

國防工業發展基金會委託學術機構總研究計畫
成果報告

漸變式光罩技術開發(1/3)

NSC 91-2623-7-009-013

執行期間：91年1月1日至91年12月31日

計畫主持人：謝漢萍

執行機構：國立交通大學 電子資訊中心

中華民國 九十二年 二月 十日

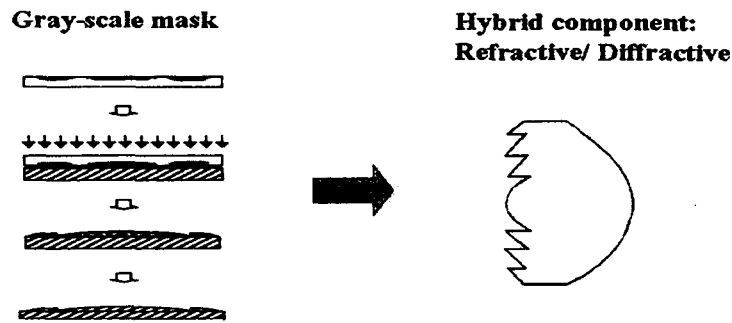
前言

微型光學元件 (Microoptical Components) 具有輕、薄、平面化與易於設計與製造等優點，因應現今科技發展的趨勢而發展得十分迅速，成為相當重要的光學應用技術。其中，繞射光學元件的發展更是引人注目。繞射光學理論是在 1980 年代末 1990 年代初發展起來的一種新興光學的理论。它是基於光波繞射理論、以半導體工業製程技術為加工方法，並研究如何利用繞射效應設計光學器件來實現各種光學功能的學問。其具有比傳統透鏡體積小功能大且易於複製的優異性，其尺寸大約為 $1\mu\text{m}$ 左右，與傳統折射式元件大有不同。而且利用相位式繞射元件的設計，不但可以提高光的穿透效率，且可以將元件的厚度固定在某一範圍內，不需要因加大通光孔徑而增加厚度，因此易於製作大數值孔徑之透鏡。並且由於繞射元件具有色差為負值的特性，亦可以利用此特性來進行消除傳統透鏡色差的設計。

由於超大型積體電路 (Very Large Scale Integration ; VLSI) 半導體製程技術-光罩微影技術 (Mask Lithography)，已被移植到繞射光學元件的製作程序中，進而實現了製作高性能之相位繞射元件。傳統上製作微型光學元件的方法是利用二元光罩以步階的方式達成近似連續曲率表面的製作。根據富氏光學原理，我們可以得到不同步階數目下各階的繞射效率，其公式如下：

$$\eta_m = \text{sinc}^2\left(\frac{m}{l}\right), \quad l \text{ 為步階的階數}$$

因此，若要提高繞射光學元件之光效率，則需增加光罩的數量，以較高的位階數達到較佳的光效率。以二元閃耀式光柵 (Blazed grating) 為例：理論上，使用一道光罩只能產生二階的變化，其光效率只有 40.5% 左右；若使用四道光罩則可製造出十六階的變化，其光效率可提升至 99%。因此，十六階的閃耀式光罩需要四道二元光罩及四次獨立的曝光顯影製程，將造成製造成本大幅提昇，況且每道光罩圖案必須要精確地對準，當元件之線寬小於 $1\mu\text{m}$ 時，製程中前後多次圖形的對準實為製程困難之處，如果任意一道光罩對準有誤差，則所製造出來的元件將會偏離原先的設計，而使其效率大大的降低，造成良率劣化、成本提昇。因此，發展出一種既能減少曝光顯影的步驟，又能維持微型光學元件之高光學效率的新穎技術有其殷切的需求，故漸變式光罩 (又稱為灰階光罩) 因應而生。漸變式光罩技術的建立將可加速在集成式光學元件 (Hybrid optics) 上的研發、製作及運用。如圖一所示。



圖二、漸變式光罩應用於複合集成式光學元件

漸變式光罩定義

由於微影技術具有高製程精確度與 IC (Integrated Circuit) 製程相容等特性，而發展成十分成熟的製造技術。為了製作出具有連續表面結構的微型光學元件以提升元件效率，近年來數種以微影技術為基礎的新技術已被發展出來藉以取代傳統二元光罩，這些技術都是利用曝光能量不同來產生灰階度的變化，像這樣能產生曝光灰階度的光罩我們稱之為漸變式光罩或稱為灰階光罩 (Gray Scale Mask)。

漸變式光罩之原理

在微影製程中曝光用的晶圓步進機，其基本的光學結構就是投影系統，一個光學投影系統就有如空間低通濾波器。此投影系統中像平面的光強度分布是由光罩上的光穿透函數 (又稱調變函數) $T(x)$ 所控制。光穿透函數 $T(x)$ 中的 0 代表此區域在曝光時是不透光的，而 1 則代表此區域在曝光時是透光的。一個有限繞射 (無像差、無離焦) 的光學系統，其空間截止頻率為：

$$v_c = NA/\lambda$$

但是一般的晶圓步進曝光機 (Stepper) 是一個部分空間同調的投影系統，其空間同調度定義為 σ (當 $\sigma=0$ 表示完全空間同調， $\sigma=1$ 則為完全空間非同調)，如此一來空間截止頻率則變為

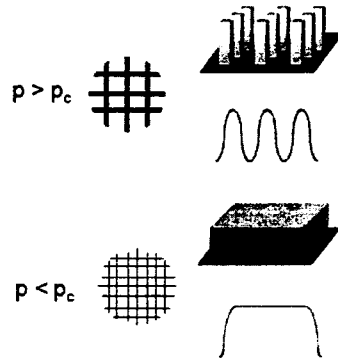
$$v_c = (1 + \sigma) \cdot \frac{NA}{\lambda}$$

因此截止週期

$$p_c = \frac{1}{1 + \sigma} \cdot \frac{\lambda}{NA}$$

這個截止頻率限制了可否透過系統的最高影像頻率。若影像頻率高於截止頻率，則物平面的結構無法成像在像平面，在像平面上只是一均勻的光場分佈。

我們將光罩圖形設計為網點結構，因為網點就有如一個二維的光柵，當光柵週期比截止週期還小時 ($p \leq p_c$)， ± 1 階以及更高階的繞射光都無法進入光學投影系統的入射光瞳，只有第 0 階繞射光可以進入，如圖二所示。



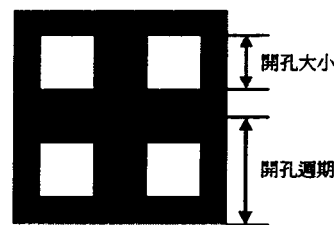
圖二、網點週期對影像之影響

而其能量強度由通光量來決定。因此我們可以藉由控制光罩上的通光開口率 (Aperture Ratio) 在像平面上產生不同灰階度的曝光能量。所以漸變式光罩的技術原理乃是利用光罩之通光量在不同位置上的變化，使得在經過光學投影系統的曝光後塗佈在晶片上的光阻得到曝光強度在不同位置上的分佈，因此在光阻中的 PAC (Photo Active Compound) 的濃度將產生對應光強度分布的濃度分布，再經過顯影後，晶片上的光阻就會依 PAC 濃度的分佈而產生灰階的光阻圖案，定影後以活性離子的非等向性蝕刻蝕刻出灰階的結構，最後以平板壓模技術便可製作出所需要的元件。

漸變式光罩之設計

1、光罩的設計

為了造成光罩上開口率的變化來產生曝光的灰階度，我們在光罩上開透光的方形網點，如圖三所示：



圖三、光罩設計

我們定義出網點結構之開孔大小與開孔週期，漸變式光罩技術乃是利用光罩上網點的分布來調變曝光量的大小，進而在光阻上達到灰階之效果。一般而言光

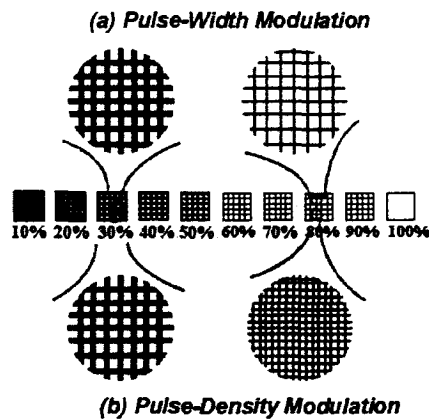
罩上網點的分布有兩種編碼方式，pulse-width 調變及 pulse-density 調變，其編碼方法分別為：

(1)網點大小調變法 (Pulse width modulation)：

如圖四(a)所示，開孔週期是固定，並藉由改變開孔大小來產生灰階度。

(2)網點密度調變法 (Pulse density modulation)：

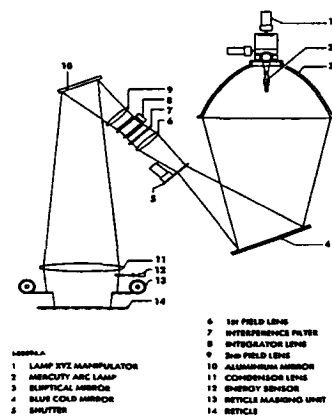
如圖四(b)所示，在此方法中開孔大小是固定，並藉由改變開孔週期來產生灰階度。



圖四、Pulse-density modulation 與 Pulse-width modulation 編碼法

2、光罩設計之限制條件

本計畫的執行上為利用 NDL(國家毫微米實驗室)之 G-Line Stepper (G-line 波長：0.4366 μm 、數值孔徑 (NA) :0.38、空間同調度 (σ) :0.5)來實現，其架構圖如圖五所示：



圖五、g-line Stepper

根據漸變式光罩原理我們可以計算得 G-Line Stepper 之空間截止週期：

$$p_c = \frac{1}{1+\sigma} \times \frac{\lambda}{NA} = \frac{1}{1+0.5} \times \frac{0.436}{0.38} \approx 0.8 \mu\text{m}$$

由於現階段光罩製程技術與 NDL 製程機台的實體限制，最小線寬僅能勉強可達

0.6 μm ，而考量在設計上的困難度，我們採用“pulse width 調變”的編碼法，其有效線寬需小於 0.6 μm 之需求，無法在目前實現，但是我們仍然可以利用週期為 0.8 μm ，將開孔之邊長由 0.6 μm 至 0.8 μm 做調變，這是目前製程上可行的。根據前敘之設計原理，我們將利用軟體進行實際的模擬。

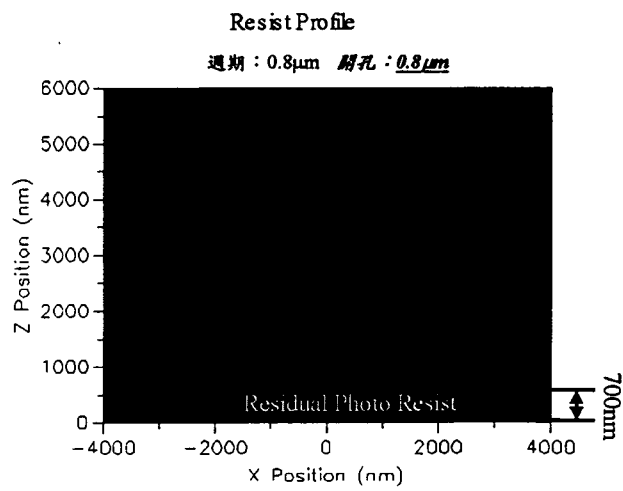
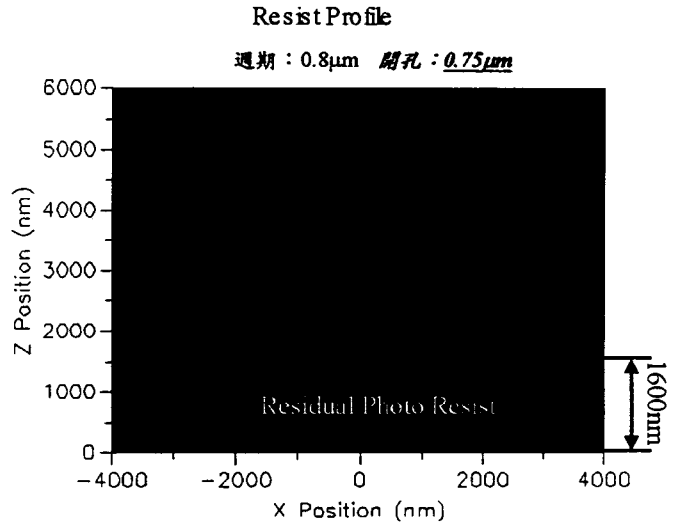
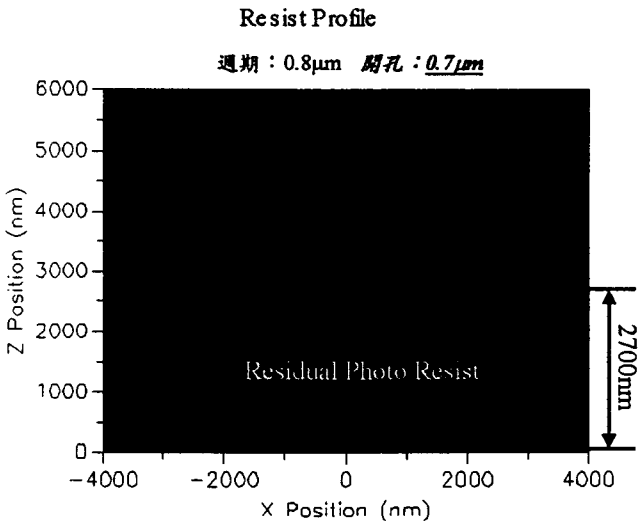
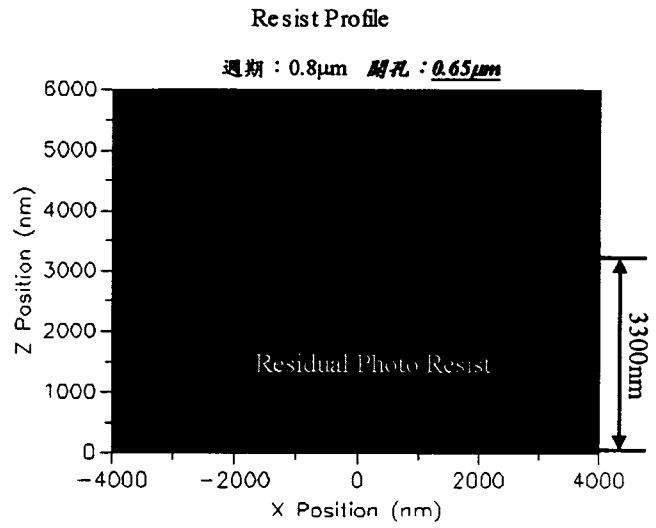
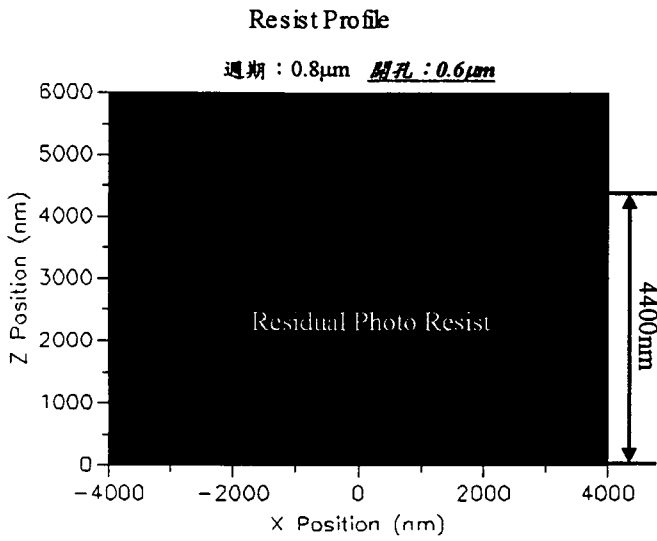
漸變式光罩之模擬

光罩之曝光顯影的模擬部分，我們採用 FINLE Technologies 公司的 PROLITH 3D，而模擬的參數如表一所示，依照我們的設計固定開孔週期為 0.8 μm ，而開孔大小由 0.6 μm ~0.8 μm ：

表一、曝光顯影模擬參數

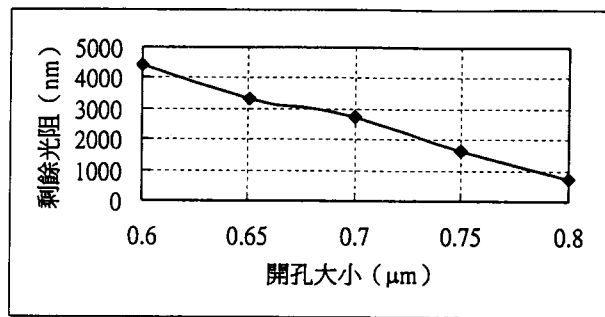
曝光機台	ASM G-line stepper
光源波長	0.436 μm
投影鏡數值孔徑	0.38
光源同調性 σ	0.5
光阻	AZ P4620
基板材質	Si
光阻塗佈厚度	6 μm
軟烤溫度與時間	100°C 90 秒
曝光能量	200 mJ/cm^2
曝後烤溫度與時間	120°C 120sec
顯影液	AZ 400K
顯影時間	90sec

模擬結果如下圖六：



圖六、光阻顯影後輪廓

我們將上述結果作成圖表，如圖七所示：



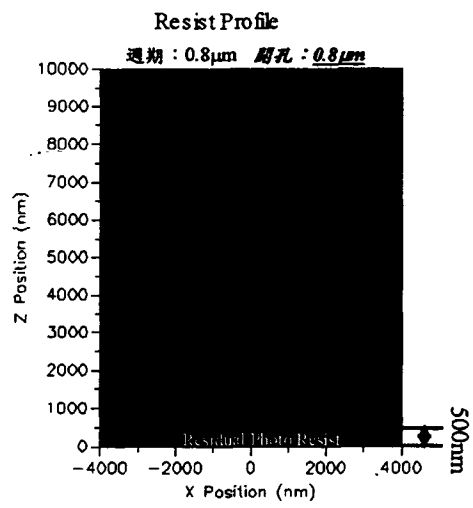
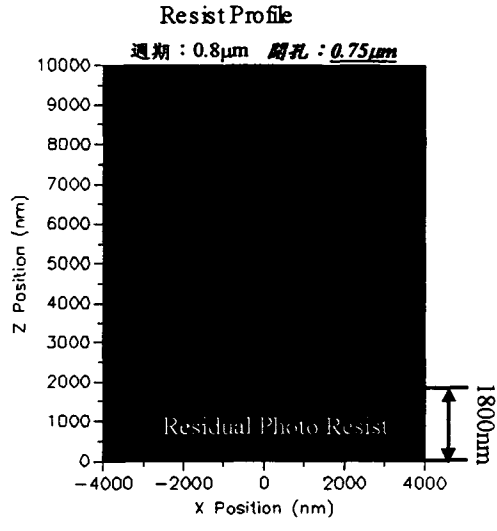
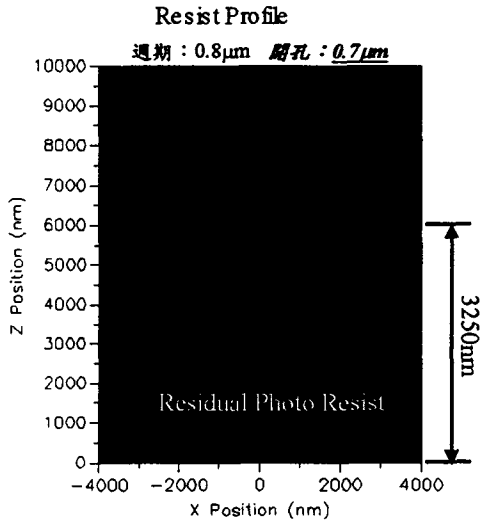
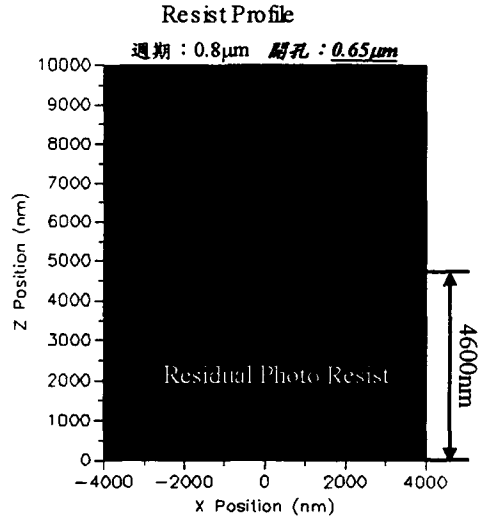
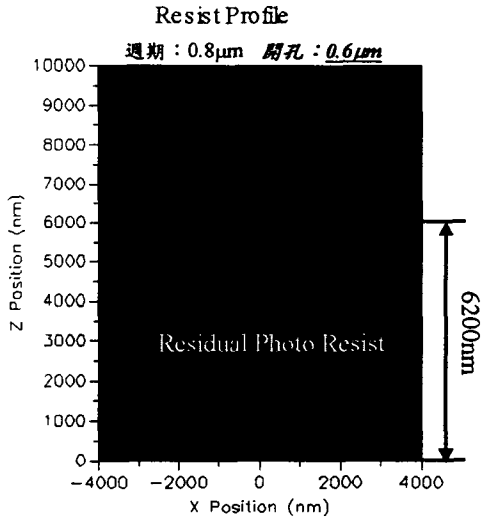
圖七、剩餘光阻與開孔大小之關係

