

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

以光感高分子材料製作垂直梳狀致動器 (2/2)

研究成果報告 (完整版)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC 97-2221-E-009-021-MY2

執行期間：97 年 08 月 01 日至 99 年 07 月 31 日

計畫主持人：徐文祥

計畫參與人員：鍾君煒、黃元德、溫鎰明、陳禹同

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：本計畫可公開查詢

執行單位：國立交通大學機械系

中華民國九十九年十月十五日

目錄

| | |
|--------------------------------|----|
| 1. 摘要..... | 1 |
| 2. 計畫緣起與目的..... | 2 |
| 3. 以正型光阻於雙面部分曝光製程開發應用與結果..... | 3 |
| 3.1. 製程方法..... | 3 |
| 3.2. 公式推導..... | 5 |
| 3.3. 製程結果..... | 7 |
| 3.4. 量測結果..... | 9 |
| 4. 以負型光阻於雙面部分曝光製程開發應用與結果..... | 11 |
| 4.1. 製程流程與尺寸設計..... | 11 |
| 4.2. 初步實驗結果..... | 12 |
| 4.2.1. 光阻塗佈厚度與轉速關係..... | 12 |
| 4.2.2. 洗邊與光阻均勻度關係..... | 13 |
| 4.2.3. 正向單次部分曝光強度與曝光深度關係..... | 14 |
| 4.2.4. 減低鍍鉻區曝光反射效應-增加塗佈厚度..... | 16 |
| 4.2.5. 背向部分曝光..... | 18 |
| 4.3. 雙面部分曝光於封閉流道測試結果..... | 19 |
| 5. 結論..... | 20 |
| 6. 參考資料..... | 20 |

1. 摘要

本計畫旨在開發雙面部份曝光製程方法，其包含正型光阻與負型光阻，利用兩者感光材料的特性，分別以垂直式梳狀致動器與封閉型微流道做為應用的載具，首先以正型光阻 AZ9260® 來製作以光感材料當基底的垂直式梳狀致動器，其中正向的部份曝光定義出下層固定結構梳齒的高度，背向的部份曝光定義上層結構的懸浮高度與厚度，完全不需犧牲層或者是額外的蝕刻步驟，而最後的濺鍍設計，使得垂直式梳狀致動器能成功的作動，而在模擬方面上，運用了有限元素分析與其分析軟體，找到輸入電壓與旋轉角的關係，而在靜態與動態的量測上，使用 SEM 儀器量測結構的外型尺寸，和白光干涉儀量測旋轉角度與微機電動作分析儀量測第一模態頻率響應，最後比較實驗與模擬數據，可得到輸入電壓為 158.3v 時可得到旋轉角為 2.31°，驗證了以光感高分子材料製作垂直式梳狀致動器的可行性。而第二項的方式是以負型光阻 SU-8 來製作封閉型微流道，以往封閉型微流道的製作方法多需用到晶片接合製程或多次光阻塗佈，應用本計畫所開發出的製程，特點是僅需單層光阻塗佈，結合雙面部分曝光，無需晶片接合，即可做出封閉型微流道，並且內部截面可具有高低差，而在結果方面上，當塗佈厚度達 380 μm 以上，可以大幅消滅反射效應，使顯影後的光阻，在鍍鉻區與透明區具有相同顯影深度，在結合正向與背向部份曝光製程部份，實驗結果發現，SU-8 厚度不足時，正向部分曝光及背向部分曝光在未鍍鉻透明區域會有明顯疊加作用，易造成曝光過量，在提高塗佈厚度至 380 μm 以上時，就成功製作出內部截面具有上下高低差的微流道結構，驗證了本計畫所開發的製程方法，以光感高分子材料製作出封閉型微流道。

A novel approach by using a double-side multi partial exposure (DoMPE) method to fabricate the polymer-based vertical comb drive with the thick photoresist AZ9260® as the structural material is proposed in this paper. The front-side partial exposure defines the height of the fixed lower fingers, and the back-side partial exposure creates the suspending space of the upper fingers. The staggering sets of fingers with a proper initial overlap and self-alignment are easily achieved by this way. The fabrication of the vertical comb drive (VCD) is completed after the development without any additional sacrificial layer and etching process. The metal layer is finally deposited on the structural surface by the sputtering system for the suitable electric conductivity to activate the polymer VCD, and the desired electric isolation is realized by the overhang design. The operation model is performed by the theoretical analysis and FEM simulation, and the static deflection and dynamic response of the polymer VCDs are characterized finally. By comparing the analytical and experimental results, the feasibility on the fabrication of polymer VCD is verified with a measured rotation angle of 2.31° under the driving voltage of 158.3V.

And our novel method is also applied to fabricate sealed micro channels by using negative photoresist SU-8. In previous studies, fabricating sealed micro channels needs either wafer bonding or multiple photoresist coating. The proposed method needs only SU-8 single-layer coating and double-side partial exposure, without wafer bonding, to fabricate not just sealed micro channels, but also sealed micro channels with non-uniform inside cross section. In terms of our results, combining front-side and back-side exposure without coating sufficient SU-8 thickness, the cross-link effect from double-side exposure will happen to result in over exposure. Finally, while coating SU-8 above 380 μ m, a feasible recipe is established to successfully fabricate sealed micro channels with variable inside cross section.

2. 計畫緣起與目的

選用垂直式梳狀致動器來做為本計畫開發雙面部份曝光製程的第一項應用，是由於靜電式梳狀致動器由 Tang et al. [1]製作出來後，在微機電領域中迅速的成為一個有名的元件且佔據著一個重要的地位，而傳統的梳狀致動器，有著兩組的梳狀結構，一組為可移動結構，一組為固定結構，在作動中因為兩組結構間有著固定的間距，使其提供優良的線性致動力，或者因外界受力移動可成為電容式感測器，因此，梳狀致動器變被大力的研究，如外型最佳化設計[2]，次微米間距梳狀致動器[3]，在微機電領域的應用方面上，如濾波器[4]，加速度計[5]，陀螺儀[6]，和光開關[7]。

梳狀致動器除了擁有平面的運動外，若使其兩組梳狀結構作成為有垂直方向上的間距，它就擁有出平面的運動能力，其叫做垂直式梳狀致動器(VCD)，相較於平行板靜電式致動器，在一供應電壓下，垂直式梳狀致動器在整個行程中可輸出一穩定力量，而且不會產生遲滯效應，如此一來，垂直式梳狀致動器非常適合應用於需要大出平面運動，低輸入電壓，低功率消耗，和迅速的作動的環境中，由於擁有這些非常傑出的特性，在近幾年中，越來越多人投入心力研究垂直式梳狀致動器，在這些研究中，可依製成方式區分為兩大類，第一大類為原始間距，在製作時兩組梳狀結構間，就存在有一固定間距，如同 SUMMiT-V 製程[8]，多晶矽回充和體蝕刻[9]，接合方法[10]，以 SOI 為基底結合 DRIE 蝕刻[11-13]，多次 DRIE 蝕刻在單晶矽基底[14]，在(111)單晶矽上進行微加工[15-16]等等。第二大類為初始變形，原先一組梳狀結構與另一組結構間有角度的不同，藉由抬生產生初始的間距，如殘留應力而導致的彎曲樑[17]，光阻熱回流[18]，塑性形變[19]等等。以上所提出的作法，全部都是使用單晶矽或多晶矽當作基底來製作。相較於矽基材料而言，高分子材料由於擁有較低的製作成本和較易的製程流程，其也成為另一個受矚目的材料之一。例如在微機電的應用中，聚碳酸酯(PC)和有機玻璃(PMMA)可以藉由熱壓方法製作出高深寬比的微結構[20]，而對解析系統(μ -TAS)中微流道而言，利用了很多高分子材料來製作，如 PMMA, PC, polypropylene (PP), and polydimethylsiloxane (PDMS) [21-23]等等，除了被動元件

