

可調適光學關鍵元件的設計與製作

Design and Fabrication of Critical Components in Adaptive Optics

劉彥良、林美姝、蘇國棟

Yen-Liang Liu, Vinna Lin, Guo-Dung John Su

可調適光學可以修正被扭曲的波前，是一種改善光學系統成像品質的技術。天文觀測、雷射、非線性光學、視光學及國防工業中，皆可見可調適光學的應用。本文將介紹如何設計與製作其中的光學關鍵元件：微透鏡陣列與可形變反射鏡，與它們在可調適光學中的應用。本文將展示毫米等級長焦（一般為數百微米）且多種佈陣模式的微透鏡陣列的製作方式，並將其應用於 Shack-Hartmann 波前感測器，以印證設計與製作成果。另一方面，我們將展示直徑 20 毫米、67 個六角形驅動電極的大幅度可形變反射鏡，並以實驗證實可形變反射鏡在波前修正的成果。

Adaptive optics is a technology that improves the performance of optical systems by reducing wavefront distortion. Currently, it is playing a more important role in astronomy, laser physics, nonlinear optics, medicine, vision and the defense industry. This paper demonstrates how we design and fabricate critical components, microlens array (MLA) and large-stroke MEMS (microelectromechanical system) deformable mirror, in adaptive optics and their applications. We present MLA with long focal length (millimeter range, which is usually several hundred microns) in various structures and arrangements. We use finished MLA on Shack-Hartmann wavefront sensors to evaluate the performance. On the other hand, we demonstrate a large-stroke MEMS deformable mirror with a 20 mm diameter circular opening and 67 hexagonal actuation electrodes. The polymer deformable mirror is a strong candidate for active wavefront control, based on our experimental results.

一、可調適光學

望遠鏡的發明，可以追溯到十七世紀荷蘭鏡片製造商漢司－立普喜 (Hans Lippershey)。自此之後，天文學者得用以觀測數百光年之外的星光，拓展了人類的視野。然而，星光被我們觀測到的時候，已經經過了重重干擾，尤其是地球的大氣層，嚴重地扭曲了星光的波前。若要觀測原始清晰的影像，必須設法修正波前。如何感測並回饋修正波

前，便是可調適光學的由來。圖 1 即為可調適光學的應用方式，利用感測回饋可形變反射鏡修正像差，還原原始影像，如圖 2⁽¹⁾。

首先是「感測」，Shack-Hartman 波前感測器是常見的感測方式之一。Shack-Hartman 波前感測器由微透鏡陣列與 CCD 組成，如圖 3(a) 所示。被扭曲的波前由微透鏡陣列分別聚焦於 CCD 上，如圖 3(b) 藍點，而偏離正常的紅點位置，便可由偏差量反推波前變形。

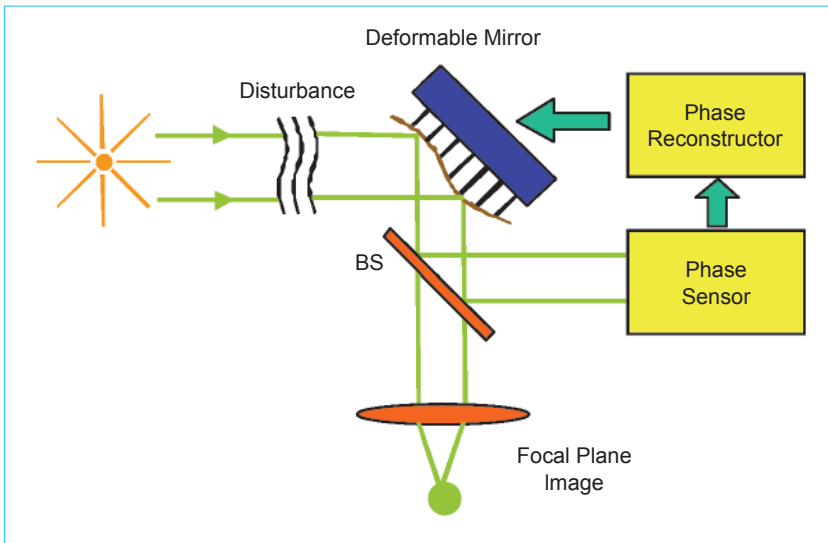


圖 1. 遠處星光經過擾動，由 phase sensor 感測回饋驅動 deformable mirror 修正像差。

有了感測之後，經由控制系統回饋「修正」。修正用的光學主動元件，這裡使用的是可形變反射鏡。可形變反射鏡的形狀可以在一定範圍內變動，以致動器控制其形狀，愈多致動器，控制參數也愈多，可形變反射鏡也能形成更自由的曲面。

將感測與修正結合，是可調適光學的關鍵，其中關鍵元件的設計與製作會影響成像的品質，也是本研究最關注的部分。以下將展示筆者在微透鏡陣列與可形變反射鏡的設計與製作成果。微透鏡陣列部分，將展示利用光阻熱回熔 (thermal reflow) 達到

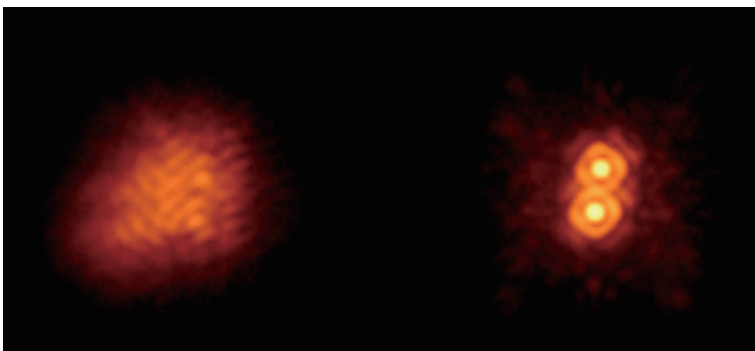


圖 2. 左方的原始影像經由可調適光學修正為右方的清晰影像。

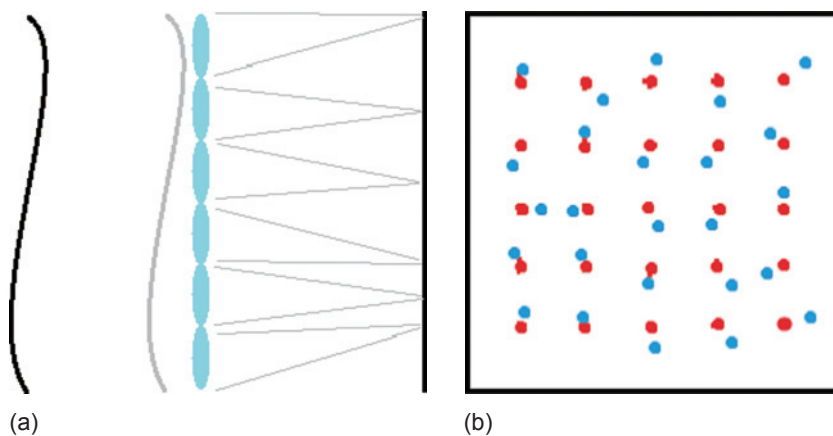


圖 3. (a) 扭曲的波前經微透鏡陣列成像於 CCD 上，(b) 扭曲波前聚焦點 (藍色) 與原始平面波前聚焦點 (紅色)。

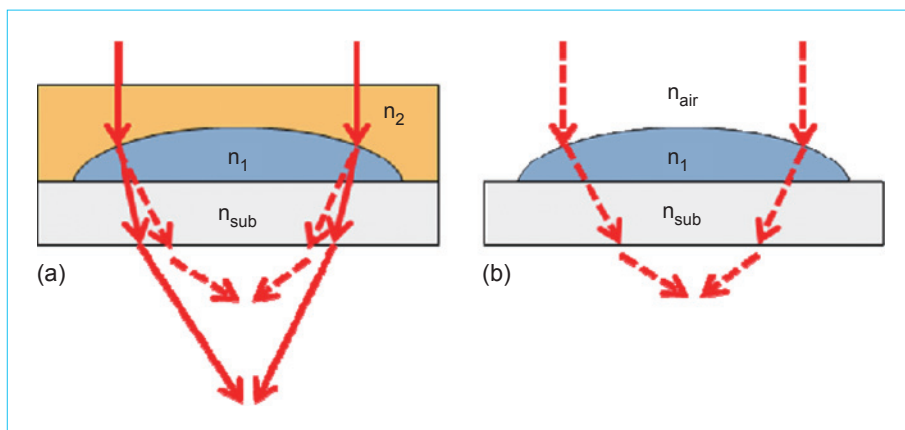


圖 4.