首先我們可以觀察到曝光顯影完後之光阻表面十分的平滑，此乃因光罩上的結構中，高頻的部分皆被光學成像系統所濾掉，只剩下低頻的部分，因此模擬的結果和先前所述之原理部分是相符合的。且由模擬之結果我們可以發現，隨著開孔由 $0.6\mu\text{m}$ 、 $0.65\mu\text{m}$ 、 $0.7\mu\text{m}$ 、 $0.75\mu\text{m}$ 至 $0.8\mu\text{m}$ 的增加，剩餘光阻之厚度相對應為 4400nm 、 3300nm 、 2700nm 、 1550nm 至 600nm 的變化，因此我們可以獲得剩餘光阻之厚度與開孔大小之關係。如圖七所示，由於剩餘光阻厚度與開孔大小之關係約略接近於線性，因此有助於實際上微光學元件設計之簡易化，因此我們可以預期的是我們將可製作出一具有灰階度之光學元件，其高度可達 3800nm 。然而以此方法製作微型光學元件卻有下述缺點：

- (1)、可調變之階數過少，開孔大小由 $0.6\mu\text{m}$ 至 $0.8\mu\text{m}$ ，如模擬所示，約只有 5 個灰階度可調變，如欲增加階數，勢必將使相鄰兩階之開孔大小差異十分微小，很容易將光罩製程上的誤差，而無法達到吾人預期所設計之灰階效果。
- (2)、可調變之光阻高度只有 3800nm 並不符合大部分光學元件之高度

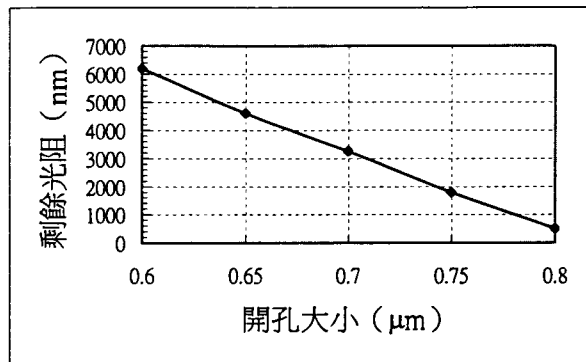
欲解決上述因現今半導體技術之限制而造成設計上之瓶頸，直覺的想法我們希望在不更動光罩設計的前提下，增加光阻厚度及顯影時間使得增加漸變式光罩能調變之剩餘光阻厚度，根據上述之設計原理，我們利用 Prolith 進行模擬，模擬條件如表一所述，但其中光阻厚度由 $6\mu\text{m}$ 改為 $10\mu\text{m}$ ，而曝光時間由 90 秒改為 150 秒。

而其模擬之結果如圖八：



圖八、光阻顯影後輪廓

我們將上述結果作成圖表，如圖九所示：



圖九、剩餘光阻與開孔大小之關係

由上面的模擬結果我們可以發現，剩餘光阻之表面依然十分之平滑，和之前所述之理論並無相悖，而且可調變之光阻厚度為 6200nm、4600nm、3250nm、1800nm、500nm，如圖九所示，剩餘光阻厚度與開孔大小之關係線性度依然十分良好，因此有助於實際上微光學元件設計之簡易化，因此我們可以預期的是我們將可製作出一具有灰階度之光學元件，其高度可達 5700nm。但是之前所述之缺點依舊存在，可調變之剩餘光阻厚度雖然增加至 5700nm，但效果沒有想像中的好，而且 5700nm 之調變深度依舊無法滿足元件設計上的需求，更遑論設計上可調變之灰階度不足。

改進的方法與實現的困難

由於現今半導體製程能力上的限制，最小之線寬只可勉強達 0.6μm，在採用先前之設計下，最小開口率為 0.56 (當週期：0.8μm，開孔：0.6μm)，導致即使在最小開口率下光阻仍被蝕刻得很深，如之前之模擬結果所示，在週期：0.8μm，開孔：0.6μm，光阻厚度 6μm，顯影時間 90 秒下光阻被吃了 1600nm，而在週期：0.8μm，開孔：0.6μm，光阻厚度 10μm，顯影時間 150 秒下光阻更是被吃了 3800nm。因此在相同之製程條件下，如果我們能經由光罩的設計，有效地降低最小開口率，不要讓光阻被曝光那麼多，則我們就能使灰階光罩所能調變之深度有效地增加，並增加可調變的灰階度。另外一方面，在開口率最大的部分，由於其最大值便是 1，並無增加的空間，因此只要確保在該製程條件下，開口率為 1 時光阻不會被曝光完即可。而降低最小開口率，我們使用的方法就是增加開孔週期內不透光的部分，並且考量漸變式光罩兩種調變的方式：

(1) Pulse-density 調變：

在固定開孔大小下，我們改變開孔 (網點) 的密度，在開孔密度低時，我們便能獲得較低之開口率。

(2) Pulse-width 調變：

之前設計由於受限空間截止週期 (0.8μm)，開孔週期只能設計小於 0.8μm 因此造成最低開口率很高，故我們若能經由光學設計提高開孔週期，便能有效的降低最小開口率。

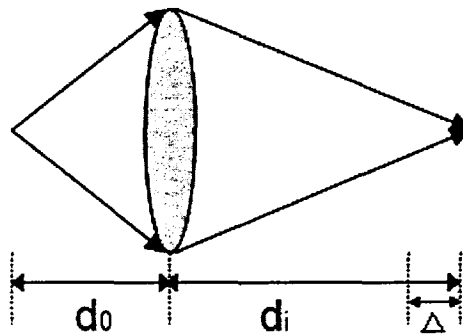
可是上述之兩種方法都將遭遇到開孔週期大於 $0.8\mu\text{m}$ 之問題，根據之前原理所述，若我們設計開孔週期大於截止系統的截止週期，我們將會得到高低起伏的光阻輪廓，而非平坦的，如此一來便不符合漸變式光罩的設計，開孔對光阻上的成像影響很明顯，平整度不好將無法設計元件，就算有比較大的調變深度也是枉然。

設計上的突破

在光學成像系統，聚焦的條件是由透鏡定率所決定：

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

如圖十所示：



圖十、成像投影系統

如果我們的光學成像系統有一定的離焦，將引進一誤差 ε ，則：

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i + \Delta} = \frac{1}{f} + \varepsilon$$

從傅利葉光學我們可知，此誤差將造成成像系統之 OTF 發生改變，假設原先未失焦之光學成像系統之 OTF 為 $H_l(f_x)$ 則在離焦的情況下成像系統之 OTF 變為：

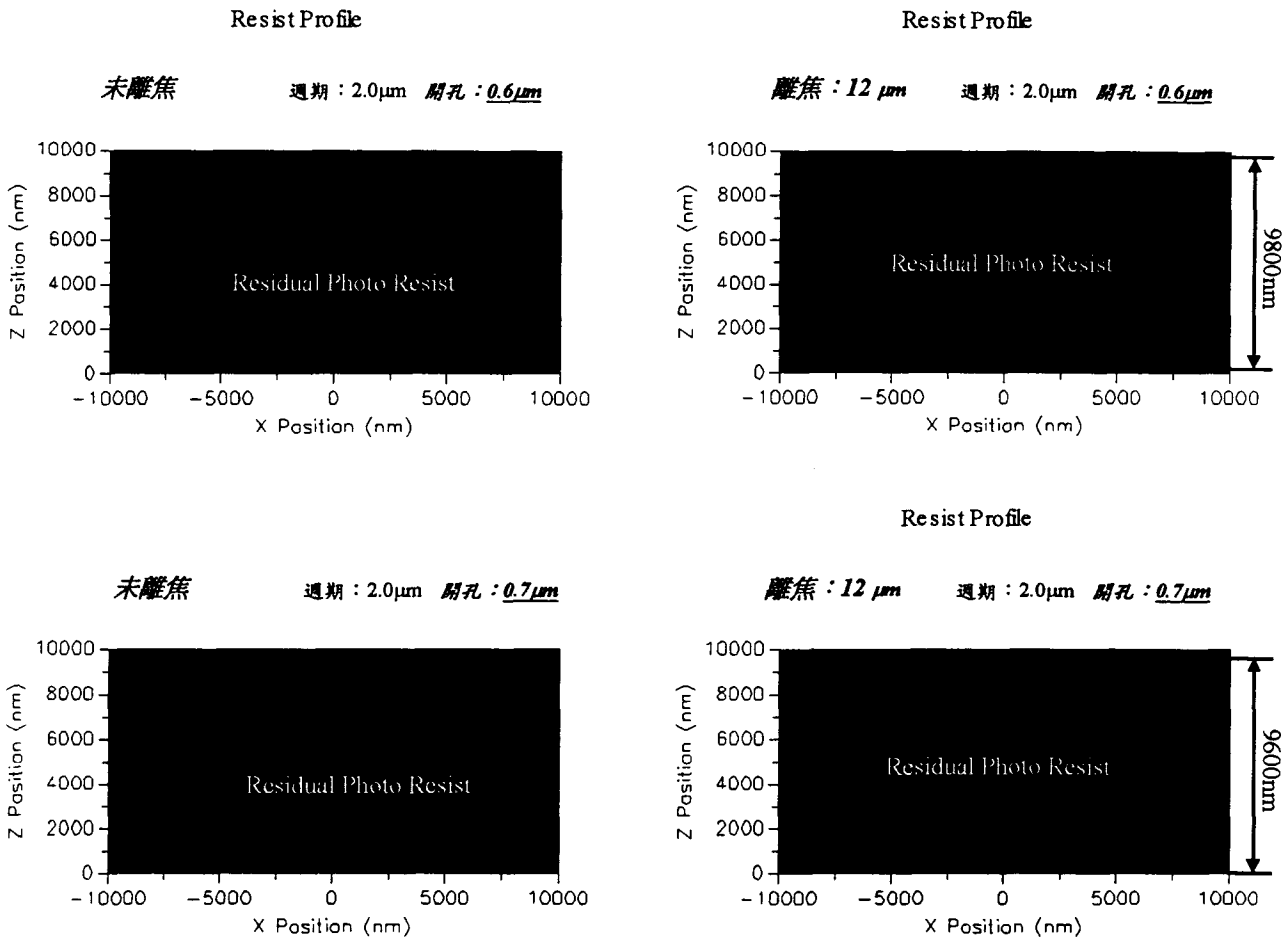
$$H'_l(f_x) = H_l(f_x) \times \text{sinc} \left\{ \frac{8 \times w}{\lambda} \left(\frac{f_x}{2f_0} \right) \left(1 - \frac{|f_x|}{2f_0} \right) \right\}$$

$$\text{其中 } w = l^2 / 8$$

由於系統之 OTF 多加入一 sinc 函數，因此可期待的是在某些 w 及 f_x 值下，此 sinc 函數將因其震盪衰減的特性，而使得系統之有效空間截止頻率下降，或是使高頻部分之響應下降，因此即使我們設計之灰階光罩有開孔週期有大於 $0.8\mu\text{m}$ 之需求，藉由適當的調整離焦，我們能把空間頻率小於空間截止頻率（及指開孔週期大於 $0.8\mu\text{m}$ 時而言）之響應降低，並降低高頻的響應，我們則預期開孔的影像將不會再出現在曝光顯影過後的光阻輪廓上，取而代之的是較為模糊而平坦的

輪廓。為了驗證上述離焦的結果，我們將此想法利用 Prolith 進行模擬，模擬條件如表一所述，但其中光阻厚度由 $6\mu\text{m}$ 改為 $10\mu\text{m}$ ，而曝光時間由 90 秒改為 150 秒，而且我們為了符合之前光罩的設計我們使用 Pulse-width 調變配合離焦設計來改善並增加我們所需灰階度，我們固定週期大小為 $2\mu\text{m}$ ，將其開孔由 $0.6\mu\text{m}$ ，每次增加 $0.1\mu\text{m}$ ，直至 $2\mu\text{m}$ ，利用此方法來調變開孔之大小。

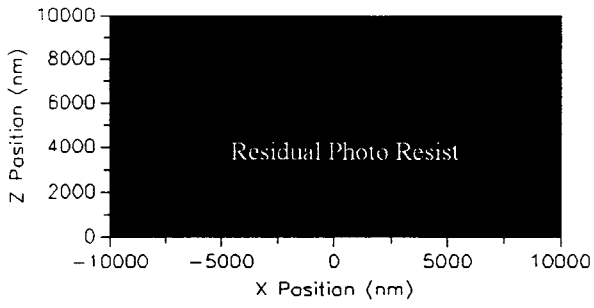
模擬結果如圖十一（左半圖之光阻輪廓：未離焦，右半圖之光阻輪廓：作 $12\mu\text{m}$ 離焦）：



