

無光罩式數位微影暨灰階 曝光應用於製作三維微結構

本研究以無光罩式數位微影技術為基礎，利用步進與灰階曝光的方式，在光阻表面製作出三維的立體微結構。藉由控制數位微反射鏡裝置的脈衝寬度調變，調控紫外 (UV) 光源投影在光阻表面的劑量，以正面曝光的方式成功地在面積 $35 \times 30 \text{ mm}^2$ 範圍內，製作出週期性的擴散片和非球面微透鏡陣列，並引入熱回流技術，將表面粗糙度 Ra 值從 21.1 nm 降低到 10.6 nm ，同時保持結構形貌的精確度。本研究也以背後曝光的方式，在石英基板上直接製作出二種不同型貌的非球面微透鏡陣列。經由建立的光學聚焦檢測系統得出聚焦光點的半峰全寬 (FWHM) 分別為 15 和 $5 \mu\text{m}$ ，驗證本研究有能力製作光學元件等級的三維微結構。

■ 張簡翊秀、李永春

關鍵詞：無光罩數位微影、步進式灰階曝光、數值模擬與最佳化、背後曝光

微米技術的迅速發展為許多領域帶來新的可能性和挑戰，在微機電系統、光學元件、生物醫學和奈米科技等領域，對於具有精細結構和複雜形狀的三維微結構的需求越來越高。傳統的製造方法往往受限於成本、製程複雜性和製造速度等方面的限制，因此需要探索新的製造方式來實現高效、精確和可靠的三維微結構製造。本研究採用無光罩數位微影技術 (Takahashi & Setoyama, 2000)，在光阻材料上直接製作出三維微結構 (Deng, 2015; Ma, 2015)，以實現快速且大量製造的目標。無光罩微影技術消除傳統黃光微影製程中光罩的使用，提高曝光圖形的靈活性和降低實體光罩的製造成本。同時，可以透過後續製程，如電鑄和壓印，進一步提高製造效率和規模。

無光罩微影系統

一、硬體架構

本研究使用的無光罩微影系統如圖一

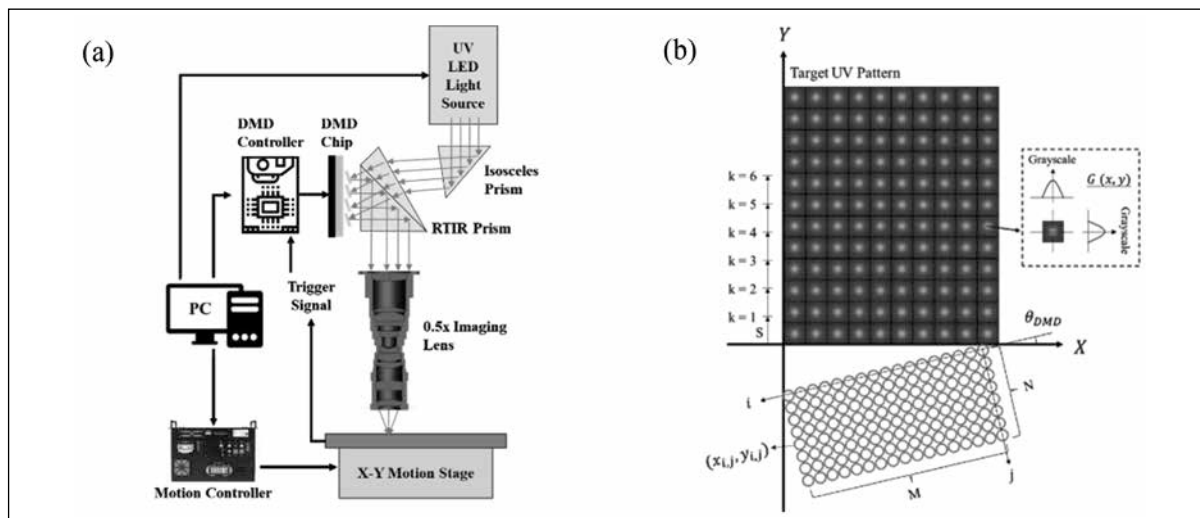
(a) 所示。光源使用中心波長為 405 nm 的 UV-LED。利用 RTIR 稜鏡將 UV-LED 光源以 24° 角入射在 DMD 晶片上。使用的 DMD 晶片為 DLP6500，陣列對角線長度為 0.65 英寸。該晶片具有 1920×1080 個微反射鏡陣列，每個微反射鏡的尺寸為 $7.56 \mu\text{m}$ 。成像鏡頭採用與上陽光學公司合作開發的高解析度雙遠心 $0.5 \times$ 成像鏡頭，該鏡頭用於將 DMD 投影下的光點進行 0.5 倍縮小並進行成像。運動平台使用上銀科技公司的多軸位移運動平台。其 XY 軸平台運動範圍為 $350 \times 700 \text{ mm}^2$ 。