(a) 本研究所設計微透鏡陣列與
(b) 傳統微透鏡陣列示意圖。

數百微米等級直徑且毫米等級焦距的透鏡陣列，以符合 Shack-Hartmann 波前感測器的需求。另外，製作 20 毫米直徑、 $2.15\ \mu\text{m}$ 厚度反射膜及 67 個六角形驅動電極的可形變反射鏡。以高分子材料反射膜取代矽反射膜，突破矽反射膜不及 $10\ \mu\text{m}$ 的形變幅度，可以修正更大幅度的波前扭曲。

二、長焦微透鏡陣列

1. 背景簡介

微透鏡陣列通常與其他元件結合為光學系統作具體應用。在可調適光學中，微透鏡陣列可感測各部分的波前，聚焦於 Shack-Hartmann 波前感測器的成像面上。製作微透鏡陣列，過去提出了許多方法⁽²⁾，光阻熱回熔⁽³⁾亦是其中一種。光阻熱回熔不僅快速、簡單，而且便宜，只需要光微影與加熱的製程。而微透鏡陣列的焦距也與光微影 (lithography) 及加熱的製程參數有關，可以依照需求調整焦長。然而，這種製程很難達到 Shack-Hartmann 波前感測器所需的毫米等級焦長。過去提出一些提升焦長的辦法，如表面能改變 (surface energy modification)⁽⁴⁾、折射率匹配油浸泡法 (index matching oil immersion)⁽⁵⁾，但表面能改變仍有提升的極限，且折射率匹配油浸泡法不能適應環境溫度的變化。以下說明透過在微透鏡陣列表面鍍透明膜，有效提升焦長，此時有效焦長與透鏡結構及兩種材料的折射率皆有關係。

2. 設計與模擬

在光阻熱回熔製程中，微透鏡陣列由加熱光阻圓柱製成。其焦長 f 可由式 (1) 表示：

$$f = \frac{r_c}{n-1} \quad (1)$$

$$r_c = \frac{h^2 + r^2}{2h}$$

其中， n 為微透鏡陣列表面折射率， r_c 為透鏡曲率半徑，與光阻圓柱高度 h 、半徑 r 有關。在此，微透鏡皆假設為球形⁽⁶⁾。然而當光阻圓柱的寬高比太低時，熱熔時無法構成透鏡形狀，自然無法形成透鏡陣列。所以，光阻圓柱的寬高比不宜太小，即使增加光阻圓柱直徑可以提升焦長，但為了保持寬高比，光阻厚度也必須增加，反而使光阻塗佈難度增加。這造成在焦長與光阻厚度間的取捨問題，因此本研究提出新的設計方式來提升焦長。

圖 4 為新設計的示意圖，在微透鏡陣列表面多覆蓋了一層不同折射率的材質。不僅可以減少微透鏡陣列表面的散射光，也提升了焦長。新的微透鏡陣列設計可以視為一平凸透鏡與一平凹透鏡的組合，焦長可由下式 (2) 描述⁽⁷⁾：

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2} \quad (2)$$

d 表示透鏡間距離，在設計中內定為 0。將式 (1)

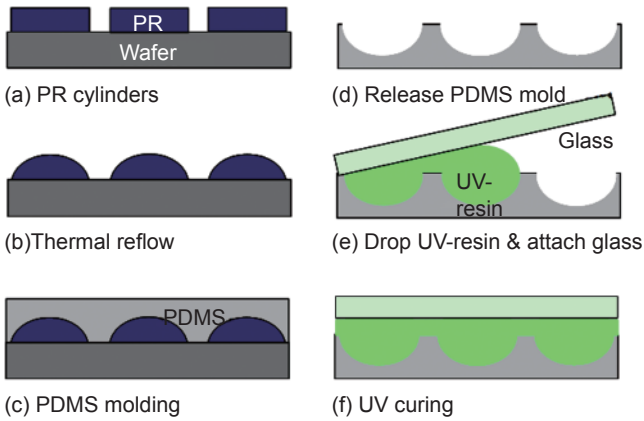


圖 5. 長焦微透鏡陣列製程。

代入式 (2)，可得設計有效焦長如式 (3)，其中的平凹透鏡焦距為負值。

$$f_{eff} = \left(\left(\frac{r_c}{n_1 - 1} \right)^{-1} + \left(\frac{-r_c}{n_2 - 1} \right)^{-1} \right)^{-1} = \frac{r_c}{n_1 - n_2} \quad (3)$$

比較式 (1) 與式 (3)，分母由 $(n - 1)$ 降至 $(n_1 - n_2)$ ，焦長也提升 $(n - 1)/(n_1 - n_2)$ 倍。

3. 微透鏡陣列的製程與結果

長焦微透鏡陣列是以高分子材料製作，可先

作出不透明的透鏡狀光阻陣列，然後將形狀轉移至透明的微透鏡材質上，最後鍍上覆蓋材質。圖 6 是製作流程的示意圖。製作透鏡狀光阻陣列時，先以雙氧水與硫酸混合液清洗晶圓，然後 120 度烘烤 (dehydration bake) 10 分鐘，接著以每分 1,000 轉轉速塗佈光阻 (photoresist, DR, AZ electronic materials, AZ-P4620) 60 秒，這將會在晶圓表面形成 $13 \mu\text{m}$ 厚的光阻。以光微顯影術使光阻形成圖 5(a) 的圖形，接著以 160 度加熱 10 小時，光阻圖形如圖 5(b)。接下來，將光阻圖形轉移至透鏡材質上，使用 UV 樹脂作為透鏡材質。如圖 5(c)，在光阻陣列上低速旋轉塗佈聚二甲基矽氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS, Dow Corning 184)，以避免塗佈過厚降低穿透率。如此便可製作出與光阻陣列形狀互補的 PDMS 膜。塗佈 PDMS 後先放置 10 分鐘，以降低表面粗糙度，然後以 65 度加熱固化 4 小時，因材料性質的緣故，回到室溫後便可輕易地從光阻陣列上取下 PDMS 結構。圖 5(d) 顯示出 PDMS 凹透鏡陣列圖形。最後在 PDMS 上滴上 UV 樹脂 (GA-126)，並以玻璃片傾蓋，如圖 5(e)，便可將 UV 樹脂塗佈滿整個 PDMS 膜。待固化後，便可得到一個長焦微透鏡陣列在玻璃片上，如圖 5(f) 所示。

