

以玻璃模造技術製作雙面微透鏡陣列製程之研究

Fabrication of Micro Tandem Lens Array by Glass Molding Technique

黃建堯、周曉宇、張耿碩、蕭文澤、周長彬

Chien-Yao Huang, Hsiao-Yu Chou, Keng-Souo Chang, Wen-Tse Hsiao, Chang-Pin Chou

近年來，微透鏡陣列已成為光學系統中的重要元件，微透鏡陣列的其中一個應用即是將光的能量均勻化，相較於單面微透鏡陣列，雙面微透鏡陣列的對位結構更容易。微透鏡陣列若由玻璃材料製作，可應用在高溫環境或高能量系統，例如雷射系統等。玻璃微透鏡陣列可利用雷射加工、光微影技術或精密玻璃模造技術等方法來製造，但是雷射加工技術和光微影技術並不適合量產。因此，本研究利用雷射加工技術和玻璃模造技術來製作雙面微透鏡陣列。首先在碳化矽表面製作直徑 $500\ \mu\text{m}$ 且深度 $200\ \mu\text{m}$ 的微孔陣列，之後利用兩個碳化矽模仁，透過精密玻璃模造技術來成形雙面微透鏡陣列。在本研究中，將探討雷射脈衝重複頻率、雷射掃描速度、模造溫度以及模造力量等參數的影響。此外，亦將探討雙面微透鏡陣列的形貌與折射率等特性。最後利用鈉玻璃材料完成直徑 $20\ \text{mm}$ ，且透鏡高度為 $52\ \mu\text{m}$ 、曲率半徑為 $851\ \mu\text{m}$ 、透鏡間距為 $700\ \mu\text{m}$ 之雙面微透鏡陣列。

In recent years, micro lens array (MLA) has become an important element for optical systems. One of the most important applications of MLA is to uniform the intensity of light. The alignment construction of double-sided MLA is easier than one-sided MLA. The MLA fabricated by glass materials could be used in high energy systems or high temperature environment, such as laser system. Glass based MLA could be fabricated by laser machining, photolithography and precision glass molding (PGM) technologies, but the former two technologies are not suitable for manufacturing. In this paper, we proposed a manufacturing method of double-sided MLA by laser machining and PGM technique. A micro holes array was firstly fabricated on the surface of silicon carbide (SiC) mold material with the diameter of $500\ \mu\text{m}$ and depth of $200\ \mu\text{m}$. The double-sided MLA was then molded by PGM process with two molds. In this paper, the parameters including laser pulse repetition rate, laser scanning speed, molding temperature and molding force, and the characteristics of double-sided MLA such as profile and refractive index were discussed. We obtained the result that the double-sided MLA with the diameter of $20\ \text{mm}$ and each lens with the height of $52\ \mu\text{m}$, the radius of $851\ \mu\text{m}$, and the pitch of $700\ \mu\text{m}$ on soda lime glass.

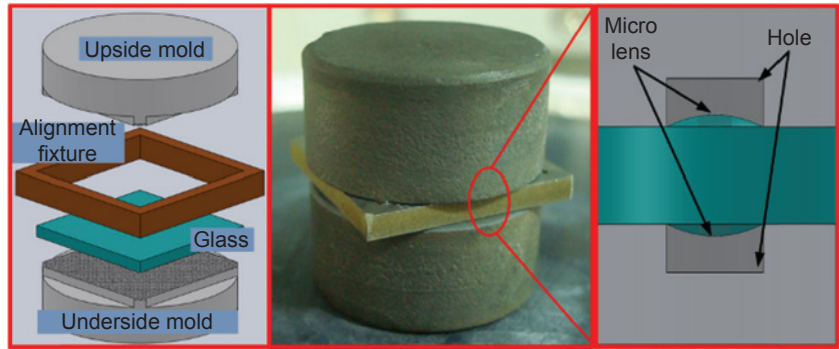


圖 1. 雙面微透鏡陣列成形示意圖。

一、前言

微透鏡陣列廣泛應用於光學系統，例如液晶顯示器、聚焦平面光學元件、光效率增強器、彩色濾光片、光束整形器和微型光掃描器^(1, 2)，利用其勻光功能，使光束能量均勻化，經過光學設計的透鏡甚至可對光束進行整形。相較於單面微透鏡陣列，雙面微透鏡陣列不需考慮兩個單面微透鏡元件的對位精度。近年來學者提出許多微透鏡陣列之製程方法，例如 Popovic 與 Hutley 分別於 1988 及 1990 使用再熔 (reflow) 法^(3, 4)、Lee 於 2001 年利用熱壓回熔法⁽⁵⁾、Cox 於 2001 年使用微液滴 (droplet) 法⁽⁶⁾、Sizinger 於 1999 年透過灰階光罩 (gray scale) 法⁽⁷⁾、Lee 於 2002 年使用 LIGA 製造法⁽⁸⁾ 及 Park 於 1999 年使用紫外光成形膠法⁽⁹⁾。

玻璃材料因具有較高硬度、耐候性以及穩定物理特性等優點⁽¹⁰⁾，故廣泛應用於高能光學系統，本研究藉由精密玻璃模造技術來批量且快速製作玻璃微透鏡陣列，玻璃模造製程可同時成形雙面的微透鏡陣列結構，不需分次的單面成形，故可減少因加工過程拆裝而造成的雙面對位誤差。但是玻璃模造技術所需模仁加工費用昂貴，因此，本研究利用雷射加工技術來加工碳化矽模仁，相較於超精密輪磨技術，雷射技術較便宜而且加工速度快，且為非接觸式加工，所製作之微結構幾何尺寸，例如間距、深度、外形，皆可快速地透過調整雷射參數而更改，能因應不同的設計需求。

二、實驗方法與步驟

使用紫外光 (UV) 雷射 (AVIA 355-14, Coherent Inc.) 在碳化矽模仁表面製作孔徑 $500 \mu\text{m}$ 、深度

$200 \mu\text{m}$ 且間距為 $700 \mu\text{m}$ 之圓孔陣列，使用此模仁，利用表面張力原理，透過精密玻璃模造系統 (207HV, Toshiba) 搭配對位固定環 (alignment fixture) 在鈉玻璃表面成形雙面微透鏡陣列，如圖 1 所示，因微透鏡表面並不會接觸到微孔底部，亦即經過雷射加工後的模仁表面粗糙度不會影響透鏡表面粗糙度，故可降低對模仁的加工品質要求，減少加工成本。之後利用精密共軛焦顯微鏡 (VK9700, Keyence)、電子顯微鏡及阿貝式折射率量測儀量測其表面輪廓及折射率等性質，實驗流程如圖 2 所示。