二、灰階曝光原理

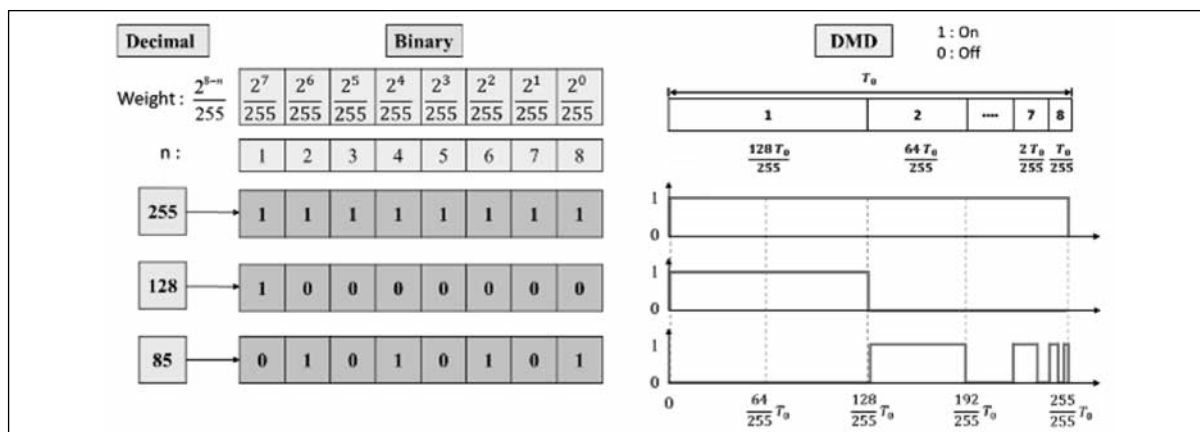
灰階曝光原理是藉由控制 DMD 的脈衝寬度調變。本研究是使用 8 位元的脈衝寬度調變，可以實現 256 種灰階控制。DLP 控制器會先將灰階圖像的灰階值從十進制轉換為二進制，如圖二所示。將一個曝光週期，

切分成 8 個不同的時間區間，每個時區的占比由 8 位元二進制序列控制，第 n 個時區，

代表的占比為 $\frac{2^{8-n}}{255}$ 。



圖一 (a) 無光罩曝光系統硬體架構圖 (b) 步進式灰階曝光演算法示意圖



圖二 灰階曝光原理示意圖，以灰階值 255、128、85 為例

三、步進式灰階曝光演算法

本研究以步進式灰階曝光演算法來生成曝光圖檔，此演算法的工作方式為在每次移動一個步進距離 S 的位置更新曝光圖檔，同時輸出觸發訊號給 UV-LED 光源，以曝光時間 t 執行定點曝光。為了增加曝光解析度，DMD 會旋轉一個角度 θ_{DMD} ，來提高曝光的橫向解析度。相較於傳統步進式曝光方式，以重複移動 DMD 尺寸寬度來生產大面積圖形，解析度會受限於 DMD 的像素

尺寸。本研究採用重疊 (Overlap) 曝光的方法。也就是說，同一個曝光區域會被曝光多次，而曝光次數取決於步進距離。此方法能夠提高曝光的縱向解析度。圖一 (b) 說明演算法的邏輯，此演算法以製作三維微結構的灰階圖檔為主。XY 平面的第一象限為目標曝光圖檔，由許多個陣列與棋盤式排列的單元組成，每個單元是一個目標三維微結構的灰階值分佈 $G(x, y)$ ，此灰階值分佈 $G(x, y)$ 為

