

準分子雷射拖曳式加工六角形微透鏡陣列之模擬分析

Computer Simulation for the Fabrication of Hexagonal Micro Lens Array by Using Dragging Process with Excimer Laser

王述宜、黃俊欽

Shuh-Yi Wang, Chun-Chin Huang

本文針對六角形微透鏡陣列製作技術進行電腦程式模擬與分析。拖曳式加工就是以工件相對於雷射光束運動；在加工一道圓弧形微溝槽後，將工件旋轉 90 度，再加工另一道圓弧形微溝槽；所以拖曳式加工兩次後即可獲得直角座標排列的微透鏡陣列。本研究首創以準分子雷射拖曳式加工三次；加工一道圓弧形微溝槽後，將工件旋轉 60 度，重複兩次後即可獲得六角形座標排列的微透鏡陣列。以程式模擬加工後的幾何形狀，並討論微透鏡的軸對稱性，以期掌握高形狀精度的非球面微透鏡陣列之相關三次元微製造技術。

A computer simulation for the fabrication of aspheric hexagonal micro lens arrays by use of the laser dragging process was examined. In this new process, the first step is to generate micro channels whose cross-section shape is similar to that of the mask. Then the dragging procedure is repeated twice, each time after rotating the work piece by 60 deg relative to the previous channels. This hexagonal micro lens array may be applied in the application of image processing. Our results indicate that the hexagonal micro lens array has a better axial symmetry and higher fill factor than a rectangle one.

一、前言

微光機電系統 (micro-optical-electro-mechanical system, MOEMS) 為以高科技製造出輕薄短小而且功能齊全的成品，可廣泛應用於通訊、感測、視訊產品方面等，其中微透鏡是微光機電系統中的重要

零組件之一。例如繞射光學元件 (diffractive optical elements, DOE)、非球面微透鏡陣列與微稜鏡陣列可用於聚焦、像差補償 (aberration compensation)、光束能量分佈修整與均質化 (homogenizing) 等方面⁽¹⁾。隨著微製造技術的快速發展下，於光學領域上有關微光機電技術的產業與研究也逐漸萌芽，並結

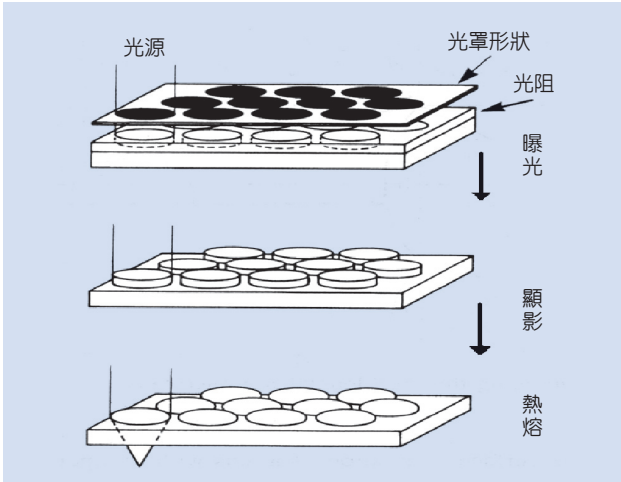


圖 1. 熱熔法製造微透鏡陣列示意圖⁽¹⁾。

合了精準的半導體製程技術，使光電產業上有更進一步地突破發展，已成功地應用於資訊、光通訊、電信傳輸、影像處理與生醫檢測等。產品則包含投影機、雷射讀寫頭、液晶顯示器 (TFT-LCD)、傳真機、數位相機與數位攝影機等⁽¹⁻²⁾。因此微光學元件的研製已成為目前的熱門趨勢與各國研發人員研究的重要課題。

微透鏡陣列 (micro lens array) 是光學產業上重要的產品，而微透鏡結合玻璃微模造技術與樹脂接合技術用於液晶顯示器方面，可增加顯示器的亮度，更可以應用於行動電話和筆記型電腦的背光板以減少電能的消耗。例如在液晶顯示器中，微透鏡陣列可以增加面板的透光率，使光源可以均勻到達每一個畫素 (pixel) 上⁽³⁻⁴⁾。而近年來隨著微機械製造技術、微光學製作技術與積體電路 (IC) 微影製程技術成熟發展下，逐漸實現微透鏡與微透鏡陣列產品的微型化、量產化與陣列化。而非球面 (aspheric) 微透鏡陣列具有優異的光學性能，例如微透鏡陣列可增強平行光效能，或用於雷射發光二極體的光線準直⁽³⁾。此外，六角型微透鏡陣列 (hexagonal micro lens arrays) 的型式主要為反射式與微凹透鏡，已廣泛應用於縮小螢幕與微光學元件的聚焦平面陣列方面⁽⁴⁾。