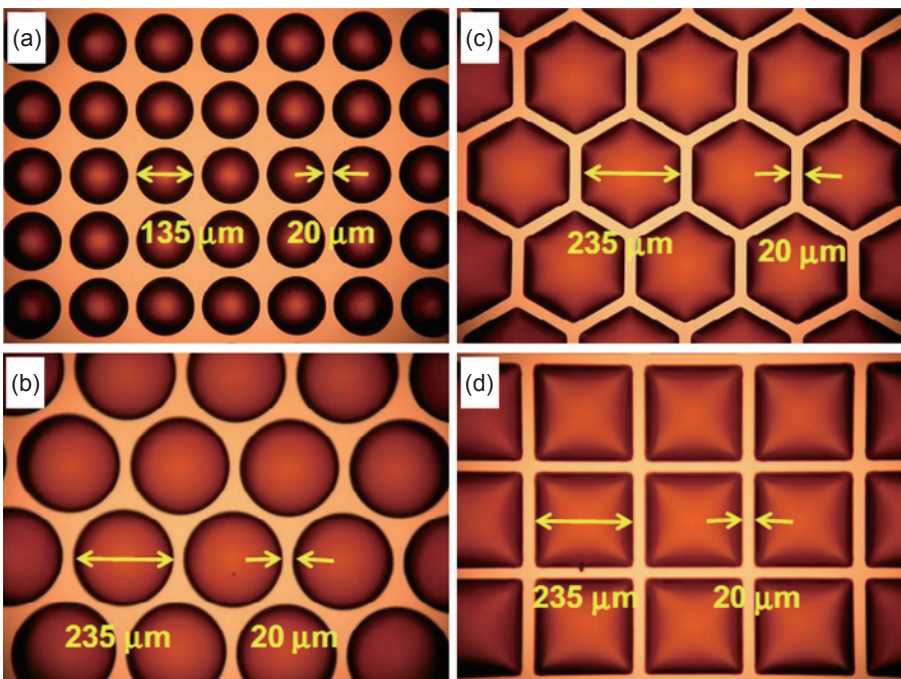


圖 6. 熱熔 (thermal reflow) 後的光阻陣列之 (a) 圓鏡方排列、(b) 圓鏡六角排列、(c) 六角鏡、(d) 方形鏡。

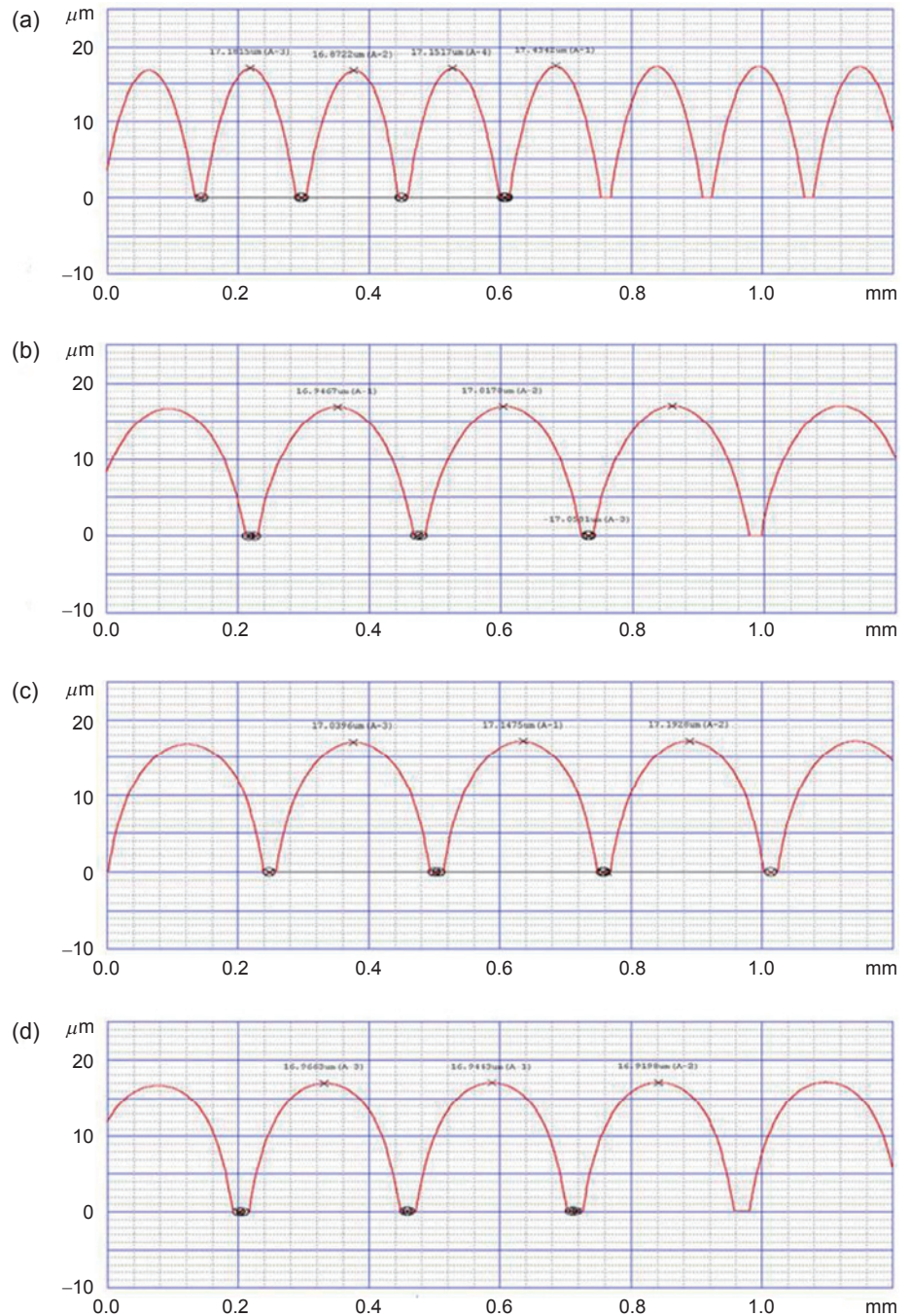


圖 7.

圖 6 (a) 圓鏡方排列、(b) 圓鏡六角排列、(c) 六角鏡、(d) 方形鏡等量測到的表面形狀。

我們製作了一系列不同尺寸與陣列型態的微透鏡陣列，如圓鏡方排列 ($d = 135 \mu\text{m}$)、圓鏡六角排列 ($d = 235 \mu\text{m}$)、六角鏡 ($d = 235 \mu\text{m}$) 與方鏡 ($d = 235 \mu\text{m}$)。各種陣列型態熱熔後的光阻陣列如圖 6 所示。光阻高度皆約為 $17 \mu\text{m}$ ，可以從圖 7 以探針 (Kosaka probe-type surface analyzer) 量測表面的結果得知。

圖 8 是 UV 樹脂除去 PDMS 膜前後在掃描式電子顯微鏡 (SEM) 下的圖像。使用的 UV 樹脂折射率為 1.4887，而 PDMS 為 1.41。藉由微調光學顯微鏡，觀測焦點大小來確定焦距長度。直徑 $235 \mu\text{m}$ 微透鏡的焦點位置與微透鏡鏡心距離約為 5.25 mm，而直徑 $135 \mu\text{m}$ 的則約為 2 mm。由於微透鏡的大數值孔徑 (numerical aperture)，焦深

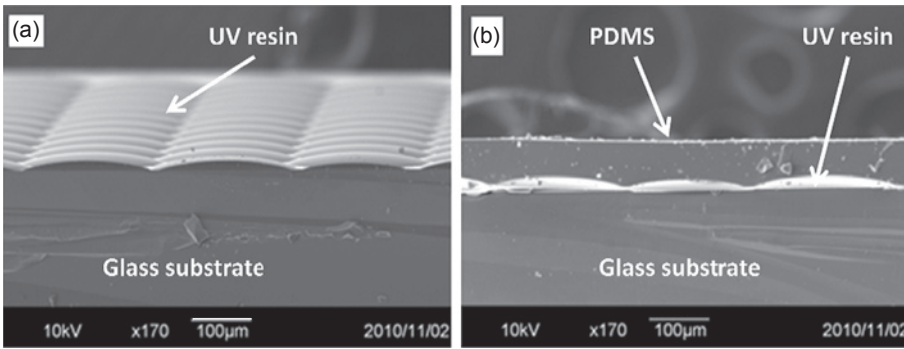


圖 8. UV 樹脂層在掃描式電子顯微鏡下的圖像，(a) 去除 PDMS 層與 (b) 保留 PDMS 層。

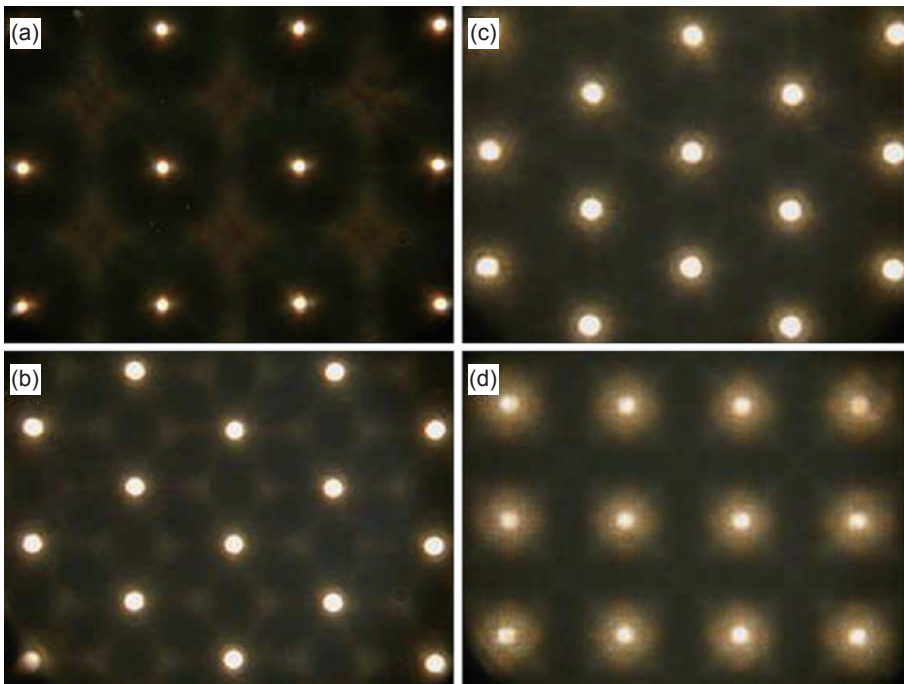


圖 9. 圖 6 (a) 圓鏡方排列、(b) 圓鏡六角排列、(c) 六角鏡、(d) 方形鏡等各種佈陣方式與各種模態微透鏡焦點。

(depth of focus, DOF) 相對很短，約 $0.7 \mu\text{m}$ ，即焦長的量測誤差。圖 9 為顯微鏡 (Eclipse 50i with $50\times$ objective, Nikon) 下的焦點成像，光源由下方入射。可以觀察到焦點形狀對稱，表示長焦微透鏡陣列的製作品質良好。微透鏡並非完全球面，其外形約有 -0.24 的圓錐常數 (conic constant)，焦長約為 5.24 mm ，與量測僅有微小誤差。

這種設計方法大幅提升了焦長，儘管需要使用兩種材質，但 UV 樹脂的塗佈相當簡單，不需要在無塵室內進行。同時使用兩種材質製作微透鏡陣列，相異的熱膨脹係數可能會造成兩者無法良好密合，不過由於 PDMS 在常溫下固化的特質，減少了溫度變化殘餘應力造成的熱膨脹不匹配。此外，PDMS 有良好的化學抵抗性，可以成為抵抗潮濕或

化學藥劑侵蝕的良好保護層，也比一般的微透鏡陣列更便於清洗。

4. 波前量測的應用

將微透鏡陣列與感光元件結合便可組成 Shack-Hartmann 波前感測器。實驗架構如圖 10 所示，以雷射作為參考波前，經過微透鏡陣列，在感光元件上形成許多焦點。以六角鏡的微透鏡陣列作實驗時，因六角鏡微透鏡陣列有較佳的填充係數 (fill factor)，且分布密度高，重建波前的精度也會較佳。待測波前所得到的焦點陣列，可以與雷射參考波前相較，得到焦點偏移，並反推波前斜率，以求得波前扭曲程度。再由 LabVIEW、MATLAB 等軟體重建波前形狀。