Resist Profile

未離焦

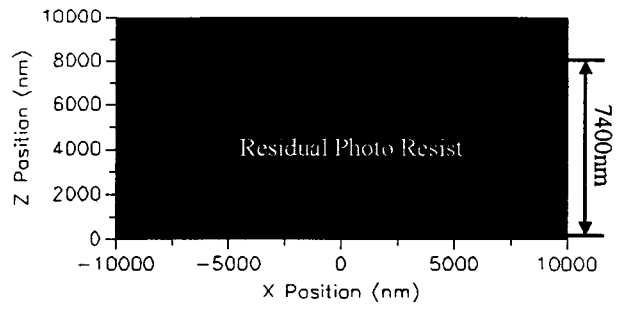
週期: 2.0 μ m 開孔: 1.1 μ m



Resist Profile

離焦: 12 μ m

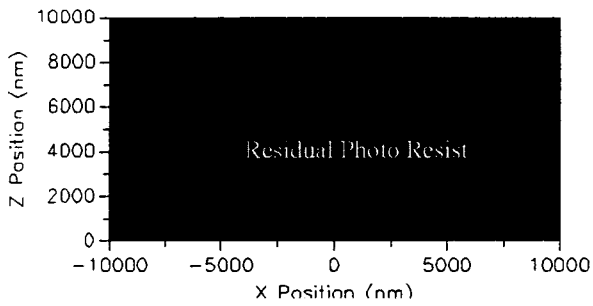
週期: 2.0 μ m 開孔: 1.1 μ m



Resist Profile

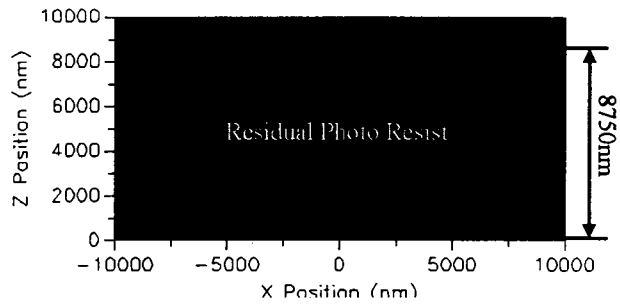
未離焦

週期: 2.0 μ m 開孔: 0.9 μ m



離焦: 12 μ m

週期: 2.0 μ m 開孔: 0.9 μ m

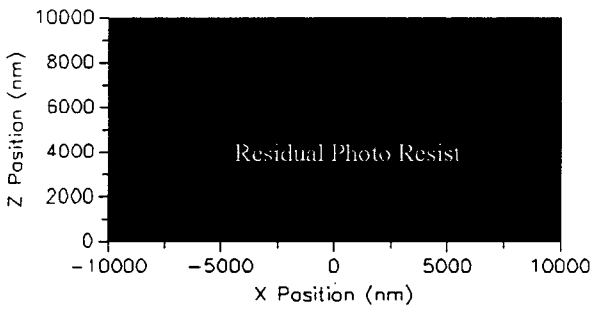


Resist Profile

Resist Profile

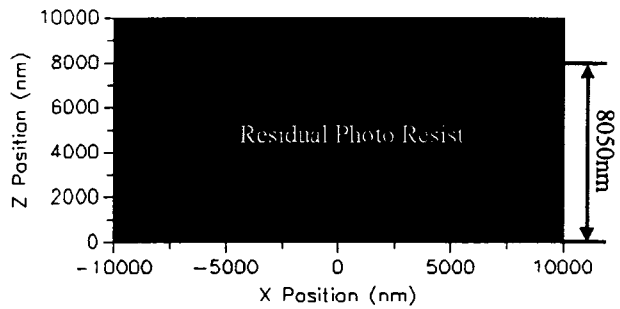
未離焦

週期: 2.0 μ m 開孔: 1.0 μ m



離焦: 12 μ m

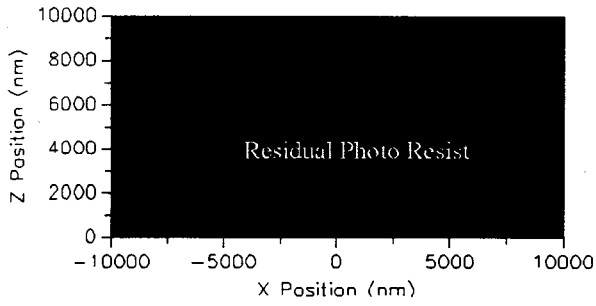
週期: 2.0 μ m 開孔: 1.0 μ m



Resist Profile

未離焦

週期: 2.0 μ m 開孔: 1.2 μ m

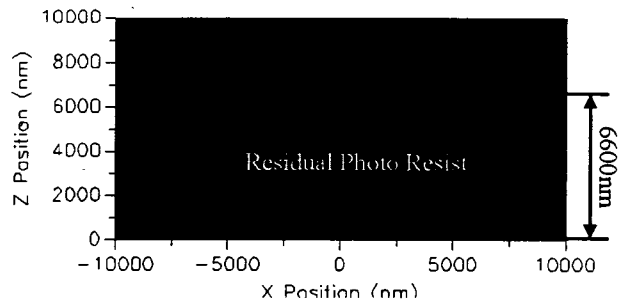


Resist Profile

Resist Profile

離焦: 12 μ m

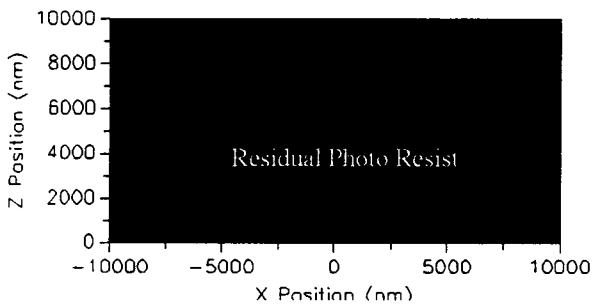
週期: 2.0 μ m 開孔: 1.2 μ m



Resist Profile

未離焦

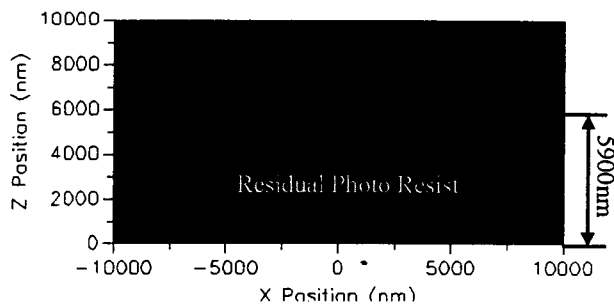
週期: 2.0 μ m 開孔: 1.3 μ m



Resist Profile

離焦: 12 μ m

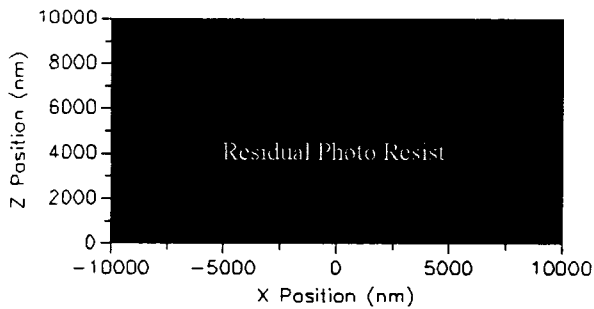
週期: 2.0 μ m 開孔: 1.3 μ m



Resist Profile

未離焦

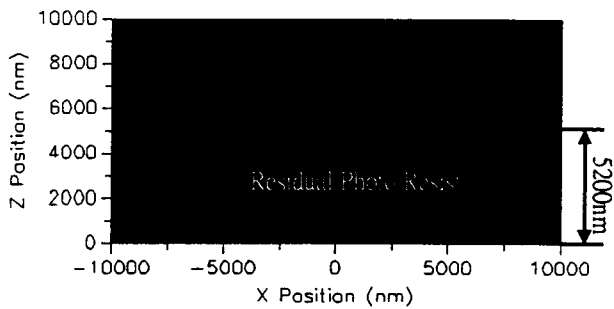
週期: 2.0 μ m 開孔: 1.4 μ m



Resist Profile

離焦: 12 μ m

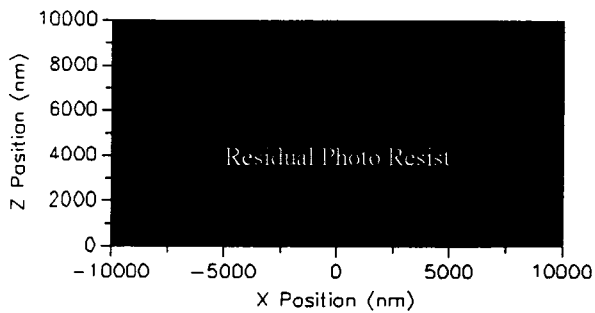
週期: 2.0 μ m 開孔: 1.4 μ m



Resist Profile

未離焦

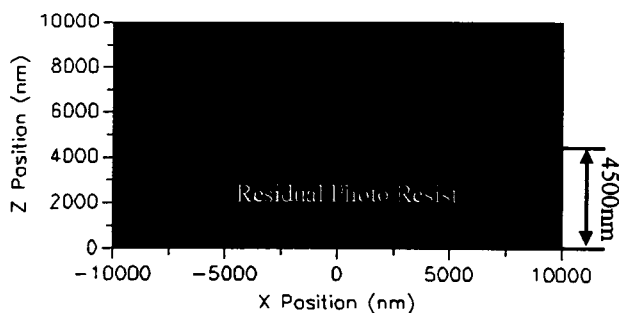
週期: 2.0 μ m 開孔: 1.5 μ m



Resist Profile

離焦: 12 μ m

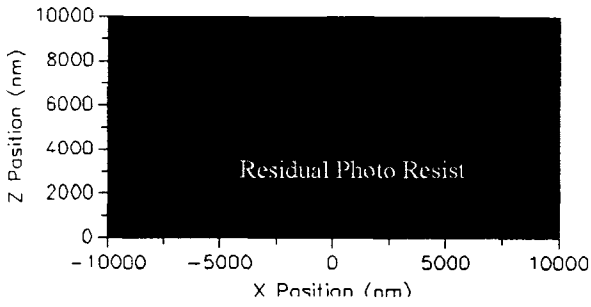
週期: 2.0 μ m 開孔: 1.5 μ m



Resist Profile

Resist Profile

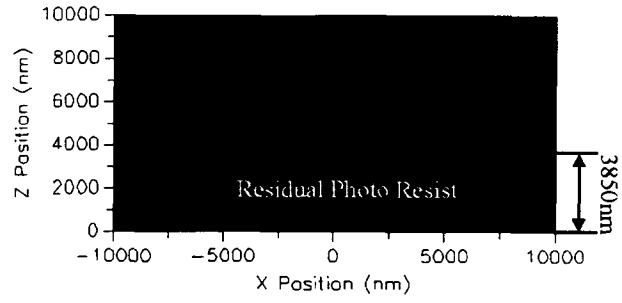
未離焦 週期：2.0 μ m 開孔：1.6 μ m



Resist Profile

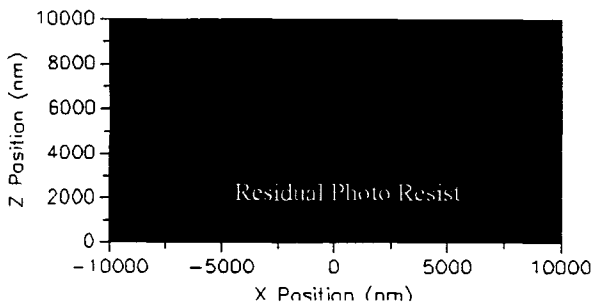
Resist Profile

離焦：12 μ m 週期：2.0 μ m 開孔：1.6 μ m



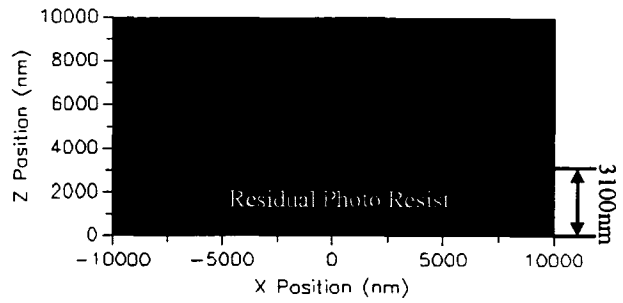
Resist Profile

未離焦 週期：2.0 μ m 開孔：1.7 μ m



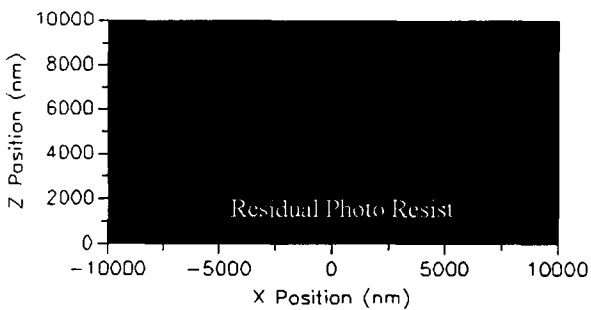
Resist Profile

離焦：12 μ m 週期：2.0 μ m 開孔：1.7 μ m



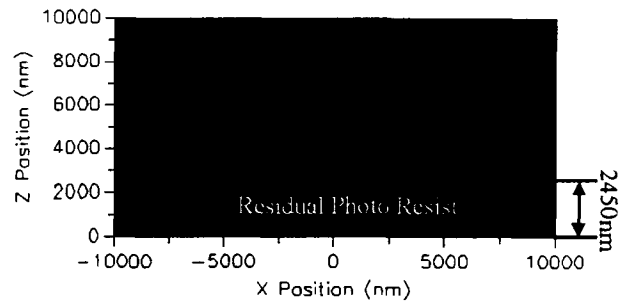
Resist Profile

未離焦 週期：2.0 μ m 開孔：1.8 μ m



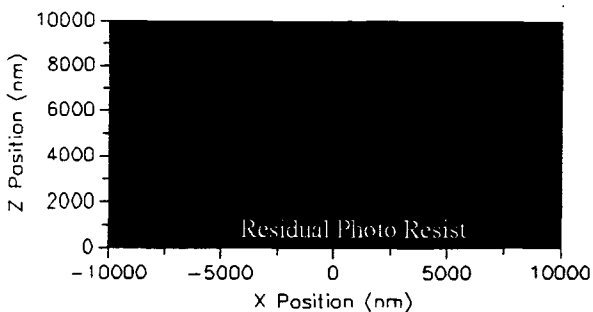
Resist Profile

離焦：12 μ m 週期：2.0 μ m 開孔：1.8 μ m



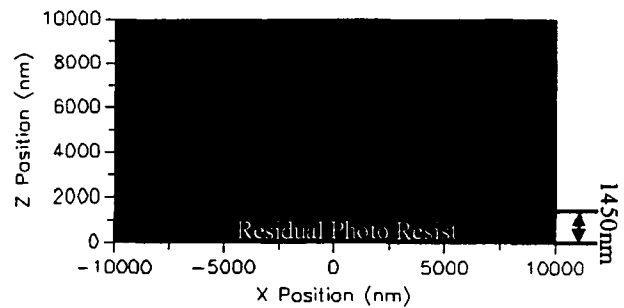
Resist Profile

未離焦 週期：2.0 μ m 開孔：1.9 μ m

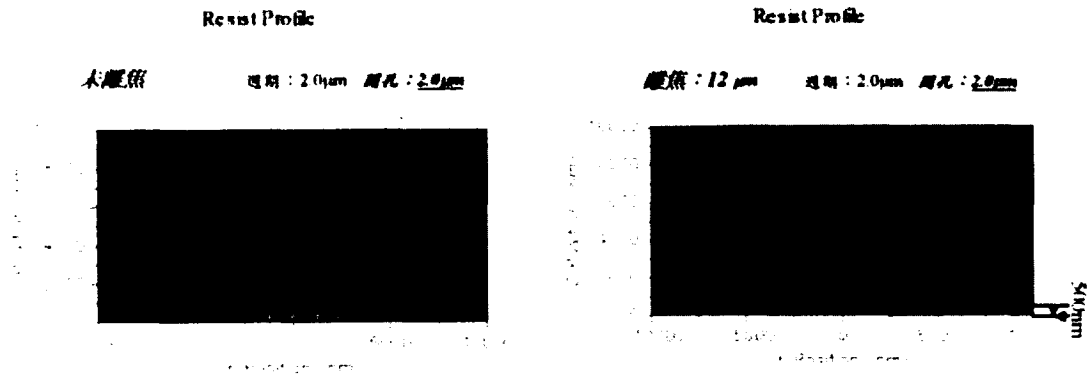


Resist Profile

離焦：12 μ m 週期：2.0 μ m 開孔：1.9 μ m

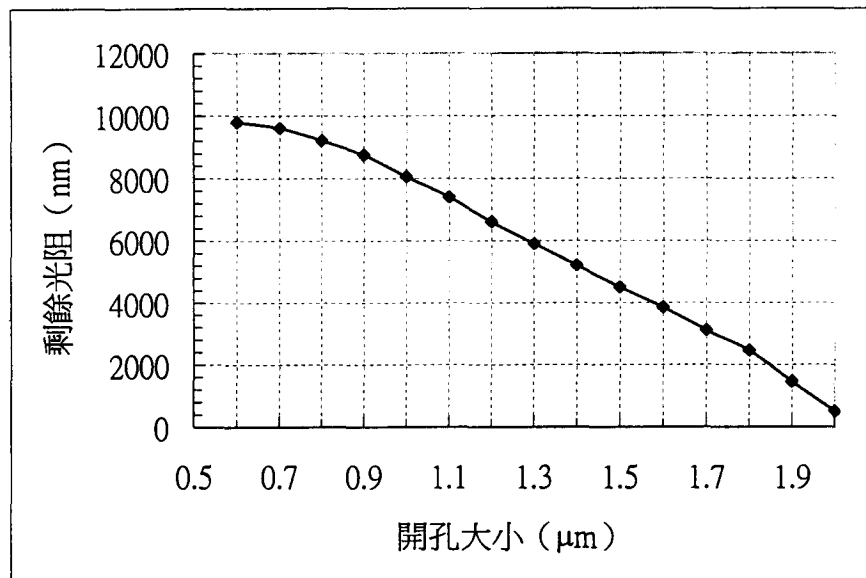


Resist Profile



圖十一、Pulse width 調變之光阻輪廓 (左半圖：未離焦；右半圖：離焦 12µm)

我們將結果繪製成圖，如圖十二所示：



圖十二、剩餘光阻與開孔大小之關係

由圖十一我們可以明顯的看到原本十分粗糙的光阻表面（突起之光阻柱便是開孔在成像平面的影像所造成的），在經過光學成像系統的特意離焦下，光阻的表面粗糙度獲得相當大幅度的改善，雖然無法達到完全之平整，但其波動不大，約在 100nm 左右，在選擇適當之烘烤時間及溫度下，使得光阻局部液化後之擴散長度大於光阻表面之波動高度，則可達到光阻熱回流的效果，因此能有效地改善光阻表面之粗糙度。且可以調變的剩餘光阻厚度為 9300nm 共有 15 個灰階度，可調變之高度及灰階數都相當之足夠，因此搭配離焦的應用我們輕易地設計出我們想要之微型光學元件。且由圖十二，我們可以發現，使用 Pulse width 調變能得到一接近線性之剩餘光阻與孔徑週期之關係，對於將來元件之設計上將帶來便利性。因此由此模擬之結果，我們確定了離焦對光學成像系統成像的影響，並且適合於應用在灰階光罩之發展，能有效地使光罩之光學設計不在完全箝制於現今半導體製程之製造能力，配合著光學理論的應用，我們突破現今半導體製程精度之

限制，而延伸了灰階光罩之實用性。

實作上遭遇的困難

由於我們希望製作出來的元件具有一定的元件高度，因此我們必須採用厚膜光阻，根據模擬的結果我們需要塗佈的光阻厚度至少 $10\mu\text{m}$ ，故所採用的光阻-AZ P4620 為一黏滯係數相當高的光阻。然而一般而言塗佈厚膜光阻會遇到兩個常見的問題：邊緣突起 (edge bead) 與晶背污染。邊緣突起是由於晶片旋轉時在四周邊緣處產生的氣流阻擋了光阻的去路，於是就累積在邊緣，此現象對於黏滯係數高的光阻而言愈是嚴重，而晶背污染的問題也是由於光阻的高黏滯係數，造成光阻沒有被順利地旋出，在晶邊的切線方向形成線狀殘餘，而污染了晶背。

原先預定採用國科會國家豪為米實驗室 (NDL) 的 g-line 晶元步進機來實現漸變式光罩的設計，但由於上述兩個使用厚膜光阻常遇到的問題將嚴重的污染機台使得機台的夾具的平整度與穩定性受到嚴重的威脅，因此 NDL 的機台不願意開放使用，另外我們亦在國內多方找尋可替代的晶元步進機，甚至包含中山科學研究院與工業技術研究院都沒有合適的晶元步進機可供使用。在機台的限制下，我們只好採用其他的製作方法來實現灰階光罩的設計。

準分子雷射微加工系統之引進

在有限的機台限制下，最後我們採用了國科會精密儀器發展中心 (PIDC) 的準分子雷射微加工系統，而選用的原因乃是因為在考量其他替代製程的可行性時，由於漸變式光罩之原理中，最重要的部分就是該製程一定要有一光學成像系統來將高空間頻率的信號屏除出成像系統，而只讓低空間頻率的信號通過，使得成像平面是一平坦的光場分佈，因此具有光學投影系統的準分子雷射微加工系統是我們最後採用該系統的主因。現有製程中常見的曝光機台如 Contact Aligner 是將光罩靠近已塗佈光阻的晶片 (通常光罩與光阻的間距約為數十微米)，無法提供一光學成像系統來當空間濾波器，因此無法應用在實現灰階光罩的設計。

另外準分子雷射微加工系統是一套能快速加工與具成本效益的製程，運用準分子雷射的光罩直寫微加工法，直接依光罩上的圖案在加工材料表面雕刻，省略了一般微影製程中晶片清洗、上 HMDS、上光阻、軟烤、曝光、曝後烤、顯影、硬烤、蝕刻等繁複的步驟，因此能大幅縮減製程的時間，以及製作的成本，尤其在做局部的設計更改及尺寸的修改更見其發展的潛力。

準分子雷射之介紹

1. 準分子雷射

準分子雷射又稱為激態分子(EXCIMER)雷射，其為活性介質而不完全是個分子，是只有在激態情況下才能生存的雙原子分子，當放出光子而降回到基態時，即分解為原子。此即表示分子中有惰性氣體(在基態時不會與其他分子結合，但在激態時即會)。準分子雷射輸出紫外線，所有的染料雷射皆可激勵，是相當實用的光源。在惰性氣體中氬最活潑，但屬於世界上稀有氣體，因此使用 Xe 氣體為活性介質，1970 年初期即出現 Xe 準分子雷射，欲產生準分子的條件必須 Xe 氣壓很高，使 Xe 彼此接近。而激發方式可選擇的不多，因為它不吸收光，無法以光激勵，較可行的方式為電子碰撞，而氣壓高又不可能放電，無法以放電方式來激勵。因此最後採用的激發方式為用電子束來碰撞，以加速器來產生電子束。此類準分子雷射的優點是效率高，準分子雷射輸出力量很大，通常用三級結構。另一個準分子雷射的優點是輸出紫外線，此類雷射出現當時是最有潛力的紫外線雷射。

後來希望氣壓不高，又可以放電，因此把其中之一惰性氣體換成鹵族氣體(較惰性氣體活潑)。這也就是現在用的方法，惰性氣體加鹵族氣體作為其活性介質。在國科會精密儀器中心所使用的為 KrF、波長 248 nm 之深紫外 (deep-UV) 準分子雷射，雷射最大輸出能量為 700 mJ/puls，最大輸出功率為 56 W，重複率為 100 Hz，均勻擴束輸出光束點徑為 12 mm × 12 mm，其應用可作為光幫浦以激發染料雷射，不須利用晶體作倍頻處理。另外在工業上也有加工的用途，因金屬材料對紅外線主要是反射，吸收少，所以用準分子雷射能較有效地對金屬才進行退火 (annealing)、鑽孔 (drilling)、標記 (marking) 等製程。

2. 加工原理

KrF 準分子雷射的波長為 248nm，屬於深紫外光(deep ultraviolet)的波段，當如此高能量的光子打在工件材料上，如果光子的能量高於材料的鍵結能量，準分子雷射將被工件吸收，並將材料的鍵結完全破壞，而大部分工件材料的吸收深度為數百埃(angstrom)，因此每一脈衝 (pulse) 能精確地移除 μm 等級以下的工件材料表層，而多餘的雷射能量被移除的工件材料帶走，因此以準分子雷射加工可視為一冷加工。而上述的準分子雷射加工機制我們稱其為光切除分解 (Photoablative decomposition)，而我們採用之加工工件為聚碳酸酯(Polycarbonate)，其吸收深度約略為 100nm。