微透鏡加工製造技術有很多種，由於微透鏡是屬三次元立體形狀的微結構，其製造技術與特殊加工方法，從已發表的技術文獻可得知製造方法為⁽¹⁻²⁾：

1. 熱熔法

熱熔法 (reflow) 是微透鏡製作最早與最主要的方法 (圖 1)，首先使用微影技術將光阻製成圓柱型陣列，然後加熱至光阻熔點使其熔化，因為表面張力與內聚力的關係，使圓柱形光阻陣列變成半球形的微透鏡陣列。這種製作方法的優點為：製造方式簡單、成本低廉。但是其缺點為：微透鏡的形狀控制困難、兩兩相鄰半球形微透鏡間需要較大間距 (gap) 才不至於黏在一起；因此填滿率 (fill factor) 相對降低⁽¹⁾。

2. 微粒滴法

微粒滴法 (droplets) 的製作方法 (圖 2) 是使用壓電陶瓷材料製成的微噴嘴來作為光阻的噴出口，並利用電腦控制電壓脈衝的頻率，使微噴嘴將液狀光阻小滴噴出至加熱板上方，由於表面張力作用使小液滴成為半球形表面⁽¹²⁾。

3. 光熱法

光熱法 (photothermal) 製作方法 (圖 3) 是藉由紫外光雷射 (UV-laser) 為光刻光源，於光敏 (photo sensitive) 玻璃表面上進行曝光，被照射到的光敏玻璃由於受到紫外光雷射的照射而產生結晶化與收縮作用，使光敏玻璃將未曝光部分的上、下兩面擠壓成半球形的微透鏡⁽¹²⁻¹³⁾。

4. 體積膨脹法

體積膨脹法 (volume swelling) 簡單示意圖如圖 4 所示，此法是藉由高能量光源照射於材質為壓克

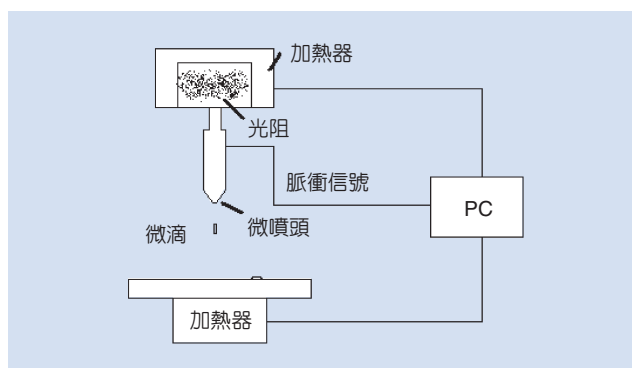


圖 2. 微粒滴法製作微透鏡示意圖⁽²⁾。

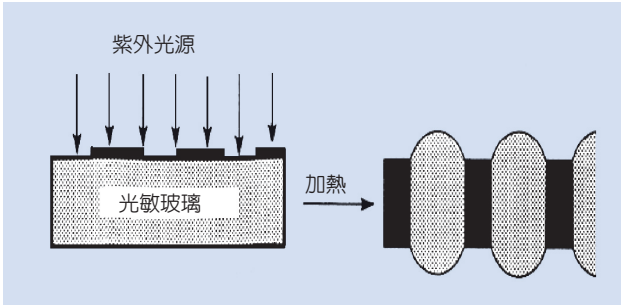


圖 3. 光熱法製作微透鏡示意圖⁽²⁾。

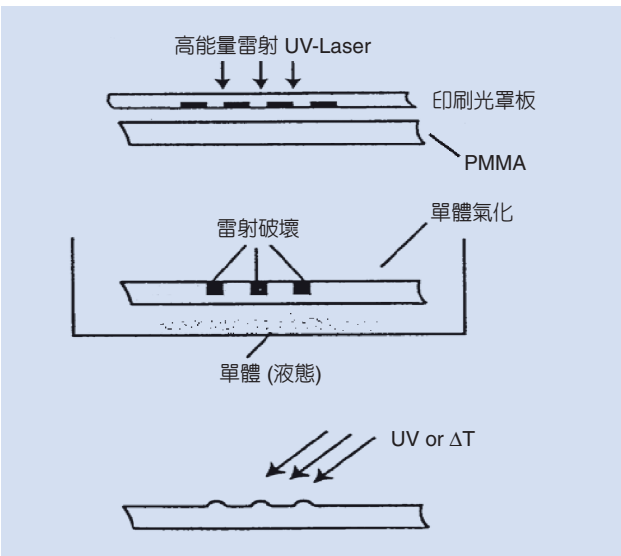


圖 4. 體積膨脹法製作微透鏡示意圖⁽¹⁾。

力 (PMMA) 的薄板，被照射的材料因為單體 (monomer) 擴散效應與化學鍵產生變化，而在被照射到的表面突起而形成半圓形球狀微透鏡⁽¹³⁻¹⁴⁾。

5. 準分子雷射微加工刻除 (Excimer Laser Micromachining) 法

當雷射機台準備就緒，將所要加工之工件放置加工平台上，在加工時，雷射光束固定不動，工件相對雷射光束直線作等速移動並於工件表面進行加工。若使用半圓形的光罩來進行加工，即可加工出一道半圓形溝槽。圖 5 是準分子雷射以拖曳式 (dragging) 加工微溝槽過程的示意圖，黃色箭頭部份是準分子雷射光光源；綠色部分是光罩部分，光罩形狀是半圓形⁽¹⁵⁻¹⁶⁾。