外，甚至些主動元件，如運用熱壓高分子材料來製作靜電式梳狀致動器[24]，或是用厚膜負光阻製作梳狀致動器[25]，還有用 SU-8 來當作結構材料的加速規[26]，和用金屬沈積在聚合物結構元件上當電通道[27]，如此一來，高分子材料就成為一個重要且低成本的製作選擇，然而，從來未有一垂直式梳狀致動器是運用高分子材料來製作。

而選用封閉型微流道來做為本計畫開發雙面部份曝光製程的第二項應用，是由於微流道是微流體系統中之基本元件，在許多的微機械結構，尤其在生物運用愈來愈重要，以半導體製程應用的微機電系統（Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS）隨著製作技術的演進，現在可以做到尺寸很小並且運用在實驗室晶片（laboratory on a chip）， μ TAS（Micro Total Analysis System），噴墨印表頭等。其功能除了在流體輸送並可用在化學分析、生物及化學反應、藥物輸送、分子的分離、連續或同步的核酸反應、環境監測等。它的潛在好處再縮小尺寸、提高效率、降低能量消耗、用完即丟、電子控制整合、價格低等。

製作開放式的微流道有面型微加工及體型微加工。封閉式微流道的做法有三明治結構，將一片開放式微流道上接合一片基板，兩片開放式接合在一起。但是接合需要高溫及對準，增加製作上的困難。矽晶片的體型微加工方式在製作微流道需要較複雜的製程（多次的微影、蝕刻、沉積及離子植入等），而且需要昂貴的設備，所以成本高，矽晶片是不透明的材料，接合後無法看到流體流動的情形，這些限制了在封閉式微流道的應用。

以高分子材料（PDMS、PMMA）在基板上製造微流道簡化了製作程序並且大大地降低製作費用，避免了昂貴的乾蝕刻設備及濕蝕刻所使用具危險性高的化學品，也使得微流道的應用愈來愈廣。

MICRO·CHEM發展SU-8負型光阻可以做成厚膜，經紫外光照射後成交鏈結構，未曝光部分經由顯影劑洗掉後可以提供流體流動的空間，具高深寬比，僅需要紫外光曝光機，對酸、鹼、有機等具有高度的穩定性，機械結構強，重複塗佈可以製作多層流道，利用部分曝光可以製作流道上蓋，僅需微影製程，高分子材料和SU-8均為透明狀，可以看見流體在內部流動的情形，故適合製作封閉式微流道。

因此本計畫之研究目的旨在開發雙面部份曝光製程方法，其完全不需任何的犧牲層，與額外的蝕刻步驟就能做出3-D立體微結構，而利用雙面多層部份曝光技術，與不同的感光高分子材料如正型光阻AZ9260®與負型光阻SU-8，製作出垂直式梳狀致動器，與封閉型微流道。

3. 以正型光阻於雙面部分曝光製程開發應用與結果

3.1. 製程方法

對正型光阻而言，達到曝光臨界值後的光阻才會在顯影後被移除，因此在正向或背向曝光方向上，可以藉由控制曝光強度，來達到不同高度或懸浮的結構，而此種方式就是我們所提出的雙面多層部份曝光方法，英文簡稱為(DoMPE) method。

圖 3.1(a)為 DoMPE 製程流程圖，對於正向部份曝光，可藉由每次不同的光罩和不同的劑量去定義去所要得的結構深度，而對於背向部份曝光，由於我們所選用的基材為玻璃材質，可以沈積不同厚度的金屬層，定義出灰階圖案，其對於光源的穿透性的不同，可用來作背向的光罩，而經由一次的曝光後，就可到深淺不同的結構高度，如此一來，運用此種雙面多層部份曝光方法，就可簡單地做出不同高度多層的 3-D 微結構。

圖 3.1(b)為藉由雙面多層部份曝光方法來達到多層不同高度結構的示意圖，此表示出運用此種方法可以得到九種不同的結構，所以說，藉由雙面多層部份曝光方法，可以製作出兩組上下不同高度的垂直梳狀結構，而且有初始不同的相對高度，來達到出平面的扭轉運動。

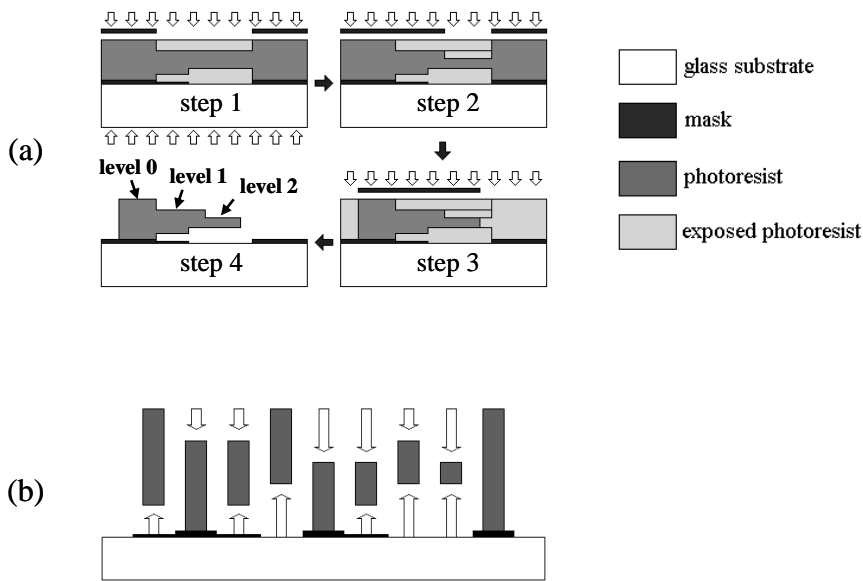


圖 3.1 雙面多層部份曝光流程圖

在此，圖 3.2 清楚地表示出高分子垂直式梳狀致動器的製程流程，我們選用蘇打玻璃當作基底材料，並選用市售的正厚膜光阻 AZ9260® (Clariant)當結構材料，來驗證我們的製程，在製程上，如圖 3.2(a)，我們沈積一層 2500 Å 厚度的鈦並用 lift-off 方式來定義出背向部份曝光的光罩，然後如圖 3.2(b)用旋塗法把光阻 AZ9260® 塗在基材玻璃上，其厚度為 55µm，接著在 90°C 的加熱板上軟烤 90 分鐘，經過一段時間的水合作用後，如圖 3.2(c)使用我們所需的曝光劑量來達到部份曝光的深度，其定義出下層梳齒的高度，接著如圖 3.2(d)，背向曝光來定義出上層梳齒的懸浮高度，其可提供垂直式梳狀致動器所需要的行程，然後如圖 3.2(e)，進行正向整個的曝光，來定義全部的結構圖案，其中上下層的梳齒可自動對準，避免重疊的問題，而導致不能作動，在經過曝光過程後，最後要用 AZ400k 顯影液來顯影，如此一來就如同圖 3.2(f)，可得到完整的結構，完全不需額外的犧牲層或蝕刻步驟，更進一步地，為了可以有導電層來驅動垂直式梳狀致動器，用濺鍍系統沈積了一層 2000 Å 厚的銅在結構表面上，除此之外，為了避免上下兩層的梳狀結構短路，有設計了遮蔽部份在懸浮結構上，方式為在支撐結構設計

