

# 第一章 緒論

1940 年貝爾實驗室發現電晶體，而 1958 年德州儀器(Texas Instruments, TI) 成功的製造出全球第一顆積體電路(Integrate Circuit, IC)，意謂真空管的時代結束，IC 的時代正式開始。從此開始各式 IC 不斷被開發出來，集積度也不斷提升。從小型積體電路(Small-Scale Integration, SSI)；一路發展中型積體電路(Medium-Scale Integration, MSI)、大型積體電路(Large-Scale Integration, LSI)、超大型積體電路(Very Large-Scale Integration, VLSI)、極大型積體電路(Ultra Large-Scale Integration, ULSI)；到現在韓國、日本等半導體大廠已陸續研發出十億級(Giga) 動態隨機存取記憶體(Dynamic Random Access Memory, DRAM)，這也意謂著十億集積度級積體電路(Giga-Scale Integration, GSI)時代即將開始。表 1.1 為半導體發展的大事紀。

為了處理大量的資訊，需要更快更複雜之積體電路。隨著電腦的進步，晶片中電晶體數目不斷增加、電晶體尺寸逐漸下降，微影技術所要求的線幅也愈來愈小。對於90奈米的線寬也於2004年順利量產，且在縮減成本、增加產率的前提下，晶圓尺寸已由原先8吋發展至12吋。而(美國)半導體工業協會(Semiconductor Industry Association, SIA)所發表的國際半導體技術路圖(International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS)預測將在2007年開發出DRAM其半間距(Half Pitch)為65奈米，於2016年開發出22奈米，如表1.2[1]。表1.3[2]為ITRS所發表未來數年之微影技術路圖。

使用極短紫外光微影技術(Extreme Ultraviolet Lithography, EUVL)[3]或是電子束投影微影(Electron Projection Lithography, EPL)及下世代微影技術(Next Generation Lithography, NGL)，可將製程路圖拓展到 45 奈米技術節點以下。目前 157 奈米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]。

目前主力機種 193 奈米氟化氬(ArF)微影技術搭配放大型阻劑以傳統發光(Conventional Illumination, CI)搭配傳統圖罩(Conventional Mask)已漸漸無法滿足解像度(Resolution)、焦深 (Depth of Focus, DOF)及製程寬容度(Process Latitude)的需求。

改善解像度增進技術、焦深及製程寬容度(Process Latitude)的主要技術有：(1)偏軸發光(Off-Axis Illumination, OAI)；(2)相移圖罩(Phase Shift Mask, PSM)；(3)光學鄰近效應修正(Optical Proximity Correction, OPC)；(4)光瞳濾波片(Pupil Filters)；(5)聚焦寬容度加強照射(Focus Latitude Enhancement Exposure, FLEX)；(6)超聚焦寬容度強化照射(Super-Focus Latitude Enhancement Exposure, Super-FLEX)；(7)表層成像(Top Surface Imaging, TSI)；(8)抗反射塗佈(Antireflection Coating, ARC)等。

偏軸發光基本原理為減少零級光(背景光)，產生空間頻率調變(調增)作用，以達到增加解像度與焦深的目的。其最大的優點在於以原有的製程步驟下即可達成。

相移圖罩則利用入射光透過圖罩相移層與非相移層二者之光幅產生  $\pi$  相位差，形成破壞性干涉。主要以空間頻率調變與邊端強化二大原理，來增強解像度與焦深。

由於 IC 電路佈局的線路寬度變得愈來愈細，微影技術需要不斷地將曝光波長縮短，以提升其解像度，而如此將會面臨到光學成像技術的瓶頸，光學鄰近效應修正為針對晶片中細微的線條和間距，在圖罩上修正，以減少曝光後的失真，在不改變曝光波長的情況下，可將解像度再提升一些。光學鄰近效應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。

2003年英特爾宣佈放棄發展157奈米微影技術，打算使用193奈米微影

技術進行90、65及45奈米製程，並計劃在2009年前，於32奈米製程導入極短紫外光微影技術。全球微影設備前三大供應商ASML、Canon、及Nikon皆力推濕浸式設備，在157奈米微影技術的研發能量將大幅度轉移至濕浸式技術。台積電已在2003年底便向ASML已訂購全球第一台193奈米濕浸式微影準生產型機台。

濕浸式微影技術主要原理是將光學透鏡與晶圓之間的介質由原來的空氣更換為液態介質( $n>1$ )，縮短在液態介質中之波長以提升其解像度(Resolution)，公式為  $\lambda_n=\lambda/n$  ( $\lambda_n$  為光在液態介質中之波長； $\lambda$  為在真空中的波長； $n$  為液態介質的折射率)。若將目前 193 奈米波長曝光機台中最後之投影鏡片與晶圓之間加入水作介質(水的折射率約為 1.44)，其波長可縮短為 134 奈米，解像度明顯增加。並利用高折射率之液態介質，讓入射光以更加陡峭的角度進入阻劑，亦可增加其焦深。

然而濕浸式技術仍有幾項關鍵因素待克服，例如水與阻劑交互作用、溫度的作用及水中微泡的控制等[5-6]。若濕浸式技術能研發成功，將可以繼續使用 193 奈米曝光機，進行 65、45 甚至 32 奈米等先進製程研發，預計將可以省下購買 157 奈米曝光機及極短紫外光微影技術機台龐大支出。

偏軸發光可增進解像度與焦深，但在間距大時，焦深依然會不足，為克服此缺點，可使用全條遮光作修正。而全條遮光尺寸很大時容易顯影，尺寸要求小，製程又不易做到，針對此一缺點，可使用全條減光[7]和陣列減光[8-9]來增進焦深，其優點為寬度可以比全條遮光更大，製程上較容易；缺點為透射率或相移角度控制不易。

本論文選擇使用美國 KLA-Tencor 之微影模擬軟體 ProLith v. 9.0，利用偏軸發光、濕浸式微影、相移圖罩增進焦深，並加上全條遮光、全條減光、陣列減光等散條之方式來改善禁止間距[10-11]，並探討全條減光的相位差之變化。

## 第二章 文獻回顧

### 2.1 禁止間距

當元件愈小，線寬愈來愈細時，線寬固定，而間距增加時，在某些間距會產生正規化成像斜率對數(Normalized Image Log-Slope, NILS)、像比(Contrast)、關鍵尺寸(Critical Dimension, CD)、焦深、製程視窗等不符需求之現象。這些有問題的間距可稱為“禁止間距”。

禁止間距發生之原因有：

1.高階光進入圓心區，如同背景光。

當間距變大，繞射角變小，可收到高階繞射光束，此時，高階繞射光易進入圓心區(此為指導老師龍文安教授所定義，為說明方便)，形同背景光增加，造成正規化成像斜率對數與焦深下降，如圖 2.1。

另外，在間距繼續增大時，高階光進入圓心區面積增加，但零級光之光強增加，一級光和二級光之光強會下降甚至趨近於零，依然會造成正規化成像斜率對數與焦深下降。

2. 高階光在圓心區所佔之面積

高階光在圓心區所佔之面積愈大時，所造成之影響會變大，如同背景光面積增加，造成正規化成像斜率對數與焦深下降。

3.高階光與零級光重疊

間距變大時，其高階光會和零級光重疊，造成正規化成像斜率對數與焦深上升。

造成正規化成像斜率對數與焦深之變化為以上三種現象相互競爭之結果，舉例而言，如圖 2.1 之 D 而言，-1,+1 進入圓心區(不利於正規化成像斜率對數與焦深)面積達最大(不利於正規化成像斜率對數與焦深)，造成正規化成像斜率對數與焦深下降；對 E 而言，-1,+1 進入圓心區(不利於正規化成

像斜率對數與焦深)面積達最小(有利於正規化成像斜率對數與焦深)，但有部份-2,+2 與 0 重疊(有利於正規化成像斜率對數與焦深)。在此相互競爭之影響，D 之正規化成像斜率對數與焦深會明顯下降，而 E 之正規化成像斜率對數與焦深會有部份提昇。