6. 非接觸壓模成形法

非接觸壓模成形法 (contactless embossing) 的操作過程是於高溫高壓下、以熱壓機製作微透鏡的母模加壓於加熱軟化的聚合物上 (圖 6)；控制溫度壓力與時間參數，使聚合物材料不接觸到母模內的頂點⁽¹⁷⁻¹⁸⁾。於熱壓成型的加熱過程中，微模具的內部便會熱熔成半球型微透鏡陣列。

7. 灰階光罩法

透過光罩的設計與光罩的性質，光罩對於曝光源只有穿透與阻擋兩種型式，使得灰階 (gray-scale or gray-level) 光罩的曝光率產生變化，曝光於工件上的能量也不同，而經過一次曝光顯影，便可以產生階梯狀或是層次高低不同的連續曲面的微透鏡⁽¹⁻²⁾，

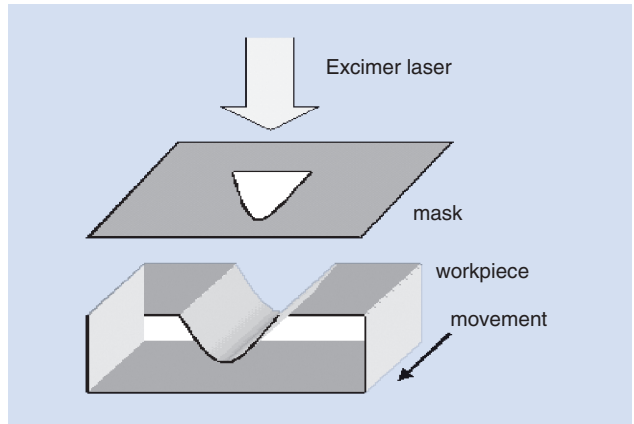


圖 5. 準分子雷射拖曳式加工示意圖。

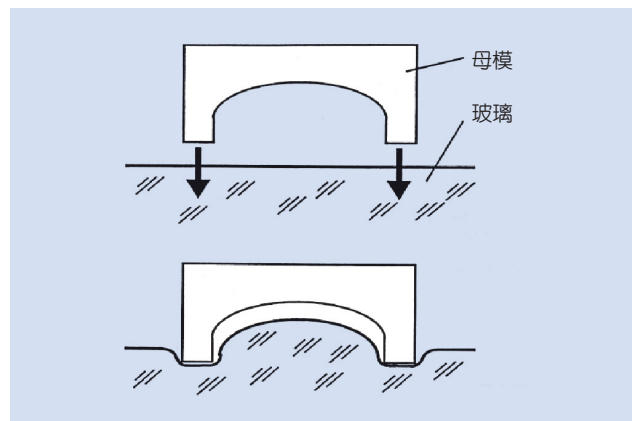


圖 6. 非接觸壓模成形法製作微透鏡示意圖⁽¹⁾。

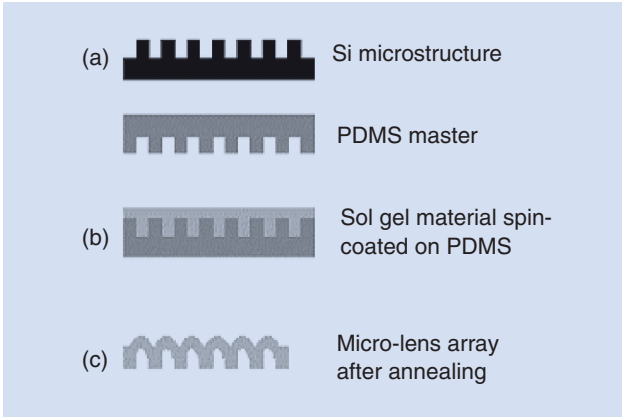


圖 7. sol gel 法製作微透鏡示意圖⁽²⁾。

但此法由於曝光顯影參數不易控制，微透鏡形狀重現度較難掌握。

8. 熔膠法

此微透鏡加工法是在矽晶圓表面製作微孔結構，再利用微翻模製造技術將 PDMS (polydimethylsiloxane master structures) 作成母模，然後將熔膠體 (sol gel) 利用旋轉塗佈技術塗於 PDMS 母模上面 (圖 7)，經過燒熱然後逐漸降溫冷卻，由於表面張力的關係而使熔膠體自然彎曲，形成半圓形微透鏡⁽²⁾。