上，背向曝光的圖案小於正向曝光的圖案，這樣上層結構就會略大於下層，達到遮蔽的功能。

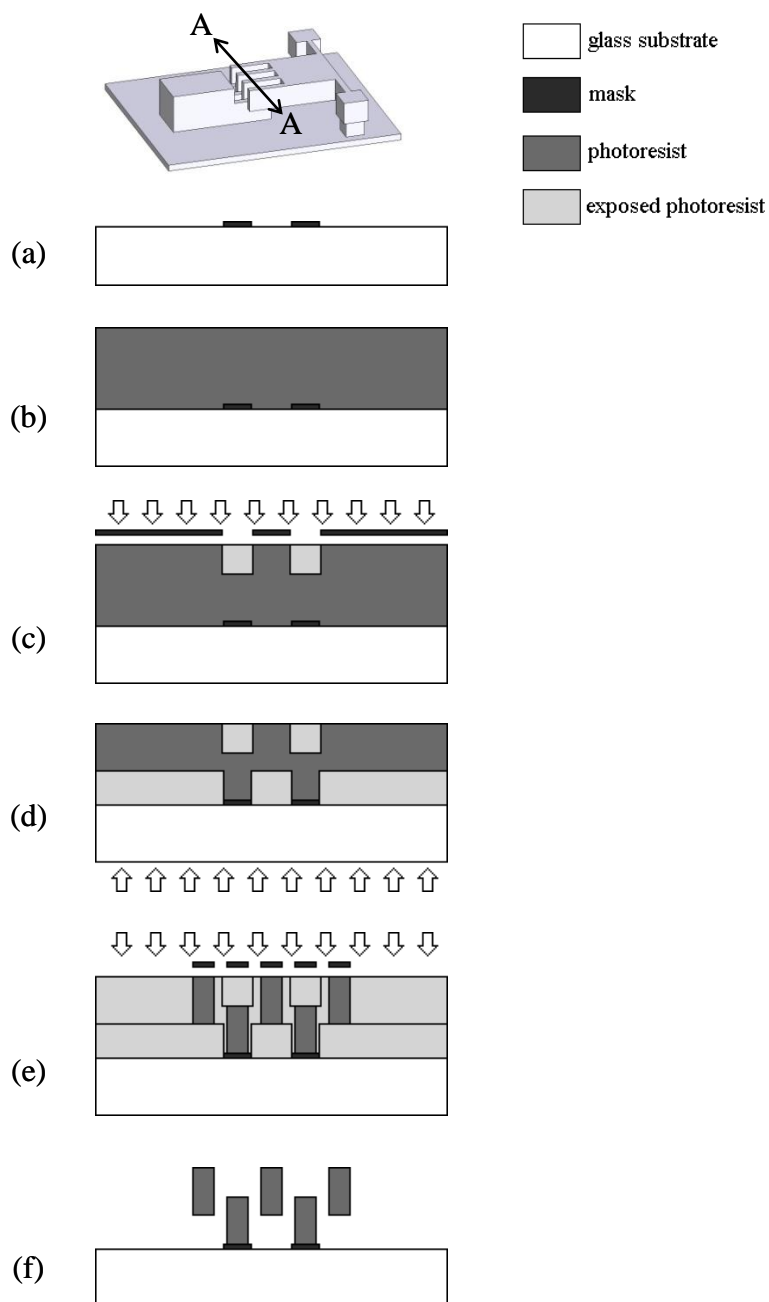


圖 3.2 垂直式梳狀致動器製程流程圖

3.2. 公式推導

垂直式梳狀致動器如圖 3.3 所示，其有兩組梳狀結構，一組固定在基底上，另一組則為懸浮結構，藉由彈簧連接在支柱上，而輸入電壓在兩者上，垂直式梳狀致動器會因靜電力而產生一轉動動作，直到與彈簧力兩者達到平衡而停止，解決力平衡的關係後，就可得到輸入電壓與轉動角的关系式。

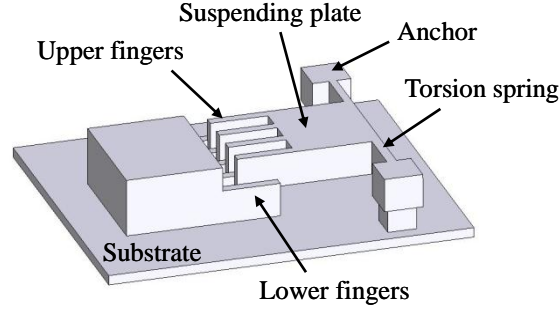


圖 3.3 垂直式梳狀致動器外型圖

一般而言，梳狀致動器的驅動力是由 n 組的梳狀對間的靜電力產生，為公式(1)

$$F_e(z) = \frac{n}{2} \frac{dC}{dz} V^2 \quad (1)$$

其中 C 為兩組梳狀對間的電容值， z 為出平面垂直位移值， V 為輸入的電壓，由於 fringing fields 是會因梳齒的高度或厚度而影響，因此不能假設為平行板電容，而是會隨著兩者間的高度變化而改變。為了找出 dC/dz 之間的關係，需要藉由有限元素分析軟體 ANSYS 來模擬不同的位移產生的電容關係量，在這把電容設為 12 階與 z 有關的多項式，如公式(2)，

$$C(z) = a_{12}z^{12} + a_{11}z^{11} + a_{10}z^{10} + \dots + a_2z^2 + a_1z + a_0 \quad (2)$$

如圖 3.4(a)所示，分成兩種狀況分析，一者有底板，另一則無，圖 3.4(b)則表示出當梳齒的高度為 $35 \mu\text{m}$ ，寬度為 μm ，間距為 $4 \mu\text{m}$ 下，兩者數值在前 2/3 的行程是吻合的，但在後 1/3 的行程，有底板的梳齒在模擬上卻發生發散的現象。

如圖 3.5 所示，垂直式梳狀致動器由靜電力所產生的力矩可表示為公式(3)

$$T_e = \int_{x1}^{x2} F_e(z) L_r dx \quad (3)$$

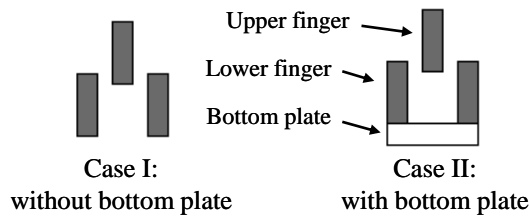
其中 $x1$ 和 $x2$ 是沿著懸浮結構方向上，上下梳齒間重疊的部份， $F_e(z)$ 為靜電力， L_r 為力臂，其分量為 $x \cos \theta$ ， θ 為垂直式梳狀致動器的旋轉角，由於垂直位移 z 可表示為 $x \sin \theta$ ，公式(3)可改寫為公式(4)

$$T_e(\theta) = \frac{nV^2 \cos \theta}{2} \left[\sum_{k=1}^{12} \frac{k(a_k x^{k+1} \sin^{k-1} \theta)}{k+1} \right]_{x1}^{x2} \quad (4)$$

