

第四章 結果與討論

4.1 凹面型微光柵的尺寸設計與模擬

本實驗擬製作之凹面型微光柵希望使得中心波長為 1550 nm、頻寬(波長波段)為 150nm(從 1475 nm 到 1645 nm)的光波，經過光的繞射效應，可以解析出 0.2~0.4nm 間隔的光；其設計程序是將已知的理論基礎運用 Matlab 及光學模擬軟體 PCGrate 對光柵的各個參數，包括光柵週期、繞射階數、光柵傾斜角度、入射角度等參數進行各種光學性質的分析模擬，再依據我們現有的製造技術選擇適當的設計參數；再依此階段的設計結果利用 SHADOW 進一步分析光柵分光的光波斑點圖[30]。

考量 X 光光刻製造技術，先選定 $3\mu\text{m}$ 為光柵週期，再利用光柵方程式進行繞射階數的取捨：

$$d(\sin\theta_i + \sin\theta_d) = m\lambda \quad (3-1)$$

其中 d 為光柵週期， θ_i 、 θ_d 分別為入射角、繞射角， m 為繞射階數， λ 為入射光波長。而根據三角函數定義可知：

$$-2 \leq \sin\theta_i + \sin\theta_d \leq 2 \quad (3-2)$$

而我們的入射光中心波長(λ)是 1550nm，光柵週期(d)是 $3\mu\text{m}$ ，則可推得：

$$-3.87 \leq m \leq 3.87, \quad m \text{ 為整數} \quad (3-3)$$

因為繞射階數越大，其光柵解析能力越高且分光的效果越好，則

在此我們選定設計的系統繞射階數取為 3 階。

而圖 4.1 所示的繞射光強度分佈圖，即為利用光學模擬軟體 PCGrate 計算光柵週期為 $3\mu\text{m}$ 、繞射光階為第 3 階，調整入射光角度為 60° 、光柵傾斜角度為 53° 時，光強度最好的表現。由圖形的分佈曲線可得知光波經過繞射後，兩旁波長的光其分光強度會越低，但是在 1475 nm 到 1645 nm 的波段裡，光強度分佈大都在 60% 以上。

再將目前所得光柵幾何尺寸代入 SHADOW 模擬軟體進行光分佈斑點圖的模擬，其模擬結果如圖 4.2 所示，在 1550nm 波段附近，以 0.4nm 為間隔的光，其空間分佈距離相差約 $20\mu\text{m}$ ，大於一個單模光纖的直徑($10\mu\text{m}$)，因此所設計的 $3\mu\text{m}$ 週期光柵將可順利達到 0.4nm 的分光間距。



經過一系列的 Matlab、PCGrate、與 SHADOW 模擬軟體的分析模擬之後，可以定義出所要製作的凹面型微光柵分光晶片的幾何尺寸，其光柵週期為 $3\mu\text{m}$ ，傾斜角度為 53° ，使用第三階干涉光階。整個分光晶片的面積約為 16cm^2 ($4\text{cm} \times 4\text{cm}$)，圖 4.3 即為整個凹面型微光柵分光晶片成品示意圖。

4.2 劑量模擬

為了研究 SU8 光阻的 X 光光刻行為，必須先建立光阻內部 X 光劑量分佈的計算模擬能力，以便設計適合的光罩結構並選擇恰當的曝

光參數。光阻內的吸收劑量與光源、光束線光學結構及光阻材料的吸收有關。本研究以台灣同步光源及其微加工光束線為基礎，並根據光阻成份模擬計算其劑量分佈。

2.5 節曾介紹過SU-8 光阻因本身的感光對比極高，因此對光罩上的要求便相對的降低，可嘗試用較厚的鼓膜與較薄的吸收體製作新式鼓膜光罩。為了了解增加X光光罩鼓膜厚度對於光刻光阻的影響，本研究首先利用模擬軟體分別計算厚度 125 μm 的PMMA與SU8 兩種光阻在不同的光罩結構下所需的曝光劑量之比較。計算基礎是依據兩支光阻的感光敏感度，PMMA需要 4000J/cm³，而SU8 需要 15J/cm³，其模擬結果如圖 4.4 所示。結果顯示當鼓膜矽晶片厚度增加的同時，PMMA光阻所需的曝光劑量也相對大幅增加，而SU8 光阻並未有明顯的增加，這說明了增加鼓膜厚度，並不會使得SU8 光阻的曝光劑量需求增加太大，可以節省能源的損耗，並因此可以增加光罩剛性，提昇製程良率。

圖 4.5 則是當曝光區光阻底部劑量達到感光度(15 J/cm³)，不同X光光罩結構吸收體底下之光阻表面劑量。在吸收體厚度相同的條件下，鼓膜厚度越薄的X光光罩結構，其非曝光區域的感光劑量越低；而在相同鼓膜厚度的條件下，吸收體越厚的X光光罩結構，其非曝光區域的感光劑量也是較低的。因此較厚的吸收體，搭配較薄的鼓膜之

X光光罩，其非曝光區域底下之光阻感光劑量將會降低，反之則相反。

此時仍未能得知非曝光區域底下 SU8 光阻表面感光劑量之極限值。當此部份光阻若超過感光極限值，將會致使光阻形成鍵結而不易去除，造成曝光、非曝光區域的定義不明，無法明確定義結構邊界；因此下節將會實際進行 X 光光刻實驗來驗證模擬軟體的正確度，並且試圖找出非曝光區域之 SU8 光阻之感光極限值。

4.3 X 光光刻行為

為了找出最佳的參數組合，本實驗嘗試對光罩結構與光刻參數進行交叉實驗，並可驗證 SHADOW 劑量模擬的可靠度。實驗中利用表 4.1 所列兩組不同組合的 X 光光罩，透過同步輻射微加工光束線，針對 125 μm 厚度的 SU-8 光阻進行光刻測試。

首先進行第一組X光光罩的曝光測試，其光罩結構組合是 2 μm 的金吸收體搭配 1.3 μm 的氮化矽薄膜與 3 μm 的矽鼓膜，圖 4.6 是曝光劑量為 11mAmin/cm的曝光結果圖。由圖 4.6a光刻結果側視圖可以發現光刻結構側壁具有良好的準直性。但由圖 4.6b光刻結果上視圖卻可發現結構周圍有殘餘的光阻無法去除，而此時吸收體底下光阻之感光劑量是 3.02 J/cm³，表示非曝光區劑量值已經超過光阻感光極限值。圖 4.7 是在劑量為 5mAmin/cm的光刻結果側視圖，其側壁並非準直，吸

收體底下光阻感光劑量是 1.37 J/cm^3 ，光刻結構周圍並沒有殘留的光阻。

接著使用第二組光罩組合進行曝光測試，光罩結構組合是 $4\mu\text{m}$ 厚度的Au吸收體搭配 $3\mu\text{m}$ 的矽鼓膜，圖 4.8 是曝光劑量為 5mAmin/cm 的光刻結果圖。由圖 4.8 可以看到其擁有良好的側壁準直性，而且此光罩結構在高達 30mAmin/cm 的曝光劑量之下，結構周圍未有殘餘的光阻，而此時吸收體底下之光阻感光劑量為 2.4 J/cm^3 。

總合以上兩個光罩組合的X光光刻測試結果，可以發現當非曝光區小於 2.4 J/cm^3 的光阻感光劑量將不會造成光阻鍵結，可以清楚的定義曝光、非曝光區域；因此定義 2.4 J/cm^3 為SU8 光阻之感光極限值，即為圖 4.5 中標示之灰底區域。例如 $2.5\mu\text{m}$ 的金吸收體搭配 $5\mu\text{m}$ 鼓膜厚度的X光光罩組合，其非曝光區域光阻感光劑量為 2.15 J/cm^3 ，小於感光極限值，因此此參數組合的X光光罩也可符合製程需求。

由圖 4.5 可以選擇多組符合設計需求之 X 光光罩之結構組合。例如可以選擇厚度較薄的金吸收體，但是必須搭配極薄之鼓膜厚度，這樣才能提供足夠的對比而達到曝光之需求。優點是較薄之吸收體厚度，具有較高之解析度。但缺點是必須搭配極薄厚度之鼓膜，所以光罩的強度將會變的很弱，對鼓膜的品質要求就相對的提高許多，造成製程的難度。

反之若選擇吸收體較厚之光罩，雖然光罩解析度會變差，但是它
可以搭配較厚之鼓膜厚度，因此光罩強度將會增加，提高光罩製程良
率，降低製作光罩的難度。

由前面的實驗結果可以發現，利用 SU8 光阻的高感光對比特性，
只要搭配適當的鼓膜結構，僅需要約 $2.5\mu\text{m}$ 的吸收體厚度即可達到曝
光需求，所以可以嘗試不需中間光罩，即可製成符合需求之簡型 X 光
光罩。增加鼓膜厚度的 X 光光罩結構不但可使製程良率大幅提升，複
雜性降低，並可降低製作的成本。