上列八種微透鏡製造方法都可成功地批量製造半球形的微透鏡陣列，但是也有其優缺點，尤其是功能優異且應用廣泛的非球面微透鏡陣列製作較為困難，所以是亟待研發與突破的微製造技術。從加工製造技術而言⁽¹⁻²⁾，折射型微透鏡是三次元的立體形狀，而目前微機電系統相關的微製造技術如 LIGA 技術等主要用於製造 2.5D 的微結構與微元件，而現今細微放電加工 (micro EDM)、立體光刻術 (stereo lithography) 等可成功地製造 3D 形狀的微元件成品⁽¹⁴⁻¹⁸⁾，如使用灰階光罩製造非球面的微折射透鏡 (micro refractive lens) 與使用微快速成型 (rapid prototyping) 技術等。而本文主要是以準分子雷射拖曳式加工法製作非球面微透鏡陣列為研究項目，此製作方法簡單，可藉由改變光罩形狀製造出立體曲面的非球面微透鏡，同時將探討拖曳式加工所產生微透鏡的幾何形狀與軸對稱性，以期能製造出形狀精度更佳的非球面微透鏡陣列，並進一步擴展準分子雷射加工的應用範圍。

二、準分子雷射拖曳式加工

準分子雷射是 1970 年代於德國所發展出來的一種高功率的深紫外光雷射。一般於實驗上，雷射 LIGA 製程的光源大致上有 ArF (193 nm)、KrF (248 nm) 與 XeCl (308 nm) 等，KrF 雷射適合加工於聚亞醯胺 (polyimide) 與聚碳酸酯 (poly-carbonate, PC)，ArF 雷射適合加工壓克力與玻璃^(3,21-22)。準分子雷射具有一般雷射的特性⁽²³⁾，如：高純色性、高功率密度、高平行度，因此其發散角度小，且具有短波長，所以適合製作微結構。而準分子雷射的加工機制為光分解刻除 (photo-ablative decomposition)，是以短波長直接破壞雷射所照射工件材料的化學鍵來完成加工⁽³⁾。準分子雷射也廣泛應用於微機電系統、微電子工業、醫療器材、光電工業、眼科手術以及實驗研究用途。

自 1990 年初期迄今以來，光罩投影式準分子雷射加工已成功地製造出 2.5D 的微結構，如噴墨印表機噴嘴、微齒輪、微繞射式光學元件等⁽¹²⁻¹³⁾。所以準分子雷射在 2.5D 微結構的製造技術已發展成熟。因為受限於準分子雷射波長比 X 光波長還要長，且焦深 (depth of focus) 比較小的緣故，此技術的瓶頸在於微結構側壁 (side wall) 的垂直度，所以無法像 X ray LIGA 製造出較高深寬比的微結構。但在另一方面，可由控制加工次數 (累積雷射光照射能量) 與工件位置達成在特定位置產生所需要的加工深度及所要的形狀。此種可加工曲面的特點使準分子雷射在三次元形狀加工應用的相關研究也日趨重要⁽³⁻⁵⁾。因此本研究針對準分子雷射拖曳式加工後所得六角形排列微透鏡陣列製作技術進行相關研究。

通常準分子雷射加工為聚焦投影 (projection) 的方式，工件以相對於雷射光束運動來進行加工刻除，也就是準分子雷射拖曳式加工方法，如圖 5 所示。此法的加工特點為加工深度和各位置的雷射光累積照射量呈正比；所以改變工件運動速度可得到不同圓弧形狀微溝槽。如以準分子雷射透過半圓形光罩於移動工件拖曳加工一次，工件上可以得到一道長條狀溝槽；將工件旋轉 90 度後，再拖曳加工一一道微溝槽，於重複加工的區域便可得到直角座

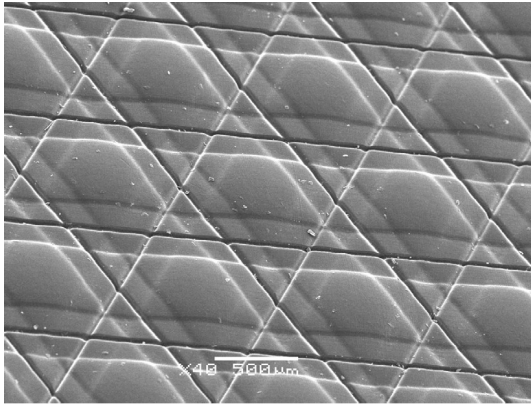


圖 8. 六角形座標排列微透鏡陣列的電子顯微鏡照像圖。

標排列的微透鏡陣列。本文將討論拖曳式加工三次，意即加工一道微溝槽後；重複二次將工件旋轉 60 度後加工，即可獲得六角形座標排列的微透鏡陣列，如圖 8 所示。本研究將以程式模擬此兩種方法加工後微透鏡的幾何形狀，並比較直角座標排列的與六角座標排列的微透鏡陣列相關特性。