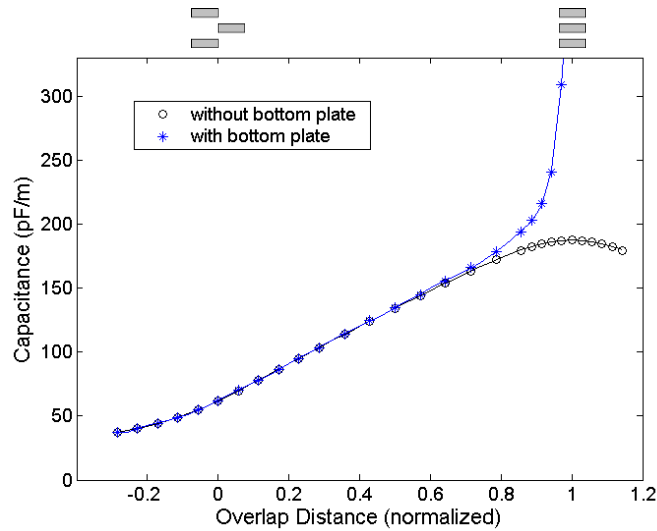
公式(4)描述著力矩的產生，是由輸入的電壓下，而形成的靜電力和轉動角的改變，另一方面，力矩也是由螺旋彈簧的機械力產生，所以也可寫成公式(5)

$$T_m(\theta) = \frac{G\theta(b^3h + bh^3)}{6L} \quad (5)$$

其中 G 為剪力的彈性係數， b ， h ，和 L 分別為螺旋彈簧的寬度，高度，和長度，藉由公式(4)和公式(5)，可以得到垂直式梳狀致動器所產生的旋轉角。



(a)



(b)

圖 3.4 數值分析圖

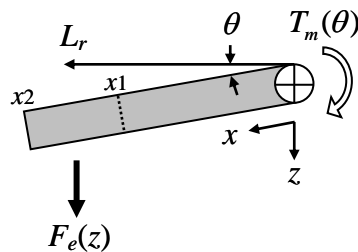


圖 3.5 靜電力與扭轉角關係圖

3.3. 製程結果

在結果方面上，大致分作三個部份，首先是雙面多層部份曝光的製程步驟中所遇到的問題與解決方式，接著是垂直式梳狀致動器的製作結果，最後是靜態與動態的量測與模擬對照。

普通而言，顯影深度主要是由曝光的劑量所控制，簡單來說，越大的曝光劑量會得到越深的深度，然而其他的製程參數也扮演了很重要的角色，如顯影時間與軟烤時間，而除了增加曝光劑量，其越久的顯影時間也會擴大顯影的深度，但又會因軟烤的時間增加而縮減，因此，適當地製程參數對於穩定的製程是很重要的，在這製程中，固定的參數為，光阻的厚度為 $55 \mu\text{m}$ ，軟烤時間為 90 分鐘，顯影時間為 45 分鐘，有了這些參數，圖 3.6 為在不同的曝光劑量下，不同的顯影深度，而這結果顯示處，隨著曝光劑量的遞增，顯影深度也會隨之遞增，而運用這

些實驗數據，我們就可以選擇上下梳齒的高度，與懸浮高度來達到目標。

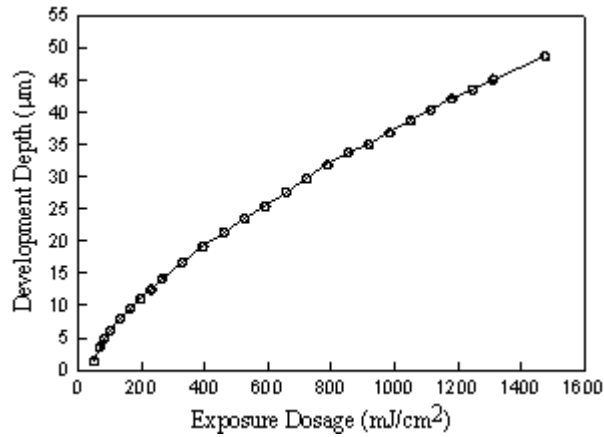
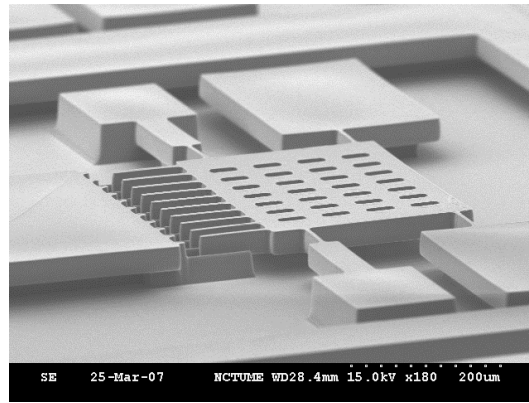
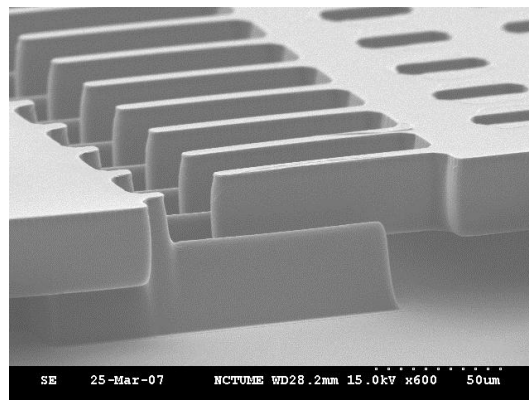


圖 3.6 曝光強度與顯影深度關係圖

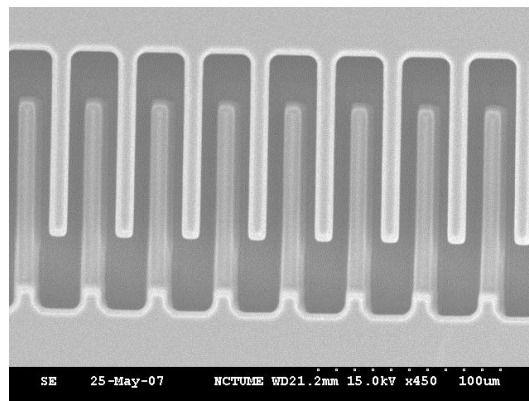
有了上述的製程參數，我們就可以製作出所要得高分子垂直式梳狀致動器，其中包含著上下兩層的結構，如圖 3.7(a)，就可看到用 AZ9260® 正光阻製作完成的垂直式梳狀致動器，且有沈積過銅，其懸浮平板的尺寸為 $300 \times 360 \mu\text{m}$ ，扭轉彈簧的寬與高度分別為 $12 \mu\text{m}$ 和 $60 \mu\text{m}$ ，而在正向曝光方面上，曝光劑量 426 mJ/cm^2 可以得到 $20 \mu\text{m}$ 的曝光深度，所以下層的梳齒厚度就為 $35 \mu\text{m}$ ，在背向曝光方面上，曝光劑量 525 mJ/cm^2 可以得到上層梳齒的懸浮高度為 $24 \mu\text{m}$ ，而其厚度為 $31 \mu\text{m}$ ，而圖 3.7(b)和圖 3.7(c)分別為圖 3.7(a)的近視角與俯視角，最後，扭轉彈簧在後續量測之下，其可移動的距離大約為 $10 \mu\text{m}$ 。



(a)



(b)



(c)

圖 3.7 實驗結果外型圖

3.4. 量測結果

垂直式梳狀致動器的靜態量測是用白光干涉儀進行，動態量測試用微機電動動作分析器進行，根據靜態量測結果，在輸入電壓為 158.3V 時，可得到最大旋轉角 2.31° ，其結果如圖 3.7，而圖 3.8 則表示垂直式梳狀致動器的動態響應結果，當輸入交流電壓 20V 偏壓 20V 下，第一模態的自然頻率響應為 6.6 kHz，再加上光組的密度，有自然頻率響應，就可得到彈性係數，而如何得到光阻 AZ9260® 的密度，在這有一簡單方法，首先先旋塗光阻在晶片上，並量測有無光阻的重量