4.4 鼓膜 X 光光罩設計與製作

在本研究中，簡型 X 光光罩的設計製造將分成兩個部份來進行
討論，依製作順序分別為晶背體型微加工、及吸收體的製作。

4.4.1 晶背體型微加工

實驗中以濕蝕刻的方式進行晶背體型微加工，此部份以蝕刻速率
為主要要求，因此選用蝕刻速率較快的 KOH 蝕刻溶液，實驗過程中
加入磁石不斷的攪拌溶液，並且定時旋轉晶片的置放角度，使得晶片
各部份的蝕刻速率相近，因此可以蝕刻出厚度較平整的試片。

而當 X 光光罩鼓膜面積過大且厚度過低時，其剛性並不好，結
構易受應力影響而變形，如圖 4.9a 所示。當 UV 光罩與 Si 晶片接觸

時，其接觸力會造成結構的變形。因此在 UV 製程時，UV 光罩與 Si 晶片中間會有間隙的存在，而增加 UV 光繞射效應，降低曝光解析度，影響光刻品質；於是嘗試就下列的製程改變來提升 Si 晶片的剛性：①只在結構下方開立所需的鼓膜範圍。②增加背部剩餘矽晶片的厚度至 100 μm 。如圖 4.9b 所示，可以大幅增加鼓膜的剛性，提高光刻解晰度。剩餘約 100 μm 的鼓膜厚度，將留至吸收體的製作之後，再接續進行此部份矽晶片的蝕刻動作。

4.4.2 吸收體的製作

在吸收體的製作部分，考量電鍍製程的溫度、精度、電鍍液考量下，選擇 SU8 負型光阻作為定義電鍍位置的結構體，並透過劑量模擬所需的吸收體厚度，以進行電鍍。

實驗中所需要的 SU8 光阻厚度必須要大於金吸收體的厚度 (~4 μm)，因此在 SU8 負型光阻結構的定義部份，係利用 UV 光對 5.4 μm 的 SU8 光阻進行微影光刻製程。如圖 4.10 所示，5.4 μm SU8 的 UV 光刻製程，存在著很嚴重的繞射效應。因此需要進行最佳化的實驗，減少繞射現象的影響，才能獲得良好的 SU8 曝光結構，也才能轉印成高解析度的鍍金吸收層。

本研究利用統計方法的田口實驗對 5.4 μm 的 SU8 光阻進行最佳化實驗，依軟烤時間、曝光劑量、曝後烤時間、以及顯影時間等四個

製程參數來作分析(軟烤及曝後烤溫度都定在 95°C), 參數資料如表 4.2 所列。表 4.3 是依這四個條件排列的 L9 田口直交表, 其實驗結果見圖 4.11。依圖 4.10 所示, 定義 D 為波峰與波谷的距離, 並以 D 值為實驗的比較依據, 在圖 4.12 每張小圖中各選取四個 D 值進行望大型田口分析, 希望可以得到光柵高度較大的參數組合。實驗數據整理如表 4.4 所示, 依軟烤時間(S.B.)、曝光劑量、曝後烤(PEB.)時間、以及顯影時間等參數進行 D 值的信號雜音比分析, 結果整理如表 4.5 所示, 數字最大者即為表現最好的參數, 因此可以得到 A2B1C3D1 的製程參數, 亦即軟烤時間 120 秒、曝光劑量 100mJ、曝後烤時間 90 秒、顯影時間 60 秒的最佳 UV 微影製程參數。

由表 4.5 可以發現, 各個製程參數對於 UV 繞射效應的影響都很大, 尤其是顯影時間對於曝光結果的影響最為顯著。因此本研究遂針對顯影時間來進行田口確認實驗, 實驗中固定軟烤時間為 120 秒、曝光劑量為 100mJ、而曝後烤時間為 90 秒, 改變顯影時間為 50 秒、60 秒、70 秒、90 秒。實驗結果如圖 4.12 所示, 顯影時間為 60 秒的曝光結果最好, 可以得到最高的光柵高度。

圖 4.13a 是 UV 光罩 OM 圖, 圖 4.13b 是製程未最佳化前的曝光結果圖, 而圖 4.13c 是經田口最佳化後之曝光結果圖。圖 4.13b 與圖 4.13c 相比較之後可以發現, 本實驗已經有效克服 UV 繞射, 並可獲

得解析度良好的 UV 光刻結果。

4.5 凹面型微光柵 X 光光刻製程

根據前述研究結果所建立的劑量模擬、X 光光刻行為以及光罩的設計與製作，實驗中繼續進行 SU8 光阻之 X 光光刻實驗。本研究使用同步輻射研究中心(SRRC)的 18B micromachining 光束線進行曝光。光刻實驗使用基板為厚度 550 μm 的 4 吋矽晶片，並以旋轉塗佈方式將 125 μm 的 SU-8 光阻進行光阻的製備。X 光光罩的金吸收體厚度為 4 μm ， Si_3N_4 鼓膜為 1.3 μm ，並以曝光區域光阻底部劑量 15 J/cm^3 為計算基礎模擬所需的曝光劑量。

在 X 光光刻過程中，當 X 光通過矽鼓膜時，將會激發出無方向性的螢光，造成光刻結構周圍會有類似糖衣狀的薄膜殘留。因此實驗中必須在光罩與光阻之間加入一層約 100 μm 的石墨片，以吸收低能量的螢光。由於石墨片對於高能量的 X 光吸收效率極低，因此不至影響光源的使用效率。

在克服螢光效應之後，同樣利用田口實驗來進行 X 光光刻製程的最佳化，同樣依軟烤時間、曝光劑量、曝後烤時間、以及顯影時間等四個參數進行 L9 田口實驗，實驗結果如圖 4.14 所示。仍定義 D 值為波峰與波谷的距離為實驗比較依據，進行望大型田口分析，再依此四個參數進行 D 值的信號雜音比分析，分析整理如表 4.6 所列，數字最

大者即為表現最好的參數，因此可以得到 A2B2C2D2 的製程參數，即為軟烤時間 20 分鐘、曝光劑量 18mAmin/cm、曝後烤時間 10 分鐘、顯影時間 9 分鐘的最佳 X 光光刻製程參數。

由表 4.6 可以發現，實驗中各個參數對於光刻結果的影響不大，可能是 X 光光源短波長、高能量、高穿透性的特性，並不會造成太大的繞射效應。

4.6 光刻結果觀察

圖 4.15 是經由掃描式電子顯微鏡(SEM)所拍攝的光柵光刻結構圖。圖 4.15a 是光柵的側視圖，由此圖可觀察光刻側壁的準直性，經由 SEM 照片以及 AutoCAD 軟體量測可以得知側壁角度大於 89° ，幾近垂直面。圖 4.15b 是光柵上視圖，由此圖可觀察到解析度良好的 $3\mu\text{m}$ 週期光柵，並經由 AutoCAD 量測光柵的有效照光面。圖中 $0.93\mu\text{m}$ 寬的光束將會照射到光柵的傾斜面上，但是 $0.36\mu\text{m}$ 寬的光束會照射到圓化頂角，因此光柵的有效照光面約為 $(0.93/(0.93+0.36))72.1\%$ 。因為照射到圓化頂角的光將會散射而形成背景雜訊，造成分光效率的損失，詳細計算還需要回饋到模擬軟體進行分析(分析結果詳見 4.7 節討論)。圖 4.15c 是光柵結構的俯視圖，由圖中可以清晰看到整齊的光柵排列。

實驗並利用原子力顯微鏡(AFM)，設定 50nN 的原子力，掃描範

圍為 $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ ，進行光刻結構側壁粗糙度的量測，圖 4.16a 是 AFM 掃描 SU8 光阻側壁的結果圖，所量測的 Ra 值為 2.03nm。若 SU8 光阻表面濺鍍上一層約 200nm 的 Au 反射層時，其 AFM 量測結果如圖 4.16b 所示，Ra 值為 4.75nm。因此不管是單純的 X 光光刻結構或是結構表面濺鍍金之後的側壁表面品質，其粗糙度都非常低，非常適合當作一個反射鏡面來使用。

4.7 光學量測

利用頻寬約為 1400nm~1700nm 的寬頻譜光源當作輸入光源，將光照射到凹面型微光柵分光晶片上，並利用 OSA 頻譜分析儀針對所接收到的反射光進行光學性質量測。

圖 4.17 即為利用 OSA 所量測而得的光訊號。其量測方法是將光纖置放在羅倫圓的接收端軌跡上掃描 $200\mu\text{m}$ 的範圍，並以 $10\mu\text{m}$ 的間距量測一個光訊號，將所接受的 21 個光訊號重疊顯示。圖中每一個光訊號的峰值波長相距約 0.26nm，確實符合 0.2~0.4nm 的設計目標。

實驗最後將光刻結果所獲得的光柵幾何圖形回饋到光學模擬軟體 PCgrate 進行光強度的分析計算，並依光刻圓化的程度不同，造成光柵高度的不同來進行模擬，可以得到如圖 4.18 所示的結果圖；若針對 1550nm 波長的光來做探討。本實驗所獲得的光柵高度約為 $1.6\mu\text{m}$ ，而模擬圖上其光強度約為 43%，假若完全克服光阻圓化問題，