一個連續的數學函數是經由數值模擬與最佳化得到的，並藉由此灰階值分佈控制 DMD 投射下的劑量。最後，以此演算法製作出數位灰階圖檔。

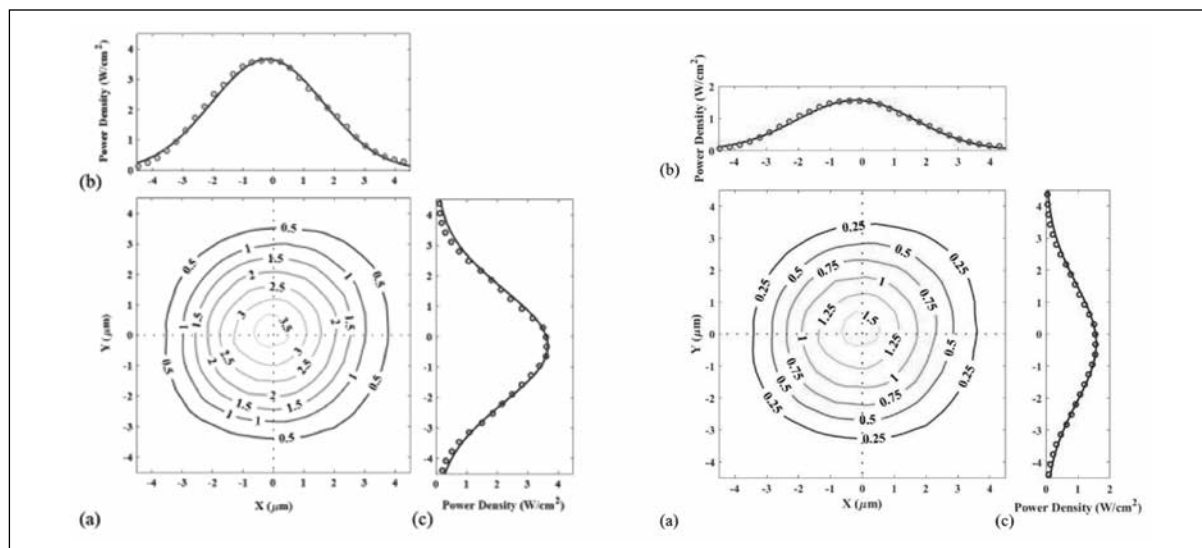
四、背後曝光

本研究針對負光阻材料開發的背後曝光技術，應用於製作三維微結構；背後曝光會將 UV 光先經由透明基板再投射在負光阻上。負光阻材料被 UV 光照射後，內部結構會產生交聯效應變得更堅固，再經由曝後烤和顯影即可製作出三維微結構。背後曝光的優勢在於可以直接在基板上製作出凸型光阻微結構。相反地，若使用正光阻搭配正面曝光，則有利於製作出凹型結構，還需要經由電鑄和壓印等製程，才能製作出目標凸型結構。

曝光數值模擬

一、光點測量與分析

為了進行曝光數值模擬，首先需要測量 DLP6500 單一個像素投影在運動平台上的光點能量分佈。測量方法是只開啟 DLP6500 中間的一個像素，其他像素皆關閉。透過高解析度 CMOS 影像感測器搭配 4 倍遠心鏡頭，可以提高解析度至 $0.3125 \mu\text{m} / \text{pixel}$ ，使其有足夠的解析度去測量光點能量分佈，接著使用光功率計測量光點功率，得到單一光點的功率密度分佈。由於投影鏡頭的光學繞射效應，導致投射下的光點功率密度呈現高斯分佈，為了更精確描述光點的功率密度分佈，本研究使用高斯分佈方程式進行擬合，如圖三所示。



圖三 光源波長為 365 nm 與 405 nm 的光點分析，(a) 測量到的光點功率密度等高線圖。

(b)、(c) 擬合後 X 軸向和 Y 軸向的高斯分佈橫切面。實線代表擬合結果，圓圈記號則是測量的數據點

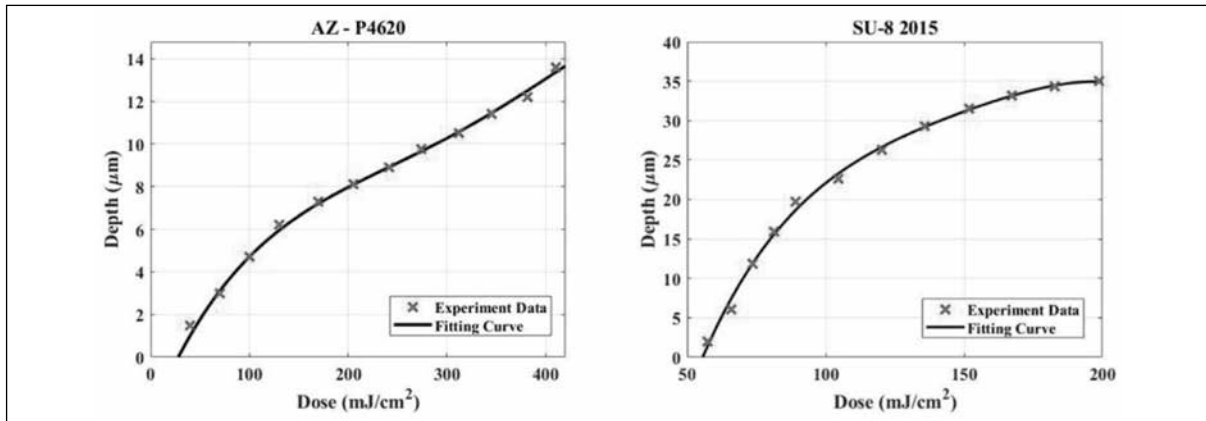
二、光阻特性曲線

為了將目標結構的深度轉換成所需對應的 UV 劑量，需要先測量出光阻特性曲線。

該曲線描述在不同劑量下，光阻經由顯影後的深度。本研究採用 DLP 控制器灰階的功能來製作光阻特性曲線。灰階功能是在可以在

一個曝光週期中，按照灰階值的比例調控 DMD 開和關的工作週期 (Duty cycle)，藉由此方法控制 DMD 給予光阻的劑量。達到在相同曝光時間中，每個像素做動不同的工作週期。藉此獲得不同劑量所對應的光阻深