在論文中，以焦深的變化來觀察禁止間距。而製程視窗影響焦深甚大，與製程視窗有關的有四個參數，包括：線寬、側壁角度、阻劑損失、照射寬容度。在製程上，這四個參數也是控制焦深的關鍵。當我們提到增進焦深最常的方法是偏軸發光和濕浸式系統。在所有偏軸發光的情形，不論是四扇面、環形、雙孔，禁止間距依然會發生。

## 2.2 傳統發光和偏軸發光

改善解像度、製程寬容度與增加焦深的方法有數種，其中偏軸發光因不須改變圖罩設計並可維持原有製程即能達到要求。目前較常用之偏軸發光為 (1) 環形發光 (Annular Illumination)；(2) 四孔發光 (Quadrupole Illumination)；(3) 二孔發光 (Dipole Illumination)；(4) 四扇面形發光 (Quasar Illumination)。以下就傳統發光和上述四類偏軸發光形式，分別討論。

### 一. 傳統發光：

傳統發光原理見圖 2.2，形狀如圖 2.2 (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[15-16]形狀如圖 2.2 (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[15-16]形狀如圖 2.2 (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。

#### 四. 二孔發光：

二孔發光[17]形狀如圖 2.2 (E)(F)，又分為光源與圖罩上線條垂直(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。

#### 五. 四扇面發光：

四扇面形[16]發光的形狀如圖 2.2 (G)。因考量圖罩圖形設計難易，及環形發光、四孔發光系統的限制，綜合環形發光及四孔發光的形式，改良成四扇面形發光。



#### 2.2.1 偏軸發光的影響[18]

當線條做到 130 奈米以下時，以偏軸發光可明顯增進解像度與焦深。但在間距很大時，繞射角會變很小，可收集到高階的繞射光。但在某特定間距下，高階繞射光會進入圓心區，如同沿軸發光的背景光。如圖 2.1。

#### 2.2.2 偏軸發光的優點與缺點

綜合前述對偏軸發光的探討，可歸納出偏軸發光之優、缺點如下：

##### (1) 優點：

- a. 應用簡單，不改變原有製程。
- b. 可大幅改善焦深，使用未偏振光對解像度僅有略微改善；如使用偏振光則可較大幅改善。

##### (2) 缺點：

- a. 僅能改善週期性圖案的製程寬容度。

- b. 在密集線/隙阻劑外緣有變形現象。
- c. 遮板偏軸發光因光強損失，使照射劑量增加，造成產率(Throughput)降低。
- d. 有鄰近效應。

## 2.3 濕浸式微影[19-25]

濕浸式微影是一個新興的微影技術，指在微影機台成像投影鏡組合中最後一片透鏡表面與晶圓表面二者之空隙，浸入折射率  $n > 1$  之液態介質(真空時， $n=1$ ) [26]，如圖 2.3。此介質在微影波長之透射率須高，折射率亦須高，由聚光當量(數值孔徑)(Numerical Aperture)  $NA = n \sin \theta_{max}$  的公式得知可增大透鏡之聚光當量值，因而收集到原遺留在入口光瞳之外的+1,-1 或更高階的繞射光束 [27]；由  $\lambda_n = \lambda/n$ ，相當於降低在液態介質中之波長。而聚光當量增大與波長降低皆可增進解像度，但僅能二選一解釋。

根據史內爾折射定理， $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 = n_3 \sin \theta_3$ ，如假設透鏡之入射角為 36 度；進入空氣或水( $n=1.44$ )中，入射角分別為 62 度及 39 度；此時，以相同之入射角進入阻劑，由圖 2.4 可看出水的入射光較空氣的入射光更為陡峭，進入阻劑時之焦深更大，所以濕浸式可明顯改善焦深 [28-29]。

### 2.3.1 濕浸式的優點與缺點：

優點：

1. 可建立在 193 乾式微影基礎上，研發成本較低。
2. 濕浸式可降低照射劑量，增進焦深，增大作業視窗，解像度可達 45 奈米節點之潛力。相對於真空或空氣，液體折射率與投影鏡較接近，光束折射角較小，理論上可增加焦深。

濕浸式尚待克服或改善的問題：

1. 裝置如設計為盆浴式(Bath)，因剪應力之關係，易產生雙折射；若設計為

水灘式(Puddle)或淋浴式(Shower)，所需液體量較少，重量較輕，但欲將液體侷限於特定區域較困難。液體供應最適化尚待研發。圖 2.5 為三種濕浸式設計[5]。

2. 使用線性電場偏振光（偏振面為二維單一面）為宜，微影品質較佳，但製程難度提高。
3. 浸入液體易生微泡(Microbubble)，晶圓平台高速移動時更易生成，導致光之散射(Scattering)。晶圓單片實驗時，液體去氣體(De-gas)技術可減少微泡生成，但高速量產時，甚難防止微泡生成 [30]。
4. 水吸附於晶圓表面，晶圓平台高速移動時，因表面張力，此吸附之水亦隨之移動，易生微泡、並增加污染機率。
5. 晶圓上化學放大型阻劑(CAR)照射後產生之質子酸( $H^+$ )，特別是表層與液體接觸之質子酸，可能受液體稀釋或中和，失去催化去保護反應之活性。如 193 微影以水( $H_2O$ )為液體， $H^+ + H_2O$  (弱鹼)  $\rightarrow H_3O^+$  (弱酸)，水形同弱鹼。如將阻劑表面旋佈一層斥水高分子薄膜，則製程難度增加。



## 2.4 光學鄰近效應[31-32]

光學鄰近效應其作用主要是影響圖案線寬設計偏離，受鄰近線路圖案密度、尺寸而有不同程度之影響。

### 2.4.1 光學鄰近效應成因與現象

#### A. 成因

光學鄰近效應主要由照射之空間影像決定，雖照射實施予劑量 (Applied Dose) 相同，但阻劑獲得劑量 (Received Dose) 却不相同。其因如下：

照射時光線通過圖罩上圖案，產生繞射現象，導致圖案邊緣光強形成降級，造成空間影像對比度降低。因圖罩上鄰近圖案密度與尺寸的不同，

使光束在阻劑發生不同程度多次反射現象，造成附近阻劑接受不同程度的照射劑量，而於顯影後形成阻劑線寬失真。除空間影像影響，顯影液流率、照後烤擴散、表面遲滯效應（Surface Inhibition Effect）等亦是造成鄰近效應的因素。

## B. 現象

積體電路線路設計的圖案中，主要包含密集線/隙、孤立線、孤立隙、接觸孔、轉角圖案（Corner Pattern）與 T-型圖案（T-Type Pattern）等。由鄰近效應所產生圖案失真現象可分類如下：

1. 線端變圓（Line-End Rounding）
2. 線端變短（Line-End Shorting）
3. 轉角變圓（Corner Rounding）
4. 關鍵尺寸偏差（Critical Dimension Offset）
5. 線間架橋（Line Bridging）



### 2.4.2 光學鄰近效應之型態

光學鄰近效應依形成的型態可區分為二種，圖 2.6：

1. 獨立鄰近效應（Independent Proximity）
2. 交互鄰近效應（Interactive Proximity）

### 2.4.3 光學鄰近效應修正之方法

目前發展研究的光學鄰近效應修正之方法以圖罩圖案設計改變為主，主要有以下數種方法，圖 2.7：

- (1) 特徵偏差（Feature Biasing）
  1. 延伸法（Extended）
  2. 飾線法（Serifs）

3. 侵入法 (Aggression)
  4. 帽冠法 (Hat)
  5. 偏差法 (Bias)
  6. 直角凹凸 (Jog)
- (2) 特徵輔助 (Feature Assisting)
1. 散條法 (Scattered Bar)
  2. 內輔助線 (Internal Assisted Line)
  3. 外輔助線 (External Assisted Line)
  4. 飾線加輔助線 (Serifs with Assisted Line)

(3) 輔助圖案法 (Assisted Pattern)

1. 透射率控制圖罩法 (Transmittance Controlled Mask, TCM)
2. 極小虛圖達成真實性加強法 (Fidelity Enhancement with Extremely Small Dummy, FEED)