三、微透鏡幾何形狀的模擬

自 1994 年德國研究人員就提出以準分子雷射拖曳式加工製造非球面微透鏡陣列，證明拖曳式加工具有三次元形狀微加工的特點；所以拖曳式加工兩次後即可獲得直角座標排列的微透鏡陣列。

但本研究首創以拖曳式加工三次，因此本文將以程式模擬加工後的幾何形狀，以期能製造軸對稱性佳的非球面微透鏡陣列，並發展可製造高形狀精度的非球面微透鏡陣列之相關三次元微製造技術。

在機器視覺 (machine vision) 與影像處理 (image procession) 研究領域中、六角座標排列的使用有其特有的優點，連接 90 (connection) 判別容易。因此六角形座標排列的微透鏡陣列的加工為一值得探討的方向。在微透鏡的幾何形狀與光學性能也將隨著拖曳式加工次數與加工方向角度的不同而改變。

先前直角座標排列的微透鏡陣列研究成果，如圖 9 為以程式模擬準分子雷射拖曳式加工結果；並與實際工件形狀經由電子顯微鏡照相結果互相比較。可以證明定性上模擬與實際結果相符合。

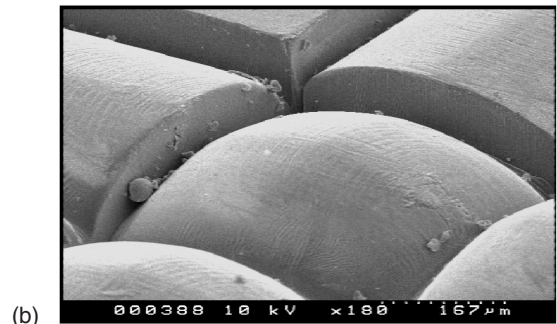
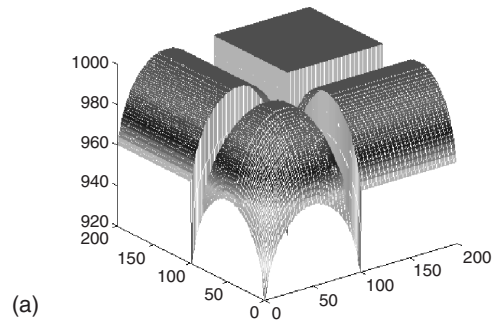


圖 9. 準分子雷射拖曳式加工所得加工模擬結果圖 (a) 與實際加工結果 SEM 量測圖 (b)。

其中拖曳式加工兩次與拖曳式加工三次示意圖如下所示。由圖 10 與圖 11 的比較得知；隨著拖曳式加工次數與加工方向角度的不同、微透鏡的幾何形狀與光學性能也將而改變。而且填滿率也不同。為進一步研究單一個微透鏡立體形狀；將由微透鏡的等高線圖與不同方向剖面線圖比較討論直角座標排列與六角形座標排列的微透鏡陣列之差異。

首先探討的是以半圓形光罩進行拖曳式加工兩次，所得到的模擬微結構是圖 12 之 (a) 等高線分布圖所示，觀察此圖其中間比較趨近於同心圓形，

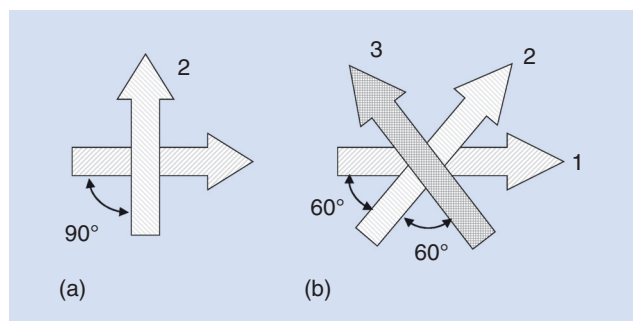
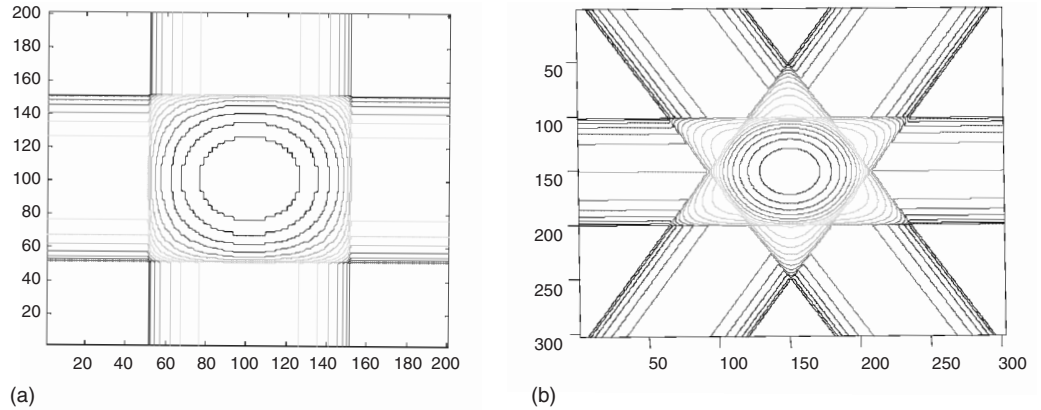