度，以建構出 AZ-P4620 與 SU-8 2015 的光阻特性曲線。有劑量和其對應的深度即可求得光阻特性曲線，本研究使用四階多項式進行擬合，如圖四所示。



圖四 AZ-P4620 與 SU-8 2015 的光阻特性曲線。紅色叉號為實驗數據點，黑線為四階多項式擬和結果

三、數值模擬與最佳化

本研究藉由曝光數值模擬與最佳化，得出目標三維微結構的灰階值分佈 $G(x, y)$ ，藉由此灰階值分佈控制 DMD 投射下的劑量，並在 2.3 節利用此灰階值分佈製作 DMD 數位灰階圖檔。在灰階曝光中，灰階值能夠決定 DMD 在一個曝光週期中，開和關的比例，如同工作週期 (Duty cycle) 的概念，因此 $G(x, y)$ 的數值會介於 0~1 之間。

首先，會得到三維微結構的目標深度 $D^{Target}(x, y)$ ，深度的定義為當以正光阻執行曝光時，代表顯影後去除的光阻深度。由於深度分佈 $D^{Target}(x, y)$ 與灰階曝光的灰階值分佈 $G(x, y)$ 趨勢相近。因此將 $G(x, y)$ 以 $D^{Target}(x, y)$ 方程式進行擬合。同時將 $D^{Target}(x, y)$ 的參數設定為優化 $G(x, y)$ 的初始猜值。接著要對灰階值分佈 $G(x, y)$ 執行曝光數值模擬。將 $G(x, y)$ 和單一光點的功率密度分

佈 $p(x, y)$ 進行卷積 (Convolution) 疊加，可以得出模擬的功率密度分佈 $P_s(x, y)$ ，如式 (1)。

$$P_s(x, y) = G(x, y) \times p(x, y) \quad (1)$$

將功率密度分佈 $P_s(x, y)$ 乘以曝光時間 t ，得到模擬的劑量密度分佈 $U_s(x, y)$ ，如式 (2)。

$$U_s(x, y) = P_s(x, y) \times t \quad (2)$$

將劑量密度分佈 $U_s(x, y)$ 帶入光阻特性曲線，求得模擬的結構深度 $D_s(x, y)$ ，如式 (3)。

$$D_s(x, y) = \sum_{i=0}^4 P_i \cdot U_s(x, y)^i \quad (3)$$

並且將模擬的結構深度減去目標的結構深度，求得模擬的總誤差 $Error$ ，如式 (4)。最後利用 Nelder-Mead Simplex 演算法，不斷地優化 $G(x, y)$ 的係數，使總誤差縮小。經由多次的迭代 (Iteration) 計算，得到最終的 $G(x, y)$ 。並在步進式灰階曝光演算法中利用 $G(x, y)$ 製作出 DMD 灰階數位圖檔。

$$Error = \iint |D_s(x, y) - D^{Target}(x, y)| dx dy \quad (4)$$

其中， $Error$ 代表數值模擬與目標結構的深度總誤差，單位是 μm ； $D_s(x, y)$ 代表經由數值模擬後的深度，單位是 μm ； $D^{Target}(x, y)$ 代表目標結構的深度，單位是 μm 。