#### 2.4.4 利用特徵輔助改善禁止間距[33]

散條法修正孤立線與密集線，其主要原理為孤立線兩旁加散條[34]，如圖 2.8(a)，亦可修正孤立線與密集線之差異。如圖 2.8(b)，顯示孤立線 + 散條修正（編號 4）空間影像之光強、斜率、形狀與密集線（編號 1）甚為接近，相對於偏差法，此為較佳之修正方法。

優缺點有：

1. 優點為可有效降低光學鄰近效應至幾乎為零，可有效修正孤立線線寬；相對於圖案偏差法之修正，孤立線和密集線隙之空間影像較互相吻合，可增大孤立線與密集線重疊之製程視窗。
2. 缺點為圖案設計較複雜，相對大幅增加圖罩之圖檔電腦資料；電子束製作圖罩及圖罩檢修皆較困難。

以散條修正間距不同孤立線

參看圖 2.8(c)，可知：

1. 當孤立線之間的距離足夠時，可加入兩條寬標準散條(Broad Standard Scattering Bar, BSSB)(即本論文之全條遮光)作修正。
2. 若孤立線彼此之距離變小，不適合加入兩條 BSSB，可加入兩條窄標準散條(Narrow Standard Scattering Bar, NSSB)作修正。
3. 若孤立線彼此之距離更小，不適合加入兩條 NSSB，可加入兩條短線散條(Dashed Scattering Bar, DSB)作修正。
4. 若孤立線彼此之距離更小，不適合加入兩條 DSB，可加入單一 BSSB 作修正。
5. 此孤立線彼此之距離更小，不適合加入單一 BSSB，可加入單一 NSSB 作修正。
6. 此孤立線彼此之距離更小，不適合加入單一 NSSB，可加入單一 DSB 作修正。



全條遮光修正可增大製程視窗重疊區，增大製程寬容度。圖 2.9。

而全條遮光尺寸很大時容易顯影，尺寸要求小，製程又不易做到，針對此一缺點。以下幾篇文獻討論全條遮光之改善方法：

方法一：全條減光

在間距增加時，會有禁止間距的問題。為了降低背景光的影響，加入全條遮光是常用的辦法，但全條遮光尺寸大時容易顯影，尺寸小製程上卻不易做到。在西元 1996 年，由 S. Ishida 等人[7]提出，利用改變透射率且控制相位，能夠做出比全條減光寬度更大的“全條減光”，如圖 2.10，其寬度可比全條遮光更大，製程上較容易，但會有相位的影響，相位差和光程差成正比(重要公式 11)，所以，須限制其相位差不可過大，並根據 B. W. Smith[35-37]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：

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

$m$ ：奇數的整數倍

$\lambda$ ：照射波長

$\theta$ ：嵌附層產生的相移角度

$n$ ：相移層在照射波長下的折射率

$d$ ：嵌附層厚度

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

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可參考龍文安教授所著之半導體微影技術，第 538~543 頁。

相位差與相移層厚度有一定的關係，相移層厚度愈小，其相位差會較小，表 2.2 為由美國羅徹斯特理工學院(Rochester Institute of Technology, RIT)，微電子工程系(Microelectronic Engineering Department)，史密斯(B. W. Smith) 教授主持之光學微影研究群，提供開放網站(<http://www.microe.rit.edu/research/lithography/>)，所查得之各種材料之折射率、吸收係數、透射率及換算所得的相位差。

方法二：陣列減光

在西元 2001 年，由 B. W. Smith 等人[8]提出，可利用原先上述所提之短線散條排成陣列式形狀，並可有效改善相位差之缺點，形成相位為零之“陣列減光”，如圖 2.11，但其缺點為製程上蝕刻陣列圖案甚困難。表 2.1 為全條遮光、全條減光、陣列減光之各項特徵。圖 2.12 為雙光強圖罩、加入全條遮光、加入陣列減光之繞射光幅。

## 2.5 微影模擬[44][45]

本實驗室使用美商 KLA-Tencor 之微影軟體 ProLith v. 9.0 為模擬工具 (Simulation Tool)，進行改善焦深之相關模擬實驗。

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( $\sigma$ )、光源波長( $\lambda$ )、系統數值孔徑值、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。

雖然 ProLith 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。

本論文使用之參數如表 2.3，使用美商 KLA-Tencor 之微影模擬軟體 ProLith v. 9.0，設計圖罩並調整，使用偏軸發光、濕浸式、極化、減光相移圖罩各項參數進行模擬計算，探討如何增進焦深，且使用全條遮光、全條減光、陣列減光消除禁止間距，並探討減光全條減光的相位移之變化。

進一步針對全條減光的材料製作可行性進行探討，參考表 2.2 作為各種

材料選擇，並且比較理論與實作之間的差異，與實作之可行性。



## 第三章 模擬與實驗方法

### 3.1 模擬設計

#### 3.1.1 模擬參數與步驟

使用之模擬參數如表 2.2，模擬設計步驟如下：

##### 1. 偏軸發光：

各別選用四扇面、環形、雙孔偏軸發光，搭配未偏振光、雙光強圖罩、乾式系統。進行模擬計算求出最適化後所需之照射能量(Exposure Energy)，改變間距，測焦深，繪製禁止間距圖。

##### 2. 濕浸式系統

使用上述偏軸發光，搭配未偏振光、雙光強圖罩、濕浸式系統。進行模擬計算求出最適化後所需之照射能量(Exposure Energy)，改變間距，測焦深，繪製禁止間距圖。



##### 3. 偏振光

使用上述偏軸發光，搭配 Y-偏振光、雙光強圖罩、濕浸式系統。進行模擬計算求出最適化後所需之照射能量(Exposure Energy)，改變間距，測焦深，繪製禁止間距圖。

##### 4. 減光型相移圖罩

使用上述偏軸發光，搭配 Y-偏振光、減光型相移圖罩、濕浸式系統。進行模擬計算求出最適化後所需之照射能量(Exposure Energy)，改變間距，測焦深，繪製禁止間距圖。

由以上之結果，我們得知，在偏軸發光中，以四扇面之效果最佳，故以下將使用四扇面偏軸發光加入特徵輔助來觀察其變化。

##### 5. 全條遮光

使用四扇面偏軸發光，搭配未偏振光、雙光強圖罩、乾式系統。並進行模擬計算求出最適化後所需之照射能量(Exposure Energy)，並由上述所繪製之禁止間距圖，參考焦深最高和低之距離，於孤立線時，在適當之距離加入全條遮光，繪製禁止間距圖。

## 6. 全條減光

使用四扇面偏軸發光，搭配未偏振光、雙光強圖罩、乾式系統。並進行模擬計算求出最適化後所需之照射能量(Exposure Energy)，並由上述所繪製之禁止間距圖，參考焦深最高和低之距離，於孤立線時，在適當之距離加入全條減光，繪製禁止間距圖。

## 7. 陣列減光

(1) 使用四扇面偏軸發光，搭配未偏振光、雙光強圖罩、乾式系統。並進行模擬計算求出最適化後所需之照射能量(Exposure Energy)，並由上述所繪製之禁止間距圖，參考焦深最高和低之距離，於孤立線時，在適當之距離加入陣列減光，繪製禁止間距圖。

(2) 使用四扇面偏軸發光，搭配未偏振光、雙光強圖罩、濕浸式系統。並進行模擬計算求出最適化後所需之照射能量(Exposure Energy)，並由上述所繪製之禁止間距圖，參考焦深最高和低之距離，於孤立線時，在適當之距離加入陣列減光，繪製禁止間距圖。

(3) 使用四扇面偏軸發光，搭配 Y-偏振光、雙光強圖罩、濕浸式系統。並進行模擬計算求出最適化後所需之照射能量(Exposure Energy)，並由上述所繪製之禁止間距圖，參考焦深最高和低之距離，於孤立線時，在適當之距離加入陣列減光，繪製禁止間距圖。