而 100%成功轉印光罩圖形，則其光柵高度為 $3.3\mu\text{m}$ ，光強度約為 68%；其中 $43\div 68=63.2\%$ 相似於光柵有效照光面的損失。

由圖 4.18 結果圖，可得知若要提高分光強度，必須提高光刻解析度。而解析度的損失由兩個原因所造成，分別是吸收體的製作，及 X 光光刻製程；其中吸收體的製作部分，因為無法完全克服 UV 繞射效應，嚴重影響 X 光光罩解析度，造成光刻圓化最為嚴重。

為了提高光罩製程解析度，可以考慮製作高解析度的中間光罩，或是利用電子束微影的方式來製作高精度的 X 光光罩。可是由圖 4.18 結果顯示， $1.6\sim 2.4\mu\text{m}$ 的光柵其分光效率差別不大，若要明顯提升分光強度的話，除了必須提昇製程解析度，更要克服光阻本身化學特性所造成的頂角圓化效應，此部份是較難解決的問題。因此可以嘗試改變光柵的設計尺寸，將對分光效率有更直接的助益。

表 4.1 X 光光罩結構組合

編號	Au 吸收體厚度(μm)	薄膜厚度(μm)
1	2	Si : 3 & Si ₃ N ₄ : 1.3
2	4	Si : 3

表 4.2 5.4 μm 厚度的 SU8 UV 曝光之田口實驗參數表

Factors	Levels		
	1	2	3
A. SB time (sec)	90	120	150
B. Dosage (mJ/cm ²)	100	130	160
C. PEB time (sec)	50	70	90
D. Develop time(sec)	60	90	120

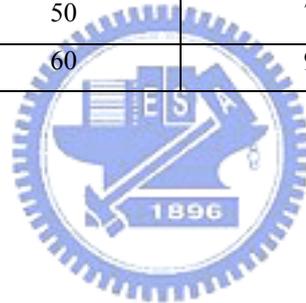


表 4.3 L9 田口直交表

No.	A	B	C	D
E1	1	1	1	1
E2	1	2	2	2
E3	1	3	3	3
E4	2	1	2	3
E5	2	2	3	1
E6	2	3	1	2
E7	3	1	3	2
E8	3	2	1	3
E9	3	3	2	1

表 4.4 望大型田口分析表

No.	Line Width Difference (um)				Average (um)	η (dB)
	D1	D2	D3	D4		
E1	1.464058	1.699084	1.662897	1.807456	1.658374	4.316038
E2	0.869426	0.922764	0.79856	0.745222	0.833993	-1.66291
E3	0.724867	1.208112	0.90599	0.886012	0.931245	-1.03847
E4	0.880734	0.964416	0.838705	0.838705	0.88064	-1.14574
E5	1.355686	1.609936	1.355686	1.05903	1.345085	2.281089
E6	1.268046	1.415055	0.882054	1.029063	1.148554	0.768922
E7	1.242602	1.223755	1.336839	1.26145	1.266162	2.035338
E8	0.87753	0.501527	0.626861	0.480606	0.621631	-4.82461
E9	1.216028	1.378115	0.972898	1.013419	1.145115	0.92457

The signal to noise ratio, $\eta = -10 \log \left(\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 1/D^2 \right)$

表 4.5 5.4 μ m 厚度的 SU8 UV 曝光之田口實驗結果

	Level 1	Level 2	Level 3
A. SB time (sec)	0.538222	0.634758	-0.62157
B. Dosage (mJ/cm ²)	1.735213	-1.40214	0.218342
C. PEB time (sec)	0.086784	-0.62802	1.092654
D. Develop time (min)	2.507232	0.38045	-2.33627

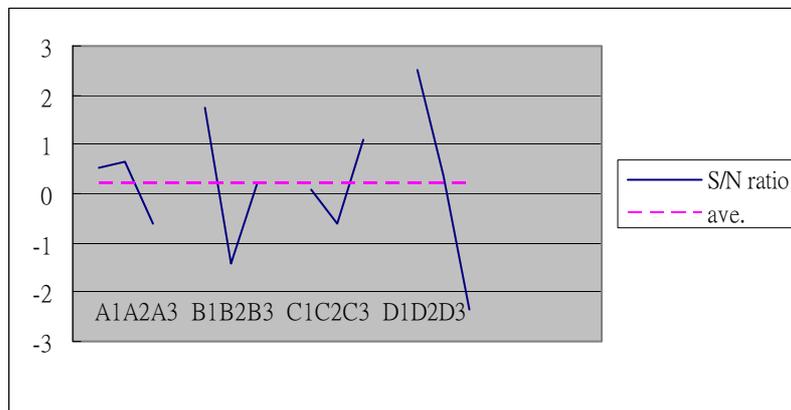
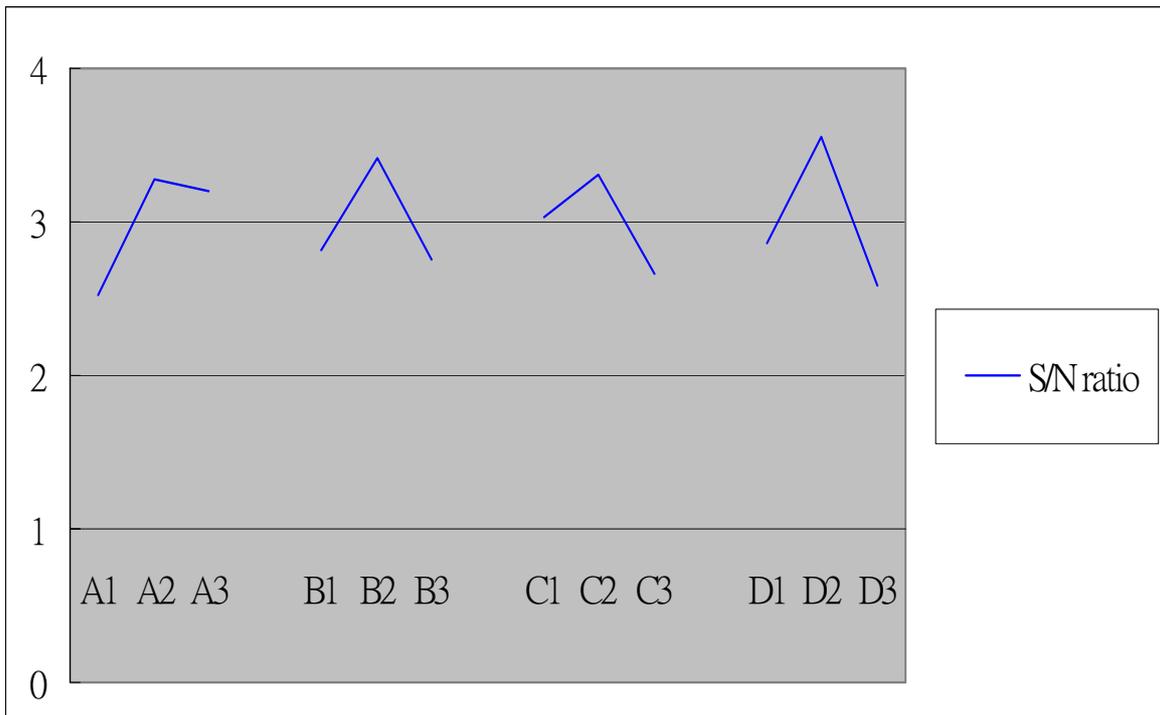


表 4.6 125 μm 厚度的 SU8 之 X 光光刻田口實驗結果

Factors	Levels		
	1	2	3
A. SB time (min)	16	20	24
B. Dosage (mAmin/cm)	15	18	20
C. PEB time (min)	8	10	12
D. Develop time(min)	7	9	11