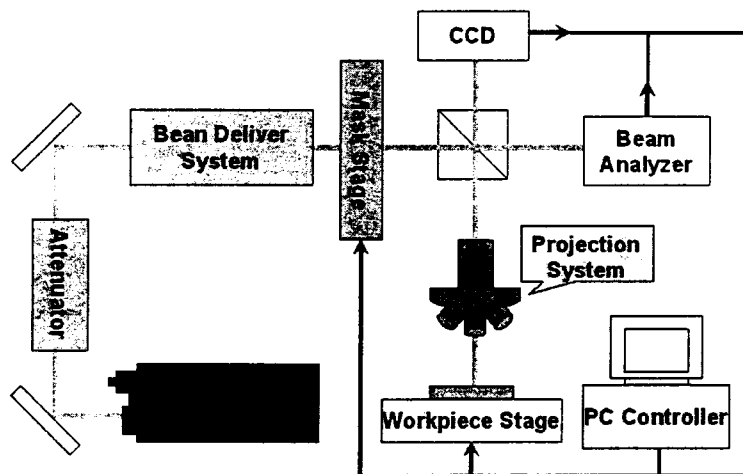
3. 加工模式

準分子雷射微加工系統有數種加工模式，包括雷射直寫、光罩直寫、直線拖

拉、旋轉拖拉，但由於本計畫是利用光罩上開孔的失真來達到一平坦的平面，再藉由改變開孔的空間密度，來完成灰階度的調變，因此在此我們只介紹光罩直寫的模式。

如圖十三所示，準分子雷射微加工系統系統之基本組成元件包括準分子雷射（248nm 的 KrF Laser）、光衰减器（attenuator）、光學鏡片、光罩（Mask）、聚焦透鏡、成像系統以及三維精密定位平台。

為方便在加工時能量上彈性的調整，如圖十三所示，準分子雷射光源首先將經過一衰减器的調整，再者，由於準分子雷射輸出之光數強度相當的不均勻，因此我們利用光傳送系統中的光束成形器與光束均勻器來產生強度均勻的雷射光束，而雷射光束再經由光罩上圖案的調變後，經由光學成像系統之成像直接投影在加工工件上來進行光切除分解，而此成像系統是一 10:1 的系統，因此縮小十倍的光罩圖樣便能順利地轉寫在加工工件上，再配合三維精密定位平台的位移便可完成大面積且多元的加工。



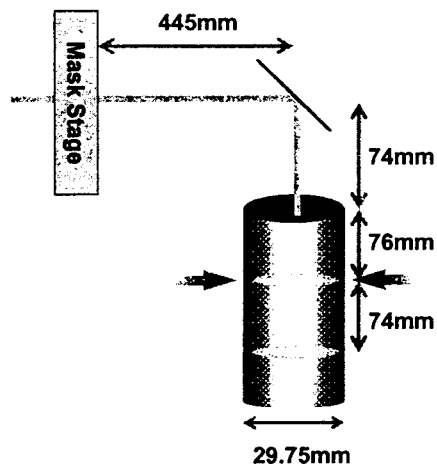
圖十三、準分子雷射微加工系統的系統架構圖

因此如果灰階光罩能將入射光進行具有灰階度的調變，在經過光學成像系統的濾波，使得能量亦具有灰階度，則可預期的在加工工件上我們將可獲得一具有灰階度的加工面，如此一來多階的結構，甚至是一連續的的曲面都是可實現的。

準分子雷射的模擬

在我們利用準分子雷射進行實作之前我們同樣需要模擬其光學特性，並且確定其能與我們先前設計的漸變式光罩搭配使用。首先，我們需先了解的漸變式光罩設計原理中的空間截止頻率 P_c ，由於 P_c 在光罩的設計上是很重要的參數，而其是由光學成像系統所決定的。而準分子雷射的光學成像系統的詳細結構圖如同

圖十四：



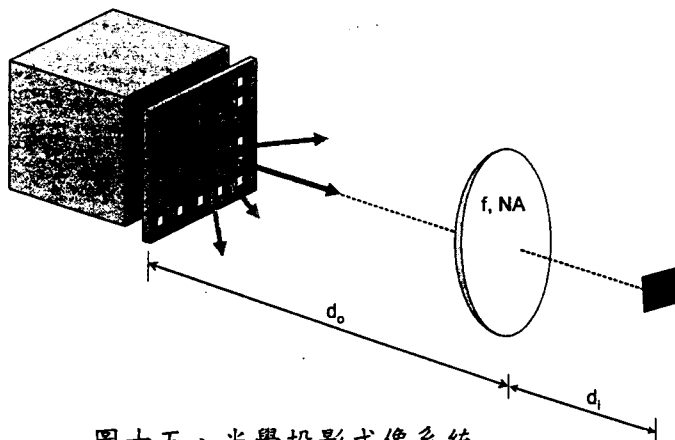
圖十四、投影成像系統之結構圖

該成像系統主要由兩個透鏡所組成，而系統之光瞳 (Aperture) 出現在第一個透鏡，這光瞳限制了高空間頻率的傳播，造成成像平面上平坦的光場分佈。另外，半色調光罩上網點的圖案會造成繞射的現象，而其效應可以由下式來表示：

$$\text{Sin}(\alpha_m) = m \frac{\lambda}{p}$$

其中 α_m 是繞射角度， m 是繞射級數，是開孔週期。利用這個公式與投影成像系統的幾何關係我們可以計算出：當開孔週期小於 $9.923\mu\text{m}$ 時只有 0 階的空間頻率出現在成像平面，此時我們可以得到均勻的光場分佈，而當開孔週期小於 $19.847\mu\text{m}$ 只有 0 級與 1 級的空間頻率出現在成像平面，雖然此時有 0 級與 1 級的空間頻率出現在成像平面，可是由於經過模擬出來的結果其均勻度可以接受，而且我們可以提升我們的灰階度，所以我們把 1 級的空間頻率也考慮進去，可以有效提升可變動的範圍，達到更多更有效的設計。

根據上面的計算，我們進一步利用一套專門計算物體繞射效應的軟體 -Diffract 進行光學模擬來瞭解光場在經過光學成像系統之效應，且投影系統的架構如圖十五。而系統的參數如同表二。

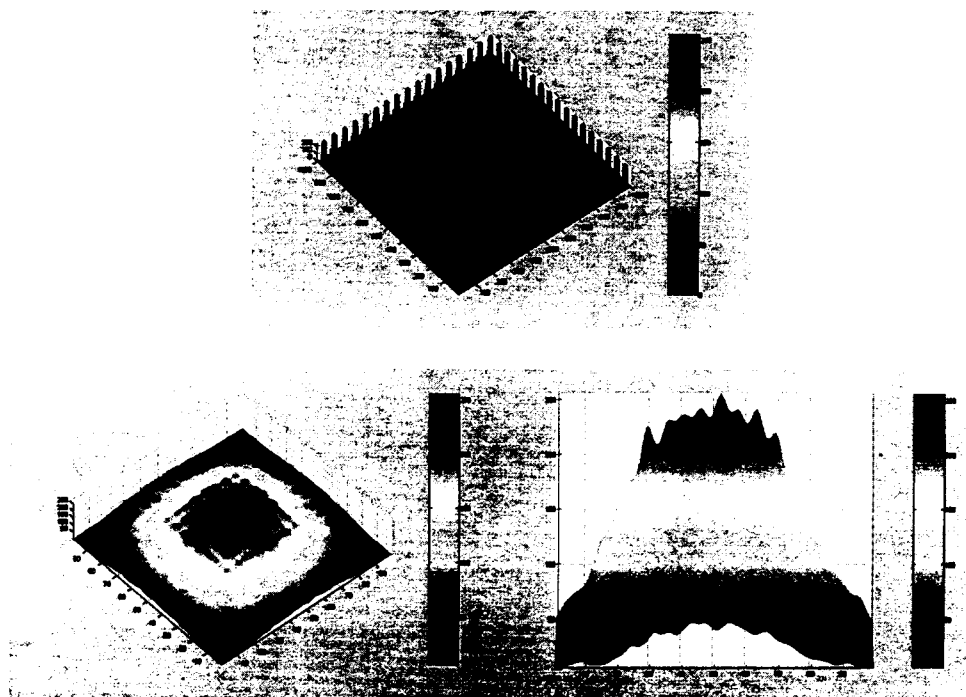


圖十五、光學投影成像系統

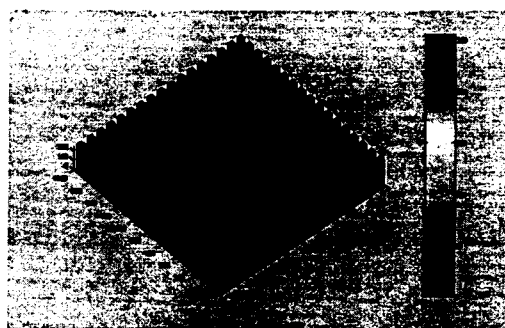
表二、光學投影系統參數設定

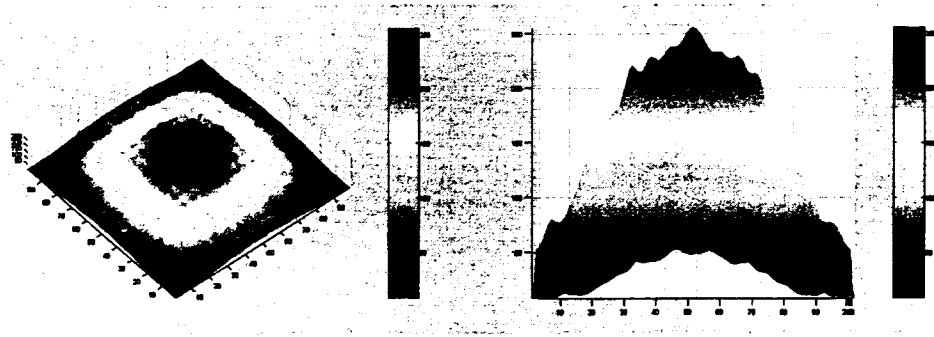
物距 (d_o)	681.818mm
像距 (d_i)	68.182mm
焦距	61.983mm
數值孔徑	0.2
開孔大小	14.875mm

首先，由於截止頻率的限制在 $10\mu\text{m}$ ，我們先固定開孔週期為 $6\mu\text{m}$ 並將開孔大小由 $1.8\mu\text{m}$ 增加至 $3.4, 5.0$ ，其開孔大小與光場變化的關係圖如同圖十六，左圖是經過光罩時之光場分佈，右圖是成像平面之光場分佈。

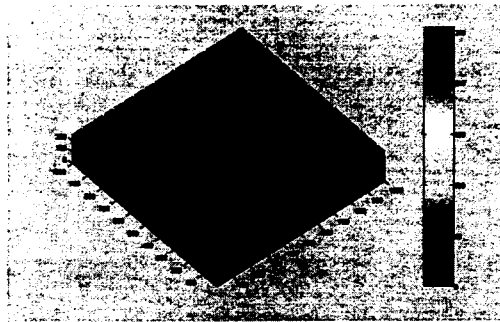


(a)





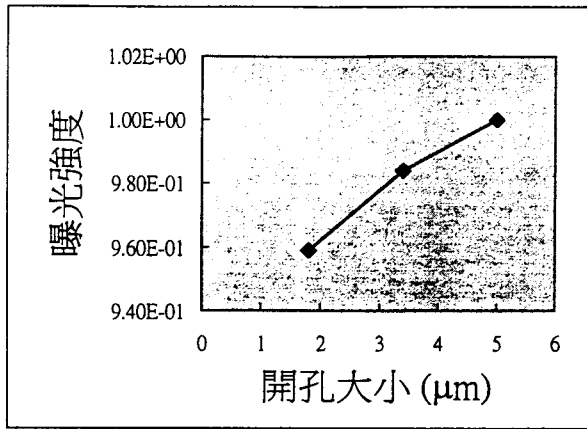
(b)



(c)

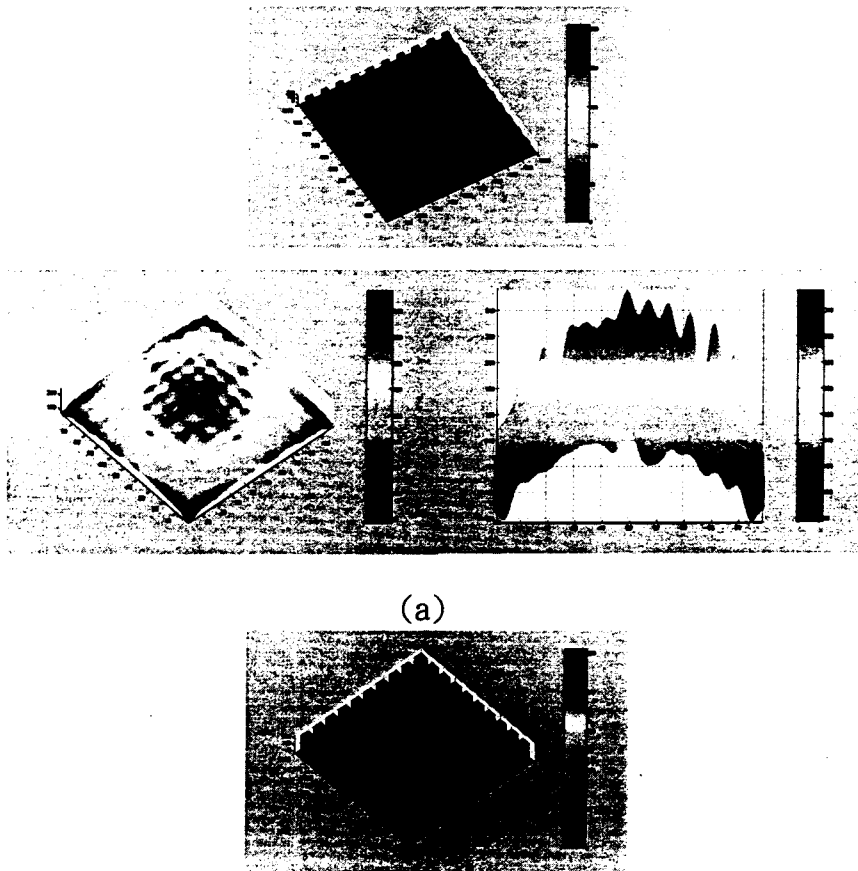
圖十六、光場分佈在光罩調變後與在成像平面上之變化
 (a)開口大小 $1.8\mu\text{m}$ (b)開孔大小 $3.4\mu\text{m}$ (c)開孔大小 $5.0\mu\text{m}$

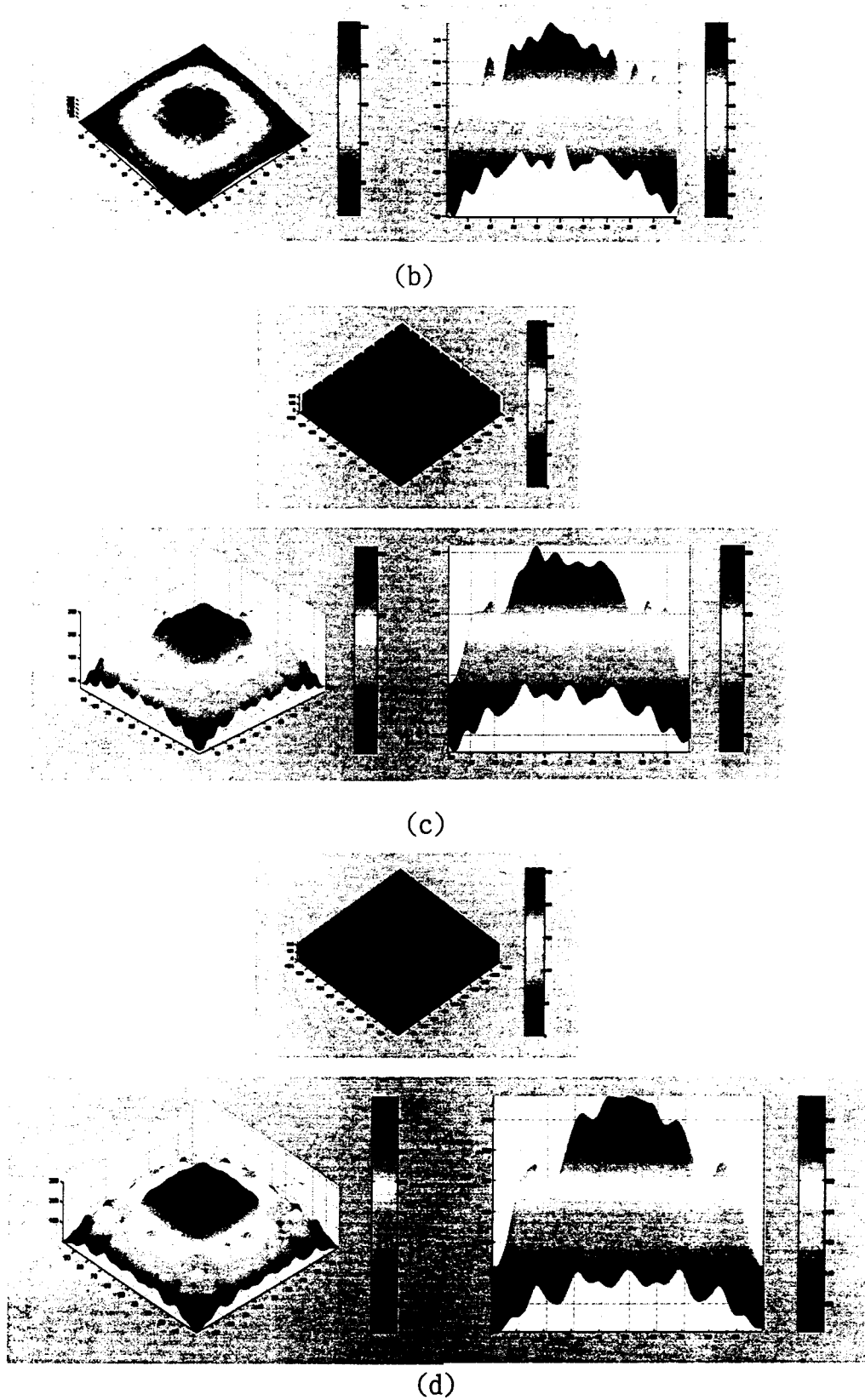
並且將上述結果繪製成圖，如圖十七所示：



圖十七、曝光強度與開孔大小之間的關係

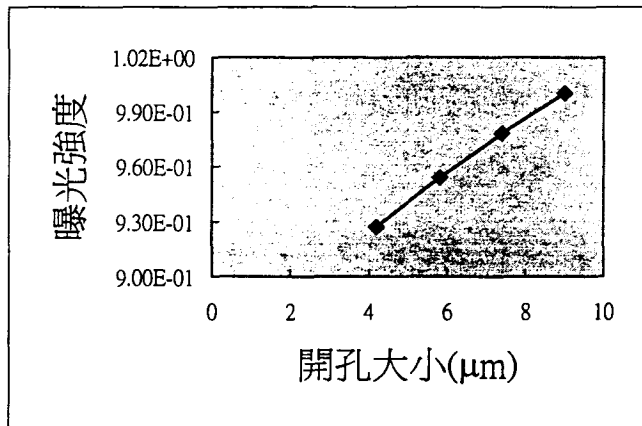
由上述的結果我們發現原先光罩上網點的結構確實因為空間濾波的效應而在成像平面上消失，形成一較為平坦的光強度分佈，且曝光強度與開孔大小之間的關係接近於線性，雖然在平坦平面上由模擬的結果我們可以看到有一些小的突起，可是我們相信在實際操作上由於色散現象或是準分子雷射聚焦位置不同的效應，結果應該可趨於平坦，我們將在實作時觀察其效應。接下來我們將開孔週期提高為 $10\mu\text{m}$ 並將開孔大小由 $4.2\mu\text{m}$ 增加至 5.8 ， 7.4 ，和 $9.0\mu\text{m}$ ，其開孔大小與光場變化的關係圖如圖十八，左圖是經過光罩時之光場分佈，右圖是成像平面之光場分佈。





圖十八、光場分佈在光罩調變後與在成像平面上之變化
 (a)開孔大小 $4.2\mu\text{m}$ (b)開孔大小 $5.8\mu\text{m}$ (c)開孔大小 $7.4\mu\text{m}$ (d)開孔大小 $9\mu\text{m}$

並且我們將上述結果繪製成圖，如圖十九：



圖十九、曝光強度與開孔大小之間的關係

由上述的結果我們可以得知原先光罩上網點的結構確實因為空間濾波的效應而在成像平面上消失，形成一較為平坦的光強度分佈，然而我們由圖十八可以發現，原本應該是平滑均勻的成像平面，有小突起的情況在此部分的模擬則顯得更加嚴重，此是因為此時1級的空間頻率已經有部分進入的成像平面所以導致了這樣的結果。當開孔週期大於 $10\mu\text{m}$ ，而小於 $20\mu\text{m}$ 時，此時雖然1級繞射空間頻率已進入成像平面，但是由於像差或是成像系統誤差如離焦，將使成像解析度劣化，我們預期半色調光罩依然是可行的。