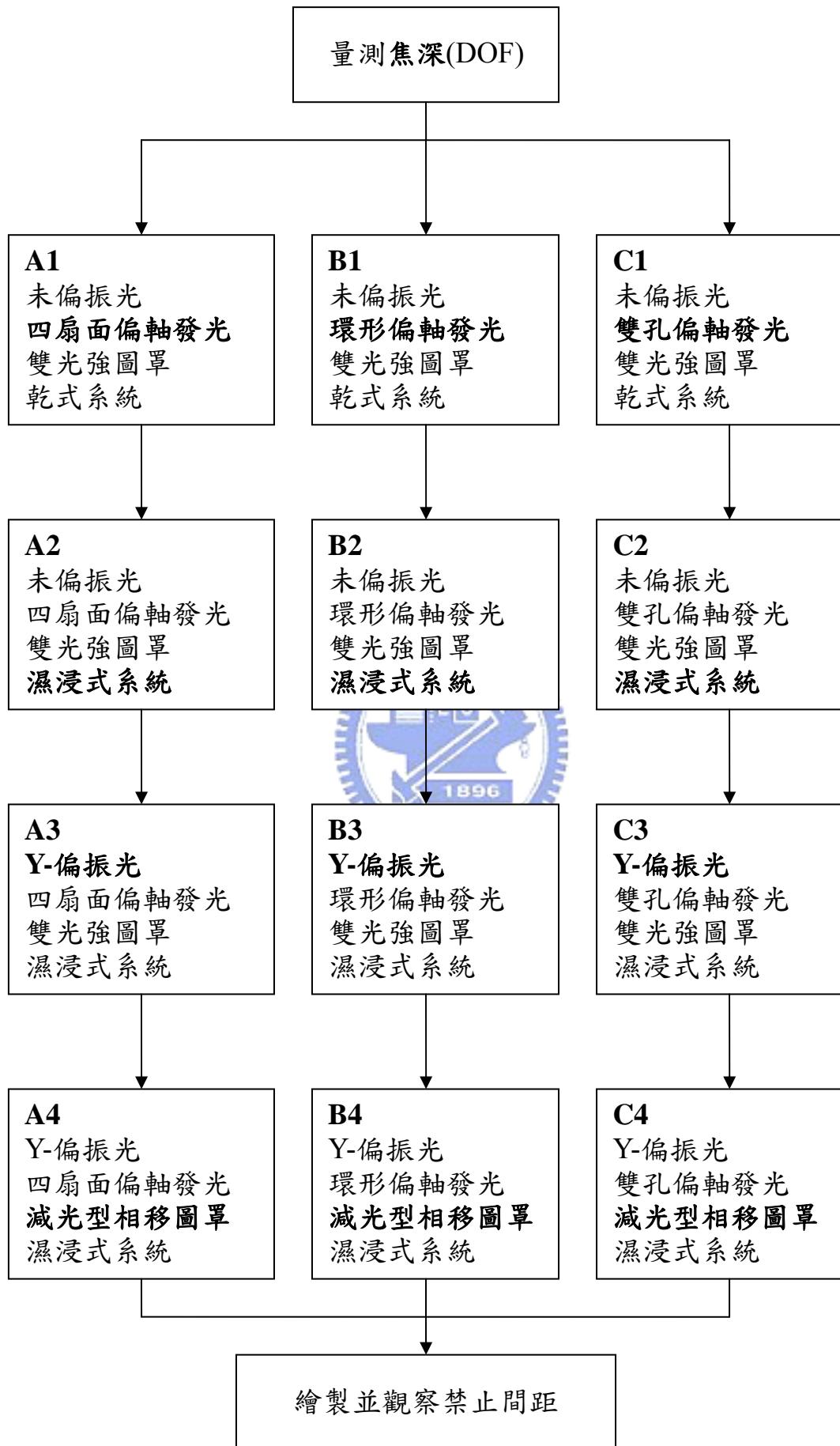
(4) 使用四扇面偏軸發光，搭配 Y-偏振光、減光型相移圖罩、濕浸式系統。並進行模擬計算求出最適化後所需之照射能量(Exposure Energy)，並由上述所繪製之禁止間距圖，參考焦深最高和低之距離，於孤立線時，在適

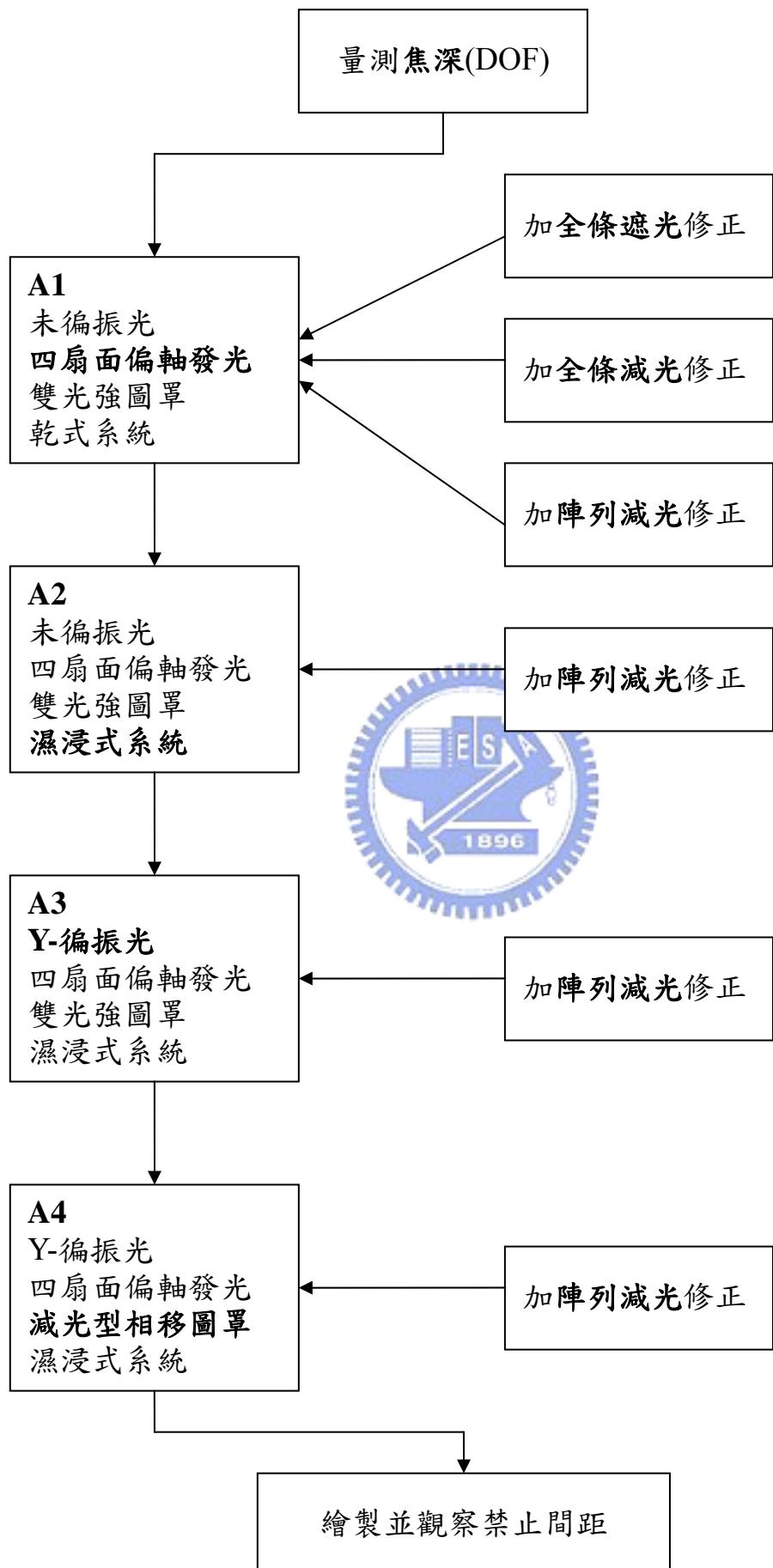
當之距離加入陣列減光，繪製禁止間距圖。

針對焦深可容許範圍之設定，因阻劑厚度設為 270 nm，焦深需較阻劑厚度大，故設定 300 nm (0.3 micron)為可接受值。

完整模擬步驟流程圖如下頁：







## 3.2 全條減光實驗物品

### 1. 熔融二氧化矽(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) 热性質(Thermal Properties)：

- 1. 热膨胀係數： $5 \times 10^{-7}$  cm/cm°C
- 2. 退火點： $1215^{\circ}\text{C}$
- 3. 耐熱溫度： $1683^{\circ}\text{C}$