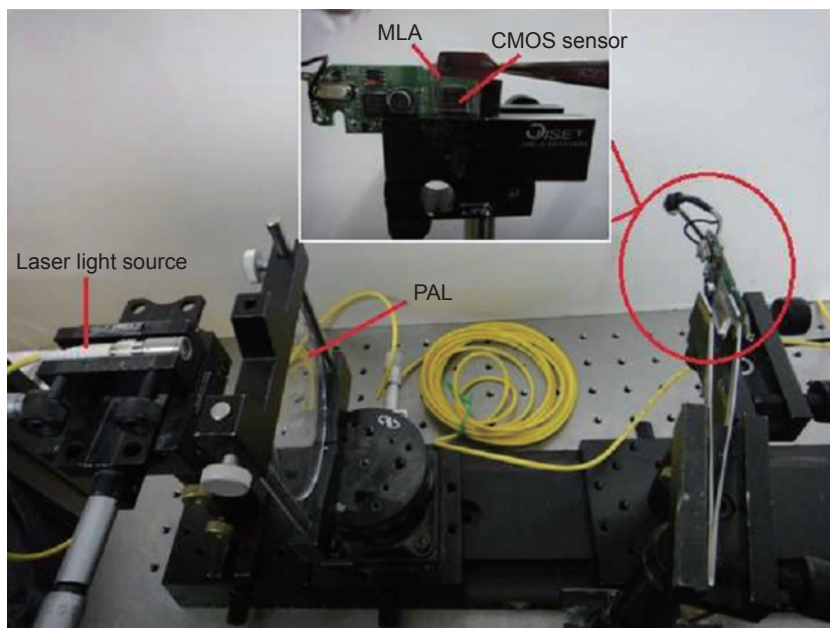


圖 10. 以微透鏡陣列量測漸進多焦式鏡片的實驗架構。

$$\frac{\partial w(x, y)}{\partial x} = \frac{\Delta x}{f} \quad (4)$$

$$\frac{\partial w(x, y)}{\partial y} = \frac{\Delta y}{f}$$

$w(x, y)$ 為波前形狀，其偏微分與藍點偏差 Δx 、 Δy 及微陣列透鏡焦距 f 相關。要重建波前形狀，可以使用各項次皆正交的函數，如 Zernike 多項式 (見表 1、圖 11)，即式 (5)，可以由最小平方法求得各項次的係數⁽⁸⁾。

$$w(x, y) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k Z_k(x, y) \quad (5)$$

藉由檢測漸進多焦式鏡片 (progressive addition lens, PAL) 來驗證鏡片品質。漸進多焦式鏡片部分區域有相當的像散像差，故漸進多焦式鏡片在檢測時被放在雷射與微透鏡陣列間。

由於 CMOS 感光元件的大小，我們可以得到 37 個聚焦光點，可以 4 次、10 項的 Zernike 多項式重建波前像差。圖 12 是與市售 Shack-Hartmann

表 1. Zernike 多項式之低次項定義。

mode j	order n	frequency m	$Z_n^m(\rho, \theta)$	Meaning
0	0	0	1	Constant term, or Piston
1	1	-1	$2\rho\sin(\theta)$	Tilt in y-direction, Distortion
2	1	1	$2\rho\cos(\theta)$	Tilt in x-direction, Distortion
3	2	-2	$\sqrt{6}\rho^2\sin(2\theta)$	Astigmatism with axis at 45°
4	2	0	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	Field curvature, Defocus
5	2	2	$\sqrt{6}\rho^2\cos(2\theta)$	Astigmatism with axis at 0° or 90°
6	3	-3	$\sqrt{8}\rho^3\sin(3\theta)$	Trefoil
7	3	-1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\sin(\theta)$	Coma along y-axis
8	3	1	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\cos(\theta)$	Coma along x-axis
9	3	3	$\sqrt{8}\rho^3\cos(3\theta)$	Trefoil
10	4	0	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	Spherical Aberration, Defocus

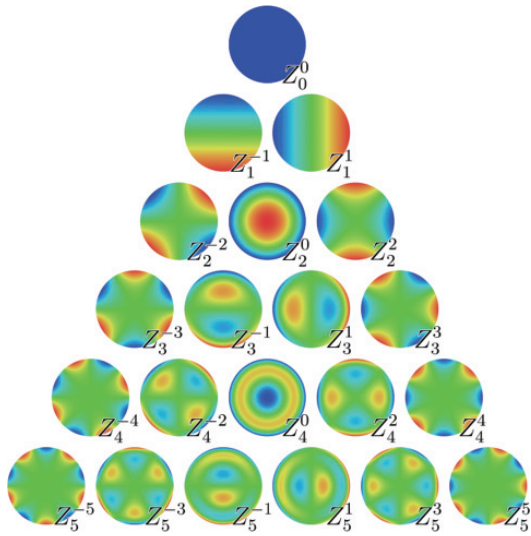


圖 11. Zernike 多項式之低次項示意圖。

波前感測器與本研究設計的波前感測器量測結果比較，兩者圖形有 90 度的旋轉。長焦微透鏡陣列在其中扮演重要角色，由式 (4) 可得，焦距與焦點位置偏差成正比，大的焦點偏差也利於量測，可減小量測誤差，提升量測敏感度。

5. 小結

我們展示了一種簡單的方法，大幅度提升了微透鏡陣列的焦長。常溫固化的 PDMS 覆蓋於原始微透鏡陣列結構上，可以減少散射光同時提升焦長。UV 樹脂為微透鏡陣列材質，也可以用類似的材質代替。焦長與兩種材質的折射率相關，可以用相同形狀的 PDMS 搭配不同材質作為微透鏡陣列以改變焦長，不用重新製作光阻陣列。此種微

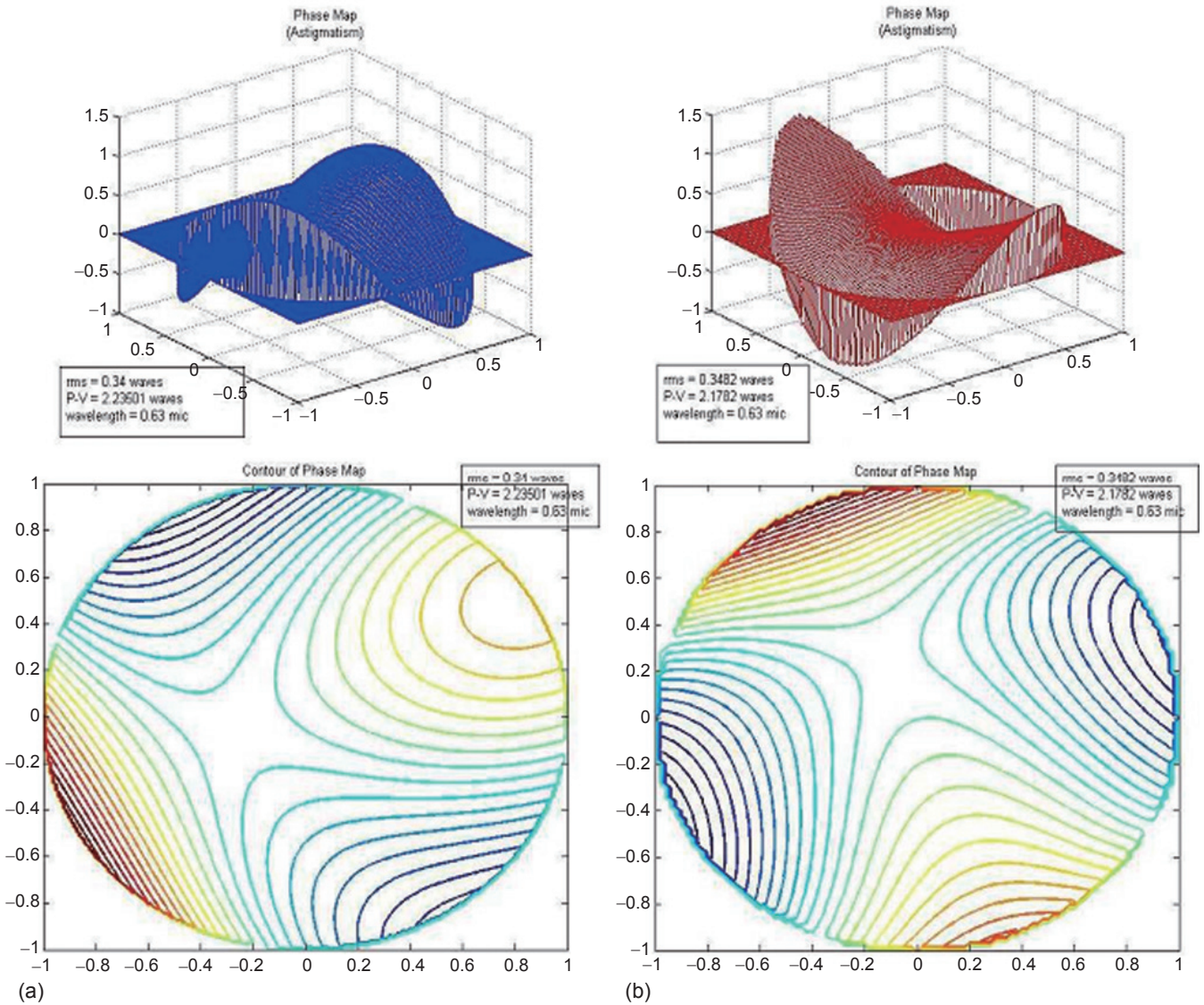


圖 12. 以 (a) 長焦微透鏡陣列與 (b) 市售的 Shack-Hartmann 波前感測器量得波前結果。

透鏡陣列設計適合用於需要搭配長焦長的應用，如 Shack-Hartmann 波前感測器，而且測試結果顯示它可以精準地量測漸進多焦式鏡片的波前像差。

三、大幅度可形變反射鏡

1. 背景簡介

如前文所言，可形變反射鏡是修正像差的有效手段，可分為熱致動⁽⁹⁾、液晶調制 (liquid crystal modulators, LCMs)⁽¹⁰⁾、聲光效應致動^(11, 12)、壓電致動^(13, 14) 與微機電可形變反射鏡⁽¹⁵⁾。熱致動的成本很低，運用材料本身熱脹冷縮的特性，但反應時間相對很長，可達數十秒，在需要快速反應的可調適光學中就派不上用場。此外，熱致動加熱時也會消耗很多能量。液晶調制可以做出大口徑、高解析度的波前相位調制，但也因液晶本身特質，部分光線會被吸收、散射，甚至產生色散的問題。聲光可編程色散濾波器 (acousto-optic programmable dispersive filter, AOPDF) 在超短脈衝應用能提供有用的脈衝壓縮和整形，但是效率較低且有色散問題。壓電致動的可形變反射鏡可以達到大幅度形變，但會有滯後現象且成本較高。以矽基材微機電系統製作的可形變反射鏡有千赫等級的反應時間，但矽材料只有小於 10 微米等級的形變幅度^(16, 17, 18)。形變幅度主要取決於其中反射層的材料，所