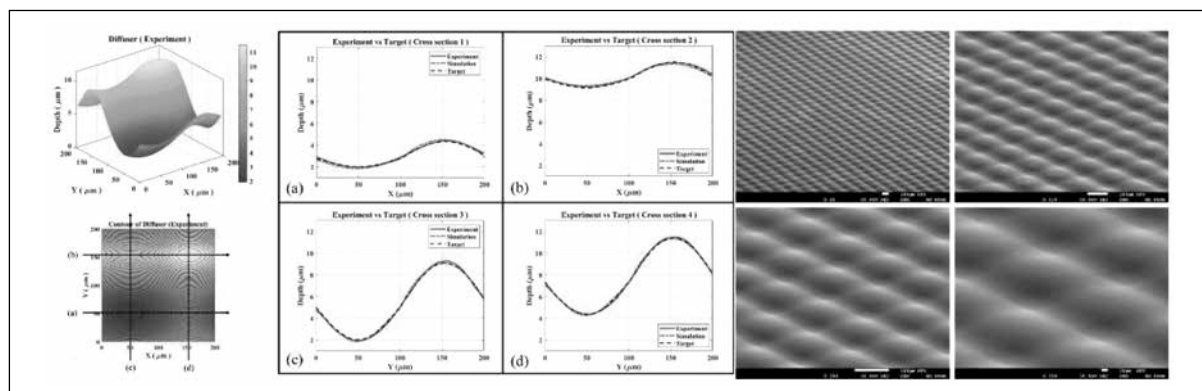
實驗與結果

一、擴散片

本研究以利用正面曝光搭配步進式灰階曝光製作擴散片。首先，藉由數值模擬與最佳化生成灰階曝光圖檔。然而，透過無光罩數位微影製程，在 2 吋矽晶圓上製作出面積 $35 \times 30 \text{ mm}^2$ 的擴散片。經無光罩微影製程後，為了降低微結構的表面粗糙度，本研究導入熱回流技術 (Thermal Reflow)。熱回

流技術是藉由提高光阻的溫度，使光阻達到其玻璃轉換溫度 (T_g)；此時，光阻會由玻璃態轉變為橡膠態，流動狀態的光阻會趨向於表面積最小化來減少表面能。以此方式來降低微結構的表面粗糙度，達到光學元件等級的條件。而熱回流技術主要調控的參數分別是溫度和時間，溫度需要超過光阻的玻璃轉換溫度，若溫度太高會導致結構坍塌快速，為保持整體結構形貌，溫度與時間須精確控制。

以共軛焦顯微鏡量測擴散片的三維表面形貌，圖五展示擴散片的三維實驗結果，以及擴散片在不同放大倍率下的 SEM 觀察結果。將實驗結果與目標結構進行比對，分別對結構水平、垂直橫截面執行誤差分析。



圖五 擴散片的三維實驗結果以及不同放大倍率下的 SEM 觀察結果。(a)、(b)、(c) 和 (d) 分別代表不同橫截面的實驗、模擬和目標比對圖

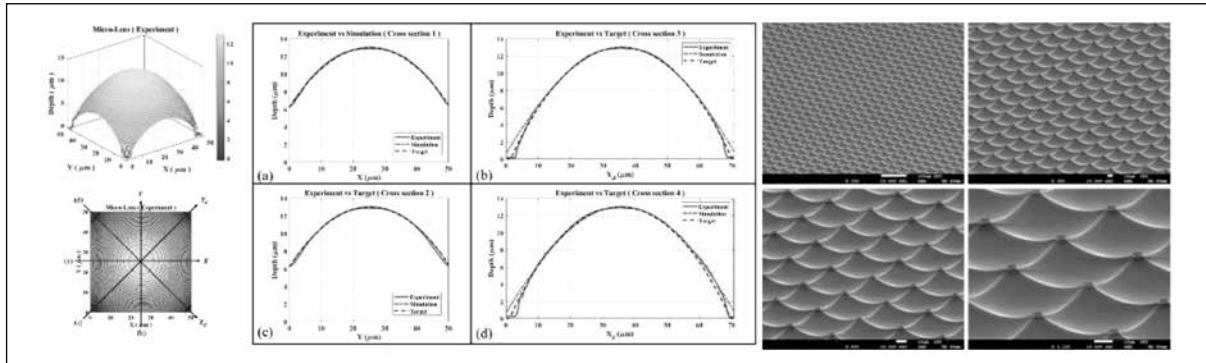
表面粗糙的品質對於光學元件來說極為重要，嚴重影響其光學性質。因此本研究以原子力顯微鏡 (Atom Force Microscope, AFM) 量測擴散片的表面粗糙度，測得未經由熱回流技術前的平均 Ra 值為 21.1 nm ；經由熱回流技術後的平均 Ra 值則為 10.6 nm 。

二、微透鏡陣列

經由曝光數值模擬和無光罩曝光微影製程後，本研究以共軛焦顯微鏡量測非球面微透鏡的三維表面形貌，曝光使用的光阻為正光阻，因此深度的定義為以光阻表面為基準面向下的深度，即為曝光顯影後