### (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,  $\Omega\text{-cm}$ )

$2 \times 10^{14}$  ( $20^{\circ}\text{C}$ )

$2 \times 10^{10}$  ( $800^{\circ}\text{C}$ )

### 2. 硅(Silicon)基材

竹齊科技

純度 99.999%，p-type，晶格方向(1 0 0)

直徑 4 吋

### 3. 鍍膜材料

氮化矽( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )

二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )

### 4. 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： $-73^\circ\text{C}$  至  $260^\circ\text{C}$

## 3.3 實驗儀器

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

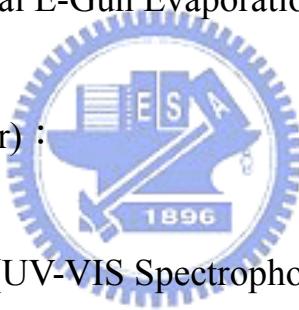
ULVAC EBX-10C

2. n-k 分析儀(n&k analyzer)：

FE-016B

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

Shimadzu UV-2501PC



## 3.4 實驗步驟

1. 基材清洗：

(1) 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。

(2) 矽晶圓基材：

以 RCA 清潔程序清洗。

2. 沉積嵌附層薄膜：

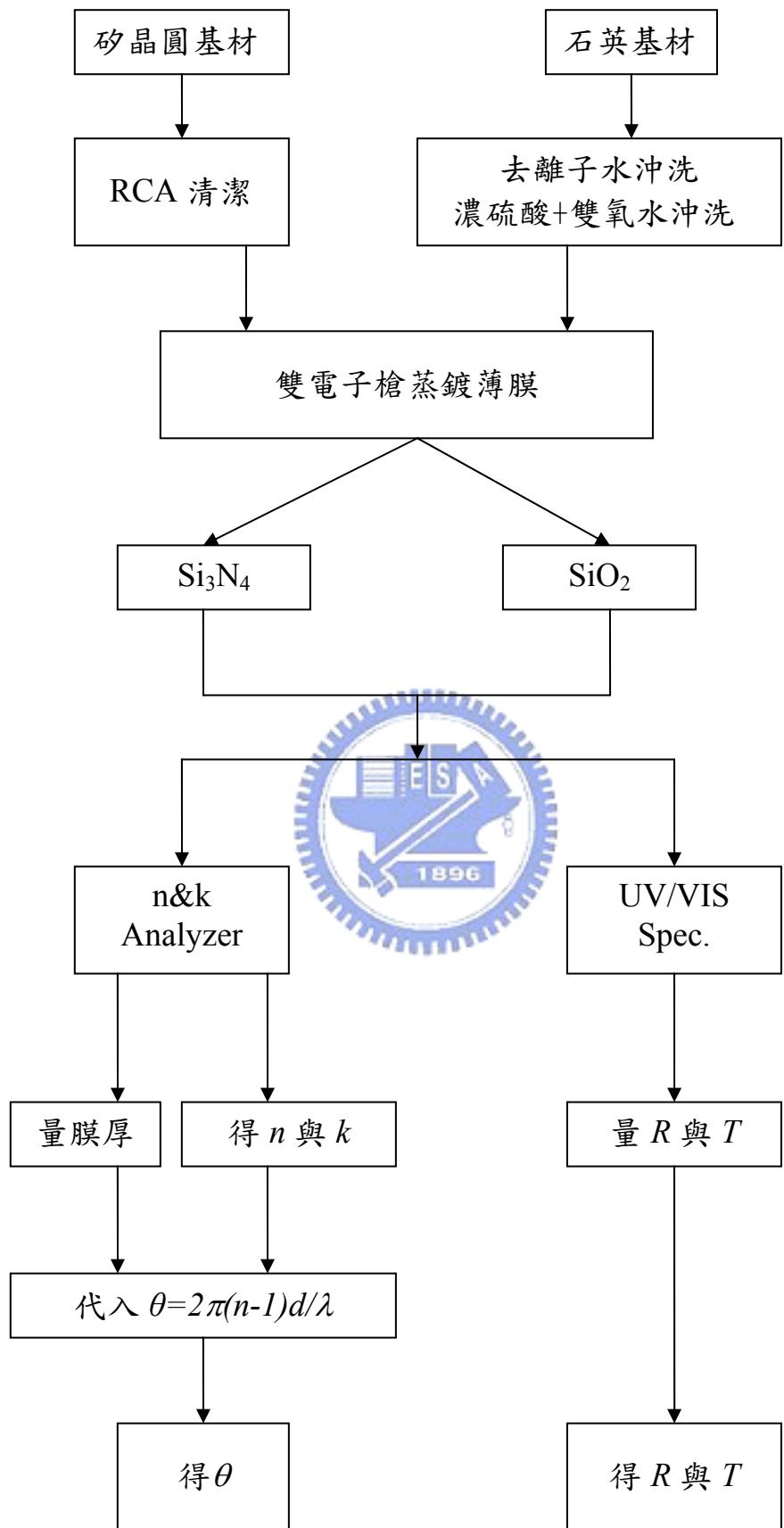
雙電子槍蒸鍍方式：

設定兩個材料個別之功率，氮化矽為 30 mA，二氧化矽為 10 mA，背景壓力為  $2 \times 10^{-6}$ ，Density：2.02，Z-ratio：1.07，由沈積速率(氮化矽為 0.2 Å/sec，二氧化矽為 0.1 Å/sec)決定欲鍍之厚度。

3. 以 n-k 分析儀(n&k Analyzer)量測樣品薄膜之厚度。
4. 以 n-k 分析儀(n&k Analyzer)量測樣品薄膜之折射率與吸收係數。
5. 以紫外光-可見光光譜儀(UV/VIS Spectrophotometer)量測樣品薄膜之透射率。
6. 將已知薄膜厚度、折射率、工作波長代入公式  $\theta = \frac{2\pi(n-1)d}{\lambda}$ ，計算薄膜之相移角度。
7. 得到全條減光的相移角度與透射率之光學性質。

完整實驗步驟流程圖如下頁：





## 3.5 應用公式

### 一. 符號說明：

$\lambda$ ：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

$\sigma$ ：相擾度

$E$ ：光子能量

$A_i, B_i$  and  $C_i$ ：個別物質電子結構相關參數

$\varphi_{c,vcrit}$ ：導帶或價帶的電子態

$\tau_i$ ：電子轉換的生命期

$E_{c,v(kcrit)}$ ：導帶或價帶的電子能量

$\Delta\theta$ ：相位差

$\Delta\delta$ ：光程差

## 二. 重要公式：

### 1. 理論解像度

$$R = K_I \frac{\lambda}{NA} \quad (\text{沿軸發光 } \sigma=0, K_I=1/2 ; \sigma=1, K_I=1/4)$$

(偏軸發光  $\sigma=0, K_I=1/3 ; \sigma=1, K_I=1/4$ )

(雷文生相移圖罩  $\sigma=0, K_I=1/4 ; \sigma=1, K_I=1/4$ )

### 2. 源自瑞利規範原始焦深

$$DOF = K_2 \frac{\lambda}{(NA)^2} = \pm 0.5 \frac{\lambda}{(NA)^2} \quad (K_2=1)$$

變更原始定義之廣義焦深

$$DOF = K_2 \frac{\lambda}{NA^2} \quad (K_2 > 1.7, 1 \times n_{resist} \sim 1.7)$$

