

以數位光學斜掃描為基礎之 無光罩微影技術應用於 大面積任意圖形三維微結構之製作

本研究的主題是如何在一光阻 (Photoresist; PR) 層上以曝光與顯影的方式製作出大面積的三維微結構，方法是使用一種以數位微反射鏡裝置 (Digital Micro-mirror Device; DMD) 為基礎的無光罩式微影技術，可以精準調控投射在光阻層上的紫外光劑量。該系統搭配光點陣列的斜掃描以及紫外光源的閃爍，利用所開發之跳躍式斜掃描演算法 (Obliquely Scanning and Step Strobe-lighting; OS³L)，針對任意表面形貌之獨立三維微結構建立一套數值迭代模擬演算法，以求得正確的曝光劑量。另外，針對高填充率之週期性三維微結構，則是使用反卷積 (Deconvolution) 的數學計算求得正確的曝光劑量分佈。本研究成功在曝光面積為 $200 \times 160 \text{ mm}^2$ 的正光阻上，製作出軸對稱 / 非軸對稱之三維微結構。並在正光阻上製作面積為 $35 \times 30 \text{ mm}^2$ 和 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 的週期性三維微結構，同時結合熱回流技術 (Thermal Reflow) 大幅降低微結構陣列表面之粗糙度，能夠應用於光學元件或製造鍍模具供大規模生產背光顯示的導光板。

■ 朱峰毅、李永春

關鍵詞：無光罩微影、斜掃描、數值迭代模擬演算法、反卷積

微影曝光，又稱光學曝光或紫外光曝光，是近幾十年來半導體積體電路製造和量產中應用最廣泛的曝光技術。一般來說，微影曝光可以區分為有光罩式與無光罩式曝光這兩種技術。隨著時代的演進，對圖案靈活性和快速原型製作的需求也正在增長，例如：MEMS 元件、IC 基板和生物醫學晶片等。因此，更具靈活彈性的無光罩微影技術因應而生，在先進封裝、MEMS 等製程上，具有先天優勢。近幾年來，有關以 DMD 為基礎的無光罩式微影曝光系統製作三維微結構的研究如雨後春筍般出現。國內外已經發表許多關於三維微結構曝光的文獻 (Z. Zhang et al, 2016), (Y.-S. Syu et al., 2023)。

回顧上述文獻，本研究旨在利用我們

已開發之新型以 DMD 為基礎的無光罩式微影曝光系統，針對三維的紫外光圖案化演算法進行研究，探討有關在正光阻上製作大面積之任意表面三維微結構的方法，同時建立一套數值迭代模擬演算法以及反卷積理論來因應各種複雜且具有週期性的三維微結構。

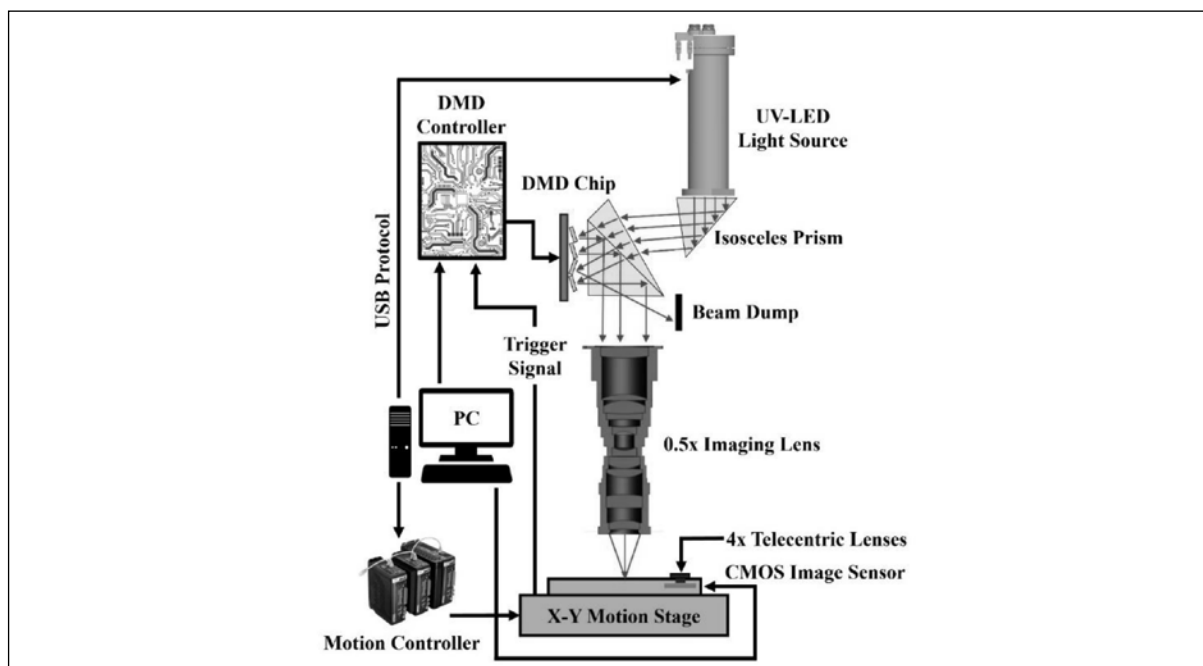
無光罩式微影曝光系統

一、系統架構

本研究開發的高精度無光罩式微影曝光系統硬體主要由光學引擎、X-Y-Z 伺服位移平台以及影像感測器三個子系統組成，如圖一所示。其中，光學引擎內的光源為高功率 UV-LED，中心波長為 405 nm。接著，利用 RTIR 稜鏡將 UV 光以 24 度的入射角