1. 實驗材料

玻璃模造技術所使用的模仁材料需在高溫時具有高剛性，因此碳化矽 (SiC)、碳化鎢 (WC) 以及玻璃碳 (glassy carbon) 皆是常見的模仁材料。本實驗使用碳化矽作為模仁材料，其上模仁與下模仁尺寸皆為外徑 20 mm 以及厚度 10 mm ，在其端面製作微孔陣列，進行微孔加工製程中一併製作對位側邊結構，如圖 1 示意圖，利用對位固定環拘束上模仁與下模仁之圍繞微孔陣列的四方向側邊，因側邊與微孔是使用精密雷射加工系統同時製作，且固定環是使用精密線切割放電加工機製作，其相對位置精度極高，因此可使上模仁與下模仁在模造製程中保持高對位精度。成形微透鏡陣列之材料使用鈉玻璃 (soda lime glass)，其透光性佳、表面平整、厚度薄且價格便宜。本研究所使用之鈉玻璃為外徑 20 mm 、厚度 1.2 mm 。

2. 雷射加工技術

碳化矽是燒結的硬脆材料，通常使用研磨或鑽石銑削的方式來製作外形或結構，但這兩種加工方

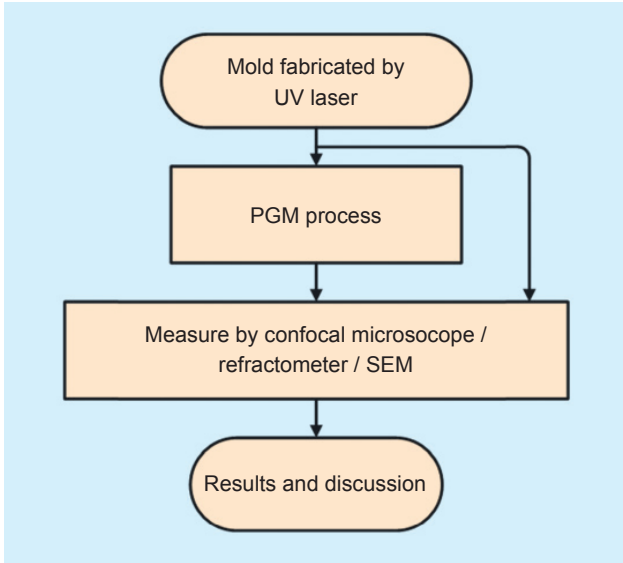


圖 2. 實驗流程圖。

式皆有其加工幾何尺寸的限制，對於微米結構較難加工。雷射光束聚焦尺寸小，例如本實驗所使用之紫外光雷射其聚焦尺寸約僅 $30\ \mu\text{m}$ ，故極適合加工微結構。圖 3 為雷射加工系統示意圖，雷射加工為非接觸式加工，加工過程中機械力極小，因此被加工材料僅需置放在加工平台上，不需額外夾持，可避免材料因夾持而受損。

雷射製程雖然加工金屬材料會產生再鑄層 (recast layer)，但是對於燒結材料卻不會有此現象，因此適合使用雷射加工技術在碳化矽上成形所需的微孔結構。圖 4 為雷射加工金屬材料 (不鏽鋼) 與燒結材料 (碳化矽) 之再鑄層比較圖，圖中可看出雷射加工金屬材料會產生嚴重的再鑄層堆積，嚴

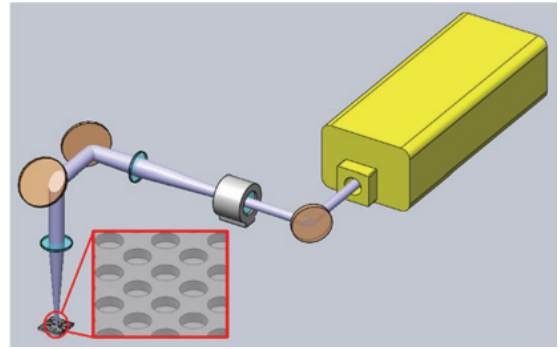


圖 3. 雷射系統架構示意圖。

重影響微結構表面輪廓，而燒結材料幾乎沒有產生再鑄層。

雷射掃描速度是雷射加工中的重要控制參數，適當的雷射掃描速度可縮短加工時間、降低加工成本並獲得優良的加工品質。本實驗使用波長為 $355\ \text{nm}$ 之紫外光雷射系統，搭配振鏡掃描系統對工件進行加工，針對加工速度 $50-500\ \text{mm/s}$ 進行加工品質分析，所使用的輸出功率為 $14.3\ \text{W}$ 。此外，雷射脈衝重複頻率會影響雷射輸出功率大小，而微孔陣列結構的間距亦會影響微透鏡勻光效果，在本研究中亦會對其進行實驗分析。

3. 玻璃模造技術

玻璃模造技術具有成形精度高、成形週期短以及可成形自由曲面輪廓元件等優點，近年來被廣泛用來量產高精度光學元件。其製程為將玻璃預形體加熱至模造成形所需溫度，一般而言高於降伏點 (At) 溫度 $20-30\ ^\circ\text{C}$ ，之後施加力量於模仁上，模

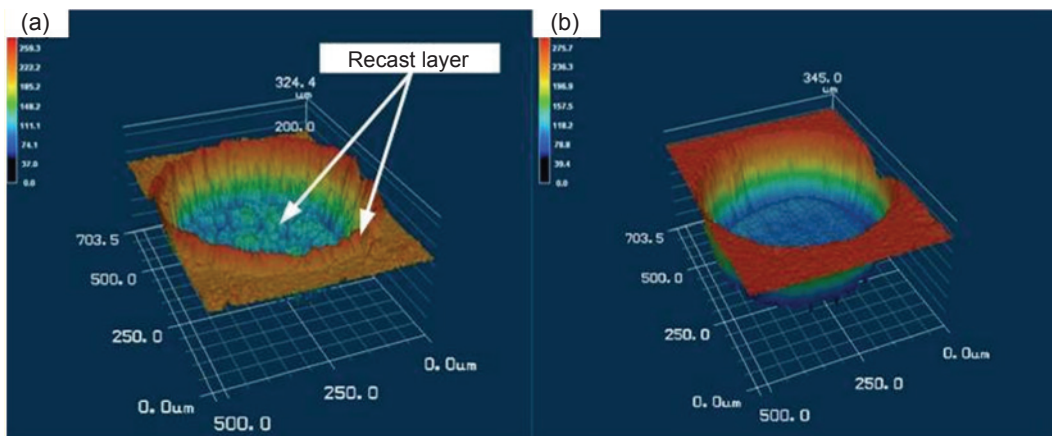


圖 4.
(a) 金屬 (不鏽鋼) 與 (b) 燒結材料 (碳化矽) 經雷射加工後表面形貌。

仁輪廓將轉寫至玻璃元件，冷卻後即完成光學元件成形製程。一般而言，外徑小於 50 mm 之元件，僅需 30 分鐘以內的成形週期。圖 5 為玻璃模造之二段成形製程履歷，玻璃模造製程中，溫度與力量是極為重要的參數，本研究利用精密玻璃模造熱壓機，針對 680 °C 與 690 °C 的模造溫度與 500—2500 牛頓的模造力量評估其對微透鏡陣列輪廓的影響。