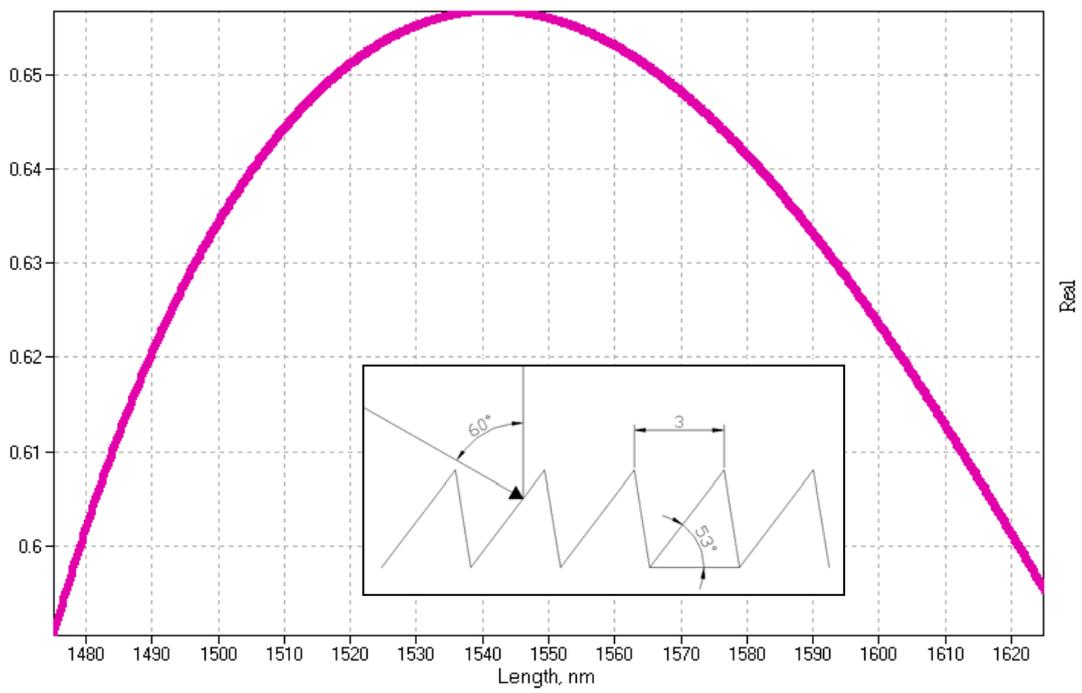


圖 4.1 繞射光強度分佈圖

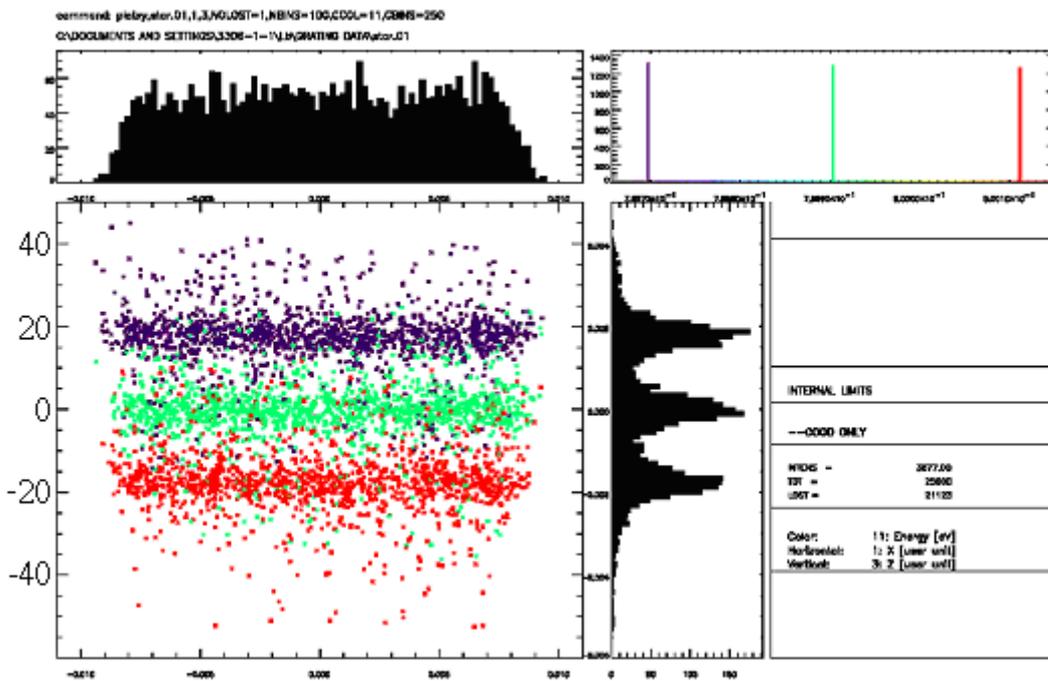


圖 4.2 3 μm 週期光柵在 1550nm 波段的光分佈斑點圖

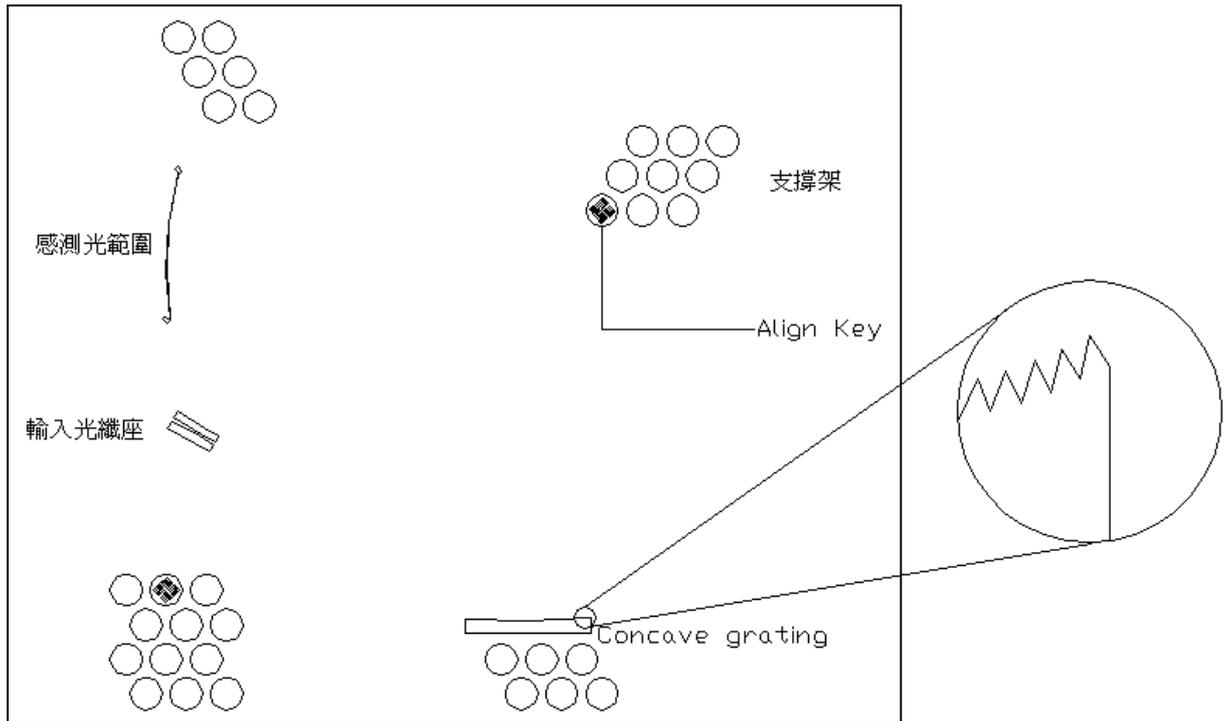


圖 4.3 微光柵分光晶片成品示意圖

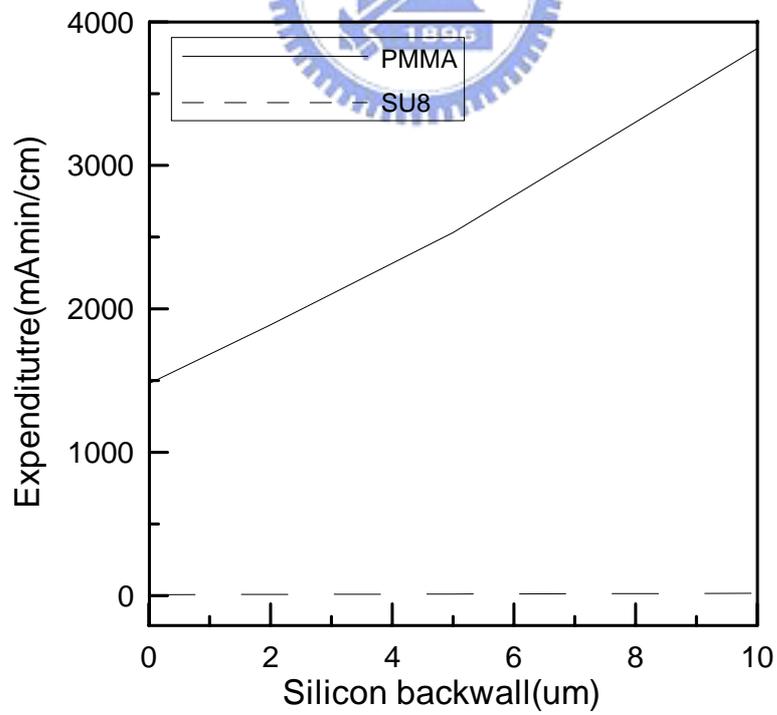


圖 4.4 SU8 以及 PMMA 光阻在不同鼓膜厚度下所需之劑量模擬圖

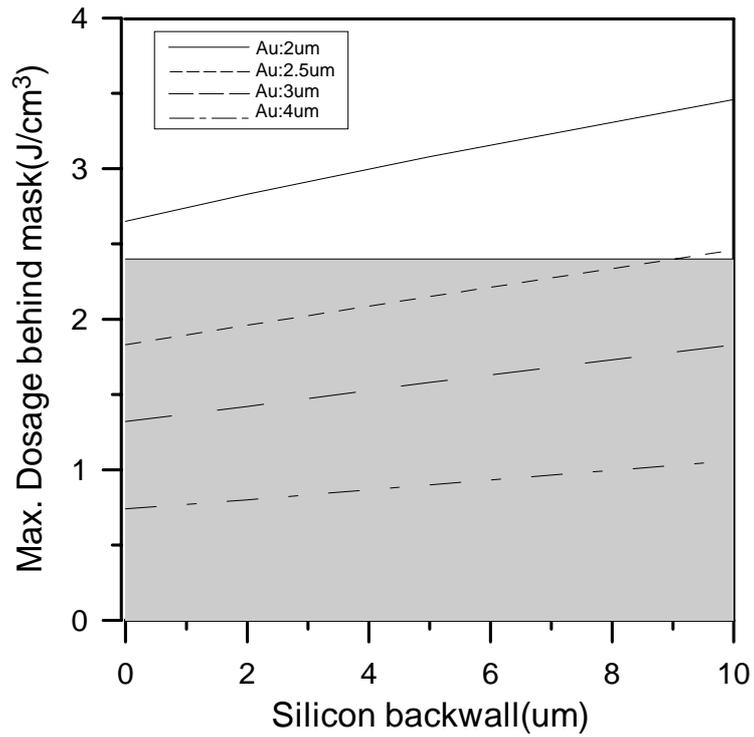


