙，觀察兩者之阻劑輪廓，如圖 4-30、圖 4-31、圖 4-32 與圖 4-33。

模擬觀察空間影像時，可發現二孔發光垂直位向之側葉效應遠小於平行位向，對微影製程影響不大，不需輔助孔或其他方法修飾，故二孔垂直位向並無討論側葉之意義。由於二孔平行位向類似沿軸發光，故主極大光強較垂直位向高；二孔垂直位向則因光束偏軸入射，具有偏軸發光之效果，故主極大光強之底寬較平行位向大。

偏軸發光之聚焦深度較沿軸發光為大，因此設定相同顯影條件時，觀察阻劑輪廓可發現，二孔垂直位向曝光所得之隙深度較平行位向深。如調整顯影條件使兩種位向之發光方式均曝出相同尺寸之隙時，則平行位向較嚴重之側葉現象，可能因為達到門檻劑量而顯影於阻劑上。

電腦模擬發現，由於沒有光源參數可調變空間影像，且門檻光強之實質意義不大，聚焦深度無法得知，因此空間影像僅能做為單一發光方式解像能力之參考，可靠性不及阻劑輪廓，然而阻劑輪廓

需考慮之顯影條件甚複雜，必須以相同條件或相同目的為前提，方能公平比較兩種位向之解像能力。

4-5 二孔垂直位向發光搭配偏振光之模擬

一. 使用二孔垂直位向發光，孔徑=0.3，孔距=0.6，聚光當量=0.8，分別將未偏振光(Unpolarized)、p 偏振光(X-polarized)與 s 偏振光(Y-polarized)搭配二孔垂直位向入射，模擬觀察空間影像如圖 4-34。

二. 使用二孔垂直位向發光，搭配未偏振光(Unpolarized)、p 偏振光(X-polarized)與 s 偏振光(Y-polarized)三種光源種類，改變以下變因觀察像比之變化：

(1) 發光孔距 = 0.6，發光孔徑 = 0.3，聚光當量：0.6-0.9，結果如圖 4-35。

(2) 發光孔徑 = 0.3，聚光當量 = 0.8，發光孔距：0.5-0.7，結果如圖 4-36。

(3) 發光孔距 = 0.6，聚光當量 = 0.8，發光孔徑：0.2-0.4，結果如圖 4-37。

(4) 發光孔距 = 0.6，發光孔徑 = 0.3，聚光當量：0.8，隙寬：80-200 nm，結果如圖 4-38。

(5) 發光孔距 = 0.6，發光孔徑 = 0.3，聚光當量：0.8，線寬：90-400 nm，結果如圖 4-39。

模擬實驗發現，使用二孔垂直位向發光，當聚光當量值越大時，由於光束最大聚焦半夾角變大，故投影鏡兩端平行入射面之 p 偏振光會趨近垂直；而垂直入射面之 s 偏振光則維持互相平行，因此在高聚光當量之情況下，p 偏振光之光束同調性會變差，聚光光束之

干涉現象不如 s 偏振光，故二孔垂直位向搭配 s 偏振光之成像品質較佳，未偏振光次之，p 偏振光相較之下則最差。此外，模擬發現提高聚光當量可有效改善像比，即使 p 偏振光有破壞性影響，但聚光當量與 p 偏振光互相競爭之結果，仍以聚光當量對像比之影響較大，故聚光當量逐漸提高時，使用 p 偏振光之整體像比趨勢仍然是升高的情況。

光束入射至遮光板所形成入射面為由中心向外之放射狀，理論上入射面可為無限多，因此每道入射面均有對應之 s 電向量垂直於其上。圖 4-40 以合向量之方式解釋反射面與 s 偏振光，圖 4-40 (A) 為俯視圖，圖上之箭號代表入射面，圖 4-40 (B) 之箭號代表 s 電向量，s 電向量與其反射面皆為互相垂直。若使用四孔或環形偏軸發光，則並非所有入射面之 s 電向量聚焦時皆為平行，部分 s 電向量甚至互相垂直，導致合向量較低，此為 s 偏振光之缺點。二孔發光對圖案線條之應用性雖有限，但可突顯 s 偏振光之優勢，對於直線圖案具有雙管齊下之效果，足見二孔偏軸發光之價值。