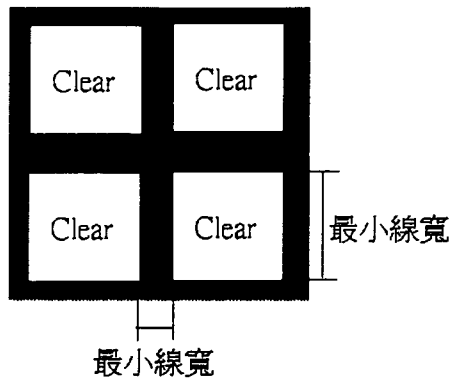
此外，曝光強度隨著開孔大小的增加而增加，因此我們分析曝光強度與開孔大小之間的關係如圖十九所示，其關係是線性的，這結果表示蝕刻深度與開孔大小之間的關係亦是線性的。因此，半色調光罩在開孔週期小於 $10\mu\text{m}$ 時是可以用來展示灰階度的，而如同上段所述，當開孔週期大於 $10\mu\text{m}$ ，而小於 $20\mu\text{m}$ 時，我們預期仍可以展示灰階度。我們將於下一階段的實作進行驗證。

準分子雷射灰階實作

1. 光罩的設計

光罩的設計依循之前的模擬，採用 pulse-width modulation 編碼法，亦即我們固定光罩上開孔的週期但改變開孔的大小，藉由不同的開口率變化來調變灰階度，但是實作光罩卻需要更進一步詳細的考慮，其考量因素如下：

- (1) 最小線寬：在考量最小線寬時需同時考慮 dark 和 clear 的區域，如圖二十圖示，因此在設計光罩時要避免開口率過大導致 dark 部分的線條小於最小線寬，使得我們所預期的連續性通光量變化無法確實產生，造成實作上的誤差。



圖二十、最小線寬分佈圖

(2) 製作光罩的製程精確度：由於製作光罩有其一定的製程精確度，因此相鄰兩階間其開孔的大小差值應有其製程上的最小值，因此雖然由理論上開口率（對應通光量）可做完全連續的調變，然而在實作上卻是行不通的。

因此在光罩的製作上我們請台灣光罩公司代為製作，採用其 Grade A 的製程條件，最小線寬與製程精確度分別為：

$$1\mu\text{m} < \text{CD}(\text{critical dimension}) < 3\mu\text{m}$$

$$\text{Tolerance} = \pm 0.2\mu\text{m}$$

因此綜合了所有的製程條件，我們設計了兩組灰階光罩，其參數分別如表三所示：

表三、光罩設計參數

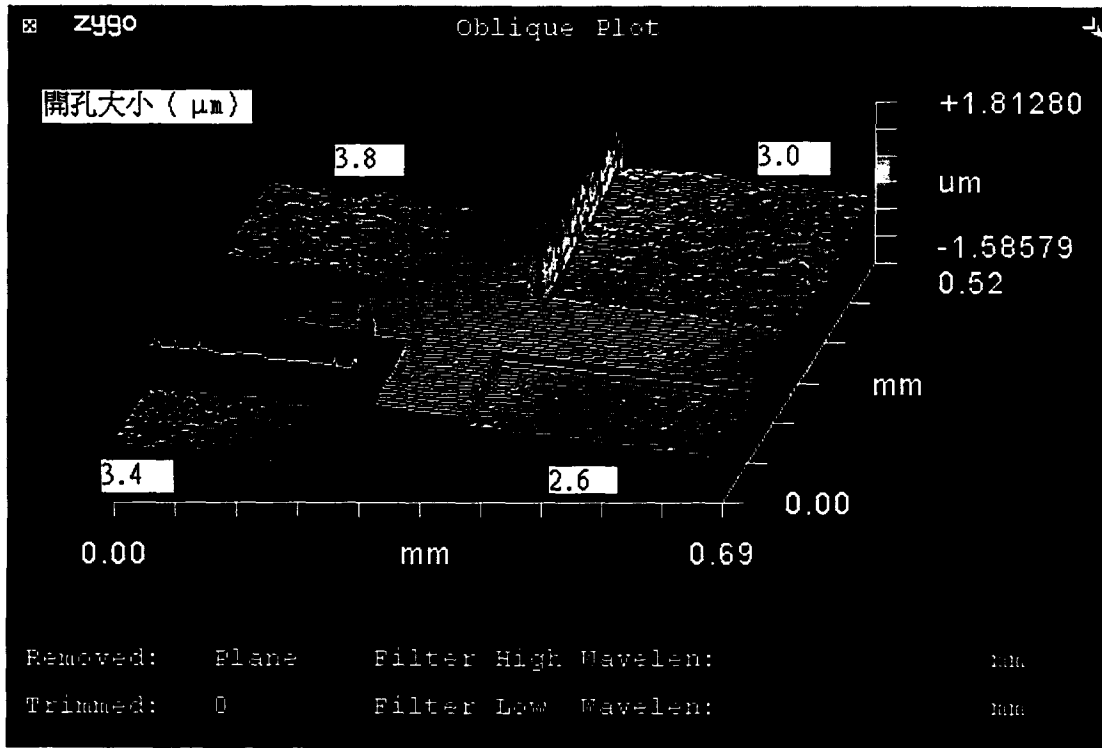
開孔週期5 μm											
灰階數	1	2	3	4	5	6	7	8			
開孔大小(μm)	1	1.4	1.8	2.2	2.6	3	3.4	3.8			
開孔週期6 μm											
灰階數	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
開孔大小(μm)	1	1.4	1.8	2.2	2.6	3	3.4	3.8	4.2	4.6	5

當開孔週期固定為5 μm 時，我們將開孔的大小由1 μm 增加至3.8 μm ，每次增加0.4 μm ；當開孔週期固定為6 μm 時，我們將開孔的大小由1 μm 增加至5 μm ，每次增加0.4 μm 。

2. 實驗的結果

經過國科會精密儀器發展中心準分子雷射微加工系統實驗的結果如圖二十一所示，此表面結構是利用精密儀器發展中心的光學干涉儀 Zygo 所量測的結

果，此時我們所選擇的雷射能量為 400mJ/pulse，衰減器值為 0.8，加工脈衝數為 20，雷射重複率為 20，並固定開孔週期為固定 5 μm ，而表四為開孔大小與蝕刻深度之對應表。



圖二十一、週期為 5 μm 之 4 階灰階實驗量測結果

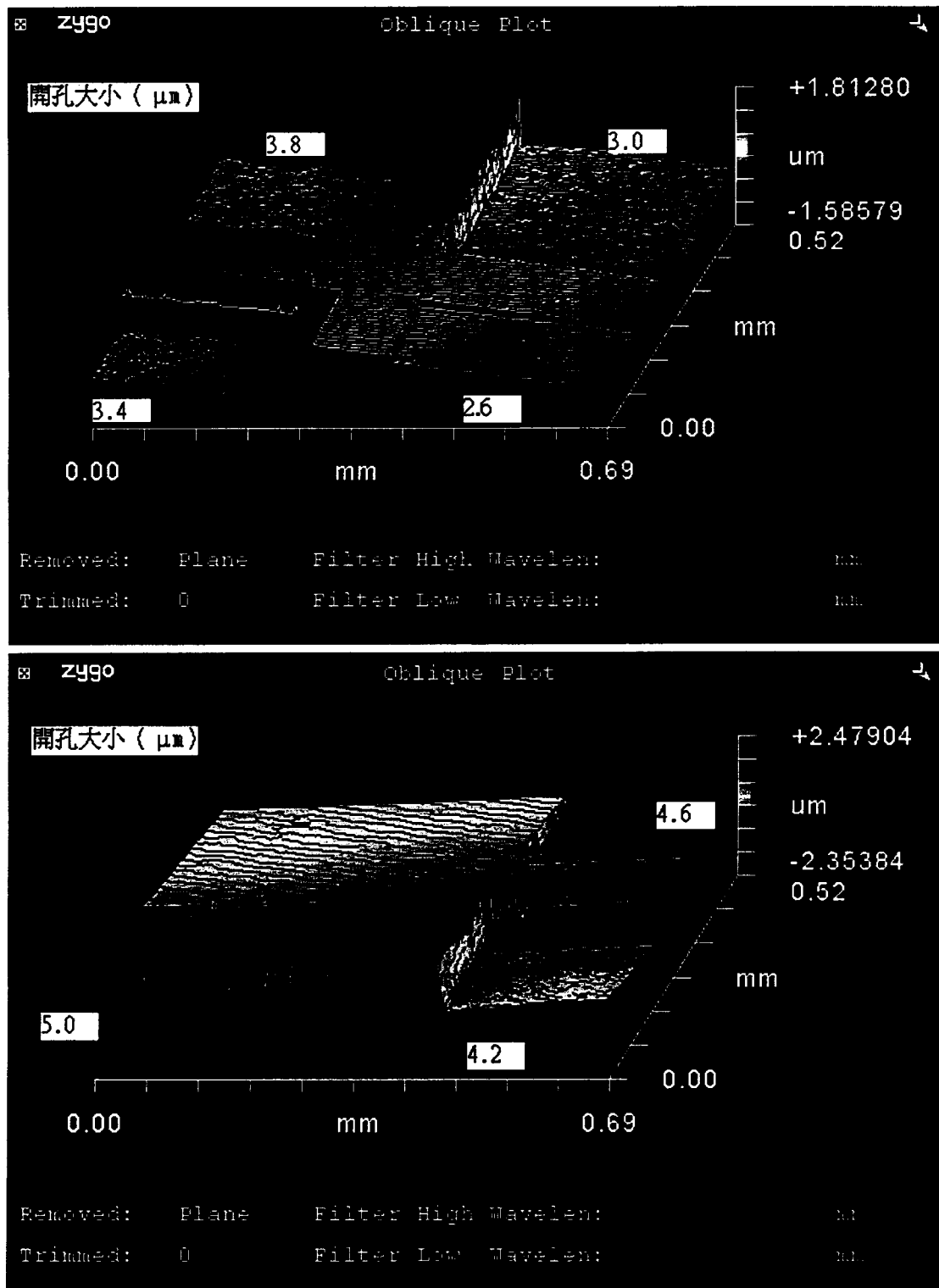
表四、週期為 5 μm 之開孔大小與蝕刻深度之對應表

開孔週期 (5 μm)	
開孔大小 (μm)	蝕刻深度(nm)
1	0
1.4	0
1.8	0
2.2	0
2.6	117.27
3	686.51
3.4	1198
3.8	1778

由實驗之量測結果(圖二十一)我們可以明顯地看到準分子雷射微加工系統的光學成像系統確實能有效地將空間頻率中的高頻訊號濾去，因此我們可得到四階十分平整的灰階變化，而且由表四可清楚的顯現加工的深度隨著開孔的大小逐漸地增加。然而在此我們並沒有展示開孔大小從 1 μm 至 2.2 μm 的實驗結果圖，因為這個區段的開孔根本無法在聚碳酸脂(Polycarbonate)上加工到達可量

測的深度，其原因我們將在稍後說明。

另外，當開孔週期固定為 $6\mu\text{m}$ 時，實驗結果如圖二十二所示，而表五為開孔大小與蝕刻深度之對應表。



圖二十二、開孔週期為 $6\mu\text{m}$ 之六階灰階變化之量測結果

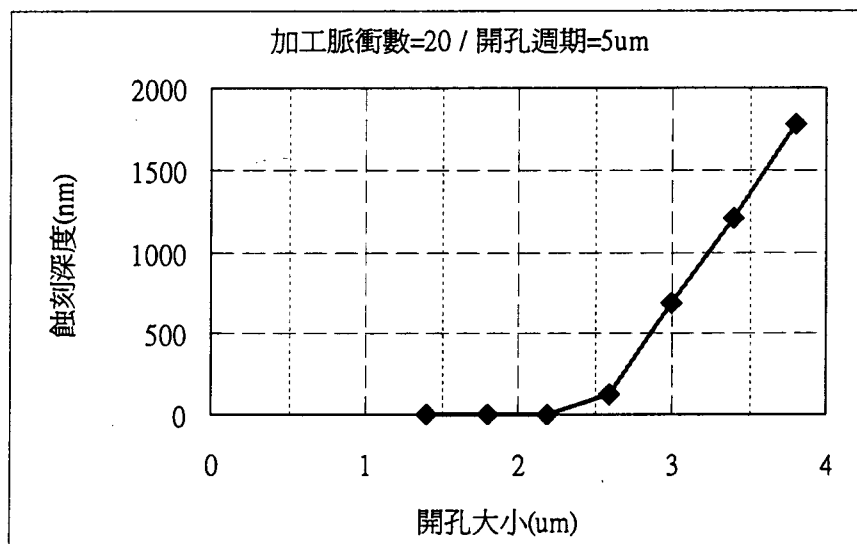
表五、開孔週期為 6 μm 之開孔大小與蝕刻深度之對應表

開孔週期 (6 μm)	
開孔大小 (μm)	蝕刻深度(nm)
1	0
1.4	0
1.8	0
2.2	0
2.6	0
3	0
3.4	378.5
3.8	888.94
4.2	1415
4.6	1819
5	2240

由實驗之量測結果 (圖二十二) 我們可以得到與先前類似的結果, 準分子雷射微加工系統的光學成像系統確實能有效地將空間頻率中的高頻訊號濾去, 因此我們可得到六階十分平整的灰階變化, 而且由表五可瞭解到加工的深度隨著開孔的大小逐漸地增加。然而同樣的, 在此我們並沒有展示開孔大小從 1 μm 至 2.6 μm 的實驗結果圖, 因為這個區段的開孔根本無法在聚碳酸酯 (Polycarbonate) 上加工到達可量測的深度。

3. 實驗結果的分析

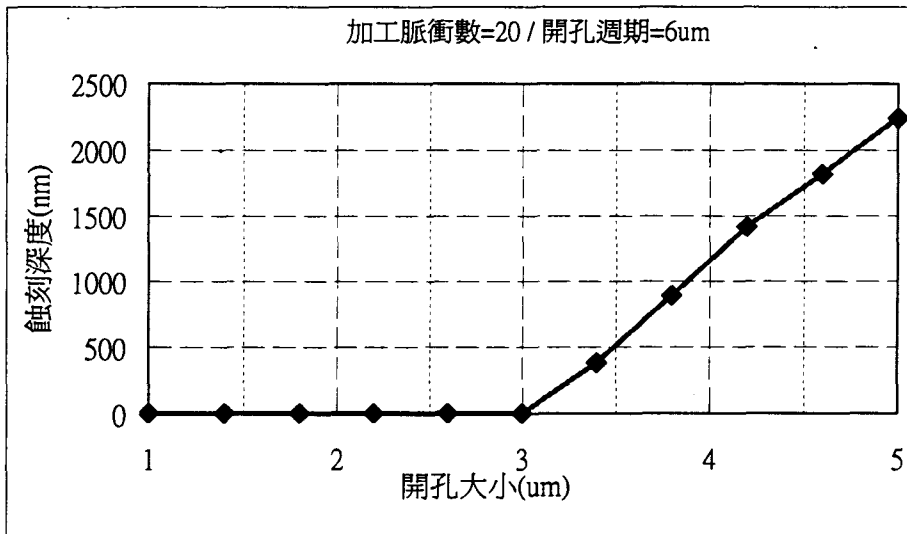
我們分析 PC 基版的蝕刻深度與開孔大小之間的關係, 因此我們將其關係繪製成曲線圖, 當週期為 5 μm 時, 其結果如圖二十三所示:



圖二十三、開孔週期為 5 μm 時蝕刻深度與開孔大小的關係

由圖二十三我們可以看出當開孔大小大於 $2.6\mu\text{m}$ 時蝕刻深度與開孔大小之間幾乎呈現線性的關係，此關係對於設計光學元件時提供相當大的便利性，然而唯一美中不足的是可調變的灰階變化只有四階。

當週期為 $6\mu\text{m}$ 時，其結果如圖二十四所示：



圖二十四、開孔週期為 $6\mu\text{m}$ 時蝕刻深度與開孔大小的關係

由圖二十四我們可以看出當開孔大小大於 $3\mu\text{m}$ 時蝕刻深度與開孔大小之間幾乎呈現線性的關係，相同的，此關係將在未來當我們要設計光學元件時提供相當的便利性，而灰階度只有六階。

然而是什麼原因使得開孔週期為 $5\mu\text{m}$ 時，開孔大小從 $1\mu\text{m}$ 至 $2.2\mu\text{m}$ ，及當開孔週期為 $6\mu\text{m}$ 時，開孔大小從 $1\mu\text{m}$ 至 $2.6\mu\text{m}$ 準分子雷射無法有效地對 PC 基版進行加工？歸究其原因我們發現，事實上準分子雷射其加工之最小能量有其一定的最小臨界值，而且不同的加工工件及加工波長有不同的臨界值，以 248nm 波長之雷射光與 PC 基版而言，其最小加工能量臨界直為 $0.12\text{J}/\text{cm}^2$ 。我們將實際計算準分子雷射的臨界值是否接近此值。首先，我們由精密儀器發展中心得到了準分子雷射加工系統中衰減器(attenuator)與雷射穿透率的關係，如表六所示，並將其結果繪製成圖二十五，因此，由表七可知當衰減值為 0.8 時，穿透率約為 0.013 ，故當開孔週期為 $5\mu\text{m}$ 開孔大小為 $2.2\mu\text{m}$ 時在基版上的最大加工能量密度(尚未考慮繞射)為：

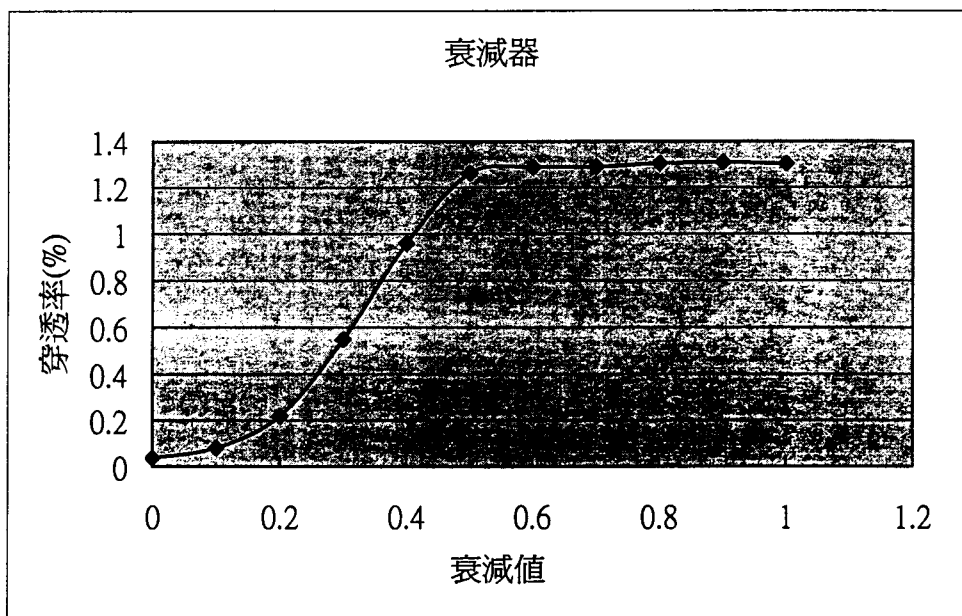
$$\begin{aligned} & \text{加工能量} * \text{穿透率} * \text{開口率} / \text{加工面積} \\ & = 400\text{mJ} * 0.013 * (2.2\mu\text{m}/5\mu\text{m}) / (0.12\text{cm})^2 = 158.89 \text{ mJ}/\text{cm}^2 \end{aligned}$$