照射到 DMD 晶片表面。本研究使用具有 1920×1080 個微反射鏡陣列且單一像素尺寸為 $7.56 \mu\text{m}$ 的 DMD 晶片。光學引擎內的成像鏡頭採用高解析度的雙遠心 $0.5\times$ 成像鏡頭，專為中心波長為 405 nm 的 UV-LED 所設計。為了實現大面積的紫外光圖案化，將會在光阻層上執行動態掃描，與之搭配的位移平台採用高精度之多軸伺服位移平台。

在位移平台上，安裝一高解析度之 CMOS 影像感測器，該影像感測器單一像素尺寸為 $1.25 \mu\text{m}$ ，其目的為量測 DMD 投影陣列的光點中心位置。另外，透過加裝 $4\times$ 遠心鏡頭後，能夠將影像感測器解析度提升至 $0.3125 \mu\text{m}$ ，用於精確掌控 DMD 投影單一光點的光強分佈。



圖一 以 DMD 為基礎的無光罩微影曝光系統示意圖

二、跳躍式斜掃描演算法搭配光源閃爍

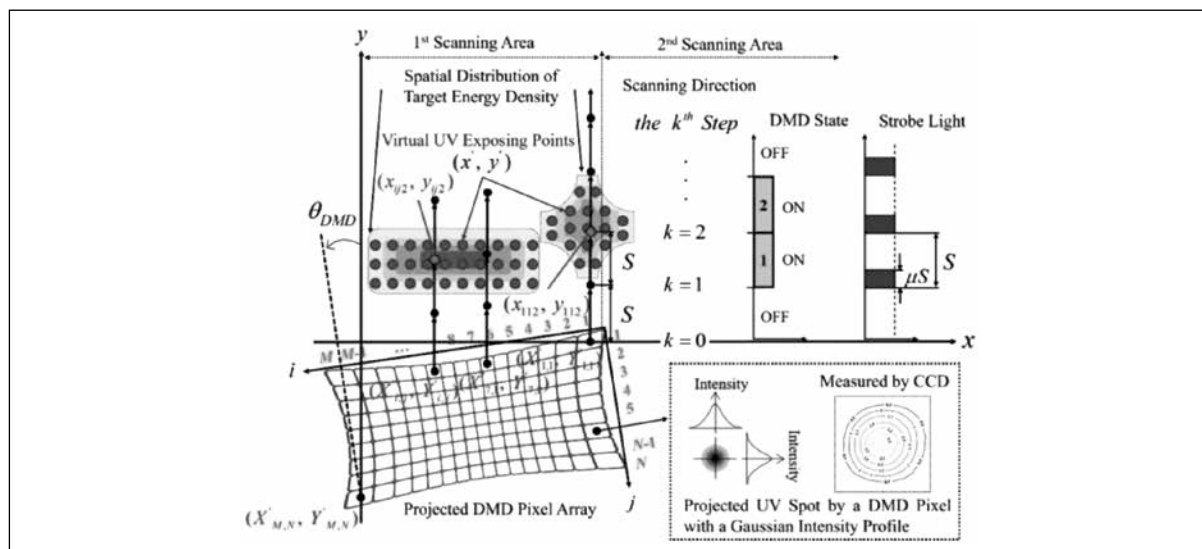
隨著產業對於線寬尺寸以及微結構複雜度的需求不斷攀升，如何因應潮流並突破技術上的限制，顯得尤為重要。為了解決上述的問題，我們已開發一種基於點座標之跳躍式斜掃描演算法並搭配光源閃爍。該演算法的核心概念是在曝光掃描過程中，利用位移平台輸出觸發訊號觸發 DMD 控制卡更新圖檔，並使 UV-LED 光源同步以特定佔空比 (Duty Cycle) 閃爍 (Strobe)。隨著 DMD 不斷在光阻上方投影光點，光點群累積的曝光

劑量分佈符合目標所需的能量密度分佈，即完成工作。該演算法不僅改進了曝光掃描方向的圖案解析度，同時也兼顧曝光產率，如圖二所示。

在圖二中，左上方的灰階分佈區域代表著目標結構之能量密度空間分佈。首先，依照目標結構之能量密度分佈去選取投影在目標區域的 DMD 光點，使選取的光點密度分佈符合目標所需的能量密度分佈。隨後，將選取之 DMD 像素中心座標依序紀錄並轉換成曝光圖檔供後續實驗使用，即完成三維紫

外光圖案化。然而，有關構建目標結構之能量密度空間分佈的方式，本研究採取製作虛擬曝光點群座標 (x', y') ，如圖中藍點所示。依靠調控其密度分佈以達成目標所需要的能量密度分佈。之後選取與虛擬曝光點群座標