玻璃模造製程歷經升溫與降溫，將玻璃軟化之後成形輪廓，因此將會影響材料折射率，而鏡片的折射率若與光學設計時不同，將會影響元件或系統的光學品質。儀科中心在今年建置經全國認證基金會 (TAF) 所核准針對折射率測試項目之測試實驗室，採用 ISO 489:1999 的折射率量測方法與儀器，本文透過折射率測試分析，可得知經過玻璃模造製程後折射率變化趨勢，以此來補償光學設計參數，獲得較正確的光學模擬結果。

在玻璃模造製程時，通常會避免在大氣環境中成形，因高溫過程，大氣中的氧氣易與模仁以及模造設備中的治具產生氧化反應，降低模仁等零組件的使用壽命，因此在模造製程中，模造設備的腔體內部可設定為氮氣環境或是真空環境，本研究亦探討兩者之間的元件成形品質差異。

三、結果與討論

本研究是利用微孔來成形微透鏡，因此微孔的孔徑尺寸對微透鏡的影響極為重要，由實驗結果顯

示，微孔孔徑愈大，其微透鏡之曲率愈大且高度愈小，過大的孔徑，甚至造成玻璃成為圓柱面，而無法成形有曲率的微透鏡，而過小的孔徑，容易在玻璃模造製程時過度填充玻璃材料，造成微透鏡破裂以及模仁因阻塞玻璃材料而無法使用，因此本研究選擇微孔孔徑為 500 μm 。以下將分別就微孔間距、雷射脈衝重複頻率、雷射掃描速度、模造製程腔體環境、模造溫度與模造力量以及降溫速度來探討其對於雙面微透鏡陣列之幾何輪廓與折射率的影響。

1. 微孔間距的影響

微透鏡陣列的作用是藉由透鏡的曲面將光束能量均勻化，因此若透鏡間有平面結構，則視為對勻光功能無助益之無效區域，因此，透鏡上的平面結構愈少，透鏡陣列的勻光能力愈佳。而透鏡之平面結構即為微孔之邊緣間距區域，若邊緣區域不足，將直接影響模仁結構強度，導致模仁在玻璃模造製程中損壞。如圖 6 為不同微孔間距的雷射共軛焦顯微鏡影像，微孔尺寸為 500 μm ，因此微孔間距 600 μm 時，其微孔邊緣區域為 100 μm ，圖 6(d) 顯示微孔過於接近時，模仁微孔邊緣已破損，無法成形微透鏡。雷射加工的特色之一即為簡易地修改圖形參數，即可獲得不同孔徑與間距之模仁，圖 7 分別為孔徑 500 μm 搭配間距 700 μm 以及孔徑 400 μm 搭配間距 600 μm 之碳化矽模仁。考量模仁結構強度與透鏡無效平面區域，選擇孔徑 500 μm 與間距 700 μm 之設計作為後續實驗模仁。

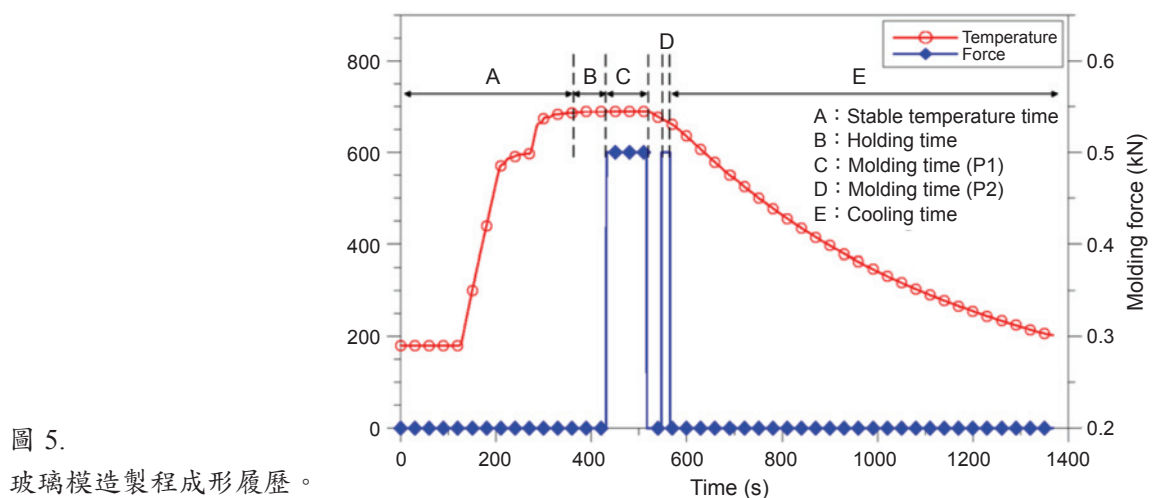


圖 5. 玻璃模造製程成形履歷。

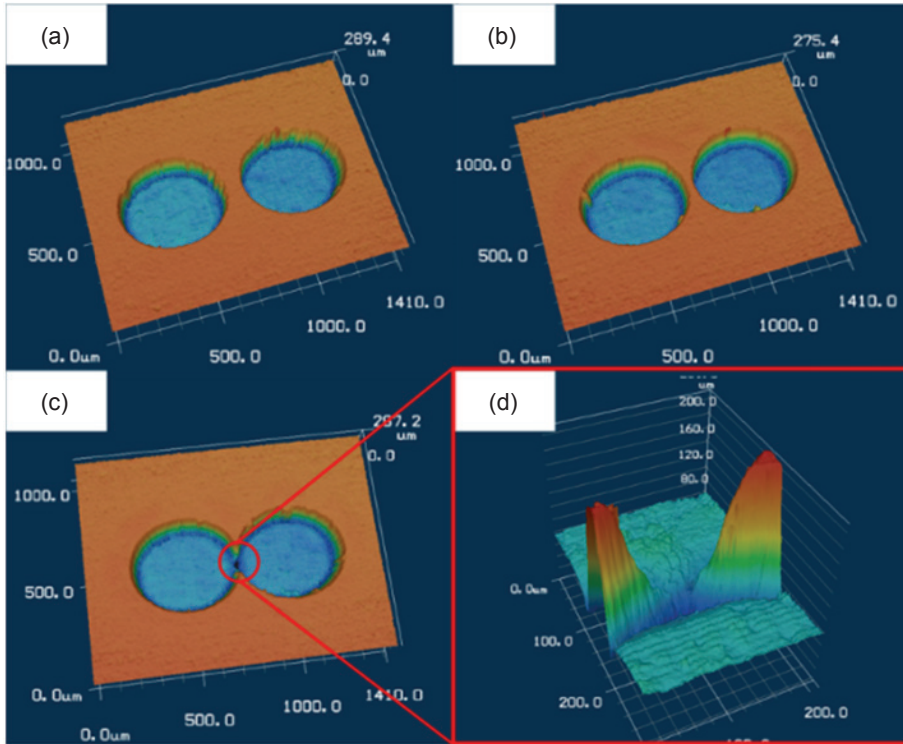


圖 6. 模仁微孔之共軛焦顯微鏡影像，间距與顯微鏡倍率為 (a) 600 μm 、200 \times ，(b) 550 μm 、200 \times ，(c) 500 μm 、200 \times ，(d) 500 μm 、1000 \times 。