而當開孔週期為 $5\mu\text{m}$ 開孔大小為 $2.6\mu\text{m}$ 時基版上的最大加工能量密度(尚未考慮繞射)為： $97.5 \text{ J}/\text{cm}^2$ ，此兩個結果是初估，若要更精確的計算必須考慮繞射

的損失及其他任何儀器所造成的雷射光的損失，但是由此計算我們幾乎可以確定開孔小時無法加工的原因便是由於加工的雷射光強度小於臨界值所造成的，因此為了有效的設計我們所需的光學元件，如何準確且有效的估計其最小臨界能量，便是我們可否準確的設計光學元件的一個關鍵。

表六、當雷射能量為 400mJ 時，穿透能量(率)與衰減值的關係

衰減值(0~1)	穿透能量 (mJ)	穿透率 (%)
0	0.146	0.0365
0.1	0.325	0.08125
0.2	0.875	0.21875
0.3	2.195	0.54875
0.4	3.835	0.95875
0.5	5.045	1.26125
0.6	5.15	1.2875
0.7	5.155	1.28875
0.8	5.215	1.30375
0.9	5.23	1.3075
1	5.21	1.3025

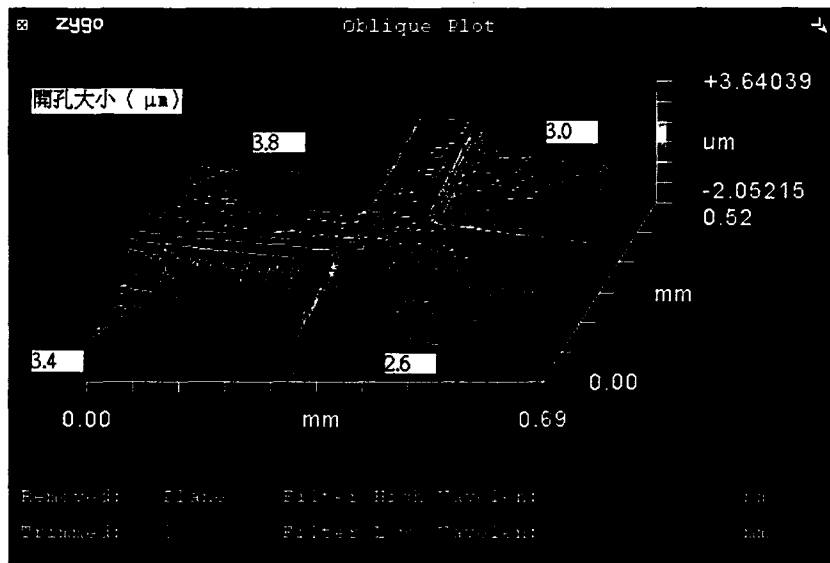


圖二十五、衰減值與穿透率的關係

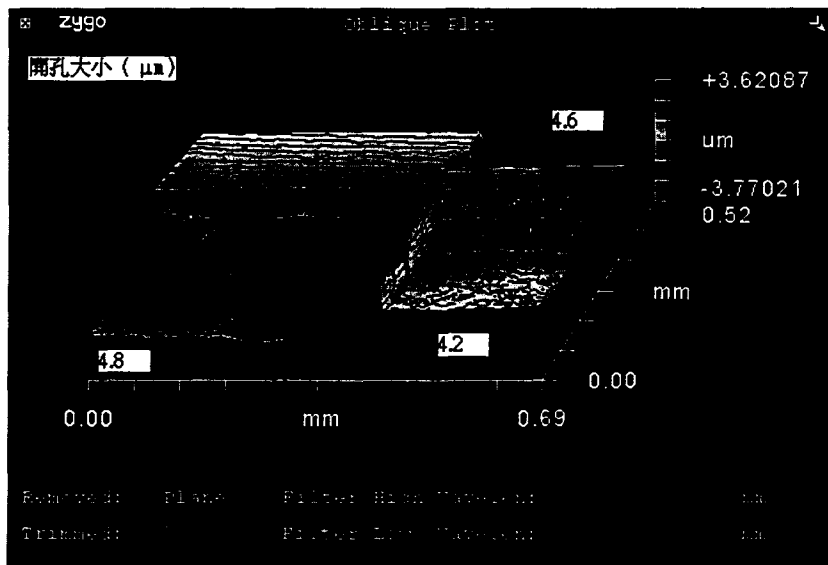
4. 加工脈衝數與加工深度的關係

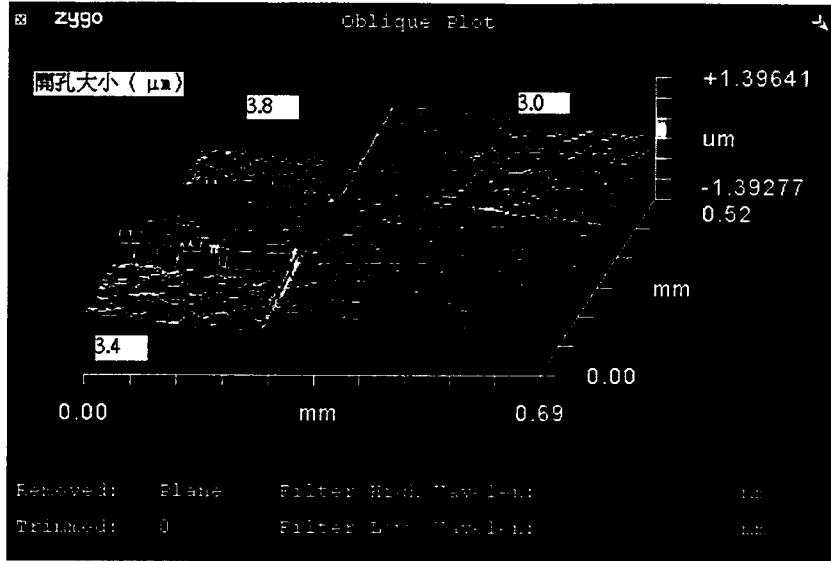
在確定灰階光罩的可行性後我們進行準分子雷射在不同加工脈衝數時對蝕刻深度的影響，因此我們改變雷射脈衝數由原先的 20 依序提升至 40、60、80，

而實驗的結果如圖二十六所示:

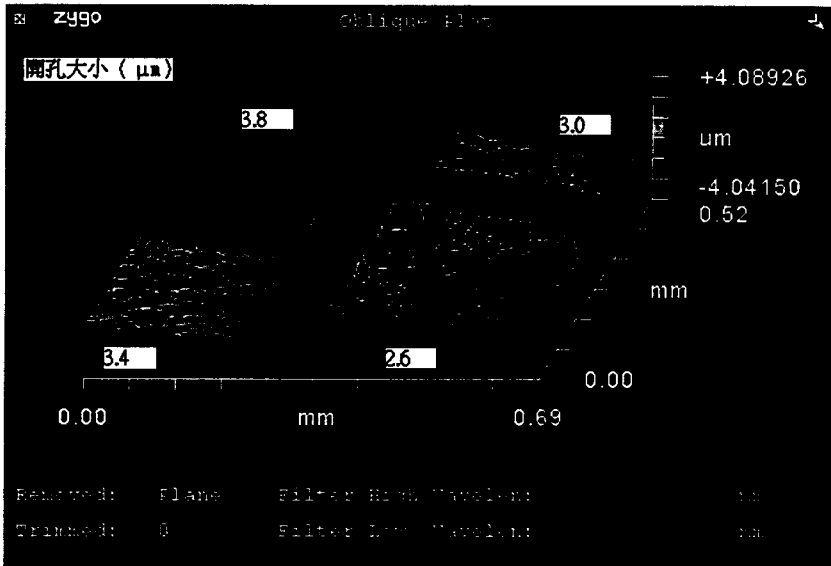


(a) 週期為 $5\mu\text{m}$ ，加工脈衝數為40之4階灰階實驗量測結果

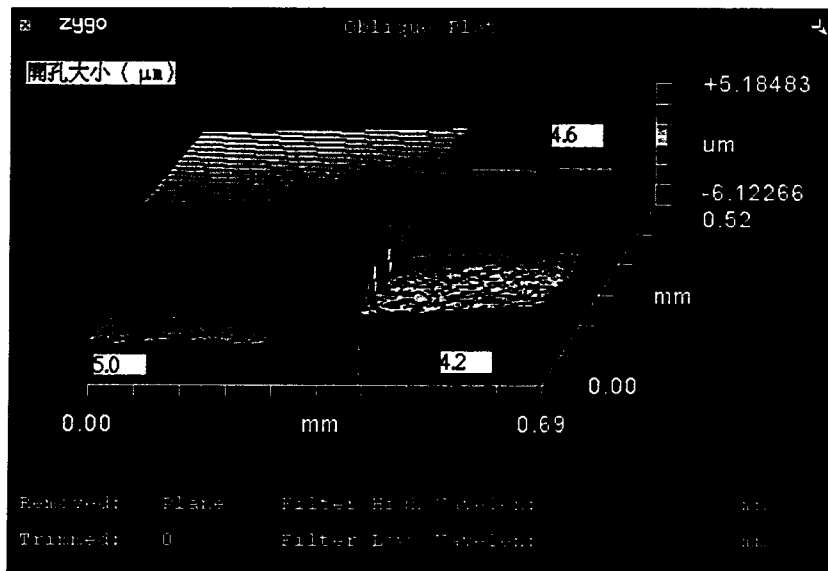


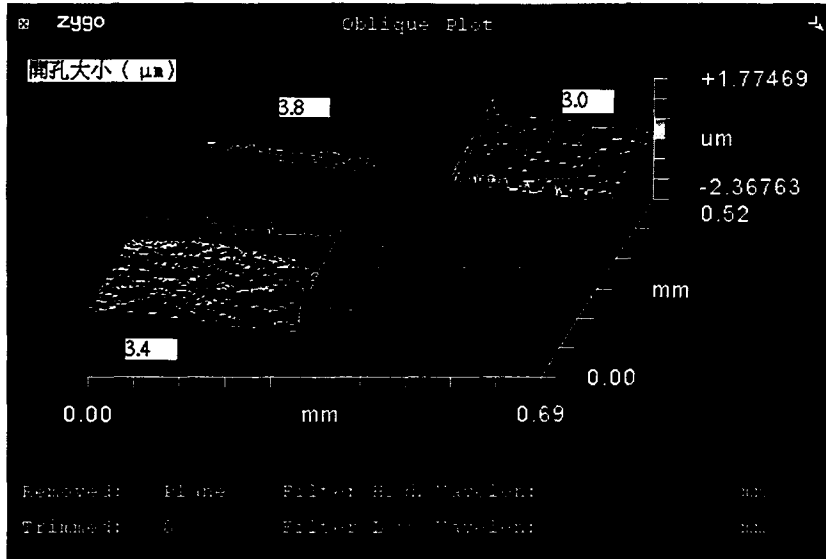


(b) 週期為 $6\mu\text{m}$ ，加工脈衝數為 40 之 6 階灰階實驗量測結果

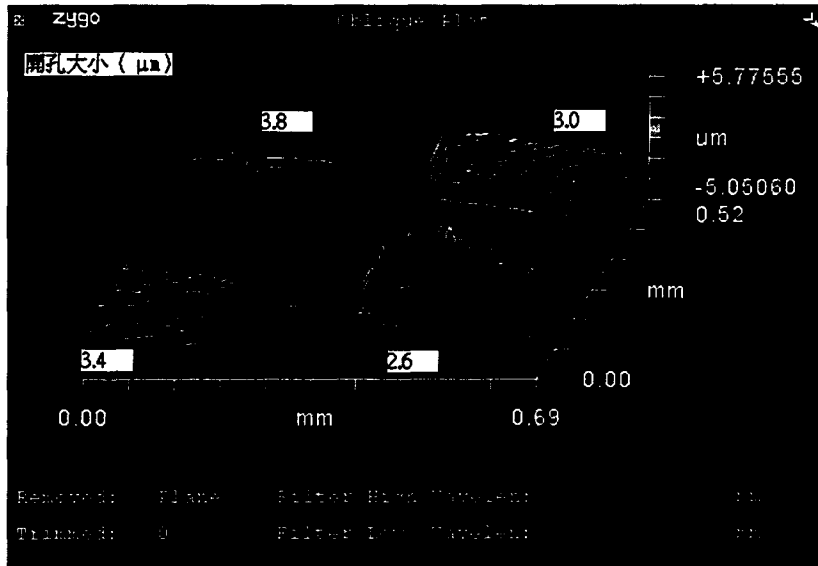


(c) 週期為 $5\mu\text{m}$ ，加工脈衝數為 60 之 4 階灰階實驗量測結果

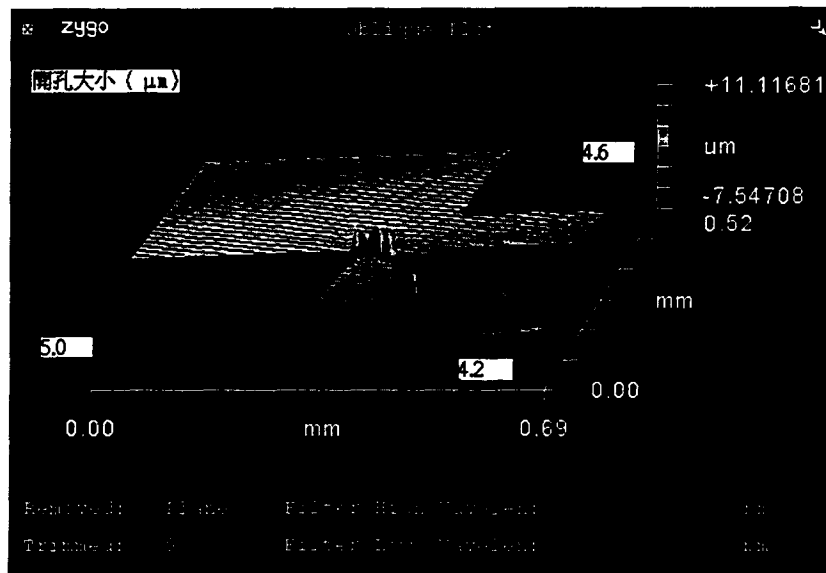


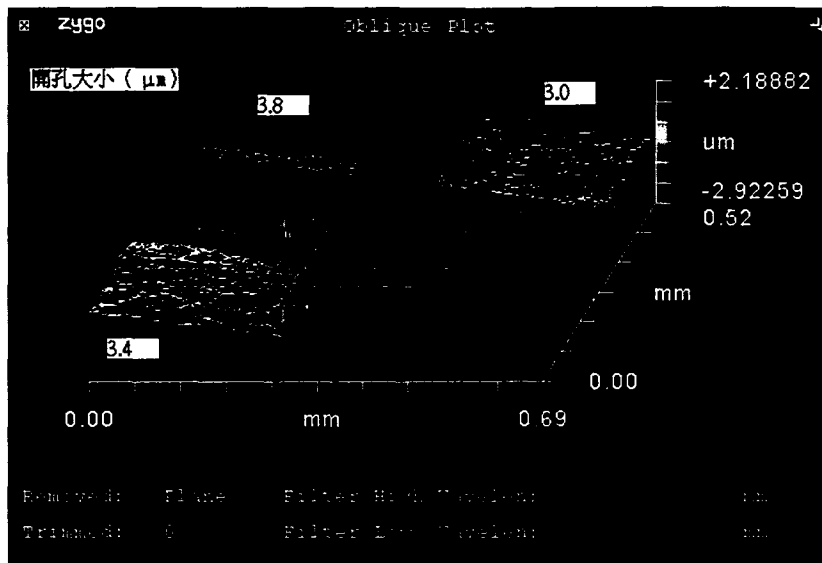


(d) 週期為 $6\mu\text{m}$ ，加工脈衝數為 60 之 6 階灰階實驗量測結果



(e) 週期為 $5\mu\text{m}$ ，加工脈衝數為 80 之 4 階灰階實驗量測結果





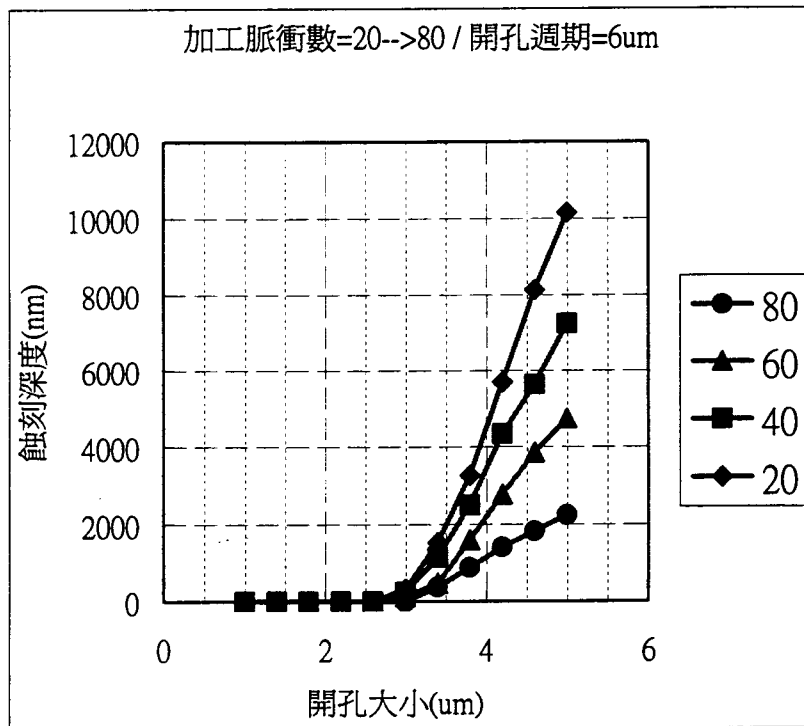
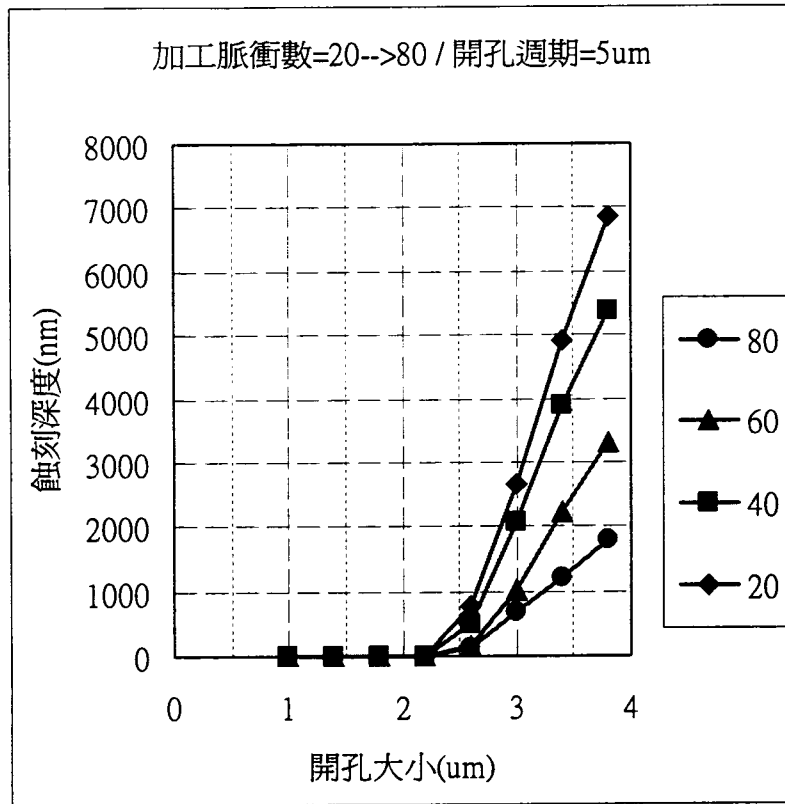
(f) 週期為 $6\mu\text{m}$ ，加工脈衝數為 80 之 6 階灰階實驗量測結果
圖二十六、加工脈衝數為 40、60、80 之灰階變化量測結果