表 2. 模擬參數。

	原始參數	模擬變動範圍
楊氏係數	10 GPa	5 – 15 GPa
殘餘應力	15 MPa	1 – 25 MPa
電極反射膜間距	82 μm	30 – 100 μm
反射膜厚度	2.15 μm	1.35 – 2.95 μm

以若能以高分子聚合物取代矽^(19, 20)，或許能提高形變幅度。當然高分子聚合物與其他材料有不同的熱膨脹係數，整合時需要小心避免溫度造成結構損壞⁽¹⁹⁾，且致動高分子材料時有空氣阻尼效應，使用於大口徑可形變反射鏡時會影響反應時間⁽²⁰⁾。

在展示靜電致動的大幅度可形變反射鏡，其反射層以聚酰亞胺 (polyimide) 製作。此種製作方法有幾項優勢：沒有色散問題、相對低電壓驅動、大幅度形變、低製作成本。軟體模擬、成品製作、量測過程皆會一一展示。

2. 設計、模擬與製程

在製作口徑為 25 mm \times 25 mm 可形變反射鏡時 (結構如圖 13(a) 所示)，可選用低應力的聚酰亞胺 (HD Microsystems, PI-2610) 作為反射薄膜材料，它的熱膨脹係數也與矽相當接近，可以減少製程中的溫度變化影響。聚酰亞胺的殘餘應力 (residual stress) 與楊氏係數 (Young's modulus) 都相

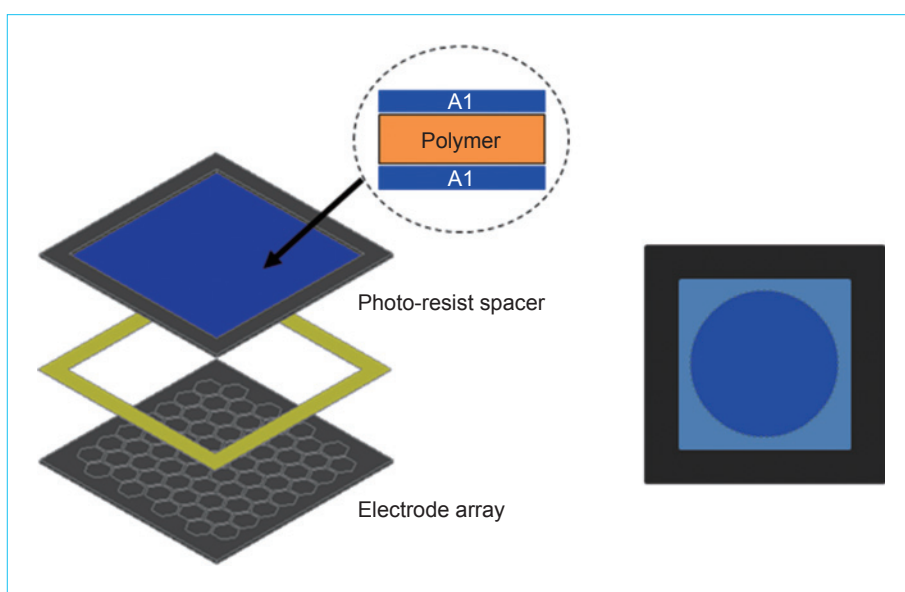


圖 13. 可形變反射鏡之組成，右圖為圓形開口邊框。

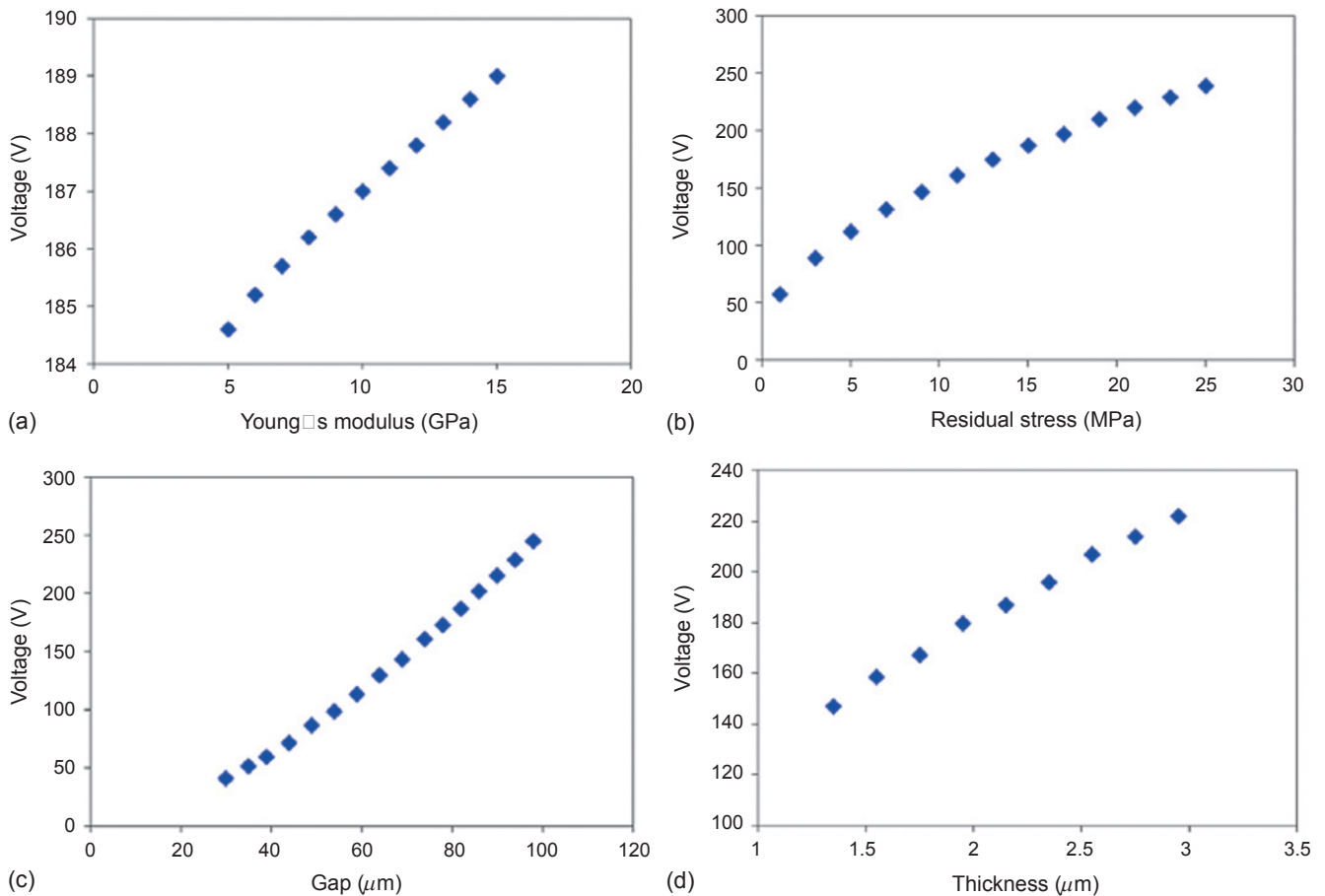


圖 14. 崩潰電壓與 (a) 楊氏係數、(b) 殘餘應力、(c) 反射膜電極間距與 (d) 反射膜厚度之間的關係。

當低，可以用相對低電壓驅動。聚酰亞胺兩面皆鍍上鋁以平衡殘餘應力。製程中，可用光阻分隔反射膜與下電極，以控制兩者間距。為了能局部控制反射鏡形變，總共設計了 67 個可以獨立操控的六角形電極。最後用光阻製作出一個圓形的開口，如圖 13(b) 所示。