圖 4.5 光罩吸收體底下 SU8 光阻之感光劑量模擬圖

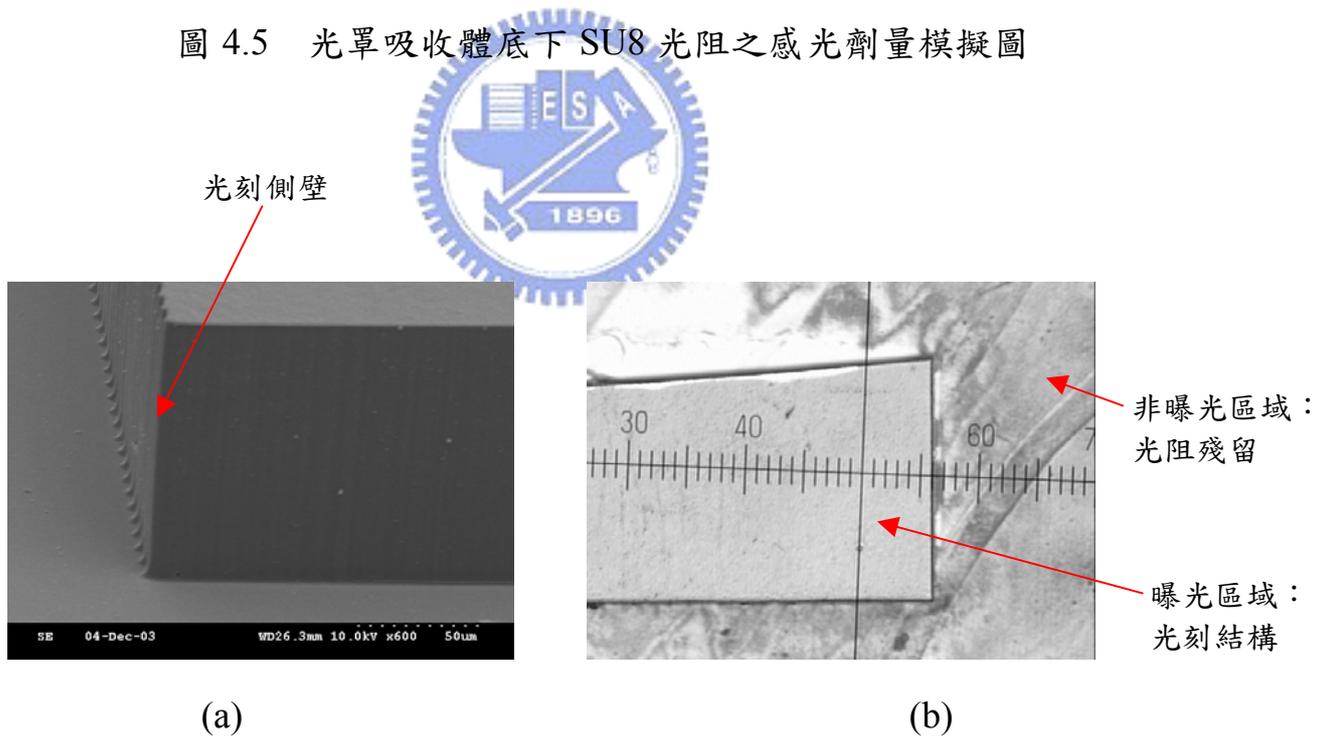


圖 4.6 光罩吸收體為 $2\mu\text{m}$ 、劑量為 11mAmin/cm 之光刻結構圖：

(a)側壁結構準直的 SEM 側視圖；(b)光阻殘留之 OM 上視圖

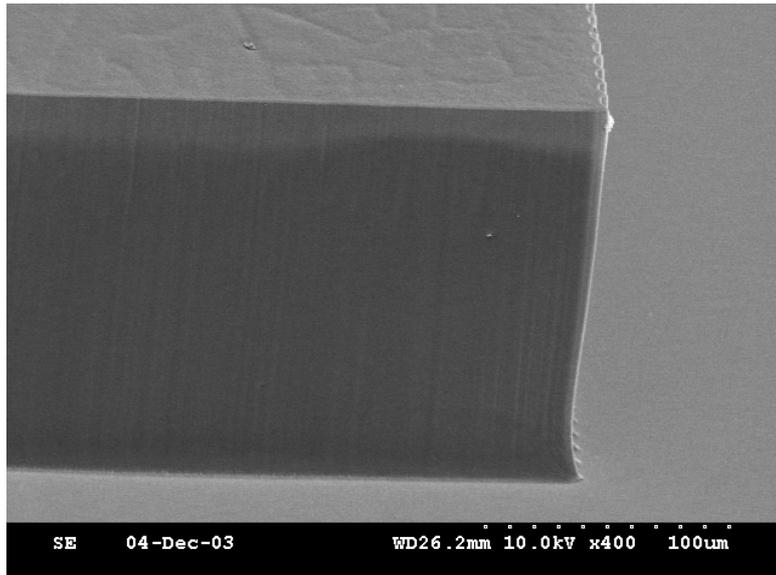


圖 4.7 光罩吸收體為 $2\mu\text{m}$ 、劑量為 5mAmin/cm 之光刻結構 SEM 側視圖，側壁有底切現象，非曝光區域沒有多餘光阻殘留。

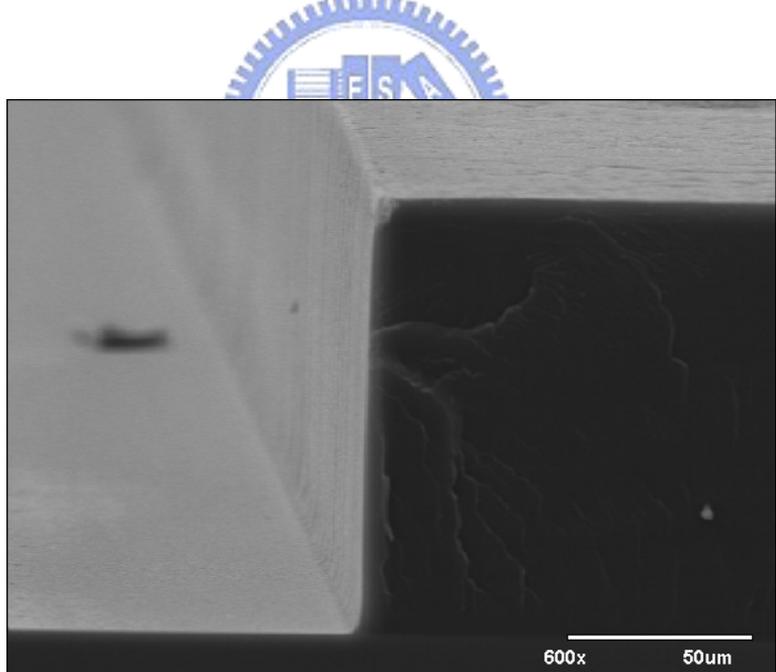