使用偏振片(Polarizer)是讓光源產生偏振的方法之一，此舉雖然簡單方便，但相對也會損失入射光通量，欲改善此缺點可藉由提高光源功率或照射時間來達成。

未來搭配濕浸式(Immersion)微影或機台之聚光能力不斷提升之時，建設性干涉現象較大之 s 偏振光源將是較佳選擇。

第五章 結論

1. 如 VASE 這類商業儀器雖然量測準確性較高，但由於價格昂貴，故一般實驗室或學術單位不易負擔，而反射率-透射率法雖然簡單，但是在薄膜表面粗糙度較大時，UV/Visible 光譜儀所測得之反射率與透射率偏差便會提高。因此，若考慮表面粗糙度為修正因子，對量測之反射率與透射率做適當修正，則計算之光學性質可以更接近 VASE 之量測值，甚至優於薄膜測厚儀之結果。
2. 薄膜表面粗糙度越大時，反射率與透射率之量測誤差越大，則修正效果越明顯。雖然修正反射率-透射率法便宜，然而步驟較多是其缺點，若能將修正方程式結合反射率-透射率法之軟體，則可以簡化步驟使修正反射率-透射率法實用性更好。
3. 本實驗製備之 Si_3N_4 、TiSiN 與 MoSiN 嵌附層製備簡單，且符合正規透射率嵌附層之條件，工作波長下的透射率為 4-15% 之內，反射率 $< 20\%$ 。薄膜厚度控制於 100 nm 左右，且不超過或接近傳統鉻膜之厚度。化學穩定性佳，抗酸鹼能力強，以利阻劑清除與圖罩清潔製程。惟嵌附層對石英或阻劑之蝕刻選擇比與嵌附層原子組成，需藉助活性離子蝕刻 (RIE) 與化學分析電子光譜儀 (ESCA) 進行量測，因為受限於機台與礙於時間等因素，無法進一步驗證。
4. 模擬結果發現”隙寬”與”隙與側葉兩中心點距離”兩者之關係，可計算導出指數公式，由於發光孔徑大小不影響側葉位置，故以聚光當量(數值孔徑)與孔距為修正項導入公式中，可使計算結果更貼近真實值。利用此公式可預測得知側葉合併時之線寬，避免側葉光強顯影於阻劑上。

5. 模擬觀察範圍為 80 nm 以上之隙寬，側葉位置較不受線寬影響，但 80 nm 以下之空間影像與干涉現象相當複雜，故不便討論之。
6. 二孔發光垂直位向之側葉效應遠小於平行位向，對微影製程影響不大，不需輔助孔或其他方法修飾。二孔平行位向類似沿軸發光；二孔垂直位向則為偏軸發光。偏軸發光之聚焦深度較沿軸發光為大，因此設定相同顯影條件時，二孔垂直位向曝光所得之隙深度較平行位向深。如調整顯影條件使兩種位向之發光方式均曝出相同尺寸之隙時，則平行位向之側葉會顯影於阻劑上。
7. 由於模擬軟體沒有光源參數可調變空間影像，門檻光強(通常設在相對光強 0.3)之實質意義不大，聚焦深度無法得知，因此空間影像僅能做為單一發光方式解像能力之參考，可靠性不及阻劑輪廓，然而阻劑輪廓需考慮之顯影條件甚複雜，必須以相同條件或相同目的為前提，方能公平比較兩種位向之解像能力。
8. 提高聚光當量可有效改善像比，即使 p 偏振光像比較差，但兩者相互競爭之結果，聚光當量對像比之影響大於 p 偏振光，故聚光當量逐漸提高時，使用 p 偏振光之整體像比趨勢依然是升高的情況。若使用四孔或環形偏軸發光，則並非所有入射面之 s 電向量聚焦時皆為平行，部分 s 電向量甚至互相垂直，導致合向量較低，此為 s 偏振光之缺點。二孔發光對圖案線條之應用性雖有限，但可突顯 s 偏振光之優勢，對於直線圖案具有雙管齊下之效果，足見二孔偏軸發光之價值。
9. 未來搭配濕浸式(Immersion)微影或機台之聚光能力不斷提升之時，建設性干涉現象較大之 s 偏振光源將是較佳選擇，若搭配二孔垂直位向之偏軸發光能有較佳解像能力。模擬結果顯示，使用 s 偏振光可獲得較佳之成像品質，未偏振光次之，p 偏振光最差。