圖 10. 準分子雷射拖曳式加工兩次示意圖 (a) 與拖曳式加工三次示意圖 (b)。

圖 11. 拖曳式加工兩次所得之單一微透鏡模擬立體等高線圖 (a) 與拖曳式加工三次所得之單一微透鏡模擬立體等高線圖結果圖 (b)。



即結構中央區域的軸對稱性較佳，相對的光學性能也較佳。但在四周角區域，越往結構的四個角落，等高線的落差也越大，軸對稱性也較差，所以形狀精度較差。亦即以半圓形光罩進行準分子雷射拖曳式加工兩次所得之直角座標排列的微透鏡軸對稱性較差，無法成為合格的非球面微透鏡陣列。反之以

半圓形光罩進行拖曳式加工三次；所得之六角形座標排列的單一微透鏡模擬等高線分布圖為圖 13 之左圖。此圖中等高線較趨近於同心圓形，即區域內的軸對稱性較佳，相對的光學性能也較佳。亦即以半圓形光罩準分子雷射拖曳式加工三次；所得之六角形座標排列的微透鏡軸對稱性較佳。

圖 12. 直角座標排列的單一微透鏡模擬等高線圖直 (a) 與不同方向剖面線圖 (b)。

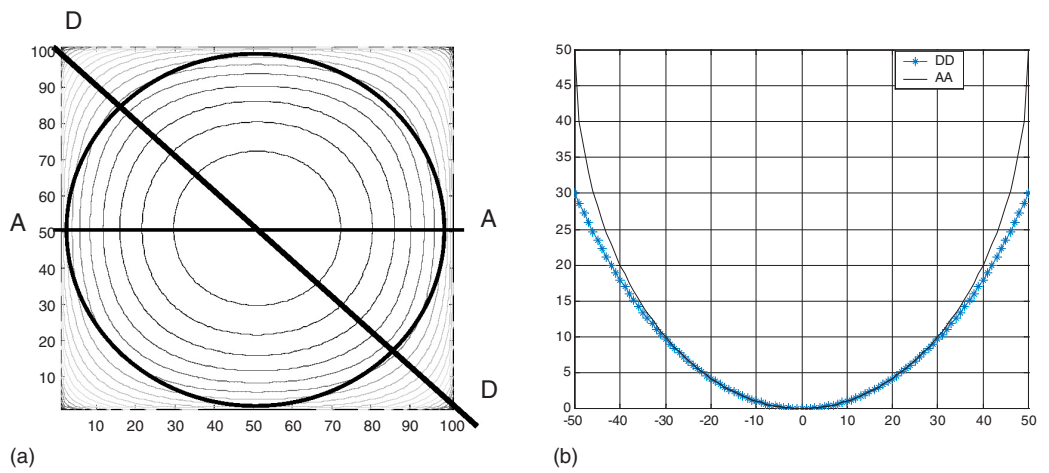
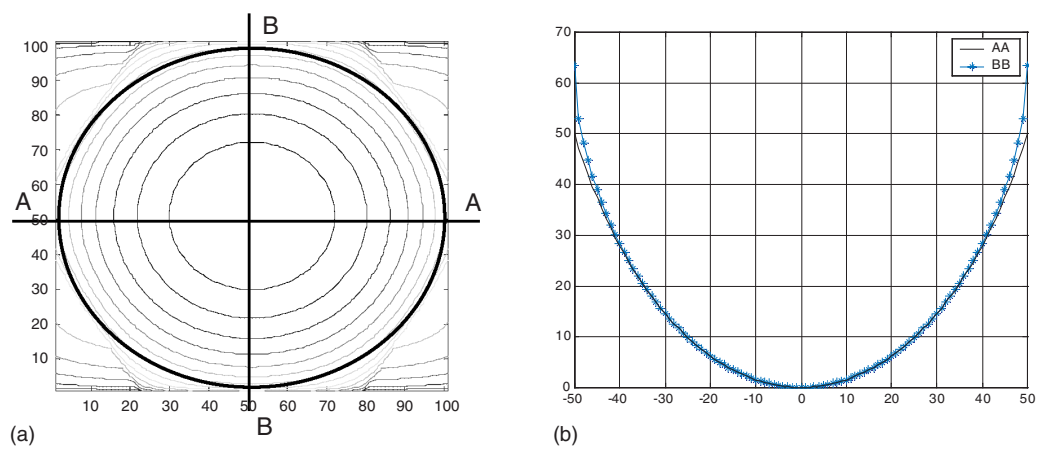