圖 4.8 光罩吸收體為 $4\mu\text{m}$ 、劑量為 5mAmin/cm 之光刻結構 SEM 側視圖，側壁結構很準直，且未曝光區域沒有多餘光阻殘留。

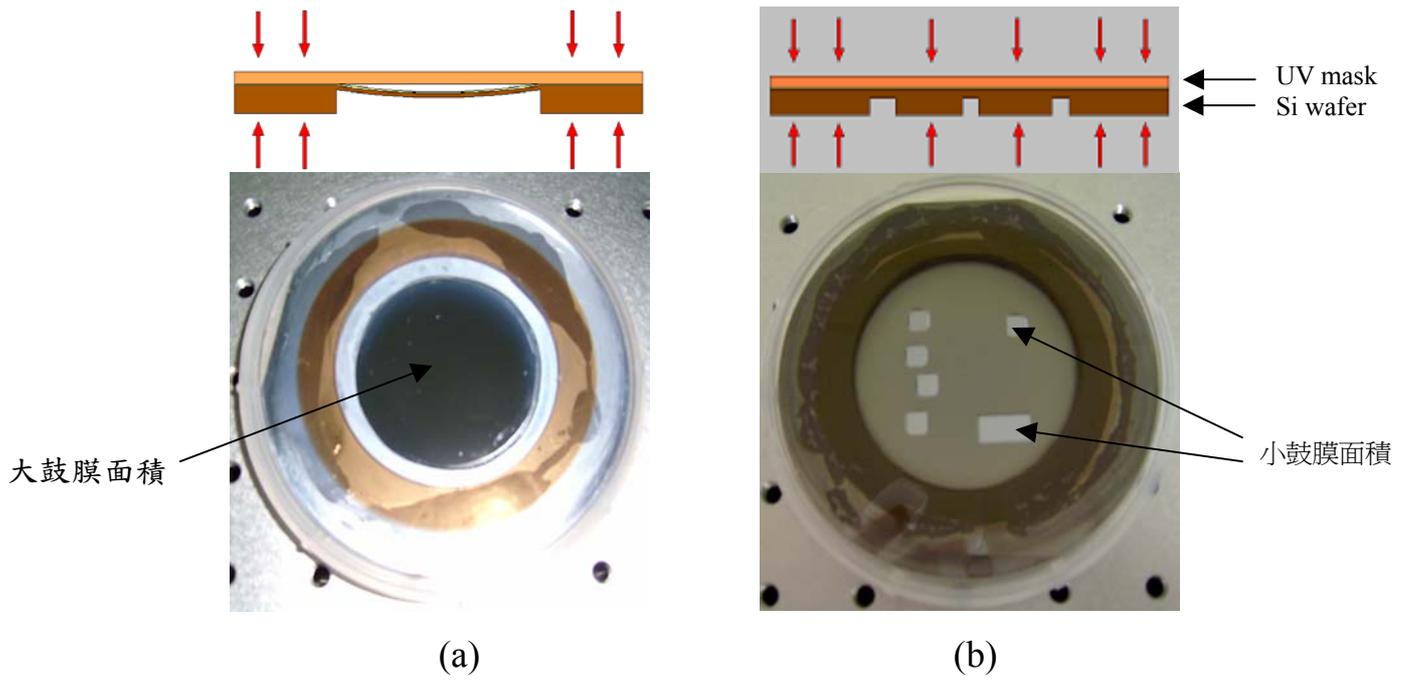


圖 4.9 (a)大鼓膜光罩曝光示意圖及成品圖(b)小鼓膜光罩曝光示意圖

及成品圖

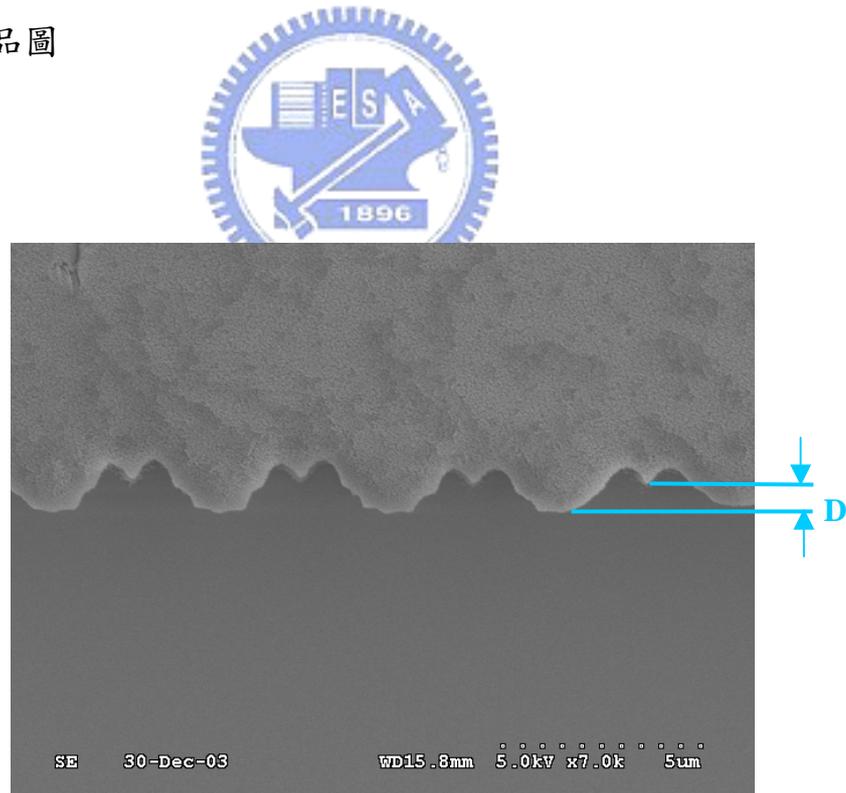


圖 4.10 定義 D 為波峰與波谷的距離

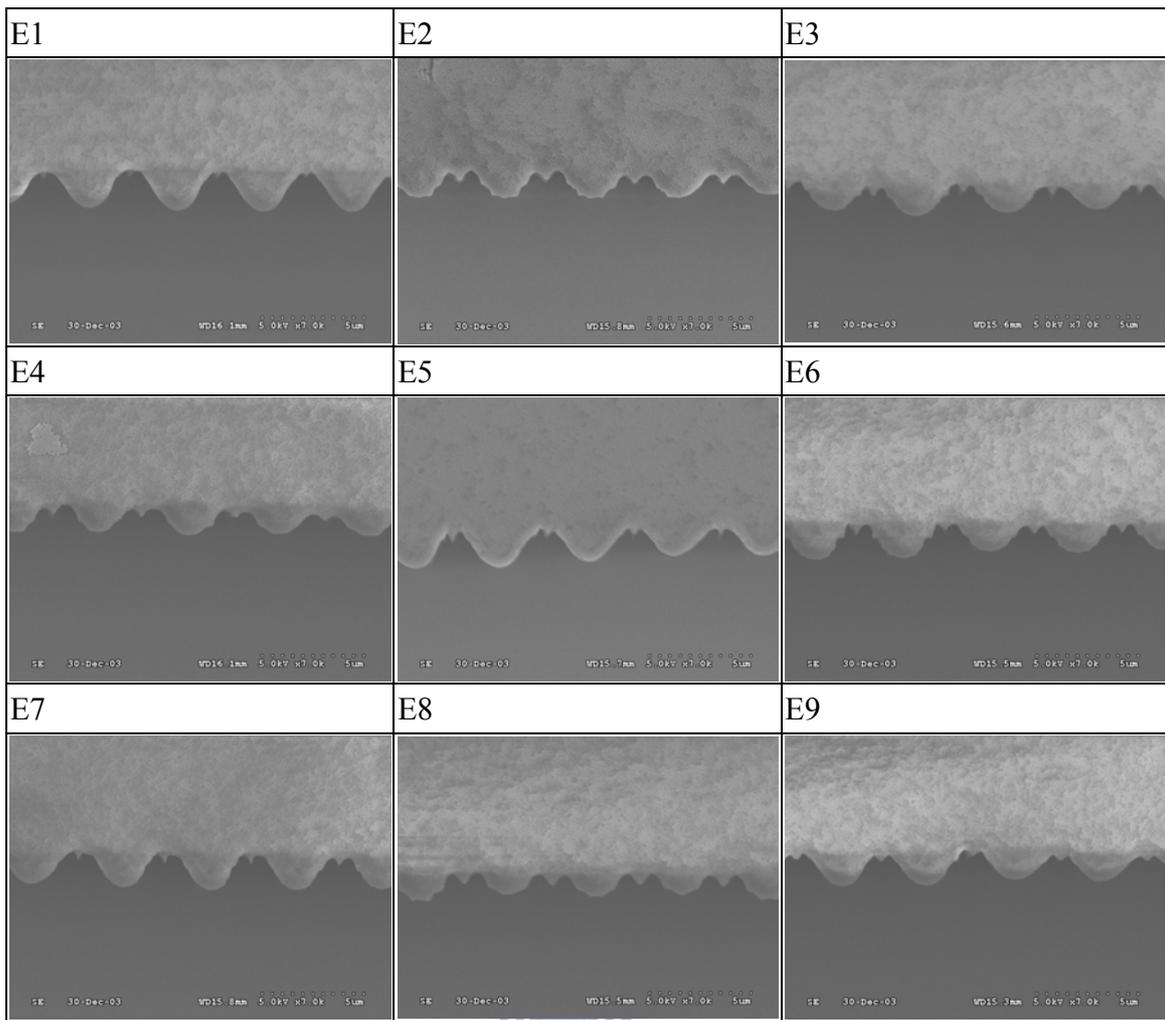


圖 4.11 5.4 μ m SU8 田口實驗結果圖