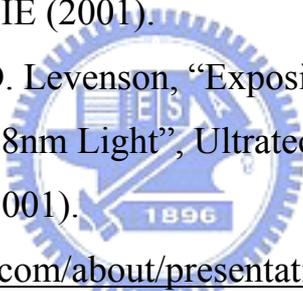
參考文獻

1. H. Levinson, “The end of optical on the ITRS lithography roadmap” , Solid State Technology, January, 2002.
2. L. Peters, “Fabricating 90 nm Devices by 2004” , Semiconductor International, January, 2002.
3. B. Nikolaus et al., “Dense plasma focus for production-level EUV lithography” , Solid State Technology, February, 2002.
4. R. Morton et al., “Testing Optical Damage for 157 nm Lithography” , Semiconductor International, February, 2002.
5. 龍文安, “積體電路微影製程”, 高立, 台北, 民 87 年。
6. T. Matsuo et al., “Challenge to Sub-0.1 μ m Pattern Fabrication Using an Alternating Phase-Shifting Mask in ArF Lithography” , Proc. SPIE, Vol. 3679, p. 302 (1999).
7. H. I. Smith et al., “Spatial period division-A new technique for exposing submicrometer-linewidth periodic and quasiperiodic patterns”, J. Vac. Sci. Technol., B, Vol. 16, No. 6, p. 1949 (1979).
8. M. D. Levenson et al., “Improving Resolution in Photolithography with a Phase-Shifting Mask”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. ED-29, No. 12, p. 1828 (1982).
9. H. I. Smith, E. H. Anderson and M. L. Schattenburg, U. S. Patent 4, 890, 309.
10. T. Tanaka et al., “A Novel Optical Lithography Technique Using the Phase-Shifter Fringe”, Jpn. J. Appl. Phys., Pt. 1, Vol. 30, No. 5, p. 1131 (1991).

11. T. Terasawa et al., "Imaging Characteristics of Multi-Phase-Shifting and Halftone Phase-Shifting Masks", Jpn. J. Appl. Phys., Pt. 1, Vol. 30, No. 11B, p. 2991 (1991).
12. W. A. Loong et al., "Simulation and Fabrication of a New Phase Shifting Mask for 0.35 μ m Contact Hole Pattern Transfer: Halftone-Rim", Proc. SPIE, Vol. 2087, p. 380 (1993).
13. B. J. Lin, "PHASE-SHIFTING AND OTHER CHALLENGES IN OPTICAL MASK TECHNOLOGY", SPIE, Vol. 1496, p. 54 (1990).
14. Y. Iwabuchi et al., "Monolayer Halftone Phase-Shifting Mask for KrF Excimer Laser Lithography", Jpn. J. Appl. Phys., Pt. 1, Vol. 32, No. 12B, p. 5900 (1993).
15. B. W. Smith and S. Turgut, "Phase-Shift Mask Issues for 193 nm Lithography", Proc. SPIE, Vol. 2197, p. 201 (1994).
16. G. Dao et al., "248nm DUV MoSiON Embedded PSM for 0.25 μ m Lithography", Proc. SPIE, Vol. 11, Issue 8, p. 2 (1995).
17. Carcia et al., "Materials Screening for Attenuating Embedded Phase Shift Photoblanks for DUV and 193 nm Photolithography", 16th BACUS, SPIE, Vol. 2884, p. 255 (1996).
18. B. W. Smith et al., "Development and Characterization of Nitride and Oxide based Composite Materials for sub 0.18 μ m attenuated phase shift masking", Microelectronic Engineering, Vol. 35, p. 201 (1997).
19. B. W. Smith et al., "Attenuated phase shift mask materials for 248- and 193-nm lithography", MICROLITHOGRAPHY WORLD, p. 7 (1997).
20. B. W. Smith et al., "Attenuated phase shift mask materials for 248 and 193nm lithography", J. Vac. Sci. Technol., B, Vol. 14, No. 4, p. 3719 (1996).