(x', y') 距離最靠近的 DMD 像素中心座標，如圖中紅點所示。當所有虛擬曝光點都有對應的 DMD 像素後，即完成上述之演算法運算邏輯。



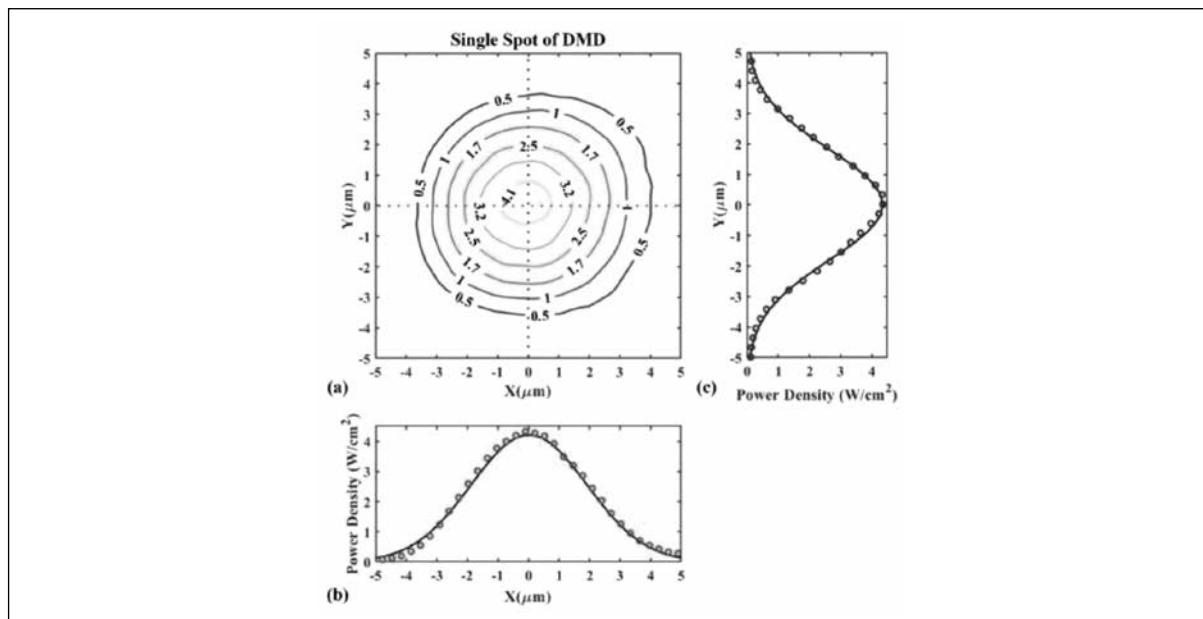
圖二 跳躍式斜掃描演算法搭配光源閃爍示意圖

在掃描過程中，DMD 像素的「ON」或「OFF」狀態在步長 S 的間隔內是保持不變的。隨著光源恆亮，因此 DMD 像素投影的光點將會沿著曝光掃描方向拖長 S 的長度，會大幅降低紫外光圖案化的空間解析度。雖然可以降低 S 的長度，但會大幅犧牲曝光掃描速度，也會增加曝光檔案的儲存量。因此，本實驗室採用光源閃爍的方式來控制光源亮暗，以佔空比 μ (%) 來表示，代表著位移平台每移動步長 S 時，光源恆亮的距離即為 μS 。雖然限制光源的使用會造成曝光產能下降，但卻能以更高的空間解析度來進行紫外光圖案化，因此兩者之間需視目標結構尺寸取捨。

三、DMD 投影光點照度分析

為了精確掌控紫外光劑量投影的空間分佈，需要先確定 DMD 晶片中單一像素投影在位移平台上的紫外光強度分佈。利用高解析度 CMOS 影像感測器搭配 4× 遠心鏡頭來量測 DMD 中心之投影光點的灰階分佈。再透過功率計量測其功率密度。隨後，將影像感測器量測的光點灰階分佈藉由功率計量測的功率密度，轉換成光點的功率密度分佈，如圖三所示。由於投影鏡頭產生的光學繞射效應，投影的單光點功率密度分布具有高斯分佈的趨勢，因此可以透過下方公式擬合，如式 (1) 所示。

$$I(x, y) = I_0 \exp\left(\frac{-2(x^2 + y^2)}{w_0^2}\right) \quad (1)$$



圖三 (a) 單光點功率密度等高線圖，(b)X 軸方向橫切面，(c)Y 軸方向橫切面

I_0 代表峰值強度， w_0 則代表在峰值強度降為峰值的 $1/e^2$ (13.5%) 時的半徑，經過擬合後， I_0 與 w_0 分別為 4.32 W/cm^2 與 $3.125 \text{ } \mu\text{m}$ 。根據式 (1)，在其強度分布的半峰全寬 (FWHM) 處的直徑約為 $4 \text{ } \mu\text{m}$ ，非常接近 DMD 投影的單光點尺寸 $3.78 \text{ } \mu\text{m}$ 。

當 DMD 投射之單光點功率密度分佈以高斯分佈擬合後，即可求得基於跳躍式斜掃描演算法搭配光源閃爍下，投射在光阻層上的單光點劑量分佈，如式 (2) 所示。

$$u(x, y) = \frac{1}{v} \int_0^{\mu s} \left\{ I_0 \exp \left(\frac{-2 \left(x^2 + (y-s)^2 \right)}{w_0^2} \right) \right\} ds \quad (2)$$

透過公式，可以發現預期的單光點劑量分佈會受佔空比 μ 、步長 S 和掃描速度 v 的大小影響。本研究將步長 S 限制為 $10 \text{ } \mu\text{m}$ 和佔空比 μ 為 10 %。然而，在 $1 \times 1 \text{ } \mu\text{m}^2$ 的範圍內，大約會有 28 個 DMD 投影光點，投影光點平均間距約為 $0.2 \text{ } \mu\text{m}$ 。隨後，將單光點劑量分佈 $u(x, y)$ 視為在 x-y 平面上的基本單位，用於在光阻層上建立曝光點群的總劑量

分佈，如式 (3) 所示。

$$U(x, y) = \sum_{i,j,k}^{All} b(i, j, k) \cdot u(x - x_{ijk}, y - y_{ijk}) \quad (3)$$