去除的光阻深度。圖六展示以共軛焦顯微鏡量測非球面微透鏡的三維表面形貌，以及 SEM 觀察結果實驗。將實驗、模擬和目

標的橫截面進行比對。以原子力顯微鏡量測非球面微透鏡陣列的表面粗糙度，得出平均 Ra 值為 19.3 nm。



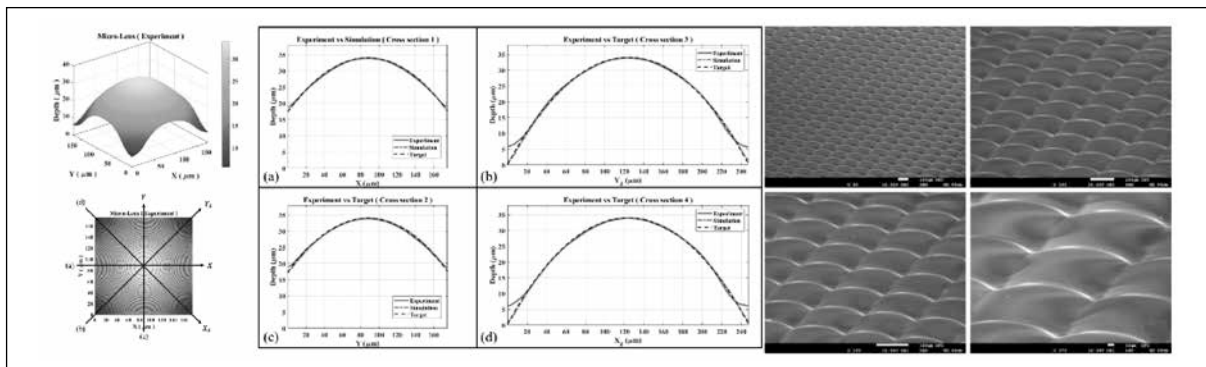
圖六 非球面微透鏡的三維實驗結果以及不同放大倍率下的 SEM 觀察結果。(a)、(b)、(c) 和 (d) 分別代表不同橫截面的實驗、模擬和目標比對圖

三、微透鏡陣列以背後曝光製作

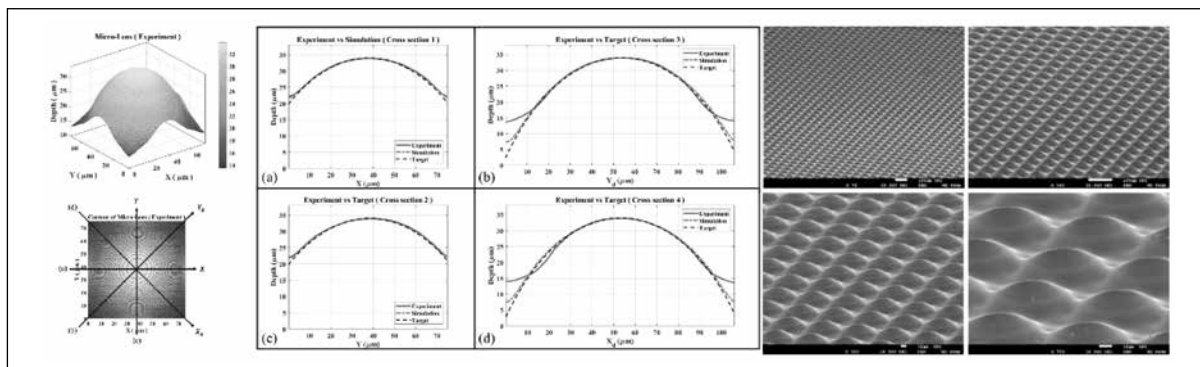
本研究以背後曝光搭配步進式灰階曝光的方式，在石英基板上製作出兩種非球面微透鏡陣列。以光學模擬軟體 ZEMAX 分別設計兩種非球面微透鏡，目的是讓平行光經由非球面微透鏡陣列，可以聚焦在基板的底部。再藉由數值模擬與最佳化生成灰階曝光圖檔，透過無光罩數位微影製程，在 2 吋石英基板上直接製作出面積 $30 \times 30 \text{ mm}^2$ 的非球面微透鏡陣列。並經由共軛焦顯微鏡量測結構的三維表面形貌。利用原子力顯微鏡量測結構的表面粗糙度，並使用掃描式電子顯

微鏡觀察結構的形貌。最後利用本研究建立的光學聚焦檢測系統，驗證兩種非球面微透鏡陣列的光學聚焦品質。

圖七展示第一組非球面微透鏡以共軛焦顯微鏡量測的三維表面形貌，以及在不同放大倍率下的 SEM 觀察結果。實驗與目標的橫截面比對。圖八則是展示第二組非球面微透鏡的實驗結果。以原子力顯微鏡量測兩組微透鏡陣列的表面粗糙度，得出第一組微透鏡陣列的平均 Ra 值為 7.4 nm；第二組的平均 Ra 值則為 9.5 nm。