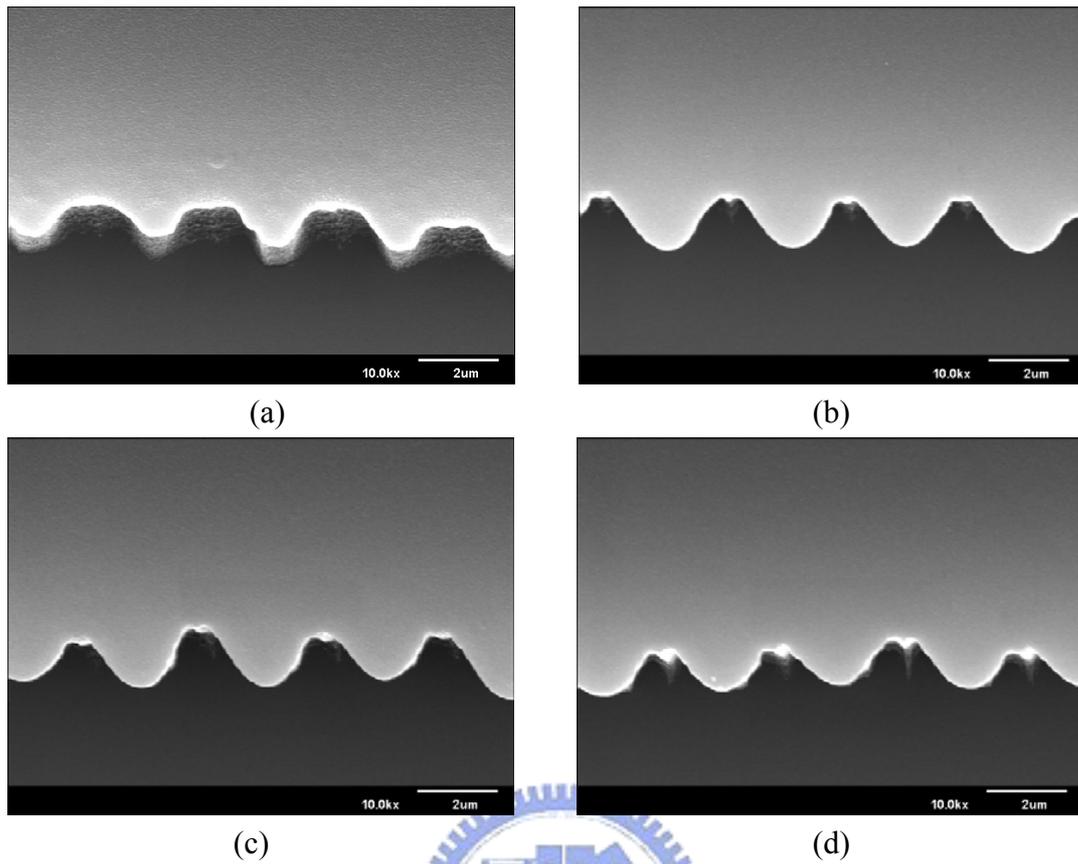


圖 4.12 顯影時間的田口確認實驗：(a) 50 秒(b)60 秒(c)70 秒(d)90 秒

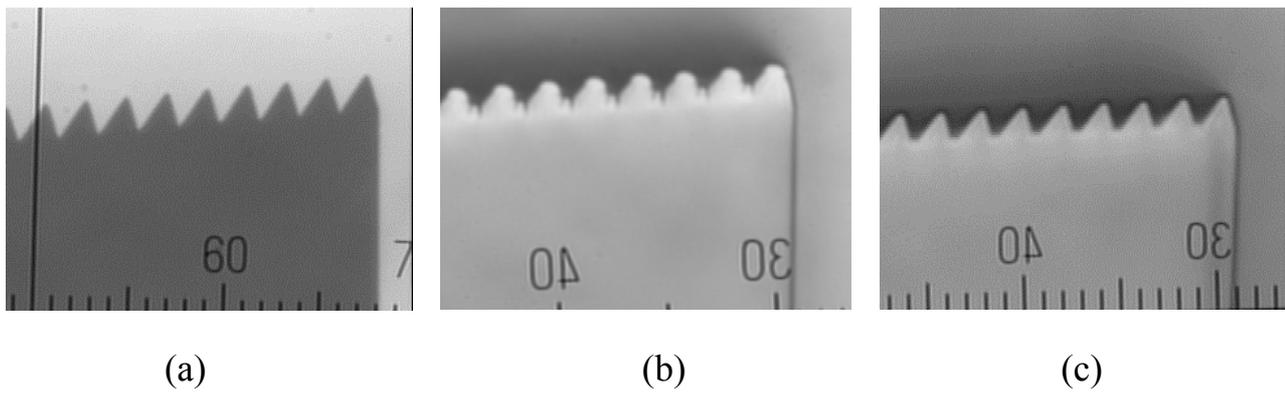


圖 4.13 3 μ m 週期光柵的 OM 圖(a)UV 光罩圖(b) UV 曝光最佳化前的結果圖(c) UV 曝光最佳化結果圖

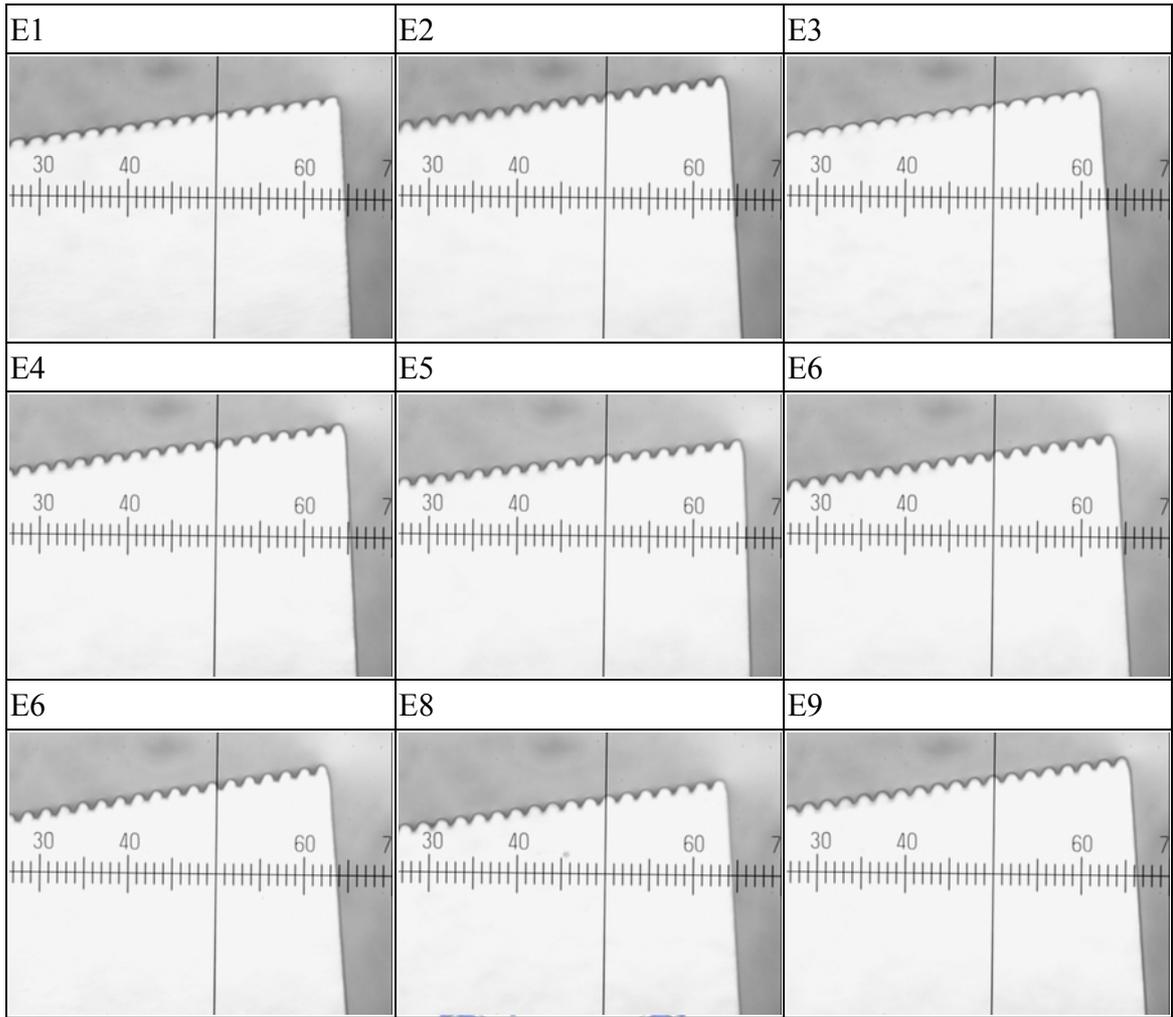
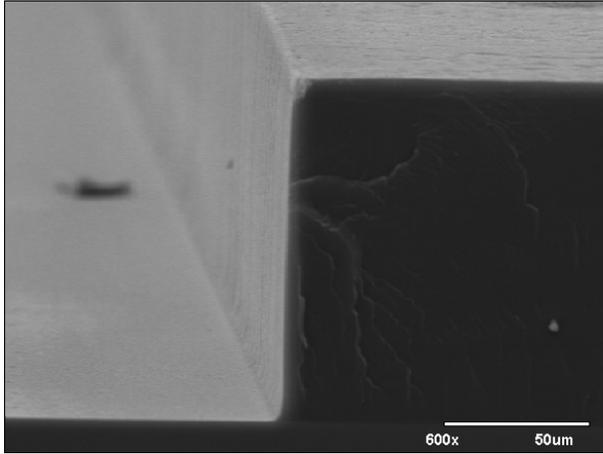
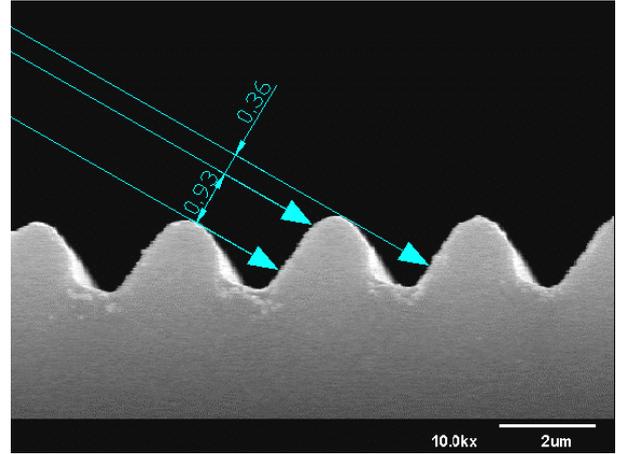