四、光阻反應曲線

為了確定目標之三維微結構的劑量分佈 $U^{target}(x, y)$ ，必須先建立光阻的反應曲線。本研究因應後續製作三維微結構的深度需求，選擇 AZ 1500 38 CP、AZ P4620 和 ma-P 1275G 這三款正光阻。並透過實驗確定，當光阻接收曝光劑量時，經過顯影將受曝光區域去除後所留下的深度，依此實驗數據來建立三種正光阻反應曲線。三種正光阻的旋塗、軟烤和顯影參數如表一所示。

表一 三種正光阻的旋塗、軟烤和顯影參數

Photoresist	AZ 1500 38 CP	AZ P4620	ma-P 1275G
Film Thickness [μm]	4 μm	14.5 μm	35 μm
Spin Coating [rpm, s]	1000 rpm, 90 s	1000 rpm, 90 s	1000 rpm, 9 s
Prebake (Hotplate) [°C, s]	100 °C, 60 s	110 °C, 180 s	100 °C, 600 s
Development (TMAH Based) [s, Cycle]	10 s, 6 Cycle	50 s, 6 Cycle	70 s, 6 Cycle

為了有效且精準確定正光阻的反應曲線，進行了基於跳躍式斜掃描搭配光源閃爍的曝光實驗。經過曝光顯影後，透過雷射掃描共軛焦顯微鏡測量曝光區域的深度分佈。隨後，將量測結果的深度剖面資訊和實際投射之曝光劑量分佈，以最小平方擬合成五階多項式，即可精準確定光阻反應曲線，如式 (4) 所示。其中 Z 定義為經過曝光與顯影後去除正光阻的深度，單位為 μm ； u 定義為曝光劑量，單位為 mJ/cm^2 ； a_i 定義為多項式在第 i 階的係數。曝光劑量閥值 PR_{th} 和 $a_0 \sim a_5$ 係數如表二所示。

$$Z(u) = \sum_{i=0}^5 a_i \cdot u^i, \quad u \geq PR_{th} \quad (4)$$

表二 三種正光阻劑量閥值 PR_{th} 和 $a_0 \sim a_5$ 係數

Photoresist	AZ 1500 38 CP	AZ P4620	ma-P 1275G
PR_{th}	4.5 mJ/cm^2	22 mJ/cm^2	5 mJ/cm^2
a_0	-2.3	-16.2	1.62e-11
a_1	0.411	1.178	-2.121e-8
a_2	-0.016	-0.02603	1.068e-5
a_3	0.0003	0.0003	-0.002571
a_4	-4.78e-6	-1.77e-6	0.3441
a_5	2.461e-8	3.927e-9	-0.3874

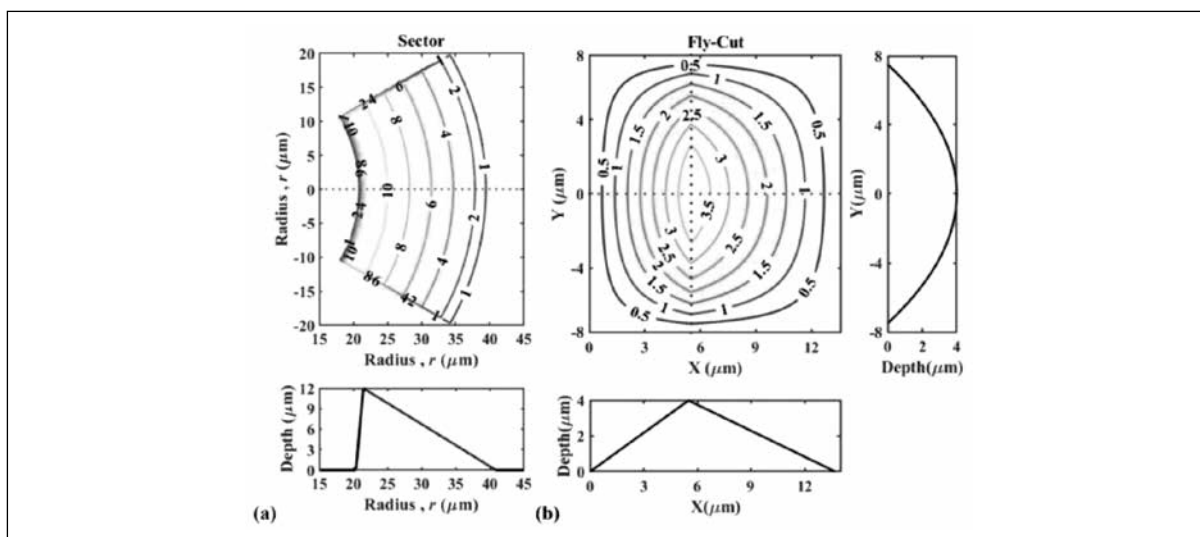
任意表面之三維微結構應用於凹結構模具

一、非週期性三維紫外光圖案化

在本研究中，選擇以合作廠商提供之兩種三維微結構設計為目標。第一種微結構為扇形體，第二種微結構為 Fly-Cut，是模擬切削加工方式所得出的微結構。為了精確描述目標微結構的深度分佈，分別在極座標系統與直角坐標系統下，建構其深度分佈方程式，如式 (5) 和式 (6) 所示；目標結構等高線圖如圖四所示。

$$Z_i^{target}(r, \theta) = \begin{cases} 0, & 0 \leq r \leq 20.9 \\ & 0 \leq \theta \leq 60^\circ \\ 11.4285 \cdot (r - 20.9), & 20.9 \leq r \leq 21.95 \\ & 0 \leq \theta \leq 60^\circ \\ 12 - 0.6233 \cdot (r - 21.95), & 21.95 \leq r \leq 41.2 \\ & 0 \leq \theta \leq 60^\circ \end{cases} \quad (5)$$

$$Z_{ii}^{target}(x, y) = \begin{cases} -0.013y^2x + 0.727x, & 0 \leq x \leq 5.505 \\ & -7.5 \leq y \leq 7.5 \\ 0.009y^2x - 0.119y^2, & 5.505 \leq x \leq 13.706 \\ & -7.5 \leq y \leq 7.5 \\ -0.488x + 6.684, & -7.5 \leq y \leq 7.5 \end{cases} \quad (6)$$