由圖二十六我們可以看到在不同的加工脈衝數下，仍然可以形成十分平整的灰階變化，亦即都還是灰階光罩的可適用工作範圍，我們並將整個灰階的變化情形整理成表七，並且將未達雷射加工臨界值的結果去除，如表六所示。而且由表七我們可以看到加工深度隨著開孔的增加而持續加深，而且加工深度亦隨著加工脈衝數的增加而增加。

表七、開孔大小與蝕刻深度之對應表

開孔週期 ($5\mu\text{m}$)	加工脈衝數=20	加工脈衝數=40	加工脈衝數=60	加工脈衝數=80
開孔大小 (μm)	蝕刻深度(nm)	蝕刻深度(nm)	蝕刻深度(nm)	蝕刻深度(nm)
2.6	117.27	156.38	502.372	776.344
3	686.51	1028	2060.104	2670.433
3.4	1198	2215	3890.37	4903.108
3.8	1778	3300	5365.723	6842.135
開孔週期 ($6\mu\text{m}$)	加工脈衝數=20	加工脈衝數=40	加工脈衝數=60	加工脈衝數=80
開孔大小 (μm)	蝕刻深度(nm)	蝕刻深度(nm)	蝕刻深度(nm)	蝕刻深度(nm)
3	0	123.246	245.22	325.805
3.4	378.5	470	1146.07	1523.371
3.8	888.94	1595.523	2494.327	3249.045
4.2	1415	2765.411	4335.194	5689.001
4.6	1819	3844.702	5630.39	8128.958
5	2240	4732.637	7242.184	10155.847

並藉由表七我們可製作出開孔大小與蝕刻深度之關係圖如圖二十七所示：



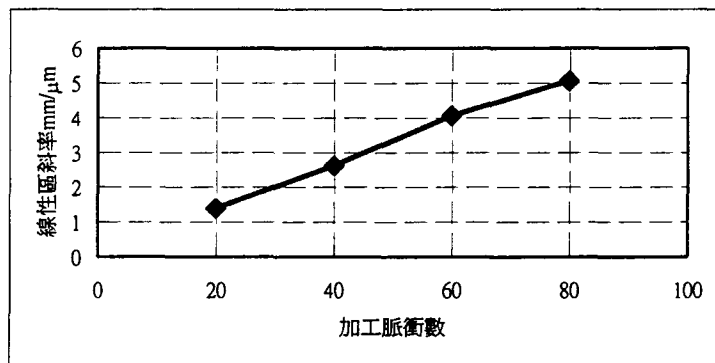
圖二十七、開孔週期分別為 5 μ m 與 6 μ m 時，在不同加工脈衝數下開孔大小與蝕刻深度之關係

由圖二十七可知不論加工脈衝數為 20、40、60 或 80，當週期為 5 μ m 時，只

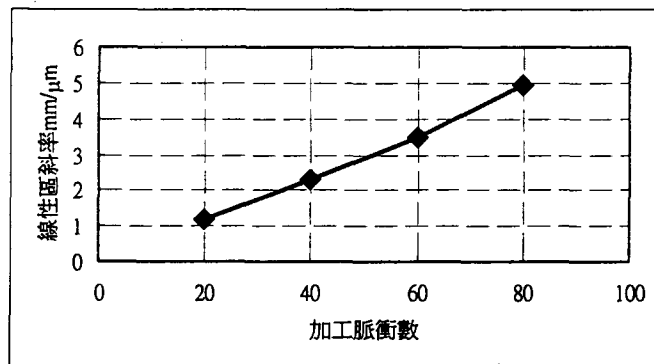
要開孔大小大於 $2.6\mu\text{m}$ ，或當開孔週期為 $6\mu\text{m}$ 時，只要開孔大小大於 $3.0\mu\text{m}$ ，則開孔大小與蝕刻深度之間為幾乎呈現線性的關係，並且各有四階與六階的灰階度。這是一個相當不錯的結果，因為這代表當我們依照開孔大小與蝕刻深度的線性關係設計光罩後，如欲改變元件的“寬高比”或“深寬比”，將不需要重新製作光罩，只需調變加工的脈衝數，即可製作我們所需的光學元件。以雙菱鏡為例，如果我們只欲修改其斜面的斜率，但不修改元件的寬度，我們便可藉由調整加工脈衝數來達成斜率上的改變，因此，利用準分子雷射加工技術來製作光學元件不但可以降低製作的成本與風險，還增加了製作上的便利性。此外，我們更進一步整理出雷射加工線性區之斜率與雷射加工脈衝數的關係，其相對應的關係如表八所示，並將其繪製成圖，其結果如圖二十八所示：

表八、加工脈衝數與線性區斜率之對應表

開孔週期 $5\mu\text{m}$		開孔週期 $6\mu\text{m}$	
加工脈衝數	線性區斜率 $\text{mm}/\mu\text{m}$	加工脈衝數	線性區斜率 $\text{mm}/\mu\text{m}$
20	1.3839	20	1.1634
40	2.6197	40	2.3047
60	4.0528	60	3.4985
80	5.0548	80	4.915



(a) 開孔週期為 $5\mu\text{m}$



(b) 開孔週期為 $6\mu\text{m}$

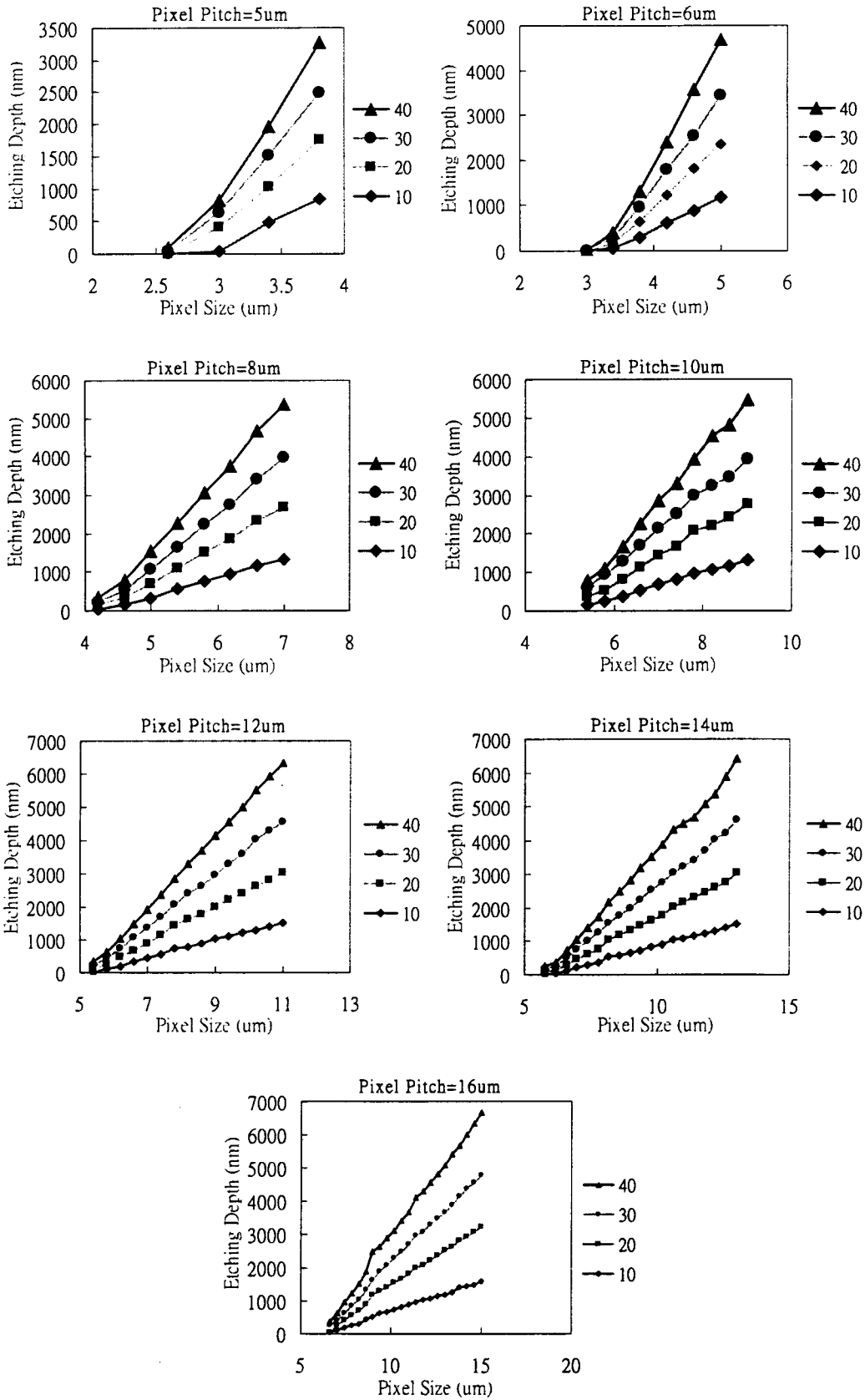
圖二十八、加工脈衝數與線性區斜率之關係圖

由圖二十八我們可以清楚的看出無論開孔週期為 $5\mu\text{m}$ 或 $6\mu\text{m}$ 加工脈衝數與線性區斜率之關係為幾乎呈現線性的關係，因此當我們欲修改元件之”寬高比”時，這樣的關係將使我們能夠很輕易的推測出加工脈衝數所需做的修正，便能完成元件的修改，這樣的線性關係能大幅地提升製作上的便利性，與修改上的彈性，是一個非常理想的結果。

此外，由於當我們固定開孔週期為 $5\mu\text{m}$ 與 $6\mu\text{m}$ 時，所能夠得到的灰階度只有四階與六階，對於設計連續曲面的光學元件而言，這樣的灰階度是不夠的，並且我們由先前的原理部分得知，當光罩的開孔週期大於系統的截止週期 $20\mu\text{m}$ 時，僅有 0 級與 1 級的空間繞射頻率可以進入準分子雷射的成像系統，因此，根據此截止週期，我們設計更多的開孔週期藉以製作出更多的灰階變化，其開孔變化如表九所示，設計光罩時仍滿足應當注意的條件，依序可產生 4~22 階不等的灰階變化。經過準分子雷射加工，在不同的開孔週期下，我們改變開孔大小與雷射脈衝加工次數，則實驗的結果如圖二十九所示：

表九、設計不同的開孔週期與灰階度的變化

	S(μm)																				#		
	2.6	3	3.4	3.8																			
P= $5\mu\text{m}$	2.6	3	3.4	3.8																	4		
P= $6\mu\text{m}$	3	3.4	3.8	4.2	4.6	5															6		
P= $8\mu\text{m}$	4.2	4.6	5	5.4	5.8	6.2	6.6	7													8		
P= $10\mu\text{m}$	5.4	5.8	6.2	6.6	7	7.4	7.8	8.2	8.6	9											10		
P= $12\mu\text{m}$	5.4	5.8	6.2	6.6	7	7.4	7.8	8.2	8.6	9	9.4	9.8	10.2	10.6	11						15		
P= $14\mu\text{m}$	5.8	6.2	6.6	7	7.4	7.8	8.2	8.6	9	9	9.8	10.2	10.6	11	11.4	11.8	12.2	12.6	13		19		
P= $16\mu\text{m}$	6.6	7	7.4	7.8	8.2	8.6	9	9.4	9.8	10	10.6	11	11.4	11.8	12.2	12.6	13	13.4	13.8	14.2	14.6	15	22



圖二十九、不同開孔週期時，蝕刻深度與開孔大小、加工脈衝次數的關係

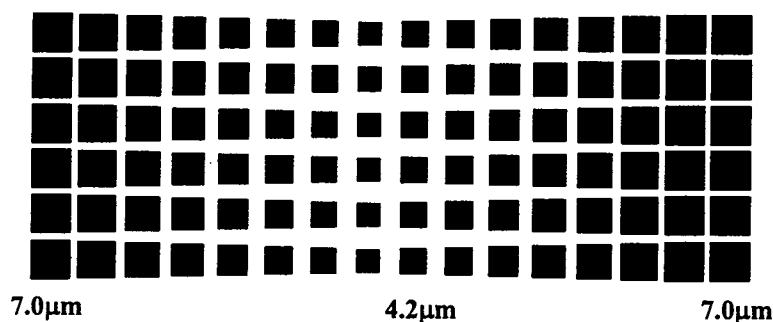
由實驗結果我們可以發現，在不同開孔週期下，蝕刻深度與開孔大小的關係都維持線性關係，並且我們可以發現蝕刻後的表面粗糙度幾乎都在 60nm 以內，皆滿足製作光學元件時，其表面粗糙度要小於四分之一加工波長，由於準分子雷射的波長為 248nm，因此四分之一的加工波長為 62nm，因此經過準分子雷射加工後的表面是相當平整，更符合我們在討論灰階光罩原理時所述，其成像系統將會把空間頻率中的高頻訊號濾掉，更者，當我們將開孔週期提高到 20 μm ，雖然會有 0 級與 1 級的繞射空間頻率進入系統，但是由實驗結果我們可以發現，加工後的平面仍然相當平整，因此我們確信其可以用來達成灰階變化，可以提供我們設計連續變化的光學元件。另外，當我們增加雷射脈衝次數由 10 次到 40 次時，蝕刻深度與開孔大小的關係仍然維持相當線性的變化，因此，我們可以輕易的改變所設計光學元件的寬高比。根據上述的結果我們可以知道，藉由增加開孔週期我們將可以得到更多且平整的灰階變化，而且蝕刻深度的線性變化更提供了我們製作光學元件的便利性，因此我們將著手設計一些簡單的光學元件。

元件的實作

既然灰階度能藉由發展的半色調光罩技術展示在 PC 基版上，並且加工深度與開孔大小間呈現線性關係，一些基本的微光學元件如雙稜鏡及微透鏡將藉由發展的漸變式灰階光罩設計並製作。

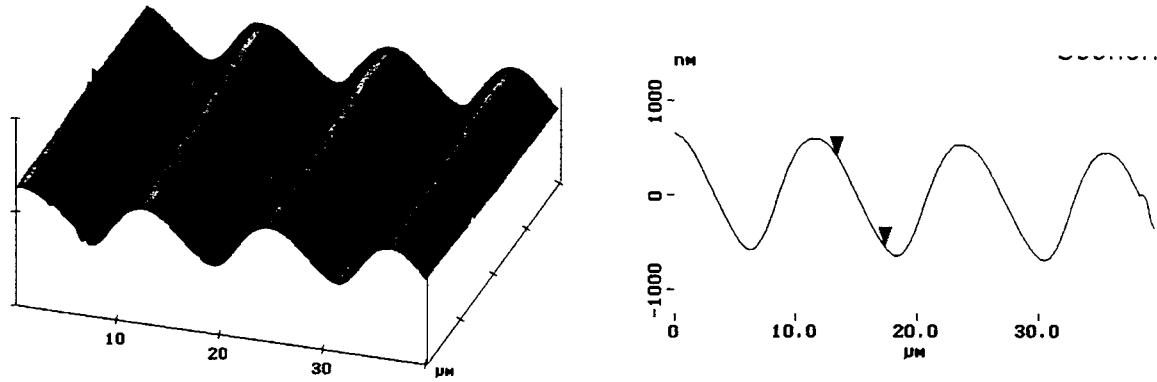
1. 雙稜鏡

雙稜鏡一般用途是折光、分光或光色散。根據灰階度的實驗結果我們設計出雙稜鏡的漸變式光罩如圖三十所示。而根據加工深度與開孔大小間的關係圖，製作出來的雙稜鏡其斜邊斜率應為 0.4。



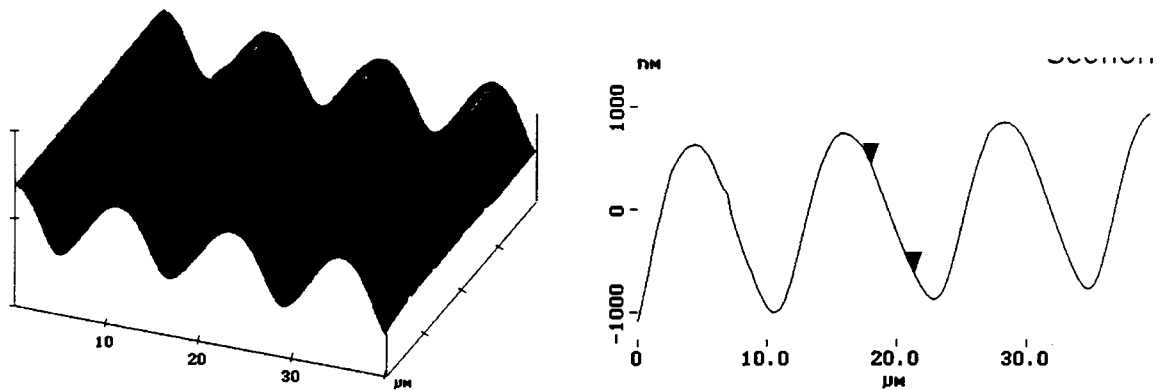
圖三十、雙稜鏡的光罩設計圖

首先我們採用 20 個雷射加工脈衝數，經過準分子雷射加工過後，利用 AFM (Atomic Force Microscope) 量測之 3D 立體圖與剖面圖如圖三十一所示：



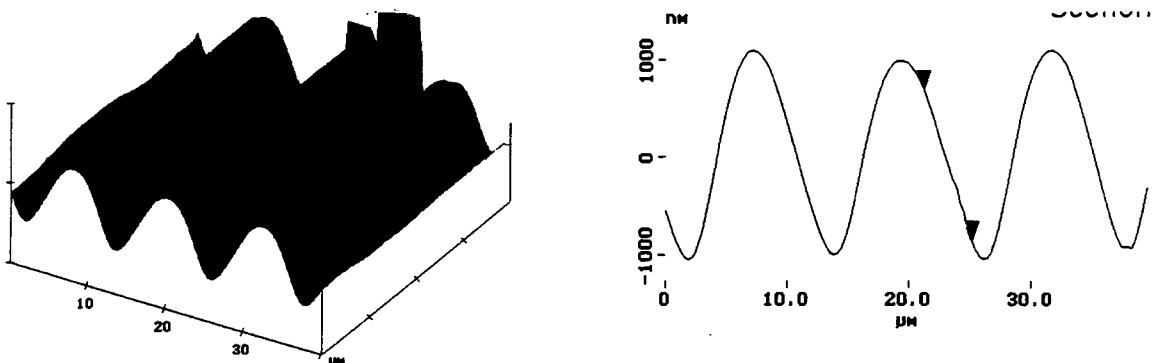
圖三十一、當雷射脈衝數為 20 時，利用發展的漸變式光罩製作出之雙稜鏡

實驗結果顯示雙稜鏡之斜邊斜率為 0.246 而非 0.4，此乃因為鄰近效應所造成的現象，而且其表面平整度只有 18.231nm 的 RMS 值。當我們增加雷射脈衝數至 40 時，實驗結果如圖三十二所示。