在本實驗中有幾個參數會影響形變幅度、驅動電壓與共振頻率：楊氏係數、殘餘應力、反射薄膜厚度、電極與反射膜間距。使用 ANSYS 以有限元素法模擬形變，參數如表 2 所示⁽²¹⁾。67 個電極分別慢慢添加偏壓直到薄膜貼到電極上而無法正常運作 (snap-down effect)，如同微機電系統中的吸附效應 (pull-in effect)。崩潰電壓與前述四項參數有正相關，其中關係顯示於圖 14。以楊氏係數為例，高的楊氏係數材質有更高的崩潰電壓，但會降低形變量、反應頻率，甚至表面粗糙度，其中取捨就需要靠模擬結果來決定。

接著，進行模擬驅動電極與形變間的關係。理想上可形變反射鏡必須能與波前像差互補，但常會受到形變幅度與電極布置的影響。因此，模擬 Zernike 多項式中的低階像差，以證實設計可行性，亦確認 67 個控制電極足以消除所有低階像差，其中失焦 (defocus)、像散 (astigmatism) 與三葉形像差 (trefoil) 的形況模擬如圖 15 所示。

可形變反射鏡製程如圖 16，首先在 (100) 矽晶圓兩面長氧化層⁽²²⁾，厚度為 6,000 Å，用以保護晶圓。接著在其中一側以光阻定義並蝕刻出 25 mm × 25 mm 的氧化層開口，然後浸泡在 90 度 tetramethyl ammoniumhydroxide (TMAH) 溶液中九小時蝕刻矽基板，直到厚度剩下 25 μm 為止，如圖 16(a)。接下來在另一面以電子束蒸鍍 200 Å 的鉻與 1,200 Å 的鋁，如圖 16 (b)，其中鉻作為緩衝層用。2.15 μm 厚的聚酰亞胺旋轉塗佈於鋁上，並以 300 度烘烤 30 分鐘。為避免高速加熱造成聚酰

亞胺龜裂，溫度上升速率約為每分鐘 5 度。之後再蒸鍍上 1,200 Å 的鋁來平衡殘餘應力，如圖 16(c) 所示。最後用光阻製作出直徑 20 μm 的開口，如圖 16(d)，並將先前保留的 25 μm 矽基板、氧化層與鋁以 XeF₂ 乾蝕刻移除，這種蝕刻方式有很高

的選擇性，不會傷害到鋁層，至此上板完成，如圖 16(e)。下板以同樣的方式製作出氧化層並鍍上鋁和鋁，然後用微顯影術製作出 67 個電極，如圖 16(f)。之後用光阻柱製作空氣流通通道，高度約為上下層間距一半，以避免短路，如圖 16(g)。最後

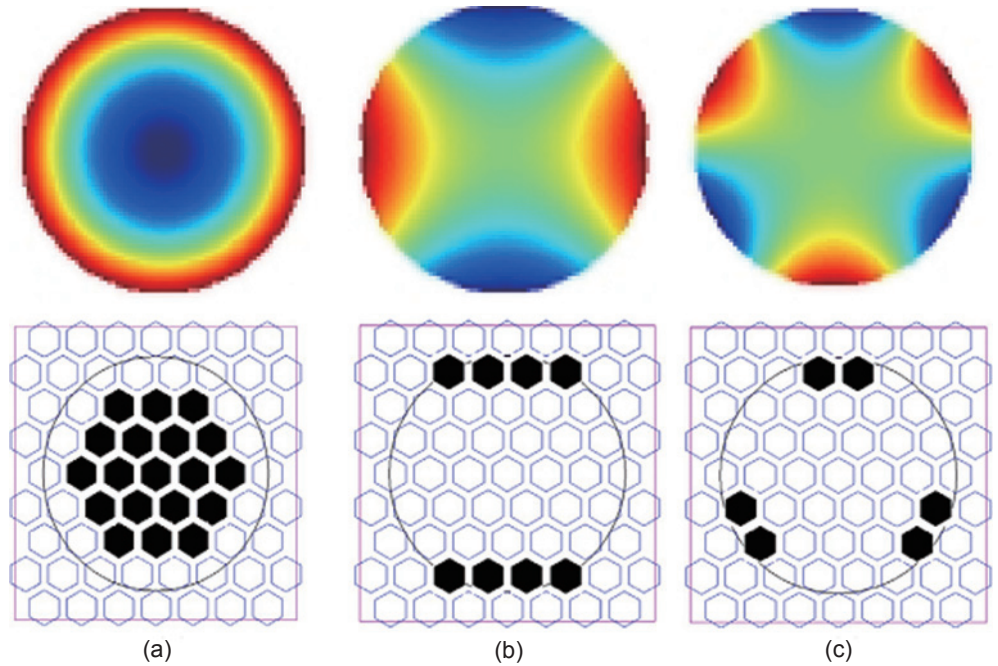


圖 15. 可形變反射鏡鏡面與電極驅動的關係。(a) defocus、(b) astigmatism、(c) trefoil。

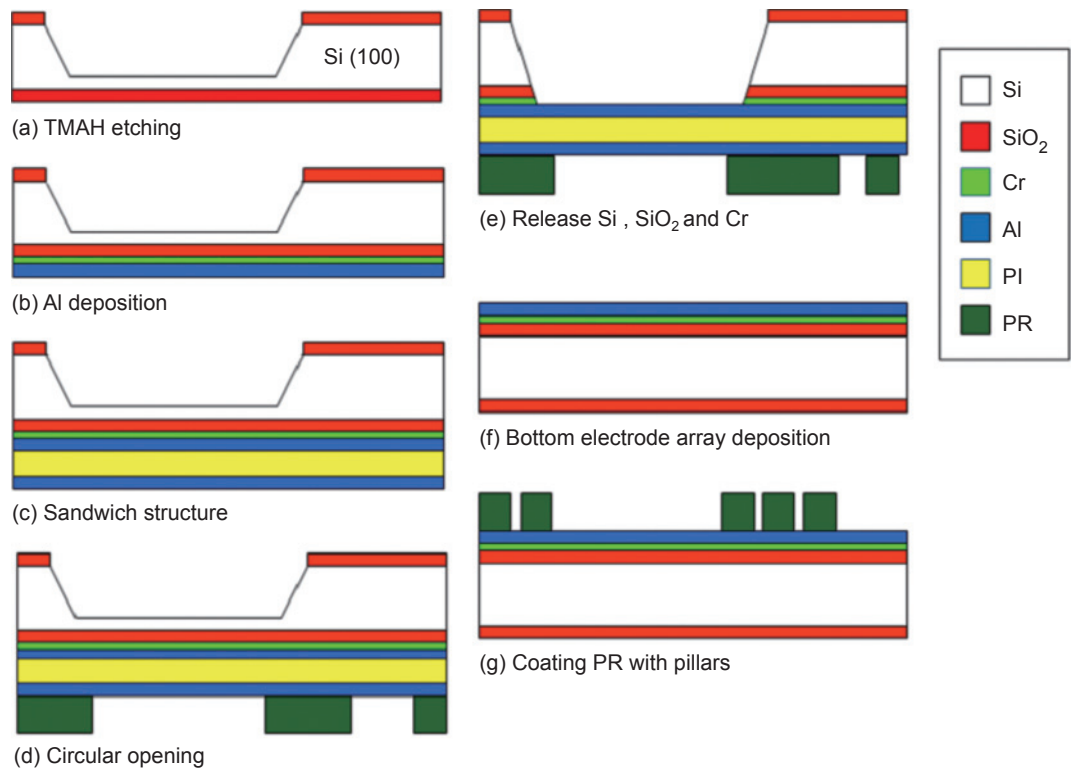


圖 16. 可形變反射鏡製程。

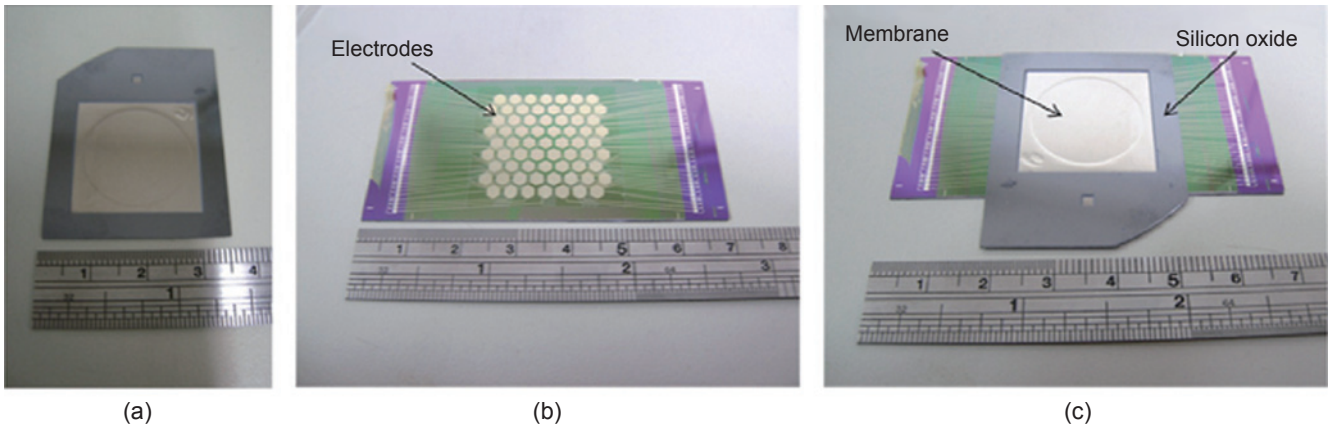


圖 17. 可形變反射鏡成品 (a) 上板、(b) 下板與 (c) 結合成品。

將上下板以 120 度加壓 60 分鐘，兩者間的光阻便可緊密黏合，成品如圖 17 所示。

3. 實驗結果與討論

以下進行反射膜的應力性質的測量。本研究使用負載撓度法 (load-deflection method) 量測楊氏係數與殘餘應力⁽²¹⁾，其關係式為：

$$p(h) = C_1 \frac{t\sigma}{a^2} h + C_2(\nu) \frac{tE}{a^4} h^2 \quad (6)$$

其中， p 為施壓壓力， h 為中心偏移量， a 為薄膜半周長， t 為膜厚， E 為楊氏係數， σ 為殘餘應力， ν 為表面柏松比 (in-plane Poisson's ratio)。 C_1 、 C_2 分別為常數⁽²³⁾。為了方便計算，將式 (6) 線性化如下：