差，接著量測光阻的厚度並有晶片的表面積，就能算出光阻的體積，而光阻的重量與體積都知道後，其密度就算出為 $1180 \pm 7 \text{ Kg/m}^3$ ，而其第一頻率響應為 6.6 kHz ，就可計算出其彈性係數為 1.142 Gpa ，把此值帶入有限元素分析計算中，並假設蒲松比為 0.4 ，而圖 3.9 就是模擬分析結果，其中垂直式梳狀致動器包含著懸浮板結構，扭轉彈簧和上層梳齒，而其第二，第三和第四模態的頻率響應結果分別為 41.40 kHz ， 44.10 kHz ，and 54.02 kHz 。

而有了上述的材料數值，高分子垂直式梳狀致動器的靜態撓度就可藉由軟體 Matlab 計算，其結果如圖 3.10 所示，有垂直式梳狀致動器模擬與實際量測結果，為輸入電壓與旋轉角的關係，其中有包括底層板有無的模擬，對於有底層板的結果，當輸入電壓為 167.37 V 和旋轉角達 2.17° 時，會因為靜電力快速的增加導致電容的增加太快，而產生拉鋸效應(pull-in effect)，而比較實驗結果，可觀查到在輸入電壓 158.3 V 和 161.8 V 間，轉動的現象很接近，和當在高輸入電壓時，有底板層就對垂直式梳狀致動器造成很大的影響。

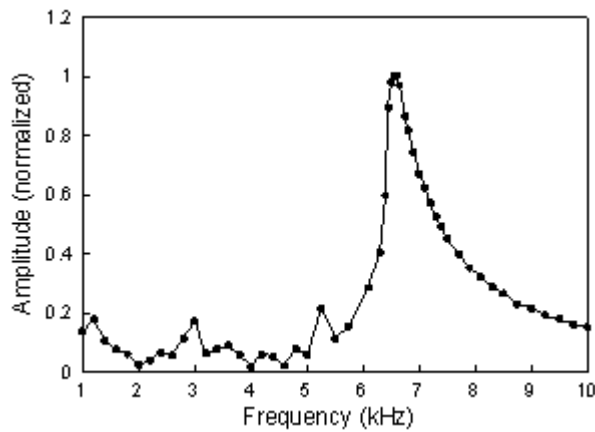


圖 3.8 動態響應圖

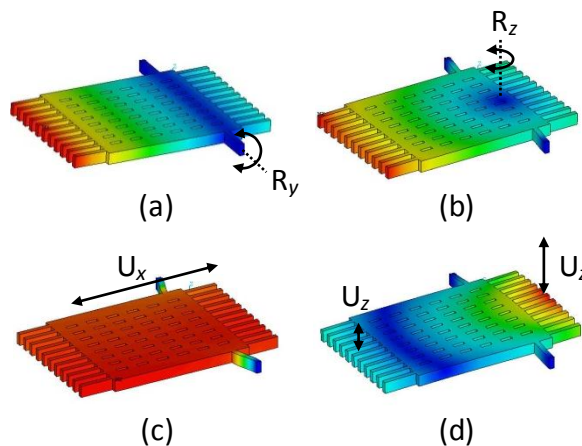


圖 3.9 有限元素分析圖 (a) $f_1=6.60 \text{ kHz}$, (b) $f_2=41.40 \text{ kHz}$, (c) $f_3=44.10 \text{ kHz}$, and (d) $f_4=54.02 \text{ kHz}$

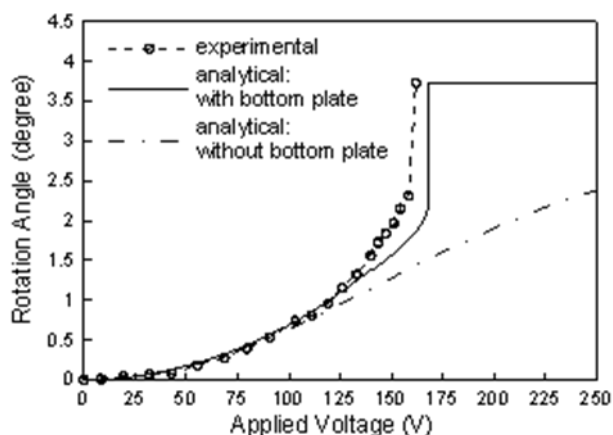


圖 3.10 輸入電壓與轉動角關係圖

4. 以負型光阻於雙面部分曝光製程開發應用與結果

4.1. 製程流程與尺寸設計

玻璃基材採用厚度 500 μm 的鈉玻璃，裁成 6 \times 6 cm 正方形。在試片上先使用 lift-off 的方法濺鍍一層 750 \AA 的鉻，其目的在背向曝光時可當作光罩以擋住不要曝光的區域。鍍鉻區範圍為 4 \times 4 cm 正方形，再細分成 4 個區域，各為 2 \times 2 cm 正方形，從上視圖各區的微流道尺寸別為 900 \times 100 μm 、900 \times 200 μm 、900 \times 300 μm 、900 \times 400 μm 。這樣的規劃可以使一片 12 \times 12 cm 的光罩上放 3 個正面曝光以及 1 個鍍鉻的圖案。

製作流程如圖 4.1：(a) 塗佈 100 μm 厚的 SU-8，(b) 正向曝光定義出流道的支柱，(c) 正向第一次部分曝光定義下層流道的高度，(d) 正向第二次部分曝光，封住流道最上層的開孔 (e) 背向部分曝光，定義上層流道的高度 (f) 以顯影劑去除未曝光的光阻，得到完整的結構。