圖 13. 六角形座標排列的單一微透鏡模擬等高線圖 (a) 與不同方向剖面線圖 (b)。



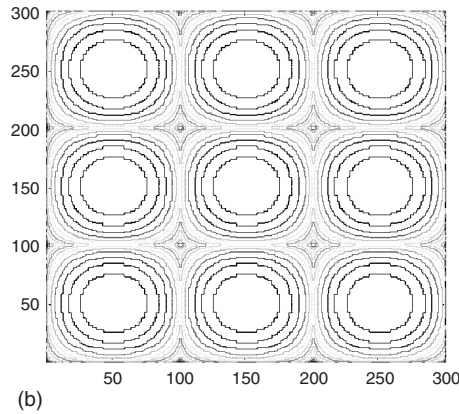
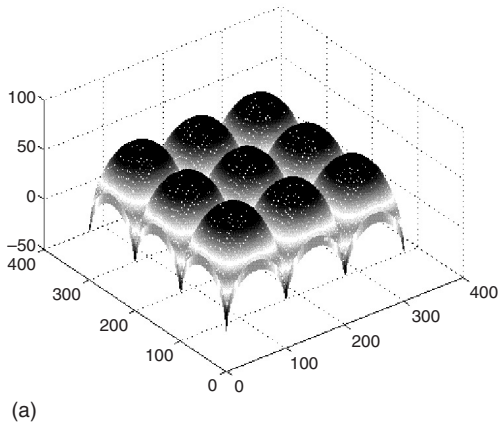


圖 14. 拖曳式加工兩次所得之直角座標排列微透鏡陣列的模擬立體結果圖 (a) 與模擬等高線圖 (b)。

由上列剖面線圖形比較得知；隨著拖曳式加工次數與加工方向角度的不同、微透鏡的幾何形狀與光學性能也將而改變。就單一微透鏡不同方向剖面線圖而言；圖 12 右圖中 AA 與 DD 剖面線的差異較大；所以軸對稱性也較差。而圖 13 右圖中 AA 與 BB 剖面線的差異較小；所以軸對稱性則較佳。此點也證明上六角形座標排列微透鏡的形狀精度較高。因此定性上以半圓形光罩拖曳式加工三次；所得之六角形座標排列的軸對稱性較佳。

1. 填滿率 (fill factor) 計算過程

以三個相同形狀 (如半圓形) 的光罩同時進行拖曳式加工兩次模擬；可得 (3 × 3) 直角座標排列的微透鏡陣列 (圖 14)。以此類似方式模擬三個同樣形狀的光罩進行拖曳式加工三次；所得之六角座標排列的微透鏡陣列 (圖 15)。

其中拖曳式加工兩次所得之直角座標排列的微透鏡陣列填滿率 (fill factor) 計算過程如下；假設圖

14 之右圖內的單一微透鏡半徑長度為 1，並 (以非嚴格標準) 將此圓內視為有效區域。則直角座標的微透鏡陣列填滿率 = $\frac{\pi \times 1 \times 1}{2 \times 2} = 0.7854$ 。

對六角形座標排列的微透鏡而言，同樣假設圖 15 之右圖內單一微透鏡半徑長度為 1；考慮其中以粗黑線的六角形區域內，以半圓形光罩拖曳式加工三次所得之六角形座標排列的微透鏡陣列填滿率 =

$$\frac{7 \times \pi \times 1 \times 1}{\left[\left(6 \times 6 \times \sec(30^\circ) - \left(4 \times \frac{1}{2} \times 3 \times 3 \times \tan(30^\circ) \right) \right) \right]} = 0.7054。$$

直角座標排列與六角形座標排列的微透鏡陣列比較表如表 1 所示。也證明直角座標排列與六角形座標排列微透鏡陣列的幾何特性顯然不同。而些許的幾何形狀差異將產生軸對稱性的不同。由前列結果得知六角座標排列微透鏡陣列可以改進微透鏡的軸對稱性；但是在採用寬鬆的有效區域定義下，直角座標排列微透鏡陣列的填滿率較高。