2. 雷射脈衝重複頻率的影響

雷射加工的作用時間 (t) 可表示為：

$$t = f \times \Delta t \quad (1)$$

其中， Δt 為脈衝時間，在雷射系統中設定為 30 μs ， f 則為脈衝重複頻率 (pulse repetition frequency)。單發的瞬間功率可以表示為 P_p ，其定義為：

$$P_p = \frac{P_a}{t} \quad (2)$$

其中， P_a 為平均功率，而單發雷射作用在工件上之能量 E 可定義如下：

$$E = \frac{P_p}{A} \quad (3)$$

其中， A 為單發雷射所加工之材料面積，因為雷射光束為圓對稱，故材料面積可定義為：

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (4)$$

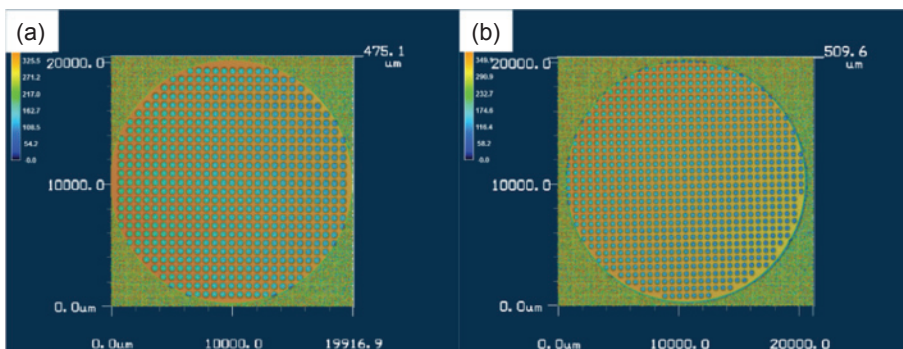


圖 7. 模仁 (a) 孔徑 500 μm 、间距 700 μm ，(b) 孔徑 400 μm 、间距 600 μm 。

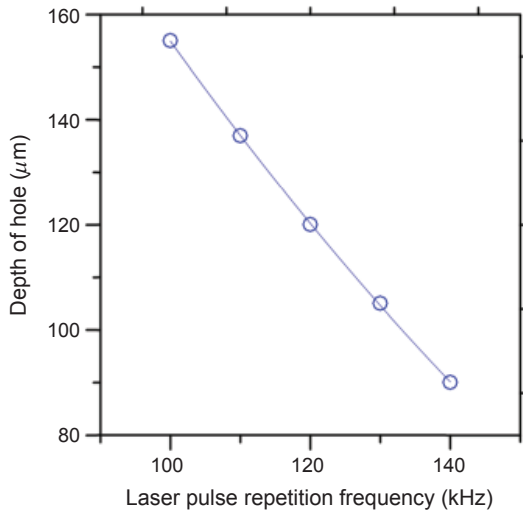


圖 8. 雷射脈衝重複頻率與微孔深度關係。

其中， d 為雷射光束直徑，針對 AVIA 355-14 紫外光雷射，其雷射光束直徑為 $30\ \mu\text{m}$ 。

由公式 (3) 可知，材料所接收到的單發雷射能量決定於雷射脈衝重複頻率，脈衝重複頻率越高則雷射功率隨之下降。表 1 為不同的脈衝重複頻率參數下，其相對應的雷射輸出功率，可看出趨近於線性關係。故針對脈衝重複頻率對碳化矽微孔深度的影響進行實驗，結果如圖 8 所示，亦為線性關係。

表 1. 雷射脈衝重複頻率與輸出功率關係表。

脈衝重複頻率 (kHz)	輸出功率 (W)
100	14.3
110	13.3
120	12.2
130	11.3
140	10.4

選擇較低之脈衝重複頻率可獲得較大微孔深度，且因碳化矽為燒結材料，不會產生再鑄層，因此選用 100 kHz 之脈衝重複頻率來加工碳化矽模仁。圖 9 是不同脈衝重複頻率參數條件下所加工的微孔結果，可明顯看出頻率愈低，其微孔深度愈深，雖然雷射加工後表面呈現粗糙結構，但本研究之微透鏡陣列成形法，其微孔底部並不會接觸到玻璃材料，因此微孔底部的粗糙度對微透鏡表面品質並無任何影響。