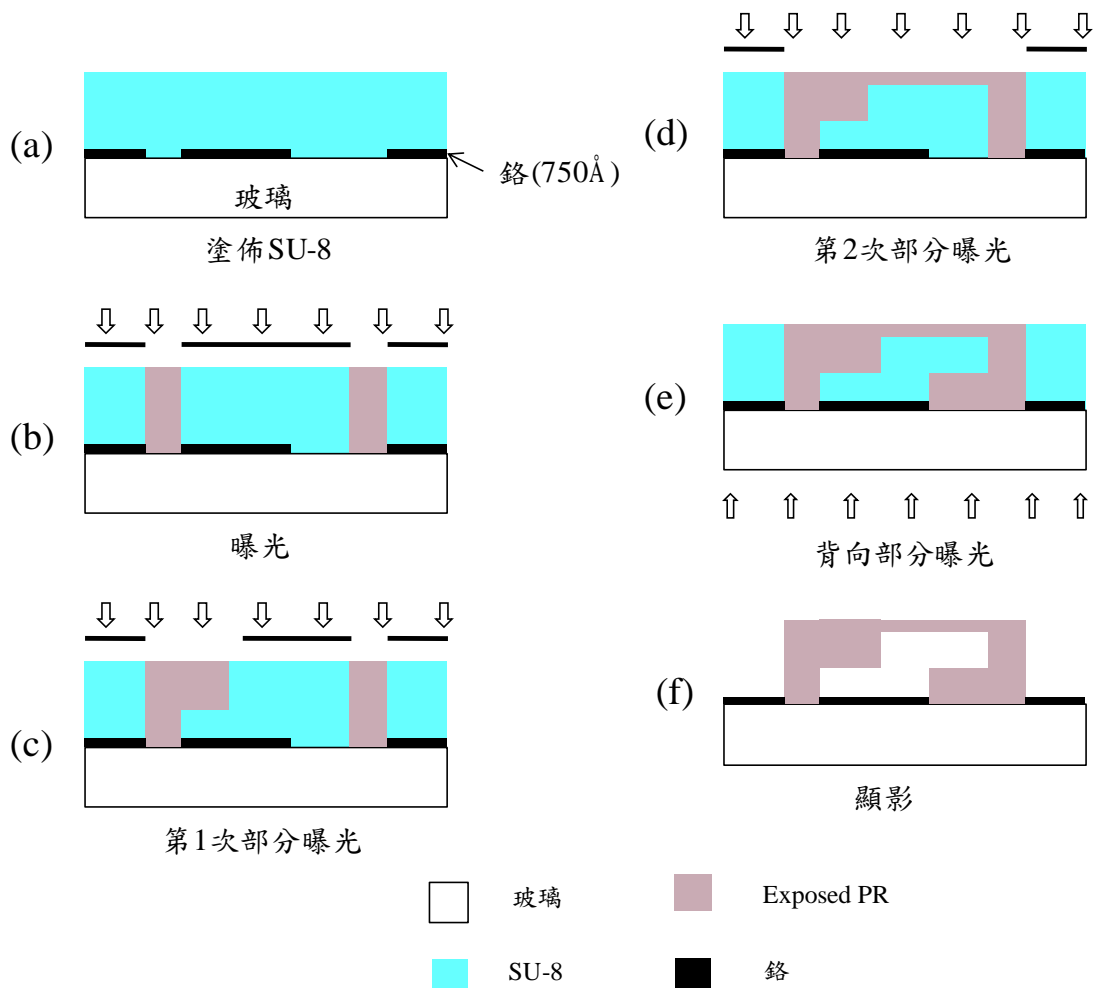


圖 4.1 製作流道流程圖

初步的塗佈厚度以及截面尺寸設計如圖 4.2。

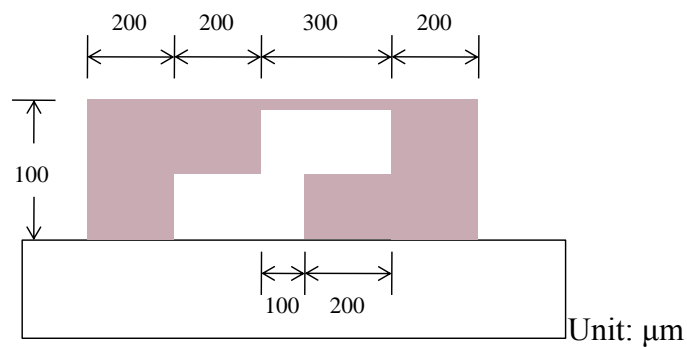


圖 4.2 初步流道尺寸設計

4.2. 初步實驗結果

4.2.1. 光阻塗佈厚度與轉速關係

以光阻厚度為 $100\mu\text{m}$ 為例，選用 SU-8 2075，由 MICRO•CHEM 提供的轉速資料第一次轉速 500 rpm、5 ~ 10 sec、加速度 100 rpm/sec，第二次轉速依 SU-8 編號及厚度曲線決定所需要的轉速，時間為 30 sec、加速度 300 rpm/sec。由 SU-8 2075 的曲線中可以決定轉速在 2200 rpm，如圖 4.3。

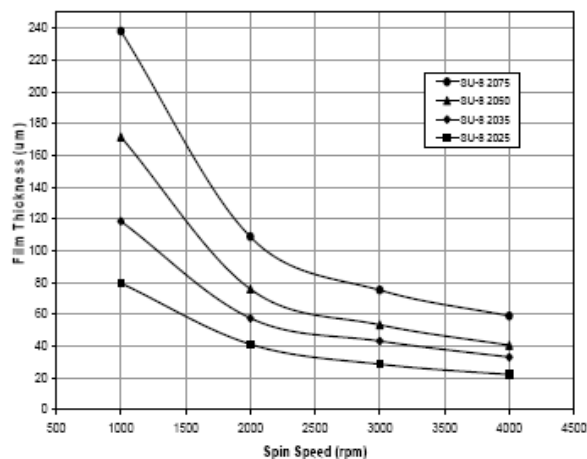


圖 4.3 塗佈厚度與轉速曲線圖

使用 RC-8 塗佈機以 2200 rpm 旋轉塗佈厚度在 120µm，測試從 1900 rpm 至 2700 rpm 的塗佈厚度結果如圖 4.4，可看到塗佈厚度比 SU-8 2075 data sheet 的值略高，反而在 2500 rpm 時才接近塗佈厚度 100µm。

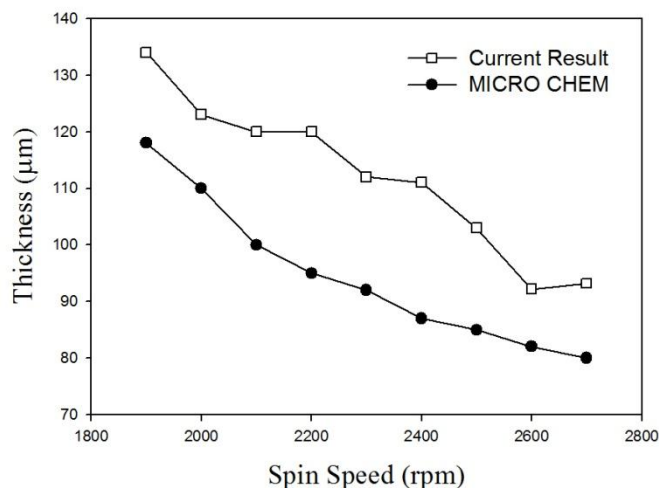


圖 4.4 轉速與塗佈厚度曲線

4.2.2. 洗邊與光阻均勻度關係

在塗佈厚度測試時發現其厚度的均勻度差異很大，如圖 4.5。觀察在旋轉塗佈的第 2 段轉速後其光阻的表面很平整，但是洗邊後光阻表面出現同心圓的凹凸狀，推測其原因為洗邊時的旋轉造成光阻再次流動而破壞厚度的均勻度。經過測試在軟烤後使光阻凝固後，不會受到洗邊時旋轉的擾動而破壞光阻表面的均勻度，然後再洗邊即可得到較佳的均勻度，如圖 4.6。