圖四 (a) 扇形體設計之等高線圖，(b) Fly-Cut 設計之等高線圖

透過式 (7) 將式 (5) 轉至直角座標系統後，即可進行製作目標微結構對應的虛擬曝光點群的流程。

首先，藉由式 (4) 光阻反應曲線方程式求得目標微結構對應的目標曝光劑量分佈 $U^{target}(x, y)$ 。令 $D(x, y)$ 為曝光點群密度，由於目標曝光劑量分佈 $U^{target}(x, y)$ 與曝光點群密度 $D(x, y)$ 的趨勢一致，因此 $D(x, y)$ 可寫成如式 (8) 所示。

$$\begin{aligned} x &= r \cdot \cos \theta \\ y &= r \cdot \sin \theta \end{aligned} \quad (7)$$

$$D(x, y) = \sum_{i=0}^5 a_i \cdot \left(\frac{Z(x, y) - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \right)^i \quad (8)$$

在本研究中，固定曝光點群密度 $D(x, y)$ 之離散解析度為 $1.5 \mu\text{m}$ 。製程參數則固定佔空比為 10 %。然而，為了減少大面積曝光所需的時間，需要決定合理的掃描速度 v 。首先，透過功率計可以量測 DMD 投影光點之平均功率密度 I_A ，約為 4 W/cm^2 。如上述所說，若欲使用的虛擬曝光點數為 DMD 可用之投影光點數的 80 %，DMD 投影光點之平均功率密度 4 W/cm^2 即降至 3.2 W/cm^2 。因 DMD 投影光點陣列的縱向長度為 $N \times \Delta$ ，約為 4.08 mm ，將該長度除上掃描速度 v 後，即可獲得曝光時間。DMD 投影光點之平均功率密度乘上曝光時間後，即可轉換成平均劑量密度，最後再乘上佔空比 μ (%)，即可推估該曝光點群累積的劑量 U ，如式 (9) 所示。

$$U = I_A \cdot 0.8 \cdot \frac{N \cdot \Delta}{v} \cdot \mu \quad (9)$$

透過光阻反應曲線可以確定目標微結構所需要的最高劑量 U_{Peak} ，將劑量 U 與掃描速度 v 移項後，如式 (10)

所示。

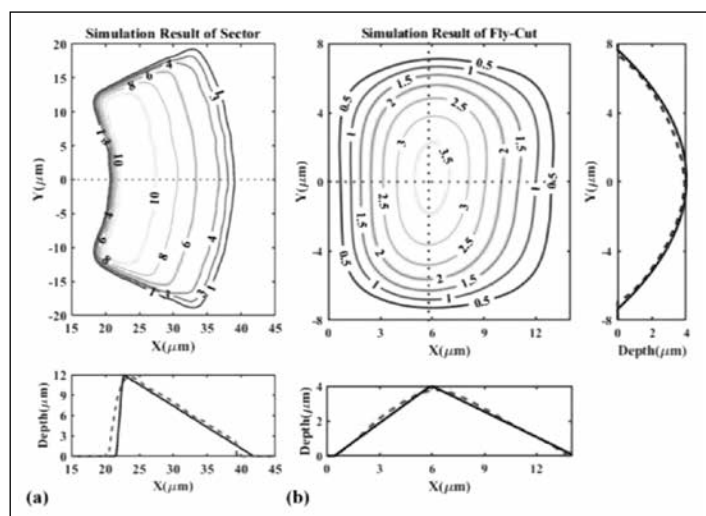
$$v = I_A \cdot 0.8 \cdot \frac{N \cdot \Delta}{U_{Peak}} \cdot \mu \quad (10)$$

根據式 (10)，即可推估合理的掃描速度 v 。以兩種目標微結構為例，經計算後扇形體結構所需的掃描速度 v 約為 11 mm/s ; Fly-Cut 結構所需的掃描速度 v 約為 20 mm/s 。決定製程參數後，最後使用 Nelder-Mead 的 Simplex 演算法 (J. A. Nelder et al., 1965)，優化式 (8) 的 $a_0 \sim a_5$ 係數，產生的優化結果如表三所示。

表三 兩種微結構數值迭代優化結果

Type	Sector	Fly-Cut
a_0	1.364e+1	8.34e+1
a_1	3.516	9.77
a_2	-1.5e-2	1.26e+1
a_3	5.1e-2	-6.62
a_4	-1.77e-3	6.37
a_5	-1.062e-3	-0.561

經過數值迭代計算後，將生成的虛擬曝光點座標與單光點劑量分佈由式 (3) 計算虛擬曝光點群整體的劑量分佈，代入式 (4) 光阻反應曲線方程式，獲得模擬結果之等高線圖、結構中心剖面，如圖五所示。



圖五 兩種微結構的模擬結果

二、週期性三維紫外光圖案化

本研究的目標為製作一組面積為 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 的非球面微透鏡陣列，且微透鏡的排列方