3. 雷射掃描速度的影響

雷射掃描速度快，可以縮短加工時間，節省加工成本。但雷射速度過快，每個微結構接收到的雷射能量就愈小，因此加工深度會降低，過快的加工

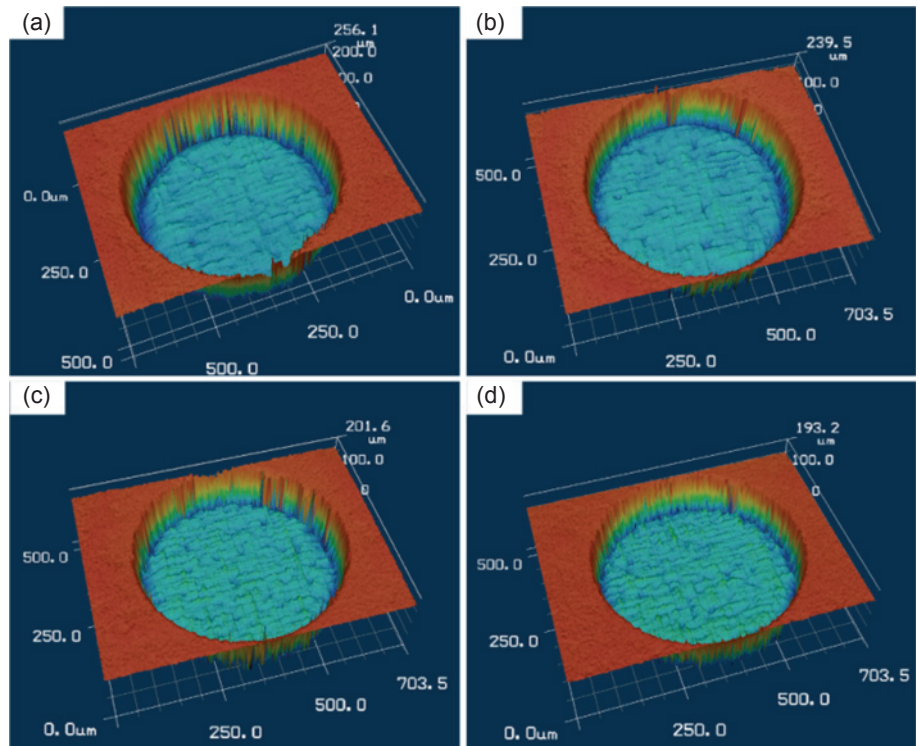


圖 9. 不同雷射脈衝重複頻率加工之微孔，(a) 110 kHz，(b) 120 kHz，(c) 130 kHz，(d) 140 kHz。

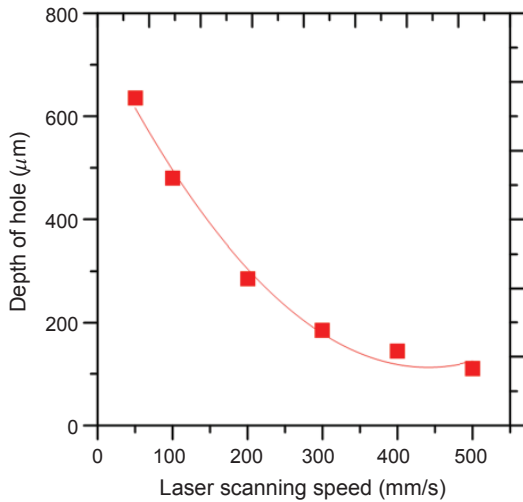


圖 10. 雷射掃描速度與微孔深度關係圖。

速度，甚至會超過雷射系統中的振鏡運作速度極限，將會導致雷射光斑重疊率不足，造成微結構不連續。而過慢的加工速度，除了增加加工時間外，因振鏡運作速度較慢，碳化矽表面累積過多雷射能量，將造成微孔結構不平整。圖 10 為雷射掃描速度與微孔深度的關係圖，隨著加工速度增加，雖然加工時間縮短，但是微孔深度也隨之下降。

圖 11 是不同雷射掃描速度製作之模仁，圖 11(a) 明顯看出因掃描速度過慢而造成之不平整微孔結構，因此考量加工時間與微孔深度，在雷射輸出功率為 14.3 W 的條件下，選擇加工速度 400 mm/s 在碳化矽表面成形微孔陣列。圖 12 為碳化矽模仁上之微孔陣列，碳化矽外徑為 20 mm，每一微孔直徑為 500 μm，可明顯看出模仁表面並無任何再鑄層堆積。

4. 模造腔體環境的影響

精密玻璃模造設備可分為單站式與連續式兩種機型，在單站式的設備中，為了避免模仁以及膜層因模造製程時的高溫氧化而受損，通常會在設備腔體中充填氮氣或抽真空，以避免模造製程中腔體內部有過多氧氣存在，一般而言，在製程中氧氣含量不超過 30 ppm。而在腔體內部為真空狀態或是充填氮氣狀態時，玻璃元件成形的溫度與力量條件也不相同。圖 13 分別是在真空腔體環境中以及在氮氣腔體環境中成形的微透鏡，可明顯看出充填氮氣的腔體環境中，微透鏡的成形高度遠高於在真空環境中成形的微透鏡。表 2 列出的實驗結果顯示，在

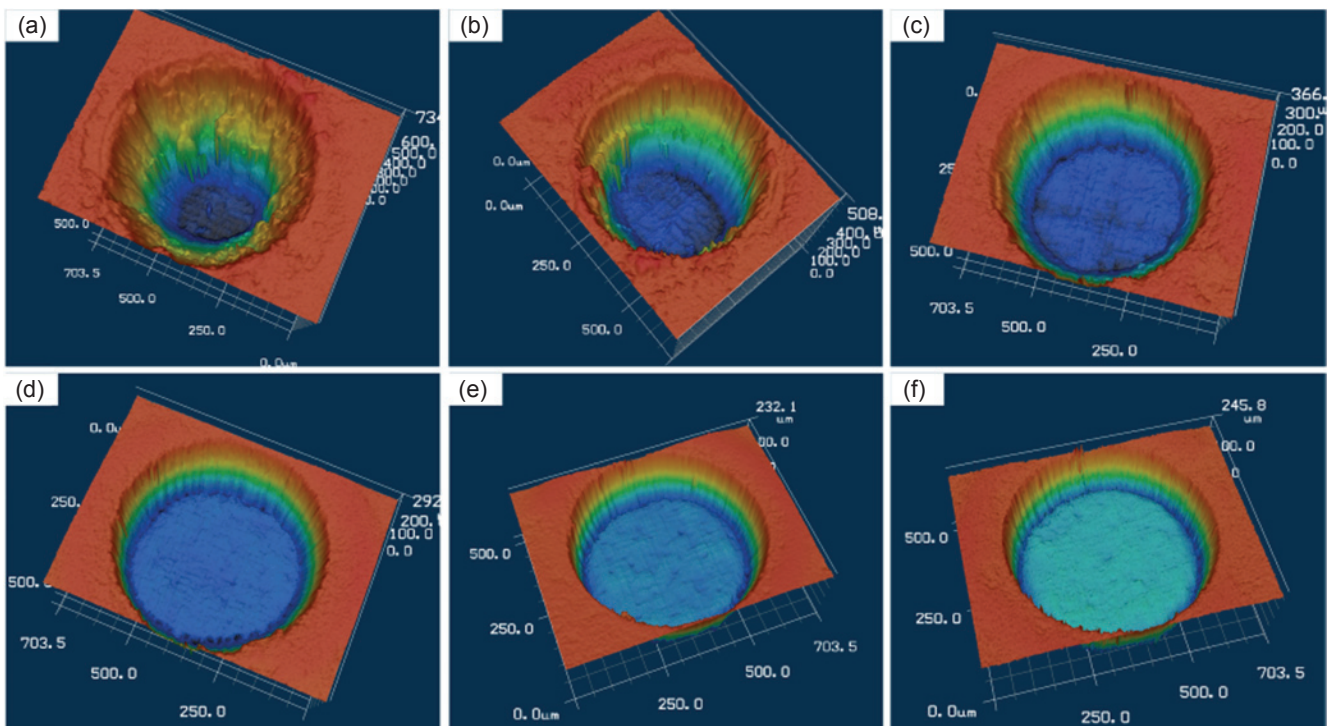


圖 11. 不同雷射掃描速度所加工之模仁，(a) 50 mm/s，(b) 100 mm/s，(c) 200 mm/s，(d) 300 mm/s，(e) 400 mm/s，(f) 500 mm/s。