### 3. 空間影像對比度

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



### 4. 透射率

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

### 5. 反射率

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

### 6. 相移厚度

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

### 7. 相移角度

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

### 8. 吸收係數

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

### 9. 透射率與相移厚度之關係

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

### 10. Forouhi-Bloomer 方程式

$$k(E) = \sum_{i=1}^q \frac{A_i(E - E_g)^2}{E^2 - B_i E + C_i}$$

$$n(E) = n(\infty) + \sum_{i=1}^q \frac{B_{0i}E + C_{0i}}{E^2 - B_i E + C_i}$$

$$A_i = \text{const} \times \left| \left\langle \varphi_{crit}^c | x | \varphi_{crit}^v \right\rangle \right|^2 \gamma_i$$

$$B_i = 2[E_c(k_{crit}) - E_v(k_{crit})]$$

$$C_i = [E_c(k_{crit}) - E_v(k_{crit})]^2 + \frac{\hbar^2 \gamma_i^2}{4}$$

$$B_{0i} = \frac{A_i}{Q_i} \left( -\frac{B_i^2}{2} + E_g B_i - E_g^2 + C_i \right)$$

$$C_{0i} = \frac{A_i}{Q_i} \left[ \left( E_g^2 + C_i \right) \frac{B_i}{2} - 2 E_g C_i \right]$$

$$Q_i = \frac{1}{2} (4C_i - B_i^2)^{1/2}$$

$$\gamma_i = \frac{I}{\tau_i}$$

### 11. 相位差與光程差之關係

$$\frac{\Delta\theta}{2\pi} = \frac{\Delta\delta}{\lambda}$$



## 第四章 結果與討論

### 4.1 禁止間距產生之問題

當元件愈小，線寬愈來愈細時，線寬固定，而間距增加時，在某些間距會產生正規化成像斜率對數、像比、關鍵尺寸、焦深、製程視窗等不符需求之現象。這些有問題的間距可稱為“禁止間距”。禁止間距發生之原因有：

- 1.高階光進入圓心區，如同背景光。
- 2.高階光在圓心區所佔之面積。
- 3.高階光與零級光重疊

在論文中，以焦深的變化來觀察禁止間距。而製程視窗影響焦深甚大，與製程視窗有關的有四個參數，包括：線寬、側壁角度、阻劑損失、照射寬容度。在製程上，這四個參數也是控制焦深的關鍵。當我們提到增進焦深最常的方法是偏軸發光和濕浸式系統。在所有偏軸發光的情形，不論是四扇面、環形、雙孔，禁止間距依然會發生。

為了降低零級光(背景光)的影響，加入全條遮光是常見的方法。但隨微影技術的發達，因全條遮光寬度太小而不易製作。為了改善全條遮光的缺點，可採用“全條減光”和“陣列減光”來增進焦深，優點為寬度可比較全條遮光更大，製程上較容易；其缺點為透射率或相移角度控制不易。

### 4.2 模擬焦深之結果

增進解像度與焦深最常見的方法為偏軸發光與濕浸式微影，在此先以偏軸發光、濕浸式微影、偏振光、嵌附式減光型相移圖罩等解像度增強技術觀察是否可增進焦深與改善禁止間距。

從模擬得到之禁止間距圖中，可得知焦深會藉由不同的偏軸發光方式(A為四扇面偏軸發光、B為環形偏軸發光、C為雙孔偏軸發光)而有所不同，

由 A1 的未偏振光、四扇面偏軸發光、雙光強圖罩、乾式系統，A2 將乾式系統改善為濕浸式系統、A3 進一步將未偏振光改善為 Y-偏振光、A4 則是整合上述之解像度增強技術並將雙光強圖罩改善為減光型相移圖罩，可得焦深明顯增加  $A1 < A2 < A3 < A4$ ，如圖 4.1。

B1 的未偏振光、環形偏軸發光、雙光強圖罩、乾式系統，B2 將乾式系統改善為濕浸式系統、B3 進一步將未偏振光改善為 Y-偏振光、B4 則是整合上述之解像度增強技術並將雙光強圖罩改善為減光型相移圖罩，可得焦深明顯增加  $B1 < B2 < B3 < B4$ ，如圖 4.2。

C1 的未偏振光、雙孔偏軸發光、雙光強圖罩、乾式系統，C2 將乾式系統改善為濕浸式系統、C3 進一步將未偏振光改善為 Y-偏振光、C4 則是整合上述之解像度增強技術並將雙光強圖罩改善為減光型相移圖罩，可得焦深明顯增加  $C1 < C2 < C3 < C4$ ，如圖 4.3。

以上三種偏軸發光結果得知，以四扇面偏軸發光所得到之焦深較佳。並可得知，無論在哪一個偏軸發光下，每增加一種解像度增強技術，其焦深會有整體改善。

當線寬固定(90 奈米)，而間距增加時，焦深會明顯不足，為了降低零級光(背景光)，加入全條遮光可有效增加焦深，消除禁止間距。

並且討論在孤立線時，加入全條減光與陣列減光對焦深之影響。以下將使用可明顯增加焦深之四扇面偏軸發光，再搭配濕浸式、偏振光、減光型相移圖罩與加入陣列減光改善零級光(背景光)之影響。

在孤立線時，以編號為 A1 之未偏振光、四扇面偏軸發光、雙光強圖罩、乾式系統加入全條遮光(在本論文中，全條遮光之寬度設定為 20 奈米，其模擬設計如圖 4.4，針對全條遮光之討論見 4.6)之結果，如圖 4.5，可明顯看出，加入全條遮光，孤立線之焦深明顯上升。

並且探討全條減光之影響，在孤立線時，以編號為 A1 之未偏振光、四

扇面偏軸發光、雙光強圖罩、乾式系統加入全條減光(在本論文中，全條減光之寬度設定為 50 奈米，其模擬設計如圖 4.6，針對全條減光之討論見 4.7)之結果，如圖 4.7，由此可得知，在相位差較小( $30^\circ$ )時，大部份可增進焦深，但效果無全條遮光佳；而相位較大( $60^\circ$ )時，較無規則，部份對焦深佳，部份對焦深差，甚至會低於孤立線，即無加入任何全條遮光或全條減光等，主要原因因為相位差和光程差成正比(重要公式 11)之影響，造成焦深之下降，由此可得知，必需限制其相位差不可過大，並由上述所提之公式  $\theta = \frac{2\pi(n-1)d}{\lambda}$  可得知，相位差與相移層厚度有一定的關係，相移層厚度愈小，其相位差會較小，可利用此控制其相位差之影響，並由材料本身之性質與厚度，來控制其透射率與相位差，達到所需要的全條減光。

進一步探討陣列減光(在本論文中，陣列減光之寬度設定為 100 奈米，其模擬設計如圖 4.8，針對陣列減光之討論見 4.8)之影響，在孤立線時，以編號為 A1 之未偏振光、四扇面偏軸發光、雙光強圖罩、乾式系統加入陣列減光之結果，如圖 4.9，可明顯看出部份效果甚至可比全條遮光佳，無相位差之影響，影響焦深，但在製程中蝕刻陣列圖案甚困難為其缺點。並比較各種散條之模擬計算焦深對間距的影響，如圖 4.10。

由以上得知，在孤立線時，加入全條遮光與陣列減光效果較佳；全條減光因有相位差影響光程差，導致焦深變化大，效果不佳。但因全條遮光太小，不易製作，故以下將對陣列減光進行探討，討論是否可搭配濕浸式微影、Y-偏振光及減光型相移圖罩，達到增進焦深之效果。

在孤立線時，以編號為 A2 之未偏振光、四扇面偏軸發光、雙光強圖罩、濕浸式系統加入陣列減光之結果，如圖 4.11，結果不僅整體焦深增加，在孤立線時，加入陣列減光亦可增進焦深。緊接著，在孤立線時，再對 A3、A4 加入陣列減光，同樣得到改善，如圖 4.12 與圖 4.13。以下為雙光強圖罩、加入單一全條遮光、加入單一陣列減光適用之繞射光幅。

$$|Mag.|_0^{th\ order} = \left( \frac{s}{p} \right)$$

$$|Mag|_1^{st\ order} = \left( \frac{s}{p} \right) \text{sinc} \left( \frac{s}{p} \right) = \left| \frac{\sin(180 \times s/p)}{\pi} \right|$$

$$|Mag|_2^{nd\ order} = \left( \frac{s}{p} \right) \sin c \left( \frac{2s}{p} \right) = \left| \frac{\sin(360 \times s/p)}{2\pi} \right|$$