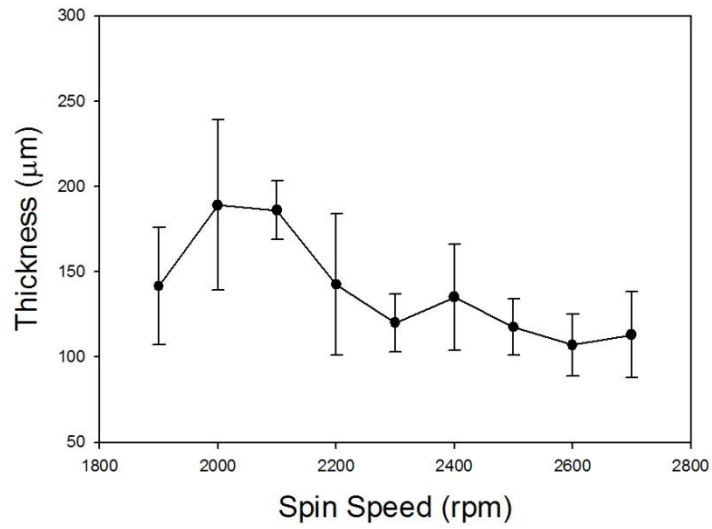


圖 4.5 旋轉塗佈後先洗邊再軟烤之厚度均勻曲線

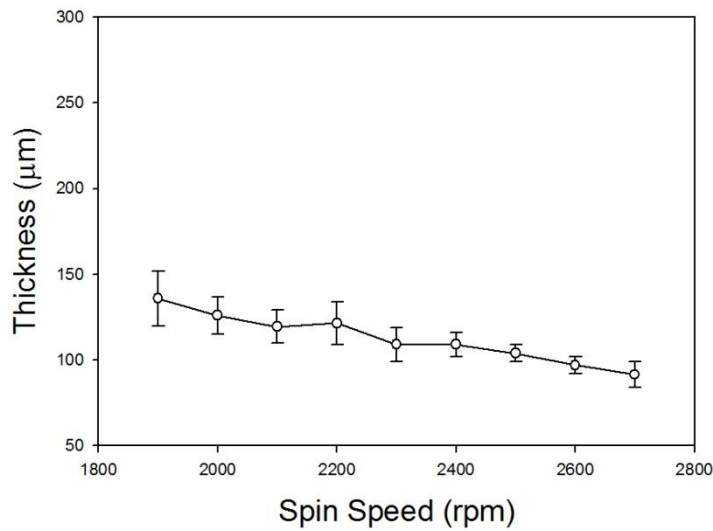


圖 4.6 旋轉塗佈後先軟烤再洗邊之厚度均勻曲線

4.2.3. 正向單次部分曝光強度與曝光深度關係

利用正向部分曝光可以製作流道的上蓋而形成封閉式的流道，首先測試部分曝光強度與曝光深度的關係，以適當的曝光強度得到希望的曝光深度。

初步測試

測試程序如圖 4.7：(a) 塗佈光阻，(b) 正向曝光，(c) 部分曝光，(d) 去光阻。

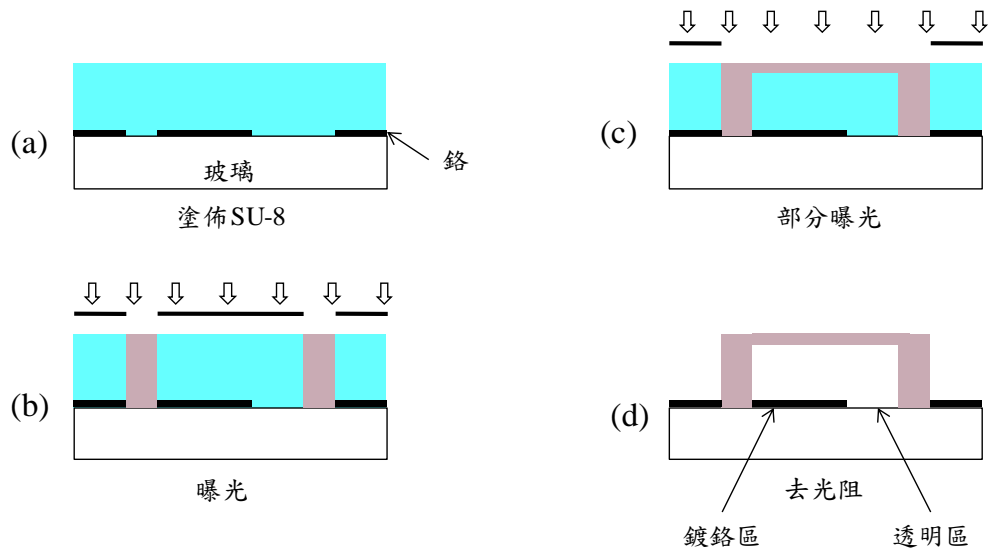


圖 4.7 部分曝光厚度測試流程圖

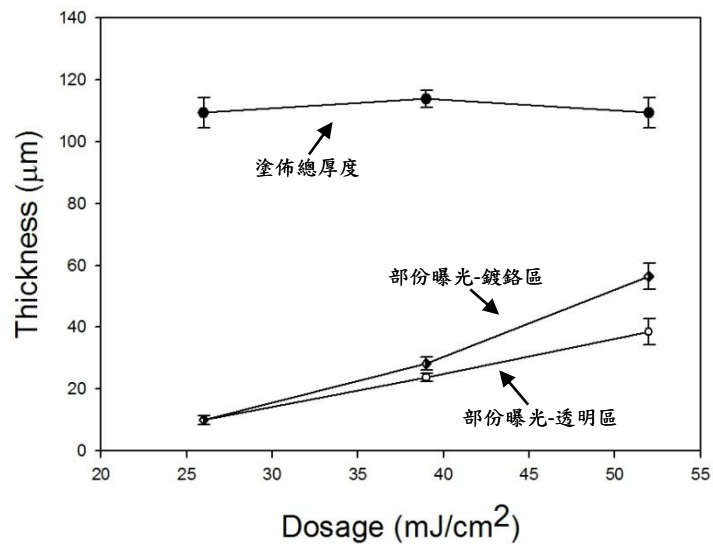
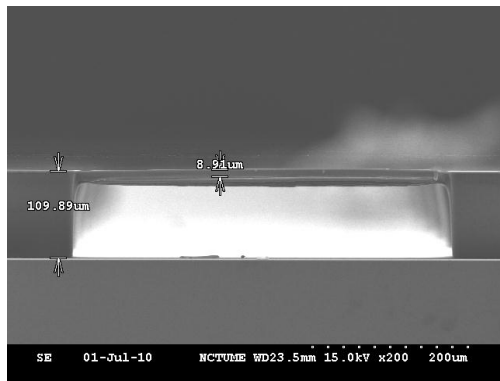
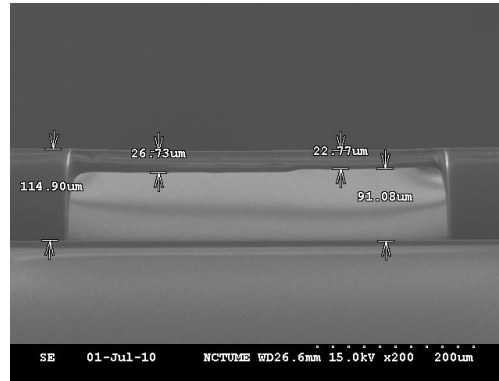


圖 4.8 塗佈厚度 110 μm 之曝光深度曲線圖

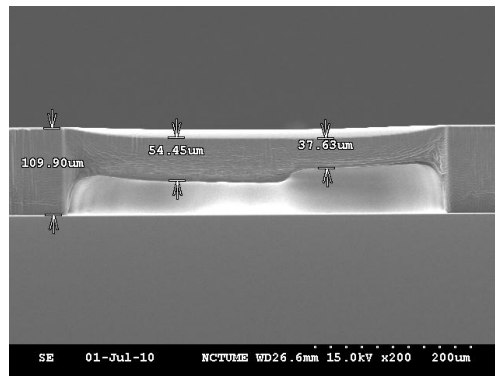
結果如圖 4.8 所示，以平均塗佈厚度 110 μm 之 3 片試片分別照射曝光能量 26、39、52 mJ/cm^2 ，發現在曝光能量 39、52 mJ/cm^2 的試片中其鍍鉻區與透明區呈現不同的曝光深度，如圖 4.9(b)、(c)。推測鍍鉻區因為反射使得曝光劑量增加，因此曝光深度比較厚。