圖 12.
碳化矽模仁。

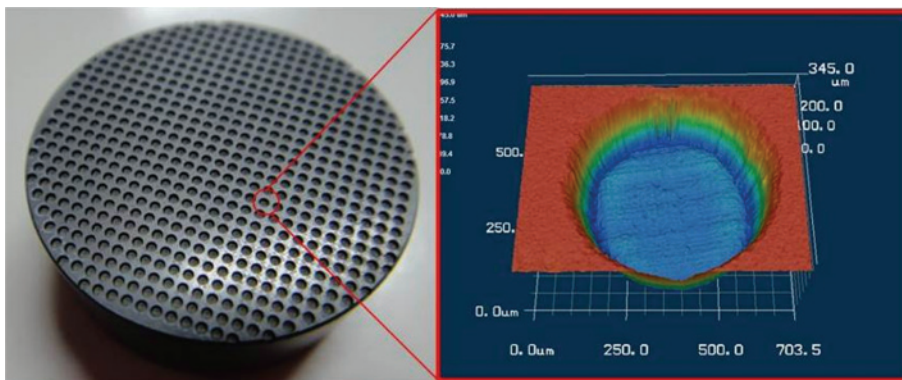
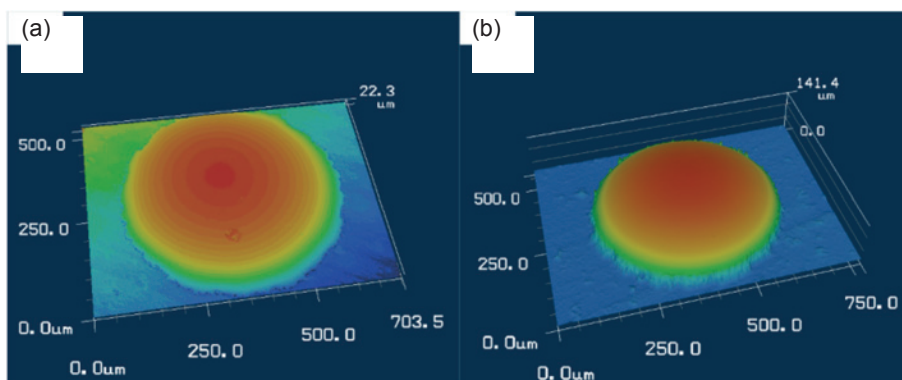


圖 13.
在 (a) 真空，(b) 氮氣環境中成形的微透鏡。



相同的溫度與力量條件下，充填氮氣下的微透鏡，其高度可達 $130\ \mu\text{m}$ ，曲率可達 $523\ \mu\text{m}$ ，但是真空狀態下的微透鏡，高度僅 $22\ \mu\text{m}$ ，曲率 $3130\ \mu\text{m}$ 。因熱能傳遞的方式為對流、傳導與輻射，但是在真空腔體中，僅有傳導與輻射，因此，雖在模仁中的溫度感測器已經偵測溫度達到設定值，而開始進行壓模製程，但此時玻璃預形體相較於同樣製程參數的氮氣環境中之預形體，其溫度較低，因此軟化程度較不足，所以導致微透鏡高度較低。因此，若在模造製程時採用真空環境中成形，則必須考慮玻璃預形體的均溫程度，適當調整如保溫時間等參數，以符合元件的設計規格。

5. 玻璃模造溫度與力量的影響

玻璃模造製程中，最重要的兩個控制參數是模造溫度與模造力量，模造溫度愈高，玻璃材料黏滯性愈低，元件愈易成形。圖 14 顯示，真空環境中，溫度為 $690\ ^\circ\text{C}$ 時，不論雙面微透鏡陣列的上面或下面曲面結構，其微透鏡高度皆高於 $680\ ^\circ\text{C}$ 時的高度，且透鏡高度隨著模造力量升高而增加。此外，透鏡下方的微透鏡高度皆大於上方高度，其原因為下模仁直接置於模造設備上（參考圖 1），因此除了燈管的熱輻射方式加熱外，另有透過熱傳導方式加熱，因為玻璃預形體具有厚度差，因此玻璃下方的溫度會略高於上方，所以實驗結果皆顯現下

表 2.
不同腔體環境與透鏡形貌之關係表。

	Surface	Height (μm)	Radius (μm)
With Vacuum (2-step)	Upside surface	8	6919
	Underside surface	22	3130
With N_2 (2-step)	Upside surface	121	560
	Underside surface	130	523
Parameters: Molding temperature $690\ ^\circ\text{C}$ Molding force P1 : $0.5\ \text{kN}$ 、P2 : $0.5\ \text{kN}$			

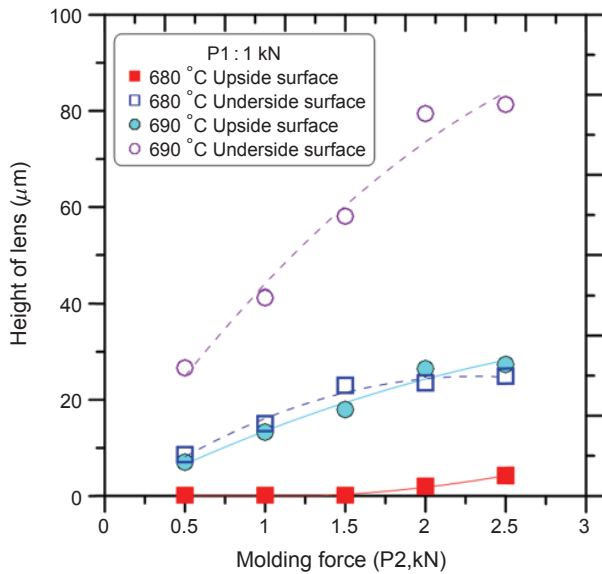


圖 14. 模造力量／溫度與微透鏡高度關係。

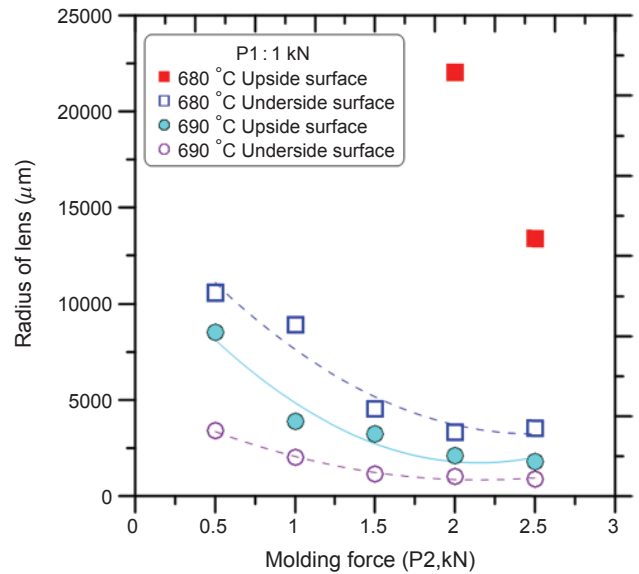


圖 15. 模造力量／溫度與微透鏡曲率關係。

方的透鏡高度高於上方，且模仁的微孔孔徑是固定值，因此，在相同的外徑下，透鏡高度愈高，其曲率半徑將愈小，如圖 15 所示。

此外由圖 14 與圖 15 中也可看出在溫度 680 °C 時，若模造力量小於 1500 牛頓，微透鏡將不會成形，導因於模造溫度與模造力量皆不足。但是較高的溫度，其升溫與降溫時間將愈長，增加能量的耗損，且溫度愈高將會降低模仁與膜層的使用壽命，亦會導致玻璃材料沾黏在膜層上，導致膜層無法再使用。但模造溫度過低，將會造成玻璃不易成形，甚至在模造過程中產生玻璃材料破裂的現象，因此必須選擇適當的模造溫度來獲得最佳的效益。