$s$ ：間隙;  $p$ ：間距

(a) 雙光強圖罩之繞射光幅

$$|Mag.|_0^{th\ order} = \left[ 1 - \left( \frac{b}{s} \right) \right] \cdot \left( \frac{s}{p} \right)$$

$$|Mag.|_1^{st\ order} = \left( \frac{s}{p} \right) \sin c \left( \frac{s}{p} \right) - \left( \frac{b}{p} \right) \sin c \left( \frac{b}{p} \right) = \left[ \frac{\sin(180 \times s/p)}{\pi} \right] - \left[ \frac{\sin(180 \times b/p)}{\pi} \right]$$

$$|Mag|_2^{nd\ order} = \left( \frac{s}{p} \right) \sin c \left( \frac{2s}{p} \right) - \left( \frac{b}{p} \right) \sin c \left( \frac{2b}{p} \right) = \left[ \frac{\sin(360 \times s/p)}{2\pi} \right] - \left[ \frac{\sin(360 \times b/p)}{2\pi} \right]$$

$b$ ：全條遮光寬度

(b) 加入單一全條遮光散條修正之繞射光幅

$$|Mag.|_0^{th\ order} = \left[ 1 - \left( \frac{b}{s} \right) \left( 1 - \sqrt{I_b} \right) \right] \left( \frac{s}{p} \right)$$

$$|Mag|_1^{st\ order} = \left( \frac{s}{p} \right) \text{sinc} \left( \frac{s}{p} \right) - \left( 1 - \sqrt{I_b} \right) \left( \frac{b}{p} \right) \text{sinc} \left( \frac{b}{p} \right) = \left[ \frac{\sin(180 \times s/p)}{\pi} \right] - \left( 1 - \sqrt{I_b} \right) \left[ \frac{\sin(180 \times b/p)}{\pi} \right]$$

$$|Mag|_2^{nd\ order} = \left( \frac{s}{p} \right) \text{sinc} \left( \frac{2s}{p} \right) - \left( 1 - \sqrt{I_b} \right) \left( \frac{b}{p} \right) \text{sinc} \left( \frac{2b}{p} \right) = \left[ \frac{\sin(360 \times s/p)}{2\pi} \right] - \left( 1 - \sqrt{I_b} \right) \left[ \frac{\sin(360 \times b/p)}{2\pi} \right]$$

$b$ ：陣列減光寬度

$I_b$ ：陣列減光之光強

(c) 加入單一陣列減光散條修正之繞射光幅

由以上之公式得知，在孤立線時，因零級光較大，加入單一全條遮光或陣列減光，可明顯降低零級光之光幅，焦深會增加，一級光和二級光之光幅依然會降低，對焦深亦有影響，但因零級光之影響較大，可由此降低

零級光，增加焦深。如以二條以上散條修正，則全條遮光、全條減光與陣列減光皆另有修正公式，因甚複雜，故從略。

針對聚焦平面之探討，舉例而言，在間距為 500 奈米時， $NA$  為 0.85，線寬為 90 奈米的孤立線，以焦深來看，聚焦在  $0.66t$  時，為較佳之聚焦位置，但此為參考用，非一定為最佳位置。實際上，因  $NA$  之影響導致入射角會有變化，以及照射寬容度亦會影響，故在設定時，聚焦面在阻劑半高以上較適合。根據史內爾折射定理， $n_1\sin\theta_1=n_2\sin\theta_2$ ，在空氣中折射率為 1，經由阻劑(折射率約為 1.7 左右)之折射後，會在半高以下做聚焦，故須修正設定聚焦平面在阻劑半高以上位置，成像時才會接近阻劑半高位置，得到較佳之焦深。而  $0.66t$  之聚焦位置只適於圖 4.14 之情況，模擬設定位置如圖 4.15。

在離焦對阻劑線寬之狀況，以間距 500 奈米， $NA$  為 0.85，線寬為 90 奈米之孤立線，聚焦在  $0.66t$  之位置為基準，設此為最佳聚焦平面，並對此做最適化劑量，觀察加入全條遮光、全條減光、陣列減光後的現象，如圖 4.16。未加入全條遮光、全條減光、陣列減光之孤立線在離焦時，阻劑線寬與原設計線寬之偏差較大，意即較不符原設計之線寬，誤差值較大。而在孤立線加入全條遮光、全條減光、陣列減光可降低其誤差值，得到較符合原設計之線寬，達到誤差變小的優點。然而，以聚焦在  $0.66t$  做為最適化劑量值，套用在不同之聚焦位置，為不公平之比較(若各聚焦位置皆套用其最適化之劑量，則阻劑線寬達到 90 奈米之設定值，為一水平線)。值得注意的是，其正離焦偏差較小，負離焦偏差較大，正離焦之情形優於負離焦。

進一步對成像之關鍵尺寸與離焦之探討，仍舊沿用間距為 500 奈米， $NA$  為 0.85，線寬為 90 奈米之孤立線，以 ProLith v. 9.0 預設值，空間影像之門檻光強值設為 0.3，測量與離焦之影響，如圖 4.17。可得在  $0.66t$  可得到較佳之成像之關鍵尺寸。而針對成像之關鍵尺寸無法到達 90 奈米之探

討，以設計線幅為 90 奈米，其間距 500 奈米，隙寬大於線寬，為孤立線(有鉻膜)，兩側(無鉻膜)繞射光強甚大影響孤立線光幅，故成像之關鍵尺寸無法達到設計之 90 奈米線幅。

### 4.3 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、厚度、基材與介質種類，先對光源波長及薄膜材料做線上計算，可得折射率、吸收係數、反射率與透射率等相關數據，以做為實驗之參考指標。193 nm 下。薄膜材料  $\text{Si}_3\text{N}_4$  與  $\text{SiO}_2$  之光學性質計算結果各別為圖 4.18 與圖 4.19。

由所輸入之數據得知：

$\text{Si}_3\text{N}_4$  在 16.9 奈米時，其折射率  $n_{ref}=2.6630$ ， $T_{ref}\% = 56.07\%$ ，並可由折射率來算出其相移角度  $\theta_{ref}=52.4^\circ$ (重要公式 6)。

$\text{SiO}_2$  在 11.8 奈米時，其折射率  $n_{ref}=1.5631$ ， $T_{ref}\% = 30.44\%$ ，並可由折射率來算出其相移角度為  $\theta_{ref}=12.4^\circ$ (重要公式 6)。

以上述之數值做為參考，並以 RCA 清潔程序清洗矽晶圓與石英基材，而後利用雙電子槍蒸鍍方式，沈積  $\text{Si}_3\text{N}_4$  與  $\text{SiO}_2$  之薄膜。沈積完後，以 n-k 分析儀與紫外光-可見光光譜儀做分析，得其各別性質。

### 4.4 全條減光量測結果

針對全條減光之嵌附層光學性質，量測透射率與折射率的方法常見有紫外光-可見光光譜儀(UV-VIS Spectrophotometer)與 n-k 分析儀(n&k Analyzer)。

一. n&k Analyzer：

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(重要公式 10)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。

193 nm 下，薄膜材料  $\text{Si}_3\text{N}_4$  與  $\text{SiO}_2$  之光學性質量測結果各別為圖 4.20 與圖 4.21。

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

波長由 700 nm-190 nm 測量其透射率與反射率。193 nm 下，薄膜材料  $\text{Si}_3\text{N}_4$  與  $\text{SiO}_2$  之光學性質量測結果各別為圖 4.22 與圖 4.23。

整合以上所得：

  
 $\text{Si}_3\text{N}_4$  在 16.9 奈米時，其折射率  $n_{exp}=2.573$ ， $T_{exp} \text{ } \% = 51.18 \text{ } \%$ ，並可由折射率來算出其相移角度  $\theta_{exp}=49.6^\circ$ 。

而  $\text{SiO}_2$  在 11.8 奈米時，其折射率  $n_{exp}=1.493$ ， $T_{exp} \text{ } \% = 35.05 \text{ } \%$ ，並可由折射率來算出其相移角度  $\theta_{exp}=10.9^\circ$ 。整理如表 4.1。