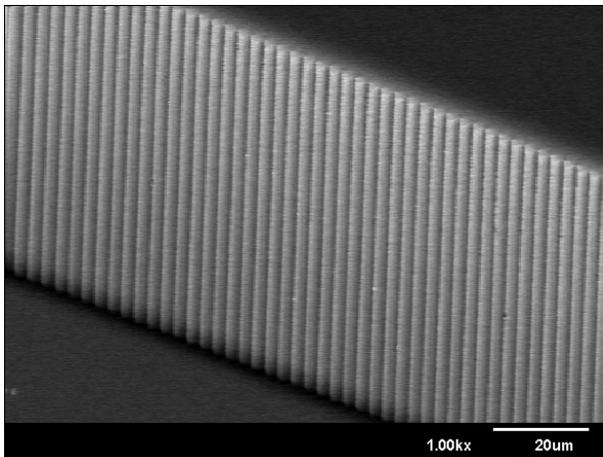
圖 4.14 3 μ m 週期光柵、125 μ m SU8 田口實驗結果圖



(a)側視圖

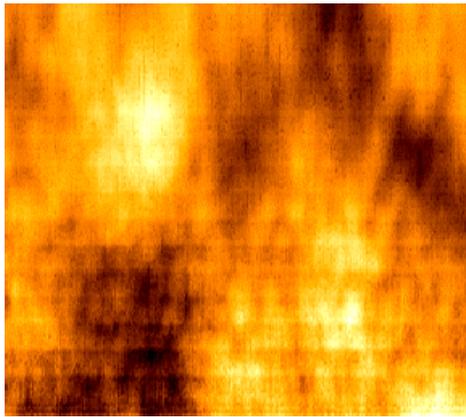


(b)上視圖

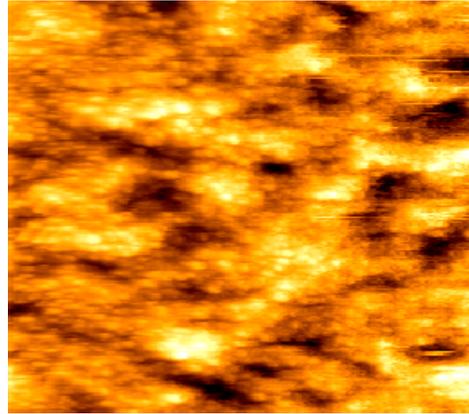


(c)立體角圖

圖 4.15 X 光光刻結果 SEM 圖



(a)



(b)

圖 4.16 AFM 量測結果：量測力 50nN、量測範圍 1 μ mX1 μ m

(a)SU8 光阻側壁表面：Ra=2.03nm；

(b)濺鍍 Au 膜表面品質：Ra=4.75nm。

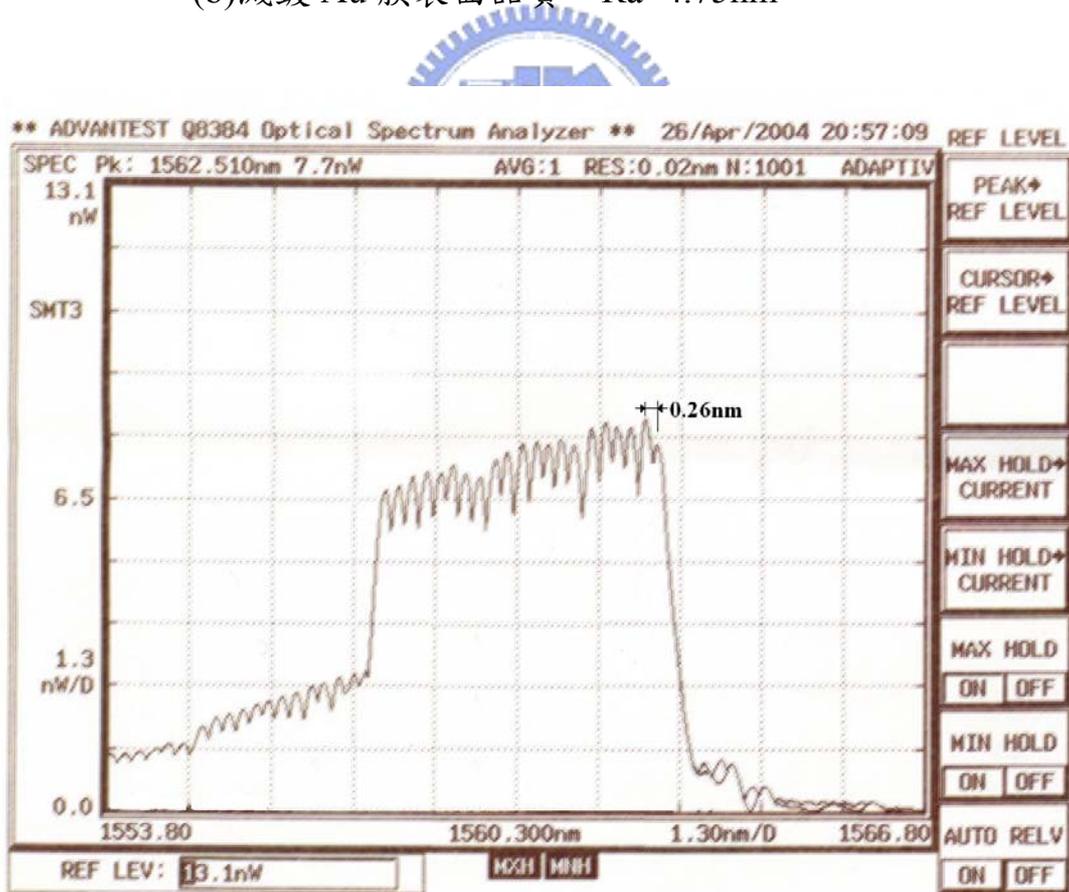


圖 4.17 OSA 光學量測圖

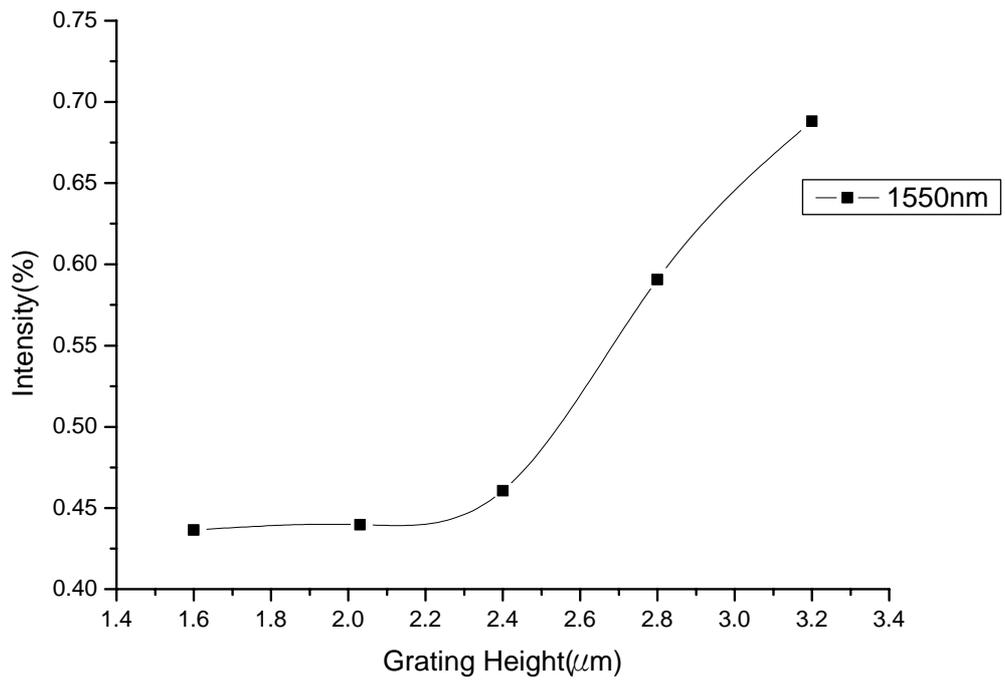


圖 4.18 PCGrate 模擬分光強度圖