6. 模造製程對玻璃材料折射率的影響

因為玻璃模造製程歷經升溫與降溫的步驟，針對玻璃材料而言，降溫速度的快慢會影響折射率數值的變化，因此，本研究利用實驗結果分析模造製程對玻璃材料折射率的影響，實驗結果如圖 16。在模造溫度的影響方面，615–695 °C 的溫度對模造製程前後的材料折射率影響微乎其微，而較快的降溫速度雖對折射率的影響相對較大，但影響亦不超過 0.001 n_D (n_D 為使用 589.2 nm 之波長光源量測折射率)。Huang 等人⁽¹¹⁾ 的實驗結果指出厚度 5 mm 的玻璃元件，在降溫速率 37.2 °C/min 時，模造製程前後折射率變化為 0.003 n_D ，其原因為本研

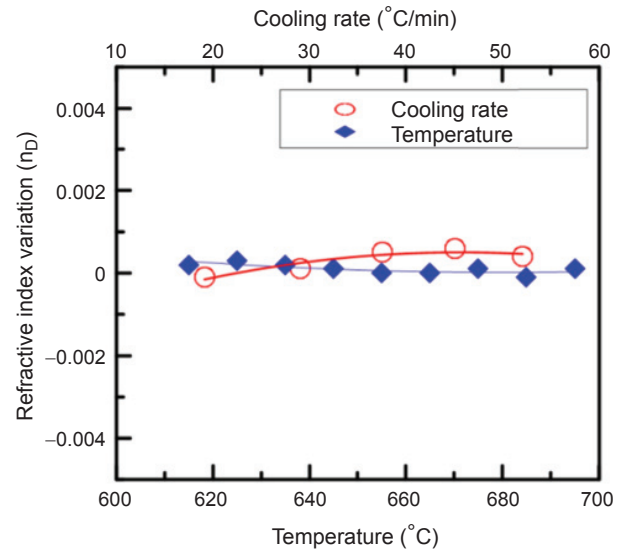


圖 16. 模造溫度及降溫速率對折射率的影響。

究中的玻璃材料厚度為 1.2 mm，因此模造製程中降溫速率對折射率的影響較小。

圖 17 為雙面微透鏡陣列之剖面圖，由圖中可看出在鈉玻璃雙面已成形微透鏡陣列，圖 17(a)、(c) 為其微透鏡之 400 倍放大圖。圖 18 為雙面微透鏡陣列之光學顯微鏡與電子顯微鏡圖。圖 19(a) 為雙面微透鏡陣列之實體照片，圖 19(b)、(c)、(d) 分別為其放大 200、400、1000 倍之共軛焦顯微鏡量測之立體圖形，圖 19(e) 為其輪廓量測結果，由圖中可看出其微透鏡曲率半徑為 851 μm ，其寬度與