圖七 第一組非球面微透鏡的三維實驗結果以及不同放大倍率下的 SEM 觀察結果。(a)、(b)、(c) 和 (d) 分別代表不同橫截面的實驗、模擬和目標比對圖



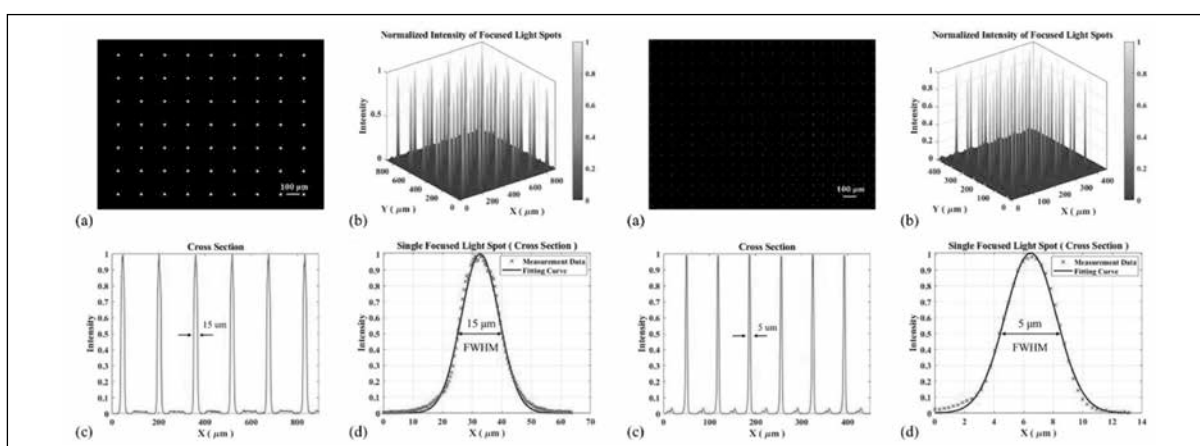
圖八 第二組非球面微透鏡的三維實驗結果以及不同放大倍率下的 SEM 觀測結果。(a)、(b)、(c) 和 (d) 分別代表不同橫截面的實驗、模擬和目標比對圖

四、光學聚焦測試

本研究建立一套光學聚焦檢測系統，用於驗證微透鏡陣列的光學聚焦品質。該系統使用中心波長為 405 nm 的 UV-LED 作為光源，利用高解析度 CMOS 影像感測器，來拍攝 UV-LED 平行光通過微透鏡陣列聚焦形成的光點。同時，配備 4 倍遠心鏡頭以提高影像解析度至 $0.3125 \mu\text{m} / \text{pixel}$ ，使其有足夠的解析度去測量聚焦光點的特性。

圖九展示兩組非球面微透鏡聚焦測試的結果。根據光學設計結果，光點會聚焦在石英基板的底部，藉由調整微透鏡陣列的位

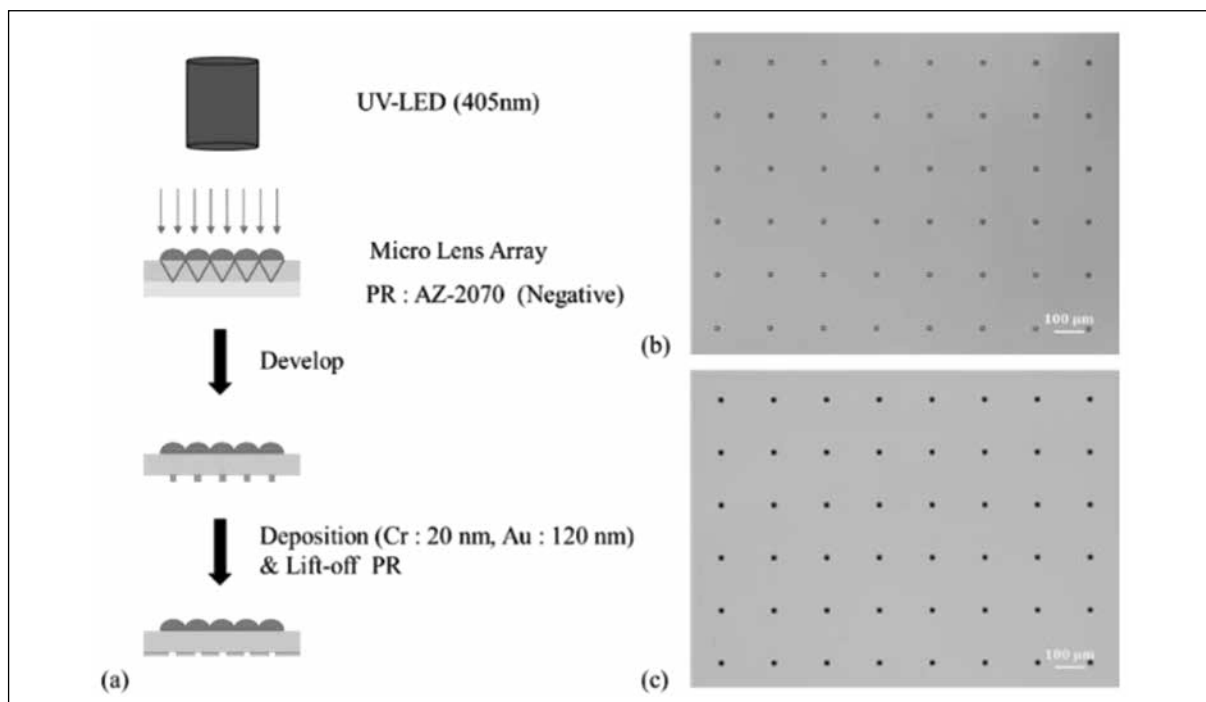
置，使 CMOS 影像感測器的影像聚焦在石英基板底部。圖九 (a) 為 CMOS 影像感測器拍攝微透鏡陣列聚焦的光點，再將灰階影像轉換成聚焦光點的光強度分佈，並對其做正規化 (Normalize)，如圖九 (b) 所示。接著對光點中心切橫截面，如圖九 (c) 所示，最後，以高斯分佈方程式擬和聚焦光點，如圖九 (d) 所示，得出第一組微透鏡陣列聚焦光點的半峰全寬 (FWHM) 為 $15 \mu\text{m}$ ，以相同的做法量測第二組微透鏡陣列，得出聚焦光點的半峰全寬為 $5 \mu\text{m}$ 。