21. K. K. Shih and D. B. Dove, "Thin film materials for the preparation of attenuating phase shift masks", *J. Vac. Sci. Technol., B*, Vol. 12, No. 1, p. 32 (1994).
22. H. L. Chen et al., "Thermal-flow techniques for sub-35 nm contact-hole fabrication in electron-beam lithography", *J. Vac. Sci. Technol., B*, Vol. 20, No. 6, p. 2973 (2002).
23. T. C. Chu et al., "Low-dielectric constant bisbenzo and fluorinated poly ether films as bottom anti-reflective coating layers for ArF lithography", *J. Vac. Sci. Technol., B*, Vol. 20, No. 6, p. 2381 (2002).
24. D. W. Bloom et al., "Optical Characterization of Titanium Nitride Thin Films", *Semiconductor Fabtech.*, 7th Ed., p. 279 (1998).
25. A. R. Forouhi and I. Bloomer, *n&k Analyzer*, n&k Technology, Santa Clara, California.
26. C. Bencher et al., "Dielectric anti-reflective coatings for DUV lithography", *Semipark Tech. Data*, Vol. 40, Issue 3, p. 1 (1997).
27. Y. S. Ihn et al., "Optical Properties of InGaAs Alloy Films in the E₂ Region by Spectroscopic Ellipsometry", *J. Korean Physical Society*, Vol. 42, p. 242 (2003).
28. H. Derin and K. Kantarli, "Optical characterization of thin thermal oxide films on copper by ellipsometry", *Applied Physics, A*, Vol. 75, No. 3, p. 391 (2002).
29. T. Easwarakhanthan and P. Alnot, "Simultaneous measurement of film and substrate optical parameters from multiple sample single wavelength ellipsometric data", *Eur. Phys. J. Applied Physics*, Vol. 6, p. 285 (1999).
30. K. Vedam, "Spectroscopic ellipsometry : a historical overview", *Thin Solid Films*, Vol. 313, p. 1 (1998).

31. J. A. Woollam et al., "Fundamentals and Applications of Variable Angle Spectroscopic Ellipsometry", *Materials Science and Engineering*, B5, p. 279 (1990).
32. Z. Cui and P. D. Prewett, "Characterization of Embedded Phase Shift Masks by Reflectance-Transmittance Measurement", *Microelectronic Engineering*, Vol. 30, p. 145 (1996).
33. T. C. Paulick, "Inversion of normal-incidence (R, T) measurement to obtain $n + ik$ for thin films", *Applied Optics*, Vol. 25, No. 4, p. 562 (1986).
34. A. Hjortsberg, "Determination of optical constants of absorbing materials using transmission and reflection of thin films on partially metallized substrates : analysis of the new (T, R_m) technique", *Applied Optics*, Vol. 20, No. 7, p. 1254 (1981).
35. J. E. Nestell and R. W. Christy, "Derivation of Optical Constants of Metals from Thin-Film Measurements at Oblique Incidence", *Applied Optics*, Vol. 11, No. 3, p. 643 (1972).
36. C. M. Lin and W. A. Loong et al., "TiSi_xO_y AS AN ABSORPTIVE SHIFTER FOR EMBEDDED PHASE-SHIFTING MASK IN 248 NM AND THE MODIFICATION OF R-T METHOD FOR THE DETERMINATION OF SHIFTER'S n AND k ", *Microelectronic Engineering*, Vol. 41/42, p. 125 (1998).
37. C. M. Lin and W. A. Loong, "Correlation between the Chemical Compositions and Optical Properties of AlSi_xN_y Embedded Layer for Attenuated Phase-Shifting Mask in 193 nm and the Modification of the R-T Method for Measuring n and k ", *J. Vac. Sci. Technol., B*, Vol. 18, No. 6, p.3371 (2000).