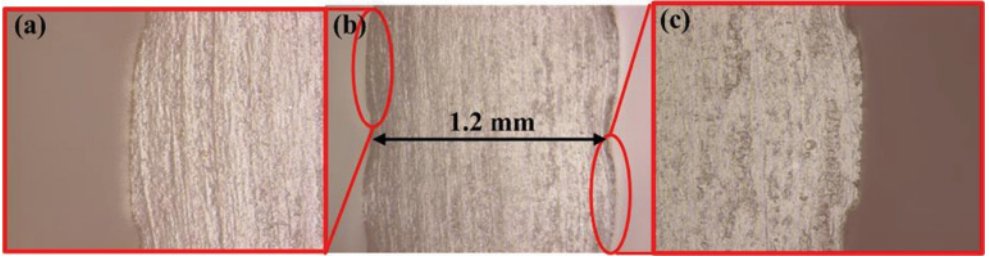


圖 17.
微透鏡剖面圖，(a) 400 倍，(b) 200 倍，(c) 400 倍。

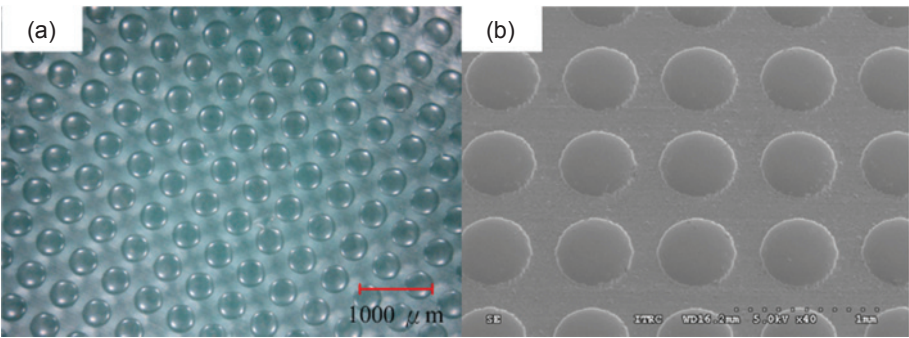


圖 18.
微透鏡陣列之光學顯微鏡與電子顯微鏡圖。

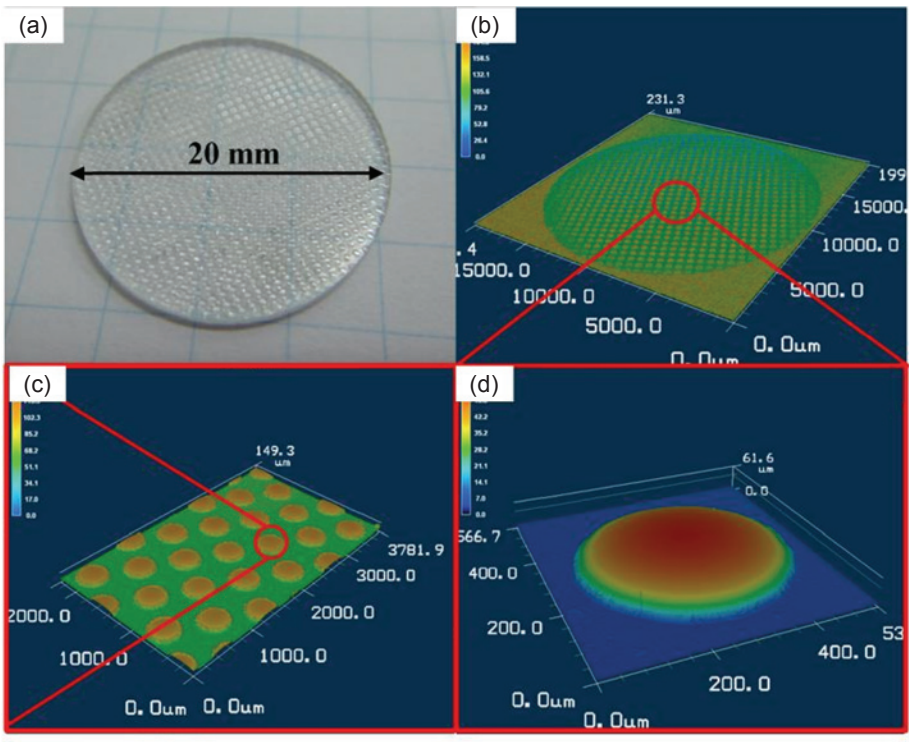
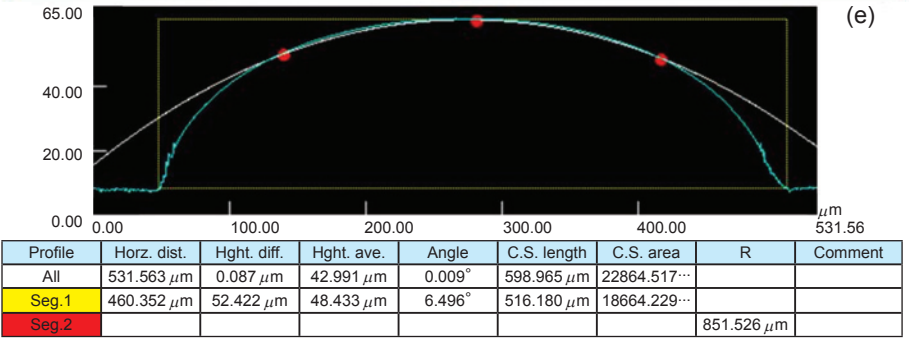


圖 19.
(a) 微透鏡陣列之表面形貌圖，(b) 200 倍，(c) 400 倍，(d) 1000 倍。



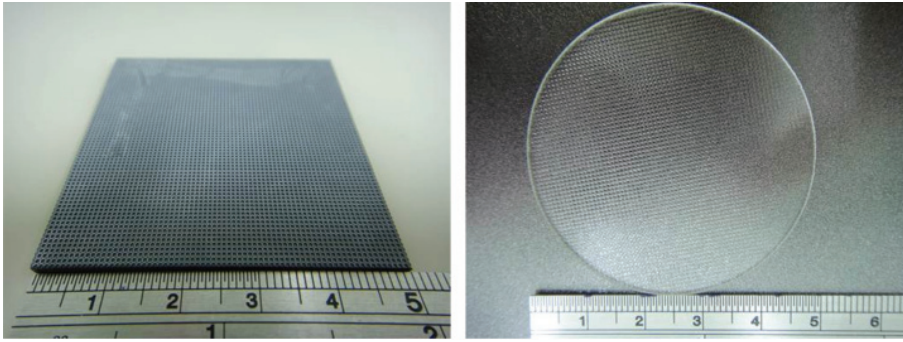


圖 20.
50 mm × 50 mm 之碳化矽模
仁與微透鏡陣列。

高度分別為 $460\ \mu\text{m}$ 及 $52\ \mu\text{m}$ ，其透鏡間距為 $700\ \mu\text{m}$ 。圖 20 則是利用 $50\ \text{mm} \times 50\ \text{mm}$ 、微孔孔徑為 $500\ \mu\text{m}$ 、間距為 $700\ \mu\text{m}$ 的碳化矽模仁製作直徑 $50\ \text{mm}$ 的雙面微透鏡陣列。

四、結論

本研究使用雷射加工技術在碳化矽模仁上製作微孔陣列，並透過精密玻璃模造技術在鈉玻璃上製作雙面微透鏡陣列，分析實驗結果，完成雷射脈衝重複頻率和掃描速度對微孔深度的關係圖，以及探討玻璃模造溫度與力量對微透鏡輪廓的影響，最後成功完成曲率半徑為 $851\ \mu\text{m}$ 、寬度與高度分別為 $460\ \mu\text{m}$ 及 $52\ \mu\text{m}$ 、透鏡間距為 $700\ \mu\text{m}$ 之雙面微透鏡陣列。透過此製程方法，依照所需設計可改變玻璃的材料、厚度或微透鏡曲率，使雙面微透鏡陣列適用於不同光學波段的光學系統。

參考文獻

1. Y.-A. Peter, H. P. Herzig, and R. Dandliker, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, **8**, 46 (2002).
2. N. F. Borrelli, D. L. Morse, R. H. Bellman, and W. L. Morgon, *Applied Optics*, **24**, 2520 (1985).
3. Z. D. Popovic, R. A. Sprague, and G. A. N. Connell, *Applied Optics*, **27**, 1281 (1988).
4. M. C. Hutley, *Journal of Modern Optics*, **37**, 253 (1990).
5. C. S. Lee and C. H. Han, *Sensors and Actuators A*, **88**, 87 (2001).
6. W. R. Cox, *Optics & Photonics News*, **12**, 32 (2001).
7. S. Sizinger and J. Jahns, *Microoptics*, Wiley-Vch Verlag (1999).
8. S. K. Lee, K. C. Lee, and S. S. Lee, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, **12**, 334 (2002).
9. E. H. Park, M. J. Kim, and Y. S. Kwon, *IEEE Photonics Technology Letters*, **11**, 439 (1999).
10. 儀科中心, 光學元件精密製造與檢測, 初版, 新竹: 國研院儀科中心, 85 (2007).
11. C. Y. Huang, K. C. Huang, J. C. Chen, K. S. Chang, S. F. Tseng, and C. P. Chou, *Advanced Materials Research*, **264**, 78 (2011).



黃建堯先生為國立中央大學機械工程研究所碩士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員，且為國立交通大學機械工程學系博士班研究生。

Chien-Yao Huang received his M.S. in mechanical engineering from National Central University. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories and a Ph.D. student in the Department of Mechanical Engineering at National Chiao Tung University.



周曉宇先生為國立成功大學物理系學士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員兼任光學廠廠長。

Hsiao-Yu Chou received his B.S. in physics from National Cheng Kung University. He is currently an associate researcher and division director of optics shop at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



張耿碩先生畢業於高雄師範大學物理系，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心技術員。

Keng-Souo Chang received his B.S. in physics from National Kaohsiung Normal University. He is currently a technician at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



蕭文澤先生為彰化師範大學機電工程研究所博士，現任國家實驗研究院儀器科技研究中心副研究員。

Wen-Tse Hsiao received his Ph.D. in mechatronics engineering at National Changhua University of Education. He is currently an associate researcher at Instrument Technology Research Center, National Applied Research Laboratories.



周長彬先生為美國田納西大學材料工程博士，現任國立交通大學機械系教授。

Chang-Pin Chou received his Ph.D. in materials science and engineering from University of Tennessee. He is currently a professor in the Department of Mechanical Engineering at National Chiao Tung University.