式為六角最密排列。非球面透鏡方程式如式 (11) 所示。

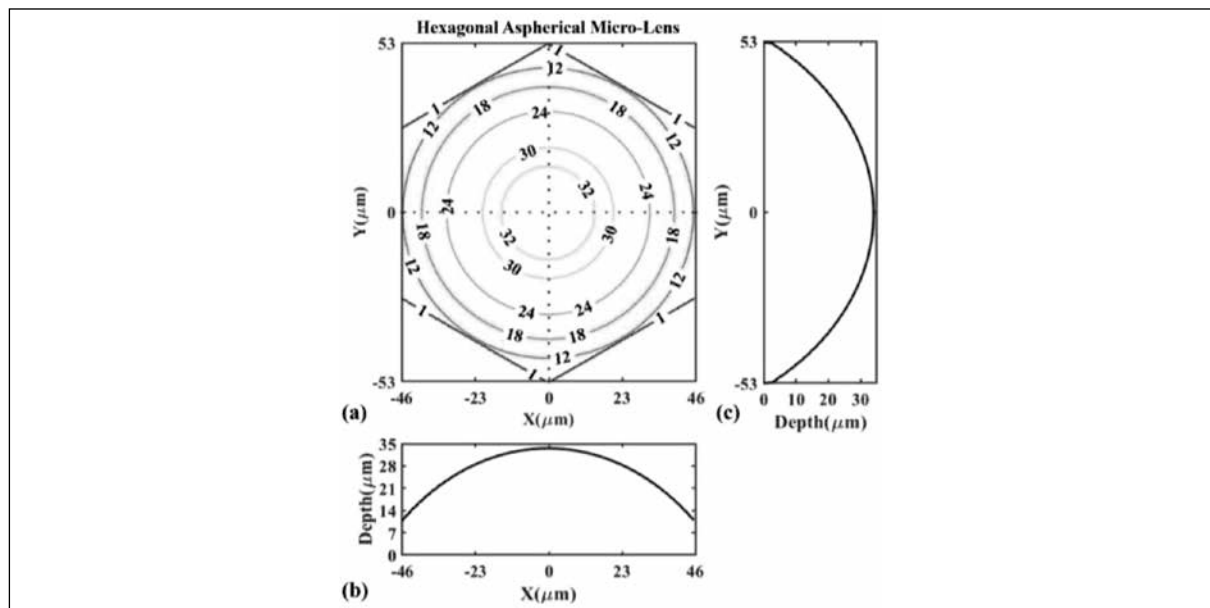
$$Z_{III}^{target}(x, y) = \frac{(x^2 + y^2)}{R \left(1 + \sqrt{1 - (1+k) \frac{(x^2 + y^2)}{R^2}} \right)} + a_2(x^2 + y^2) + a_4(x^2 + y^2)^2 + a_6(x^2 + y^2)^4 + a_8(x^2 + y^2)^6 + h \quad (11)$$

其中， R 定義為曲率； k 定義為圓錐常數； $a_2 \sim a_8$ 定義為第 2~8 階之非球面係數； h 定義為非球面微透鏡的深度。接著，將非

球面微透鏡的深度分佈範圍限制在內接正六邊形裡，供後續排列成六角最密分佈，如圖六所示。該結構週期為 $92 \text{ }\mu\text{m}$ ，最大深度為 $34 \text{ }\mu\text{m}$ 。

取得六角最密非球面微透鏡陣列的深度分佈後，即可進行反捲積流程。首先，根據式 (10)，即可計算出合理的掃描速度 v 為 3 mm/s ，同樣固定佔空比為 10% 。接著，將單光點劑量分佈 $u(x, y)$ 與目標劑量分佈 $U^{target}(x, y)$ 兩者以固定解析度 $1.5 \text{ }\mu\text{m}$ 離散，如式 (12) 所示。

$$\begin{aligned} u(x, y) &\xrightarrow{\text{discretize}} u[m, n] \\ U^{target}(x, y) &\xrightarrow{\text{discretize}} U^{target}[m, n] \end{aligned} \quad (12)$$



圖六 (a) 單一六角形非球面透鏡等高線圖；(b) X 方向橫切面；(c) Y 方向橫切面

將兩者進行傅立葉轉換至頻域，如式 (13) 所示。

$$\begin{aligned} u[m, n] &\xrightarrow{FFT} B[k, l] \\ U^{target}[m, n] &\xrightarrow{FFT} E^{target}[k, l] \end{aligned} \quad (13)$$

將兩者相除後，可得到在頻域中的曝光點群密度分佈 $P[k, l]$ ，如式 (14) 所示。

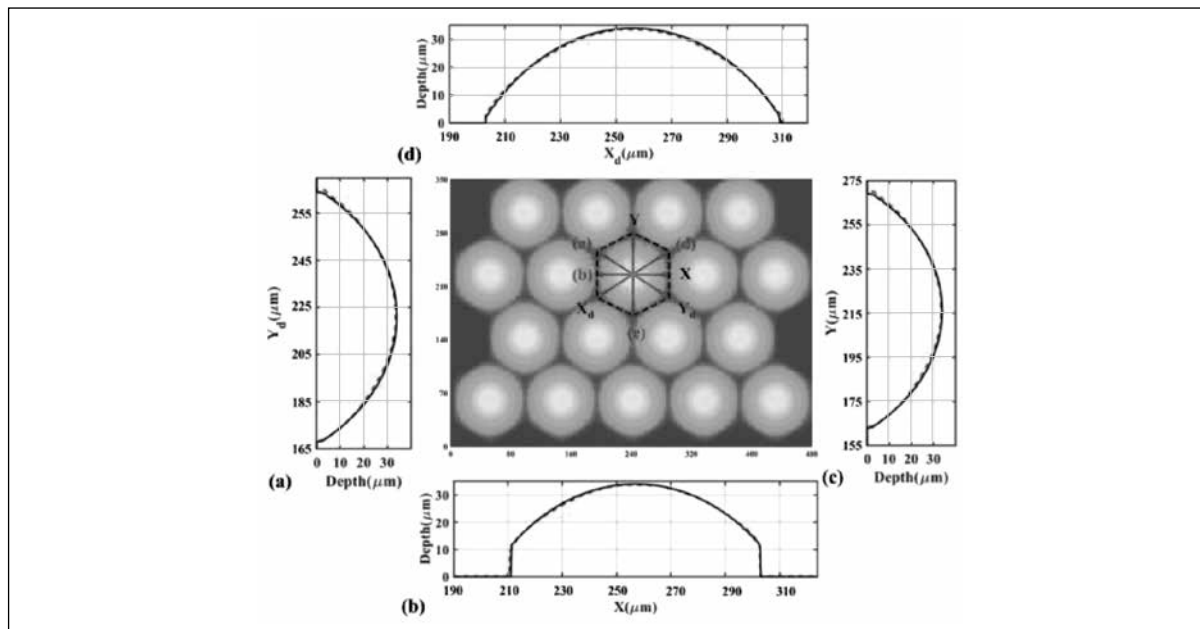
$$P[k, l] = \frac{E^{target}[k, l]}{B[k, l]} \quad (14)$$