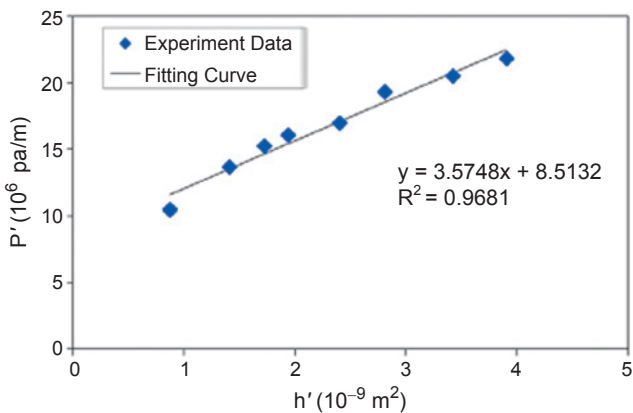


圖 18. 負載撓度法的量測數據。

$$p'(h') = C_1 \frac{t\sigma}{a^2} + C_2(\nu) \frac{tE}{a^4} h' \quad (7)$$

其中， $p' = p/h$ ， $h' = h^2$ ，如此可以實驗數據作簡單的線性回歸求得兩項參數。我們建立一套自動量測系統來量測中心偏移量與施加壓力間的關係，可形變反射鏡被固定於聚丙烯容器上，然後接在電動平台上 (KS-101-30LMS, Suruga, Japan)，每次移動最小間距為 $0.05 \mu\text{m}$ ，如此可以驅動平台以平台使容器作小範圍移動。然後用抽氣馬達對容器抽氣，可形變反射鏡的薄膜便會因容器與外界壓力不均而變形，容器內部氣壓可以用壓力計量測 (ABP300, Asia Pacific Microsystems)，並連接至電腦 (USB-6211, National Instruments)。自動控制量測可以減少許多量測誤差，得到更精準的數據。

表 3. 實驗結果。

參數	符號	數值
楊氏係數	E (GPa)	10.18
殘餘應力	σ (MPa)	4.58
回歸線斜率	m	3.57×10^{15}
回歸線截距	b	8.50×10^6
	C_1	3.45
	C_2	2.61
薄膜半周長	a (mm)	2
薄膜厚度	t (μm)	2.15

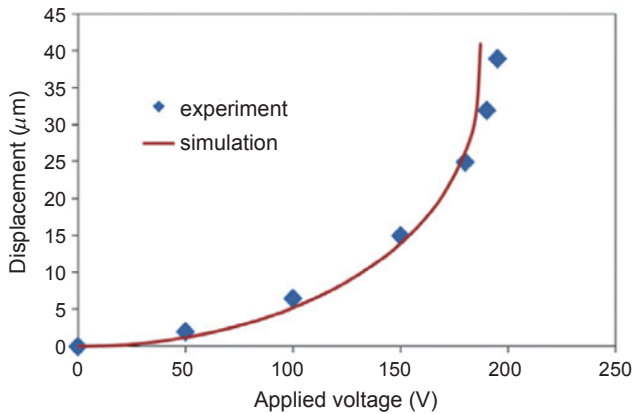


圖 19. 驅動電壓與薄膜中心偏移的量測與模擬結果。

圖 18 與表 3 為量測數據與結果。量測到的楊氏係數為 10.18 GPa，殘餘應力為 4.58 MPa。由於使用聚酰亞胺作為反射膜，其應力遠小於一般常見的材料。

另外，本研究使用光學顯微鏡量測形變量與驅動電壓關係。事前製作時，在反射膜上故意留下不平整的小點^(24, 25)，如此可以用光學對焦的方式確認形變量，驅動電壓由電源供應器 (TA-1P-15 made by Matsusada Precision, Inc.) 提供。當 67 個電極都提供 195 伏特時，可達最大形變量為 39 μm，但更大的電壓會造成 snap-down effect 而無法作用。光學顯微鏡量測誤差約為 0.3 μm，即其焦深。圖 19 是量測與模擬比較結果，可以發現兩者極為相似，數據皆落於量測誤差內，顯示模擬的可信度。

將雷射用可形變反射鏡反射至光纖，然後將接收到的雷射轉換成電訊號顯示於示波器上，給予可形變反射鏡電極方波訊號，使其形變時無法將雷射反射至光纖中，以此測量反應時間。結果顯示如圖

表 4. 形變實驗中的驅動電壓與形變誤差。

Zernike 項次	驅動電壓 (V)	RMS 誤差 (nm)
defocus	180	52
astigmatism	195	69
trefoil	195	72

20，反應時間約為 20 ms。然後改輸入正弦波訊號測量共振頻率，如圖 21。其共振頻率約為 40 Hz。因此本研究的設計適合大幅度形變，但容許稍長的反應時間。

根據二維波動方程式，邊緣固定的圓形薄膜之共振頻率為⁽²⁶⁾：

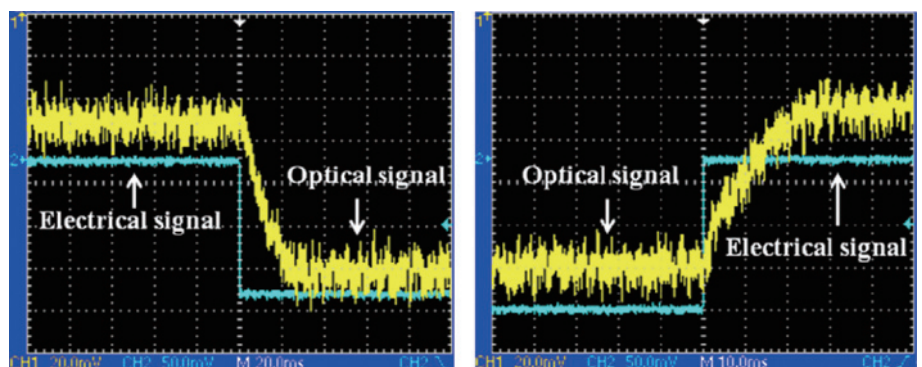
$$f_{k,m} = \frac{1}{2\pi r} \alpha_{k,m} \sqrt{\frac{T}{\rho}} \quad (8)$$

其中， r 為薄膜半徑， T 為張力 (應力與厚度的積)， ρ 為材質密度， $\alpha_{k,m}$ 為 k 階伯努力方程式的第 m 個 0。以此公式計算出的共振頻率為 42.3 Hz，相當接近實驗數據。在需求更高共振頻率或高反應速率時，可以調整製作參數，如反射膜厚度。驅動電壓也可以藉由調整電極反射膜間距而降低，其間的取舍皆可以靠改變製作參數來調整。

最後，控制可形變反射鏡使其變形如同 Zernike 多項式中的低階項次：失焦、像散與三葉形像差，方法如圖 15 的電極。然後用擴束雷射照射，並以波前感測器 (OKO, uEye UI222x-M) 量測其變形情況。驅動電壓與形變誤差如表 4 所示，形變情形如圖 22，證實在高電壓的情況下，裝置仍能正確地變形為 Zernike 多項式的低階項次。

圖 20.