由史密斯(B. W. Smith) 教授網站上所查得之物質與實際鍍膜之結果計算出之誤差值為：

$\text{Si}_3\text{N}_4$ ， $n$  誤差值為  $-3.38 \text{ } \%$ ； $T \text{ } \%$  誤差值為  $-8.72 \text{ } \%$ 。

$\text{SiO}_2$ ， $n$  誤差值為  $-4.48 \text{ } \%$ ； $T \text{ } \%$  誤差值為  $+15.14 \text{ } \%$ 。

在實際製作前，可由網站上所測得之材料性質，來決定其可行性。

誤差之主要原因有：

1. 嵌附層的純度(不一定為  $\text{Si}_3\text{N}_4$  與  $\text{SiO}_2$  完整之成份)。
2. 薄膜表面無法完全如鏡面般光滑會有粗糙度引起散射光的形成，造

成誤差。

3. 由網站上之資料為真空濺鍍系統；而實際製作時，以雙電子鎗蒸鍍系統，因原理不同，操作不同，造成誤差。
4. n&k Analyzer 藉由測量薄膜對入射光的反射光，並根據量測到的反射光譜經由電腦內建資料模擬，得出折射係數 n 與消光係數 k，我們再經過運算得出膜厚值，易造成誤差。

## 4.5 全條遮光之探討

### (1)全條遮光

全條遮光為利用原鉻膜製作，但須為次解像，即無法解像，故其寬度須很小，較不易製作。

### (2)模擬情形

本論文在模擬時，以透射率為零，寬度為 20 奈米(設定寬度太大會成像，在間距為 450 奈米時，寬度設為 30 奈米時，會成像，無法達到次解像，如圖 4.24)。



### (3)全條遮光之優缺點

優點：

可降低背景光；利用原鉻膜製作製程較方便；且無相位差之影響。

缺點：

全條遮光雖無相位差之影響，但因寬度太細而不易製作。

## 4.6 全條減光之探討

### (1)材料之選定

全條減光之沈積物質選定，需考慮折射率、透射率及與石英基材的附著性。折射率會影響相移角度，於公式  $\theta = \frac{2\pi(n-1)d}{\lambda}$  得知，可由厚度來降

低相移角度的影響，亦可由厚度來決定透射率的影響，故需精確的調控其厚度與均勻度，以達到低相移角度及高透射率之全條減光。

且由本實驗室張曜宇學長之論文[46]提到，得知對於嵌附層材料，在沈積過程中，增加氧氣，可增加嵌附層透射率；但增加氮氣，則會增加嵌附層之折射率。其全條減光可利用此特性，設計嵌附層之材料性質。

而選定全條減光物質，可以參考史密斯(B. W. Smith) 教授主持之光學微影研究群，提供開放網站(<http://www.microe.rit.edu/research/lithography/>)，所查得之各種材料之折射率、透射率及換算所得的相位差，來決定此物質可否適用。

## (2)模擬情況

本論文在模擬時，以透射率為 50 % 做為基準，相移角度為  $30^\circ$  與  $60^\circ$ ，寬度為 50 奈米(設定寬度太大會成像，在間距為 450 奈米時，全條減光相移角度為  $60^\circ$ ，寬度設為 60 奈米時，會成像，無法達到次解像，如圖 4.25)。而針對相移角度之影響，由圖 4.26 得知，相移角度太大，會對降低相對光強，易成像，故在製作時，以低相移角度較佳。

## (3)全條減光之優缺點

優點：

全條減光是利用高透射率之材料性質，可把寬度做得比全條遮光更大，也比單一陣列寬度更大，製程上較容易。

缺點：

由圖 4.10 得知，相位差過大甚至會造成焦深明顯下降(相位差和光程差成正比)，相位差 60 度時，焦深變化較無規則，部份間距明顯下降，甚至比孤立線更低。且由圖 4.26 可得知，相位差愈大愈易成像。故選用材料以低相移角度及高透射率之全條減光為較佳之組合。

## (4)實際製程所產生的相移問題

全條減光若以相位為 360 度，來達到相對相位差為 0，可有效降低相位差造成光程差之缺點。但其厚度較大，透射率將會變小，較易成像。

在實際製作前，可由網站上所測得之材料性質，來決定其可行性。

## 4.7 陣列減光之探討

### (1) 文獻上實際製作與量測

對三光束成像而言，成像最少須要有零級與一級光才可成像(亦有例外，如理想雷文生相移圖罩，以+1 及-1 級光成像，為兩光束成像)，陣列減光可利用此性質，以只收集到零級光未收集到一級光，故可由此方式來設計其陣列之排列。並可以調整陣列大小來控制透射率，例如以 240 奈米之波長，聚光當量為 0.70，相擾度為 0.85 時，60 奈米的塊狀遮光陣列各別於間距 80、100、120、140 奈米時，所得到的透射率各別為 21 %、45 %、62 %、74 %。

### (2) 模擬簡化之情形

本論文在模擬時，簡化上述情形，將實際陣列之情形視為單一全條，透射率為 50 %做為基準，寬度為 100 奈米(設定寬度太大會成像，在間距為 450 奈米時，陣列減光寬度設為 110 奈米時，會成像，無法達到次解像，如圖 4.27)，為理想情形下模擬，非實際情形。

### (3) 陣列減光之優缺點

優點：

陣列減光與全條減光最大的不同為相位差，陣列減光因沿用鉻膜遮光性質，無相位差之缺點，且由圖 4.26 得知相移角度愈大，愈容易成像，陣列減光可利用無相位差之優點。

缺點：

陣列減光利用遮光鉻膜之性質排成陣列組合。實際製程上，蝕刻陣列

圖案甚困難。



## 第五章 結論

1. 偏軸發光可增進解像度與焦深。由模擬得知，四扇面偏軸發光、濕浸式、Y-偏振光和減光型相移圖罩搭配，效果最佳；以雙孔偏軸發光、乾式系統、未偏振光和雙光強圖罩，效果最差。
2. 在孤立線時，通常以散條進行光學鄰近效應修正，可增進解像度與焦深，散條可分全條遮光、全條減光、陣列減光三種，各有利弊。
3. 全條遮光優點為製備容易；缺點為較寬時容易顯影。全條減光優點為寬度可較全條遮光更大且可改變透射率，缺點為會有相位差，所以必需限制其相位差不可過大。可藉由嵌附層厚度變小，來改善其缺點，但須注意透射率會上升。全條減光若以相位為 360 度，來達到相對相位差為 0，可有效降低相位差造成光程差之缺點，但其厚度較大，透射率將會變小，較易顯影。陣列減光，優點為無相位差之影響、可改變透射率、寬度較全條遮光與全條減光為寬，缺點為蝕刻細微陣列圖案甚困難。
4. 對於離焦時與阻劑寬度的影響，孤立線之阻劑線寬偏差較大，而全條遮光、全條減光、陣列減光可有效降低其偏差值，使製程寬容度較大。
5. 最適化聚焦面約在阻劑厚度 0.66-0.75 之間，即阻劑半高以上。
6. 對於全條減光之材料而言，可使用美國羅徹斯特大學史密斯(B. W. Smith)教授主持之光學微影研究群網站，尋求可用之材料，並以透射率介於 30-80 %，折射率低( $n>1$  或  $n<1$ ，接近 1)可使相移角度較低為材料首選目標。
7. 對於嵌附層材料，在沈積過程中，增加氧氣，通常可增加嵌附層透射率；增加氮氣，通常會增加嵌附層之折射率。全條減光可依此特性來設計嵌附層之性質。
8. 嵌附層材料，因成份以及薄膜表面粗糙度會引起散射光的形成，造成誤

差，與史密斯教授網站計算值比較，其值如下：

$\text{Si}_3\text{N}_4$ ， $n$  實驗值為 2.573，誤差值為-3.38 %； $T\%$  實驗值為 51.18 %，誤差值為-8.72 %。

$\text{SiO}_2$ ， $n$  實驗值為 1.493，誤差值為-4.48 %； $T\%$  實驗值為 35.05 %，誤差值為+15.14 %。

在實際製備嵌附層前，可由網站篩選材料，計算相關性質，決定其可行性。