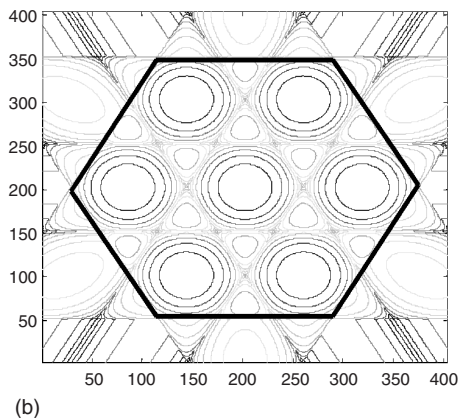
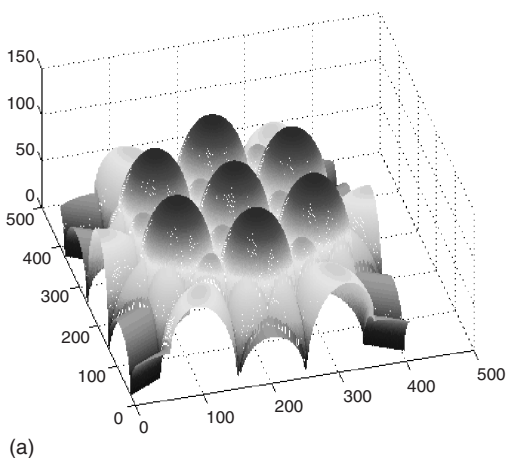


圖 15. 拖曳式加工三次所得之六角形微透鏡陣列的模擬立體結果圖 (a) 與模擬等高線圖 (b)。

表 1. 直角座標與六角形座標排列的微透鏡陣列比較表。

座標排列	直角座標	六角形座標
微透鏡總數	9	7
填滿率	0.7854	0.7054
軸對稱性 (以半圓形光罩)	不佳	佳

四、結論

本研究首創以拖曳式加工三次；加工一道圓弧形微溝槽後，將工件旋轉 60 度後加工，重複兩次後即可獲得六角形座標排列的微透鏡陣列。以程式模擬加工後的幾何形狀，並比較直角座標排列的與六角座標排列的微透鏡陣列特性。由電腦程式模擬結果得知；以半圓形光罩進行拖曳式加工後，六角座標排列微透鏡陣列的軸對稱性較佳。但是在採用寬鬆的有效區域定義下，直角座標排列微透鏡陣列的填滿率較高。因此根據應用端需求的不同，均可事先以本研究所建立之模擬與分析作良好的彈性調整。

參考文獻

1. S. Sizinger and J. Jahns, *Microoptics*, Wiley-Vch (1999).
2. H. P. Herzig, *Micro-optoics: Element, system and applications*, Taylor & Francis (1997).
3. <http://www.omron.com>
4. <http://www.optosigma.com>

5. 張勝雄, 劉海北, 光電資訊, **22**, 26 (1995),
6. 劉海北, 光電科技, (1), 85 (1996).
7. K. Ender, R. Patzel, and D. Basting, *Optical and Quantum Electronics*, **27**, (1995)
8. T. R. O'Keeffe and T. E. Lizotte, *SPIE*, **2062** (1994).
9. G. Chryssolouris, *Laser Machining: Theory and Practice*, Springer-Verlag (1991).
10. T. Bahners, *Optical and Quantum Electronics*, **27** (1995).
11. Y. F. Lu, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 1, 12B, L7138 (1994).
12. Y. F. Lu, S. Komuro and Y. Aoyagi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 1 (1994).
13. 周敏傑, LIGA 製程技術發展現況, 機械工業, **2**, 96 (1996).
14. H. Lowe and W. Ehrfeldt, *Proceedings of 38th Int. Sc. Coll. Ilmenau, FRG*, (1994).
15. Ehrfeld, et al., *Nuc. Instr. Meth. Phys. Res.*, **A 303** (1995).
16. H. Kuck, et al., *SPIE*, 2440 (1995).
17. C. P. Kuck, *SPIE*, **2062** (1994).
18. S. H. Lee, *SPIE*, CR49 (1993).
19. E.-B. Kley and W. Dorl, *VDI Berichte*, **1012**, 531 (1992).
20. E.-B. Kley, T. Possner, and D. R. Goring, *VDI Berichte*, **1012**, 531 (1993).
21. K. Zimmer and F. Bigl, *Proc. SENSOR'95*, 779 (1995).

-
- 王述宜先生為國立中山大學機械工程博士，現任正修科技大學機械工程學系助理教授。
 - 黃俊欽先生為正修科技大學機電工程研究所碩士。
 - Shuh-Yi Wang received his Ph.D. in mechanical engineering from National Sun-Yat-Sen University. He is currently an assistant professor in the department of Mechanical Engineering at Cheng-Shiu University.
 - Chun-Chini Huang received his M.S. in mechanical engineering from Cheng-Shiu University.