變形與回復的反應時間。



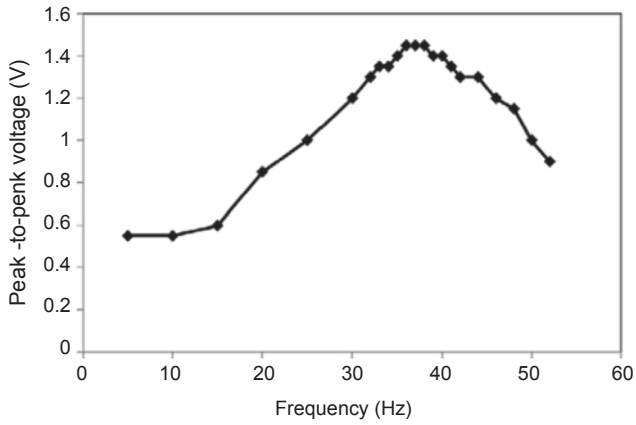


圖 21. 共振頻率的量測結果。

4. 小結

以上以聚酰亞胺作為反射膜，運用微機電技術製作了大幅度形變反射鏡。其口徑為 20 mm，反射膜厚 2.15 μm ，有 67 個六角形靜電力驅動電極。先以 ANSYS 模擬其形變，尤其幾項低階 Zernike 多項式，然後決定製作參數，並在製作後實驗量測。

我們詳細介紹了製作參數與流程。量測到的反射膜的楊氏係數與殘餘應力分別為 10.18 GPa 與 4.58 MPa，與先前的設計模擬相符。在 67 個電極全以 195 V 驅動的情況下，反射膜最大形變量為

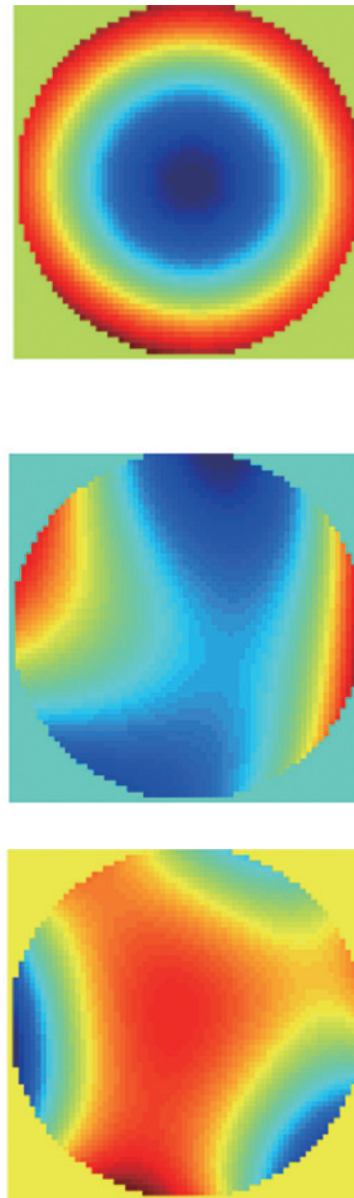
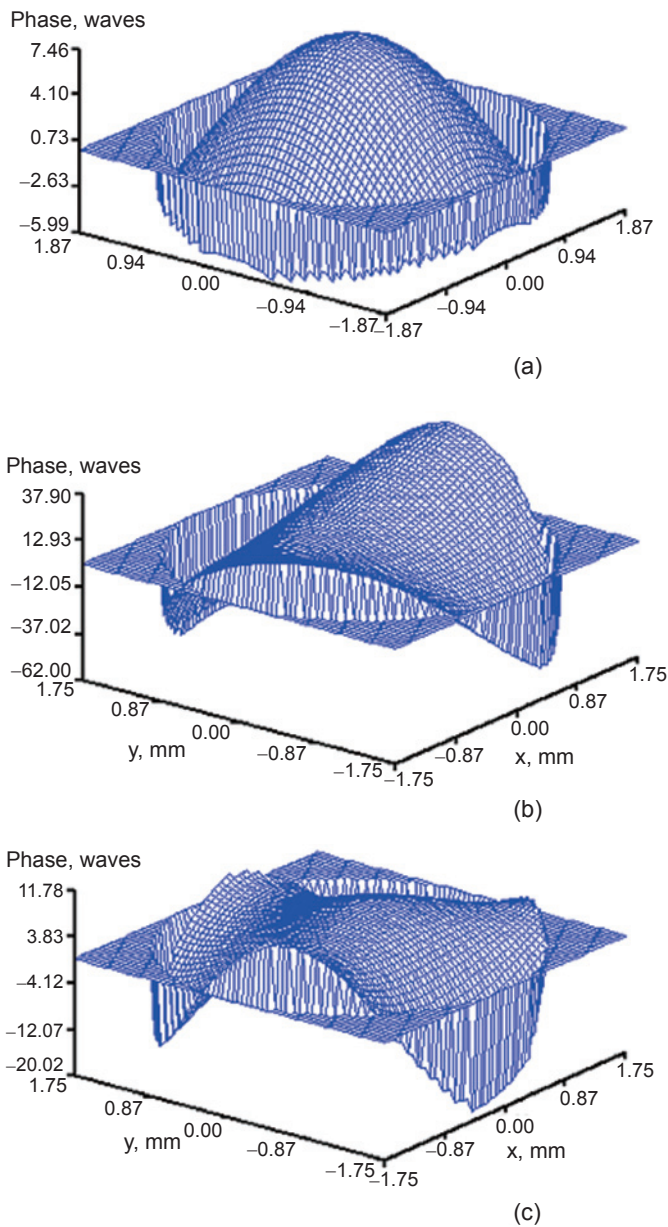


圖 22. 施加驅動電壓後可形變反射鏡形成的 (a) defocus、(b) astigmatism、(c) trefoil。

39 μm ，而共振頻率為 40 Hz。製作參數如膜厚、電極與膜間距可以依需求作最佳化調整。以上皆證實高分子聚合物可以用於可形變反射鏡作波前修正，降低製作成本。

四、結論

以上詳細說明可調適光學之原理與其關鍵光學元件，包括微透鏡陣列與可形變反射鏡。為了加強元件效能，本研究設計了新的結構與製作流程，以提升微透鏡陣列之焦長與可行變反射鏡的形變幅度。另外，使用高分子聚合物以簡化製作流程，來降低製作成本，並提升元件品質，其量測結果與模擬相似，故證實了設計的可行性。這兩種元件也可用於光場均勻化、微型鏡頭自動對焦等方面，相信此兩種元件能提供光學系統更多更廣泛的運用。

參考文獻

1. <http://instrumentsystems.jpl.nasa.gov/active/wavefrontsen/index.cfm>.
2. G.Y. Yoon, T. Jitsuno, M. Nakatsuka, and S. Nakai, *Applied Optics.*, **35**, 188 (1996).
3. H. Ottevaere, R. Cox, and H. P. Herzig, *et al.*, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics.*, **8**, 407 (2006).
4. D. Daly, R. F. Stevens, M. C. Hutley, and N. Davies., *Measurement Science and Technology.*, **1**, 759 (1990).
5. S. Haselbeck, H. Schreiber, J. Schwider, and N. Streibl, *Optical Engineering*, **32**, 1322 (1993).
6. P. Poon, L. Commander, D. Selviah, and M. Robinson, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **1**, 133 (1999).
7. S. Sinzinger and J. J. Microoptics., Wiley Online Library (2003).
8. E. Hecht, *Optics 4th edition by Eugene Hecht Reading*, **1**, 2001 (2001).
9. D. Malacara. *Optical shop testing*. Wiley-Blackwell (2007).
10. G. Vdovin and M. Loktev, *Opt. Lett.*, **27**, 677 (2002).
11. M.Y. Loktev and V. N. Belopukhov, *Rev. Sci. Instrum.*, **71**, 3290 (2000).
12. P. Tournois, *Opt. Commun.*, **140**, 245 (1997).
13. F. Verluise and V. Laude, *Opt. Lett.*, **25**, 575 (2000).
14. C. Radzewicz, P. Wasylczyk, W. Wasilewski and J. S. Krasiski, *Opt. Lett.*, **29**, 177 (2004).
15. P. Wnuk, C. Radzewicz and J. S. Krasiński, *Opt. Express*, **13**, 4154 (2005).
16. M. Hacker, G. Stobrawa, R. Sauerbrey, T. Backup, M. Motzkus, M. Wildenhain, and A. Gehner, *Appl. Phys. B*, **76**, 711 (2003).
17. D. Dagel, W. Cowan, O. Spahn, G. Grossetete, A. Grime, M. Shaw, P. Resnick, and B. Jokiel, *J. Microelectromech. Syst.*, **15**, 572 (2006).
18. A. Diouf, T. Bifano, A. Legendre, Y. Lu, and J. Stuart, *Proc. SPIE.*, **7595**, 75950 (2010).
19. www.okotech.com
20. C. Friese and H. Zappe, *J. Microelectromech. Syst.*, **17**, 11 (2008).
21. A. Ross, S. Graham, A. Gundlach, J. Stevenson, W. Hossack, D. Vass, G. Bodammer, E. Smith, and K. Ward, *Proc. SPIE*, **4075**, 41 (2000).
22. T. Chen, C. Chiu, and G. J. Su, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **20**, 830 (2008).
23. K. Bean, *IEEE Trans. Electron Devices*, **25**, 1185 (1978).
24. D. Maier-Schneider, J. Maibach, and E. Obermeier, *J. Microelectromech. Syst.*, **4**, 238 (1995).
25. M. M. Nowell and D. P. Field., *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **516**, 115 (1998).
26. S.-J. Hwang, J.-H. Lee, C.-O. Jeong, and Y.-C. Joo, *Scr. Mater.*, **56**, 17 (2007).
27. R. D. Blevins, *Formulas for Natural Frequency and Mode Shape*, Malabar, FL:Krieger, 226 (1979).



劉彥良先生為國立台灣大學光電工程學研究所博士班學生。

Yen-Liang Liu is currently a Ph.D. student in the Graduate Institute of Photonics and Optoelectronics at National Taiwan University



林美姣小姐為國立台灣大學光電工程學研究所碩士班學生。

Vinna Lin is currently a M.S.D. student in the Graduate Institute of Photonics and Optoelectronics at National Taiwan

University



蘇國棟先生為美國加州大學洛杉磯分校電機工程學博士，現任國立台灣大學電機工程學系副教授。

Guo-Dung Su received his Ph.D. in electrical engineering from University of California, Los Angeles, USA. He is currently an associate professor in the Department of Electrical Engineering at National Taiwan University.