38. C. M. Lin and W. A. Loong, “TiSi_xN_y and TiSi_xO_yN_z as Embedded Material for Attenuated Phase Shifter Mask in 193 nm ”, Microelectronic Engineering, Vol. 46, p. 93 (1999).
39. R. H. French et al., “Materials Design for Attenuating Phase Shift Photomasks”, DuPont Company (1999).
<http://www.lrsn.upenn.edu/~frenchrh/download/0006phaseshiftdesign.pdf>
40. Y. Borodovsky et al., “Lithography Strategy for 65nm Node”, 21th BACUS, SPIE, Vol. 4754, p. 246 (2002).
41. Koen van Ingen Schenau et al., “PROCESS OPTIMIZATION FOR SUB-100nm GATE PATTERNS USING PHASE EDGE LITHOGRAPHY”, 26th Annual International Symposium on Microlithography, SPIE (2001).
42. T. Ebihara and M. D. Levenson, “Exposing the SCAAM – Perfect 70nm Images with 248nm Light”, Ultratech Advanced ReticleSymposium (2001).

<http://www.ultratech.com/about/presentations/T.Ebihara.PDF>
43. J. S. Petersen et al., “Designing dual-trench alternating phase-shift masks for 140nm and smaller using 248nm KrF and 193nm ArF Lithography”, 17th BACUS, SPIE, Vol. 3412, p. 503 (1998).
44. M. D. Levenson et al., “SCAA mask exposures and Phase Phirst! design for 110nm and below”, 20th BACUS, SPIE, Vol. 4346, p. 183 (2001).
45. H. Y. Liu et al., “100-nm Node Lithography With KrF?”, 20th BACUS, SPIE, Vol. 4346, p. 21 (2001).
46. Y. T. Chen et al., “0.13μm Optical Lithography for Random Logic Devices Using 248 nm Attenuated Phase-Shifting Masks”, SPIE, Vol. 4000, p. 99 (2000).

47. J. F. Chen et al., "A Practical Technology Path to Sub-0.10 Micron Process Generations Via Enhanced Optical Lithography", SPIE, Vol. 3873, p. 995 (1999).
48. J. Finders et al., "KrF lithography for 130 nm", SPIE, Vol. 4000, p. 192 (2000).
49. K. Tounai et al., "Resolution Improvement with Annular Illumination", SPIE, Vol. 1674, p. 753 (1992).
50. H. Y. Kang et al., "A New Method of Tilted Illumination Using Grating Mask ; ATOM (Advanced Tilted illumination On Mask)", Proc. SPIE, Vol. 1927, p. 226 (1993).
51. S. W. Choi et al., "A New Simple Method of Extending the Limit of Rim Phase Shift Mask", Proc. SPIE, Vol. 2087, p. 372 (1993).
52. T. Ogawa et al., "The Effective Light Source Optimization with the Modified Beam for the Depth-of-focus Enhancement", Proc. SPIE, Vol. 2179, p. 19 (1994).
53. N. V. Lafferty et al., "Gray Assist Bar OPC", Imec (2004).
http://www.microe.rit.edu/research/lithography/research/imagetheory/5377_32presentation.pdf
54. M. D. Smith, "Modeling and Simulation for Microlithography", Finle Technologies (2001).
http://www.che.utexas.edu/twmcc/presentaions_0202/KLA.pdf
55. D. C. Cole et al., "Using Advanced Simulation to Aid Microlithography Development", Proceedings of the IEEE, Vol. 89, No. 8, p. 1194 (2002).