最後，將 $P[k, l]$ 反傅立葉轉換，即獲得離散的虛擬曝光點群密度 $D[m, n]$ ，如式 (15) 所示。

$$P[k, l] \xrightarrow{IFFT} D[m, n] \quad (15)$$

透過上述的反捲積計算流程，即能夠將產生週期性微結構所對應的虛擬曝光分佈座標。將其與單光點劑量分佈由式 (3) 計算虛擬曝光點群整體的劑量分佈，並代入式 (4)

的 ma-P 1275G 正光阻反應曲線，獲得六角最密非球面透鏡陣列之等高線圖以及剖面資訊，如圖七所示。



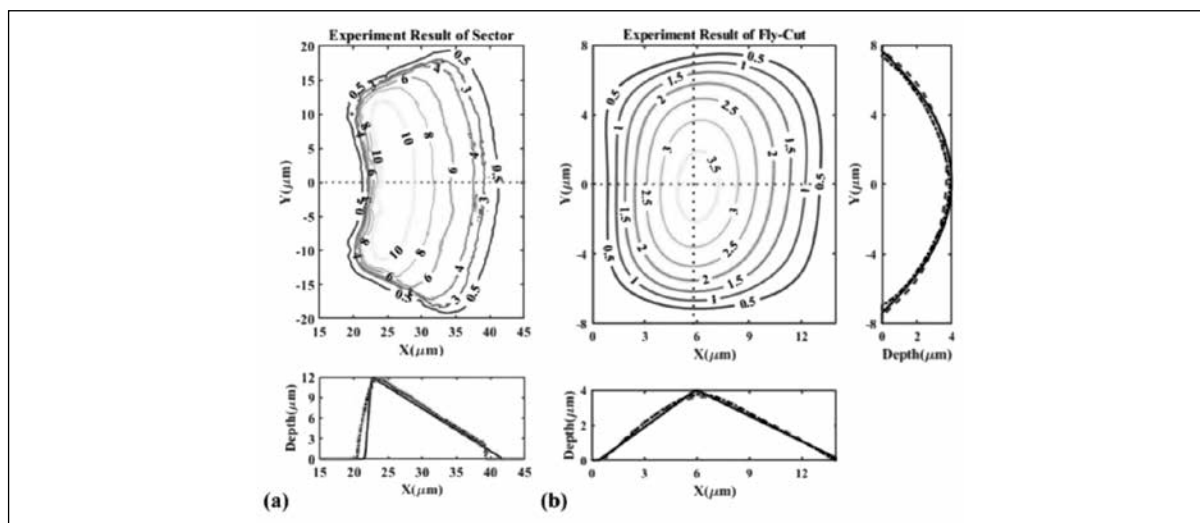
圖七 六角最密非球面透鏡陣列之模擬結果剖面資訊

三、實驗結果與分析

(一) 非週期性三維微結構

經過模擬結果與目標結構的比較、分析後，進行後續斜掃描曝光實驗。實驗結果如

圖八所示。圖十為掃描式電子顯微鏡 (SEM) 下 (a) 扇形體結構 (b) Fly-Cut 結構的量測結果。此曝光結果為尺寸 $200 \times 160 \text{ mm}^2$ 的大面積分佈式扇形體結構。