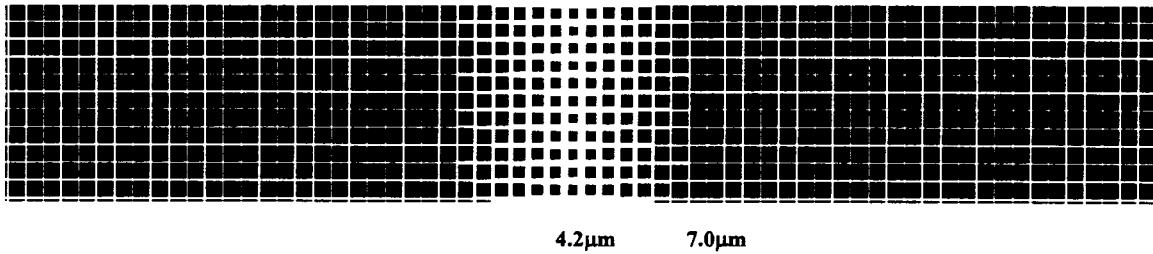
圖三十二、當雷射脈衝數為 40 時，利用發展的漸變式光罩製作出之雙稜鏡

實驗結果顯示雙稜鏡之斜邊斜率增加為 0.315，而且其表面平整度只有 54.56nm 的 RMS 值。當我們增加雷射脈衝數至 60 時，實驗結果如圖三十三所示。



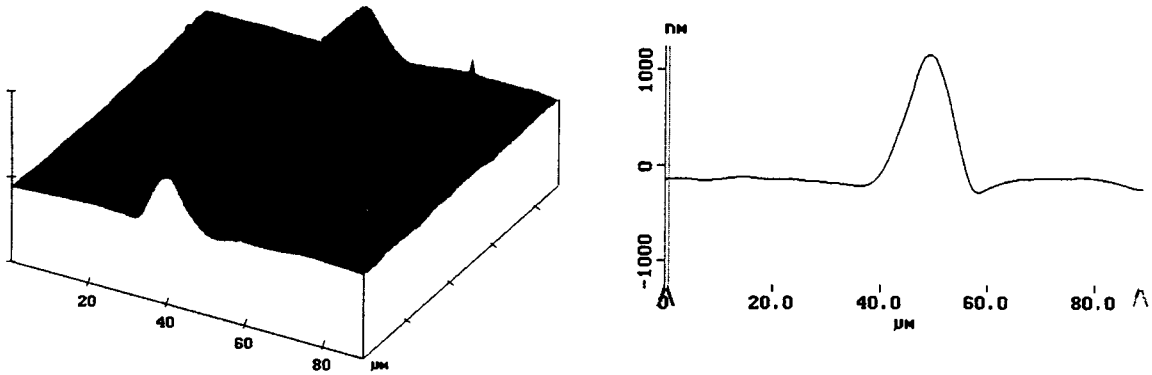
圖三十三、當雷射脈衝數為 60 時，利用發展的漸變式光罩製作出之雙稜鏡

實驗結果顯示雙稜鏡的斜率已有效地修正至 0.4，而且仍具可接受之表面平整度 38.423 的 RMS 值。此外，我們亦可製作出分離式雙稜鏡，其光罩設計如圖三十四所示。



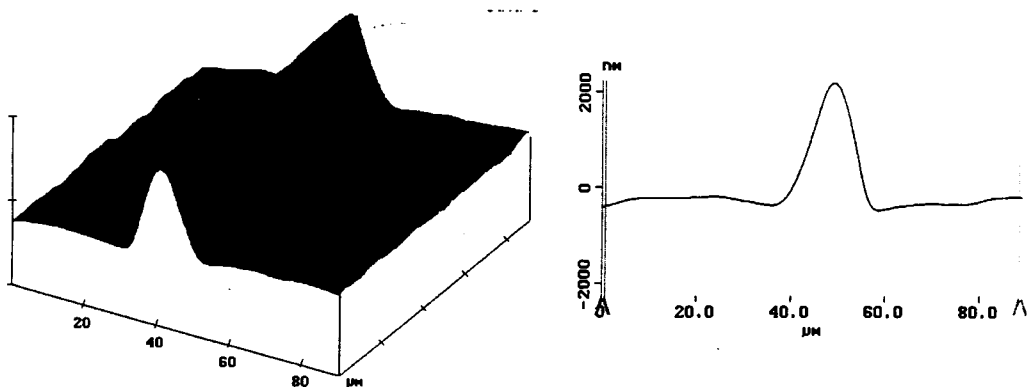
圖三十四、分離式雙稜鏡的光罩設計圖

首先我們採用 20 個雷射加工脈衝數，經過準分子雷射加工過後，利用 AFM (Atomic Force Microscope) 量測之 3D 立體圖與剖面圖如圖三十五所示：



圖三十五、當雷射脈衝數為 20 時，利用發展的漸變式光罩製作出之雙稜鏡

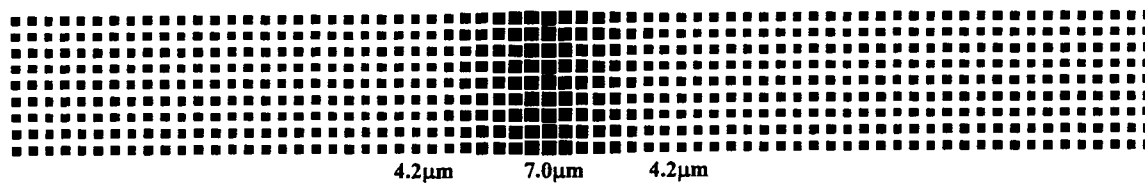
實驗結果顯示分離式雙稜鏡之斜邊斜率為 0.166 而非 0.4，此亦為鄰近效應所造成的現象，而且其表面平整度為 39.877nm 的 RMS 值。當我們增加雷射脈衝數至 40 時，實驗結果如圖三十六所示。



圖三十六、當雷射脈衝數為 20 時，利用發展的漸變式光罩製作出之雙稜鏡

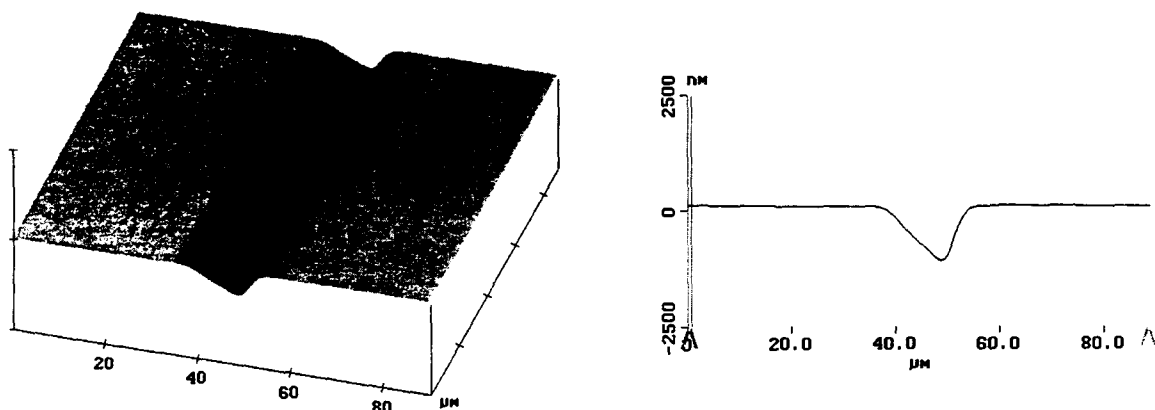
實驗結果顯示雙稜鏡之斜邊斜率增加為 0.307，而且其表面平整度為 42.793nm 的 RMS 值。當我們增加雷射脈衝數至 60 時，則其斜率可達到 0.4。

此外，我們亦可以設計出 V-cut 的光學結構，其光罩設計如圖三十七圖所示：



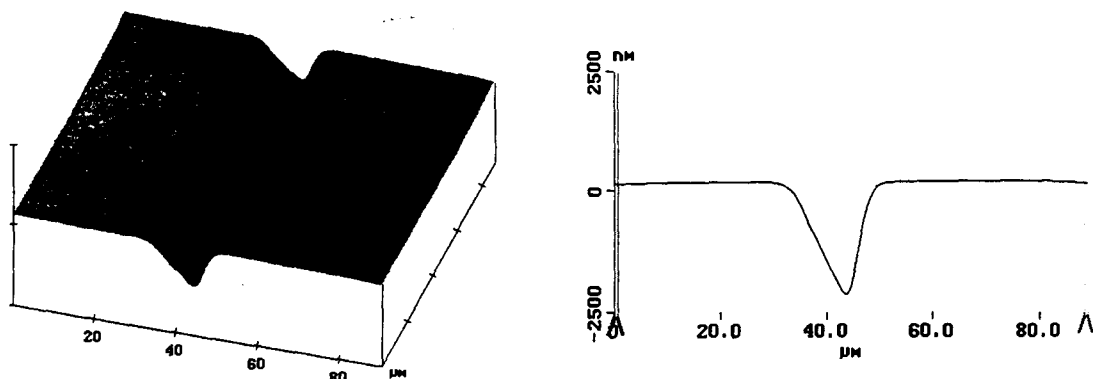
圖三十七、V-cut 的光罩設計圖

首先我們採用 20 個雷射加工脈衝數，經過準分子雷射加工過後，利用 AFM (Atomic Force Microscope) 量測之 3D 立體圖與剖面圖如圖三十八所示：



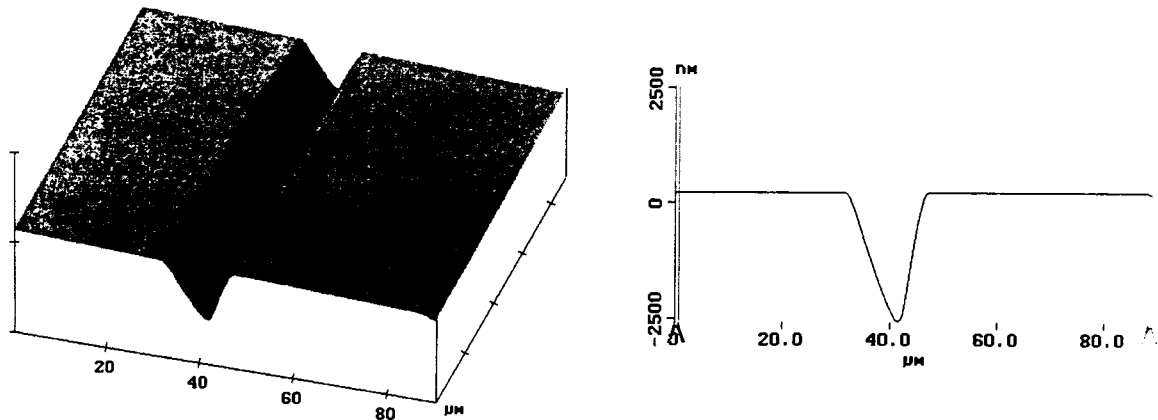
圖三十八、當雷射脈衝數為 20 時，利用發展的漸變式光罩製作出之 V-cut

實驗結果顯示分離式雙稜鏡之斜邊斜率為 0.18 而非 0.4，此亦為鄰近效應所造成的現象，而且其表面平整度為 23.323nm 的 RMS 值。當我們增加雷射脈衝數至 40 時，實驗結果如圖三十九所示。



圖三十九、當雷射脈衝數為 40 時，利用發展的漸變式光罩製作出之 V-cut

實驗結果顯示雙稜鏡之斜邊斜率增加為 0.336，而且其表面平整度為 36.431 的 RMS 值。當我們增加雷射脈衝數至 60 時，實驗結果如圖四十所示。

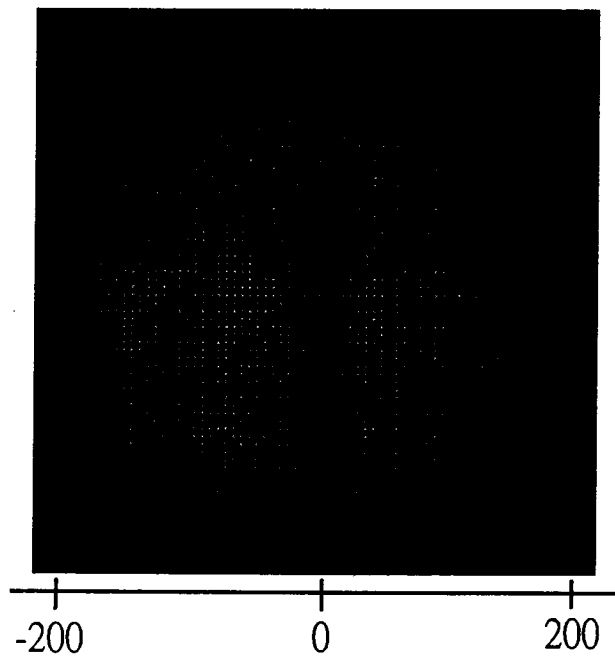


圖四十、當雷射脈衝數為 60 時，利用發展的漸變式光罩製作出之 V-cut

實驗結果顯示雙稜鏡的斜率已有效地修正至 0.4，而且仍具可接受之表面平整度 18.231 的 RMS 值。

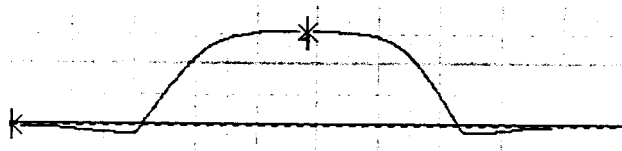
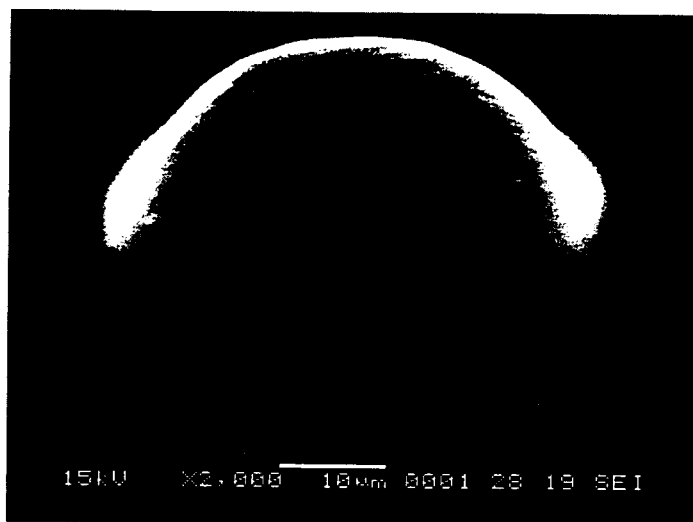
2. 微透鏡與微透鏡陣列

微透鏡一般具有聚焦的效果，我們亦展示微透鏡的設計與製作。微透鏡的光罩設計如圖四十一所示，我們將微透鏡區分為數個區域，並在每個區域依據灰階度的實驗結果置入適當的開孔大小。



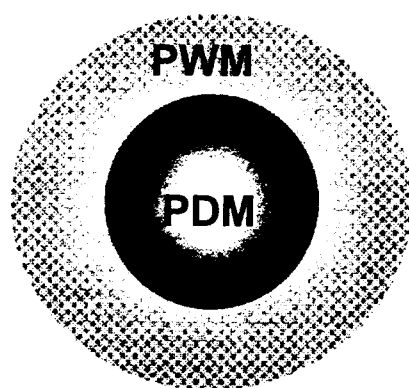
圖四十一、微透鏡的光罩設計

在經過準分子雷射加工後，微透鏡如圖四十二所示以製作完成，3D 俯視圖是 SEM (Scanning Electron Microscope) 的量測結果，而剖面圖是利用 3D PROFILE 量測。



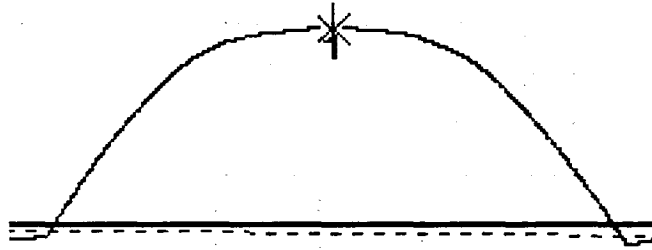
圖四十一、微透鏡

實驗結果顯示微透鏡之頂部太過平坦，這是由於灰階度的不足，因此我們更進一步增加灰階度並在一個微透鏡設計中結合網點大小調變法與網點密度調變法，如圖四十二所示。



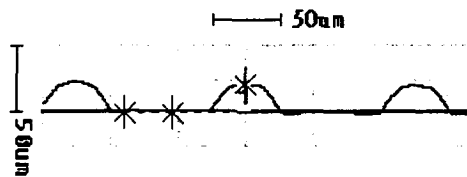
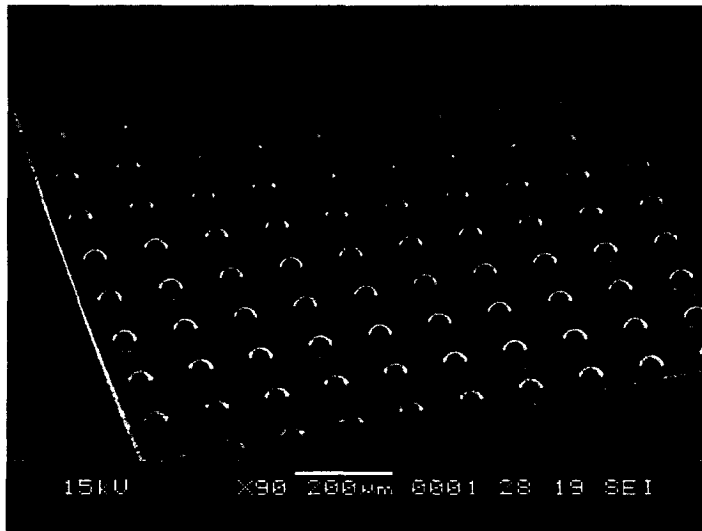
圖四十二、改進的微透鏡設計

經過準分子雷射加工後，實驗的結果如圖四十三所示，改進後的微透鏡已獲大幅度改善並已接近一半徑為 $20\mu\text{m}$ 之半圓。



圖四十三、改進後的微透鏡

我們更可以進一步的去設計微透鏡陣列，而其結果經由 SEM 量測可以得到如圖四十四所示：



圖四十四、微透鏡陣列

結論

在機台的限制與考慮需有光學成像系統的狀況下，我們採用了國科會精密儀器發展中心的準分子雷射微加工系統。由實驗的結果可知準分子雷射微加工系統確實能將高空間頻率的訊號濾出成像系統，使得每一階的加工面都十分的平坦，而且設計的灰階光罩確實能將入射光做灰階度的調變，使的不同的灰階度具有不同的加工深度。由實驗的結果判斷，當開孔週期過小時將使得雷射加工能量小於

最小加工能量的臨界值，而無法加工，因此造成當開孔週期為 $5\mu\text{m}$ 時，可獲得四階的線性區，而當開孔週期為 $6\mu\text{m}$ 時有四階的線性區，此線性的結果將使未來在設計光學元件時獲得相當的便利性。而另外加工脈衝數與線性區斜率之線性關係（如圖十九所示）將使得元件的”寬高比”能依使用上的需求做適度的調整，而且在調整加工脈衝數時將十分容易依線性的關係計算出所需的修正量，如此一來不但能大幅提昇灰階光罩的實用性，還能降低製程的成本與風險。

我們更成功的製作出漸變式灰階光罩，並結合準分子雷射微加工系統之技術。利用此技術我們可以僅只一道的漸變式光罩直接地在 PC 基板上製作出具有連續而平滑之表面的微光學元件。因此利用此技術可以大幅地降低如在傳統半導體中利用多道光罩、多次曝光顯影、蝕刻來製作微光學元件的繁複製程，並減少在多次半導體製成中所導入的對準誤差並獲得較高的光學效率。另外此技術比起 HEBS 光罩法較為經濟實用。而從模擬以及實驗的結果中，我們發展出一套方便而可靠的方式以設計漸變式光罩以製作可具任意外型的微光學元件，利用此方法設計出來的漸變式灰階光罩已成功地製作出雙稜鏡以及微透鏡等微光學元件。而製作出來的微光學元件其表面平整度之方均根值可達到在小於四分之一的波長程度，因此製作出之元件將可提供相當好的功能與光學效率。根據應用上的需求我們可以設計半色調光罩來製作出所需的元件，元件的大小可以從數百微米到數微米，和通用的高深寬比。未來我們將試著將製作出來的光學元件應用至不同的領域，使我們發展的技術能夠真正的被使用。

未來研究方向與目標

1. 更精確的掌握製程參數，使我們能更精確快速的設計並製作我們所需的光學元件。
2. 設計更多的微光學元件，並延伸其應用範圍至顯示器技術、光資訊儲存、光纖通訊及微機電等領域。
3. 利用準分子雷射微加工系統為曝光系統，PMMA 或其他光阻(如 AZ4620)來進行微影的程序，以期我們製作光學元件的製程能達到與半導體製程相容，進而更擴展其應用範圍。
4. 希望藉由對加工機台的熟悉能製作出更多更大型的微光學元件，並且進一步進行微光學元件之量測與誤差分析。