圖九 兩組微透鏡光學聚焦測試。(a) 非球面微透鏡陣列聚焦的光點，以 CMOS 影像感測器搭配 4 倍遠心鏡頭拍攝。(b) 正規化後之聚焦光點的光強度分佈。(c) 聚焦光點的橫切面。(d) 以高斯分佈方程式擬和聚焦光點，聚焦光點的半峰全寬分別為 $15 \mu\text{m}$ 與 $5 \mu\text{m}$

最後只對第一組非球面微透鏡陣列進行曝光聚焦測試。首先，在石英基板的背面塗負光阻，利用微透鏡陣列聚焦的特性，經由曝光顯影後，可以在聚焦點位置留下負光阻，圖十 (a) 為曝光測試的示意圖。經由顯影後，利用光學顯微鏡 (OM) 量測基板背面的光阻，如圖十 (b) 所示，可以觀察到在微透鏡陣列聚焦點位置成功留下負光阻，結構尺寸為 $15 \times 15 \mu\text{m}^2$ ，與測量到聚焦光點的

半峰全寬 $15 \mu\text{m}$ 吻合。接著，蒸鍍金屬鉻 20 nm 和金 120 nm ，並執行光阻去除，在聚焦點位置製作出針孔 (pin hole)，如圖十 (c) 所示，驗證本研究有能力製作光學元件等級的三維微結構。此成品適用於顯示器上，其主要目的是讓光經由針孔後再透過微透鏡陣列，使光以平行的方式投射出來。此研究成果目前廣泛應用於車載顯示器、AR/VR 顯示器和 Google 眼鏡等產品上。



圖十 (a) 曝光聚焦測試的示意圖。(b) 經由曝光顯影後，在微透鏡陣列聚焦點位置留下的負光阻結構。(c) 蒸鍍金屬鉻 20 nm 和金 120 nm ，與執行光阻去除，成功在聚焦點位置製作出針孔

結論

本研究開發出以無光罩式數位微影技術為基礎，利用步進式灰階曝光的方式，在光阻表面製作三維微結構。以正面曝光的方式，成功地在面積 $35 \times 30 \text{ mm}^2$ 範圍內，製作出週期性的擴散片和非球面微透鏡陣列。為了抑制結構表面的粗糙度，引入熱回流技術。將表面粗糙度 R_a 值從 21.1 nm 降低到 10.6 nm 。以背後曝光的方式，在石英基板上直接製作出範圍 $30 \times 30 \text{ mm}^2$ 的非球面微透鏡陣列。並經由本研究建立的光學聚焦檢測系統，得出兩種非球面微透鏡陣列聚焦光點的半峰全寬 (FWHM) 分別為 15 和 $5 \mu\text{m}$ 。驗證本研究有能力製作光學元件等級的三維微結構。

參考文獻

1. K. Takahashi and J. Setoyama (2000). A UV-exposure system using DMD. Electron. Comm. Jpn. Pt. II, vol. 83, pp. 56-58.
2. Q. Deng et al (2015). Fabrication of micro-optics elements with arbitrary surface profiles based on one-step maskless grayscale lithography. Micromachines, vol. 8, 314.
3. X. Ma et al (2015). Multiple patterning with process optimization method for maskless DMD-based grayscale lithography. Procedia Eng., vol. 120, pp. 1091-1094.

作者簡介

張簡翊秀 / 國立成功大學 機械工程學系

李永春 / 國立成功大學 機械工程學系 / 指導老師