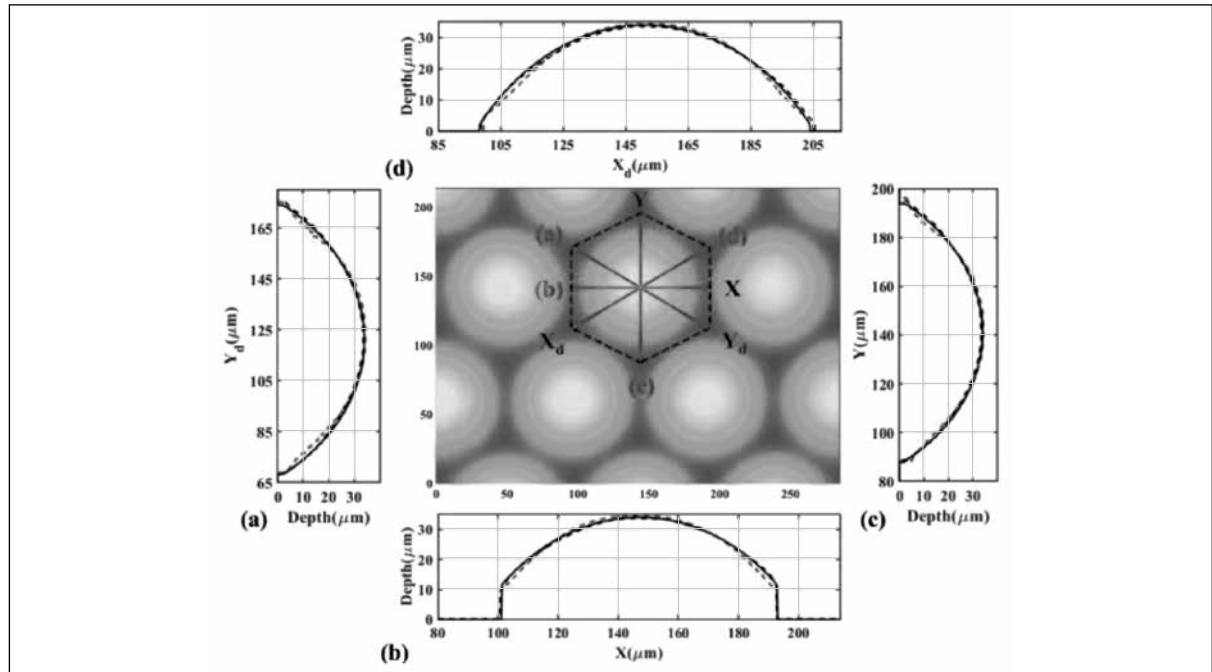


圖八 兩種微結構的實驗結果

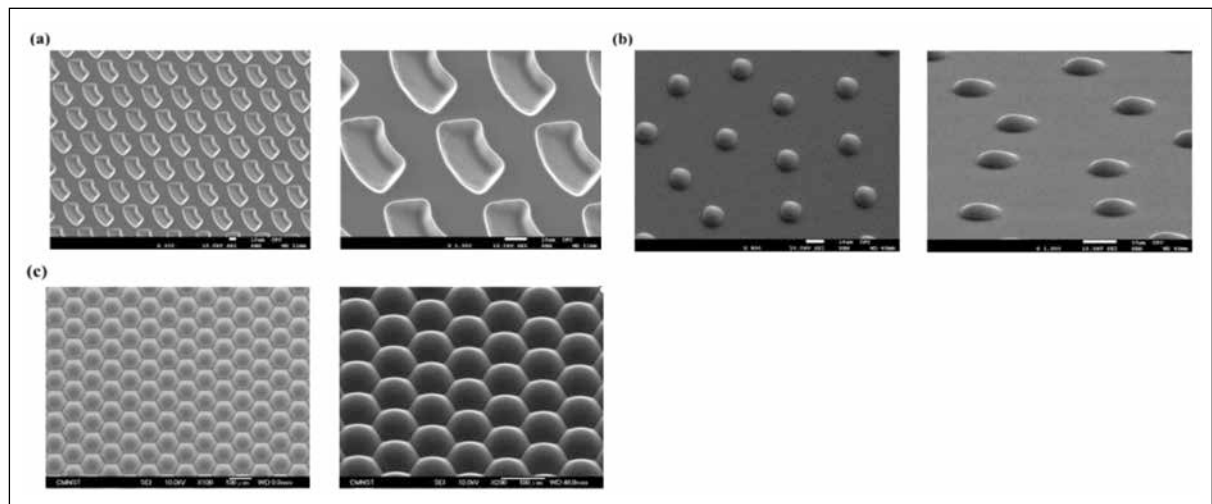
(二) 週期性三維微結構

經過模擬結果與目標結構的比較、分析後，進行後續斜掃描曝光實驗。曝光結果於

深度剖面資訊如圖九所示。圖十為掃描式電子顯微鏡 (SEM) 下 (c) 六角最密非球面透鏡陣列的量測結果。



圖九 六角最密非球面透鏡之實驗結果剖面資訊



圖十 以不同倍率的掃描式電子顯微鏡 (SEM) 量測 (a) 扇形體、(b) PDMS 翻模後的 Fly- Cut 及 (c) 六角最密非球面微透鏡陣列結構

結果與討論

本研究承襲先前已開發之以 DMD 為基礎的無光罩式微影曝光系統和基於點座標之跳躍式斜掃描演算法，在該軟、硬體的基础下，成功開發出應用於光阻上的三維紫外光圖案化方法，並針對不同類型之微結構，分別以數值迭代模擬演算法、反捲積理論成功製作出非週期性和週期性三維微結構。透過使用不同理論計算目標結構對應的虛擬曝光點群，與單光點能量分佈捲積後能夠獲得與目標相當吻合的模擬結果，同時完成曝光面積為 $200 \times 160 \text{ mm}^2$ 的特定分佈式凹結構模具與 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ 的光學元件模具的製作需求。

參考文獻

1. Z. Zhang, Y. Gao, N. Luo, et al. (2016). Fast Fabrication of Curved Microlens Array Using DMD-Based Lithography. AIP Advance., vol. 6, 015319.
2. Y.-S. Syu, Y.-B. Huang, M.-Z. Jiang, C.-Y. Wu, and Y.-C. Lee (2023). Maskless Lithography for Large Area Patterning of Three-Dimensional Microstructures with Application on A Light Guiding Plate. Opt. Express., vol. 31, pp. 12232-12248.
3. J. A. Nelder and R. Mead (1965). A Simplex Method for Function Minimization. J. Comput., vol. 7, pp. 308-313.

作者簡介

朱峰毅 / 國立成功大學 機械所

李永春 / 國立成功大學 機械所 / 指導老師