(a) 26 mJ/cm²



(b) 39 mJ/cm²



(c) 52 mJ/cm²

圖 4.9 部分曝光圖

4.2.4. 減低鍍鉻區曝光反射效應-增加塗佈厚度

光的強度會因為距離加大而減小，要減低鍍鉻區的反射效應必須增加塗佈厚度，使光的能量在到達鍍鉻區之前消失，或者反射的光能量不至於使曝光深度增加。SU-8 2075 以旋轉塗佈方式的塗佈厚度只能到 240 μ m，以注入模具的方法可以增加塗佈厚度。原先設計十字 align key 的寬度為 50 μ m，在塗佈厚度 150 μ m 時容易對準，由於塗佈厚度的增加使得對準因繞射現象而困難度增高，因此需要增加 align key 的寬度到 300 μ m。

在試片上放置厚度 500 μ m 的模具，將 SU-8 注入模具內，厚度可以達到 500 μ m。注入程序如圖 4.10：(a) 以玻璃針筒注入模具內，(b) 旋轉 500 rpm，20 sec，使 SU-8 散開在槽內，(c) 以玻璃刮片將 SU-8 塗滿槽內，由於 SU-8 為黏稠狀會沾黏在刮片上，儘量使 SU-8 留在凹槽內。刮片只能在一個方向前進一次，若刮片前進又後退就會產生氣泡在 SU-8 內，(d) 軟烤，(e) 去除模具。凹槽內為 4 cm \times 4 cm，分別注入 0.56、0.8、1 ml，結果如表 6。曝光劑量以及曝後烤時間參考 SU-8 2150 data sheet。此方法的不定因素是沾黏在刮板上的 SU-8 體積不定，多少因而影響塗佈厚度。

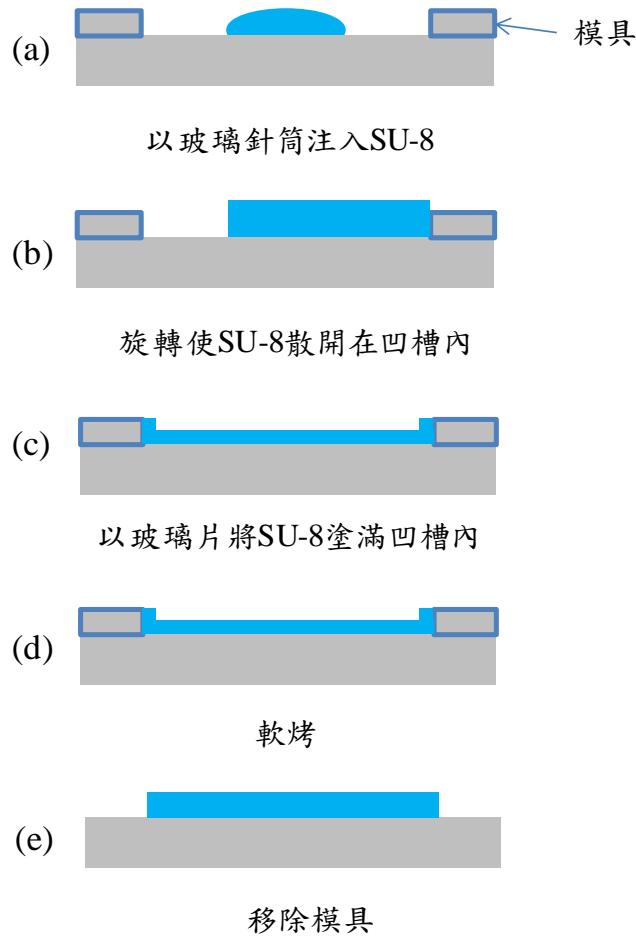


圖 4.10 注入模具法流程

其結果如圖 4.11，塗佈厚度分別為 $125.9\mu\text{m}$ 、 $345.4\mu\text{m}$ 、 $380\mu\text{m}$ 的試片上以相同的部分曝光劑量 78 mJ/cm^2 曝光，在塗佈厚度 $125.9\mu\text{m}$ 及 $345.4\mu\text{m}$ 的鍍鉻區與透明區的曝光深度仍然有差距，但在達到塗佈厚度 $380\mu\text{m}$ 上時，鍍鉻區與透明區的曝光深度則相同。

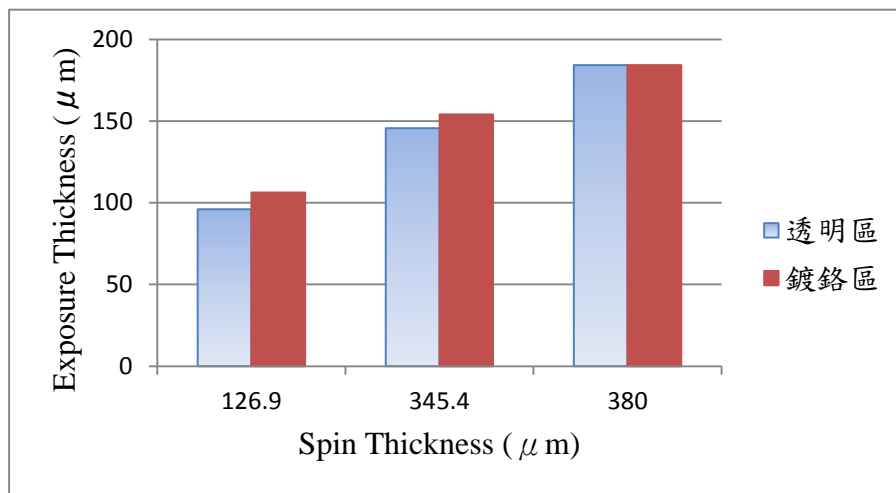
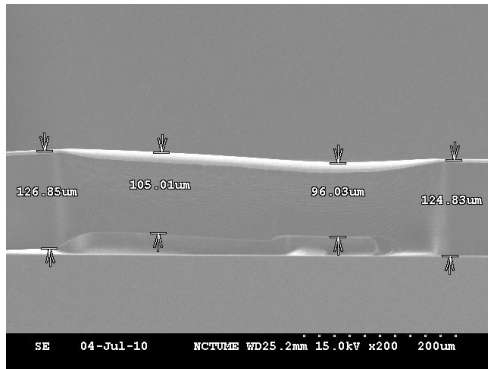
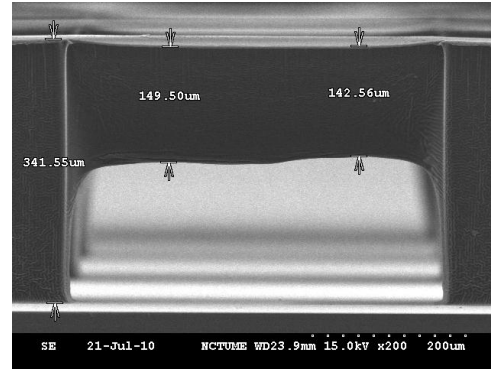


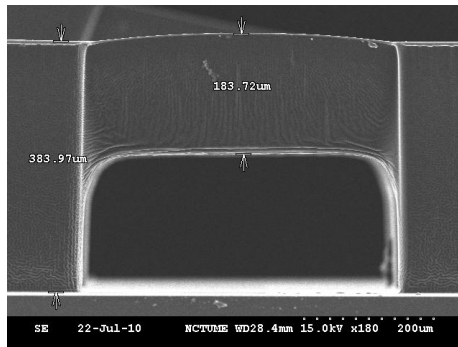
圖 4.11 相同部分曝光劑量 78 mJ/cm^2 在不同塗佈厚度之比較



(a) 126.9 μm



(b) 341.55 μm



(c) 383.97 μm

圖 4.12 單次部分曝光強度 $78\text{mJ}/\text{cm}^2$ 在 3 個不同塗佈厚度之照片

4.2.5. 背向部分曝光

除了利用正向的多次部分曝光，加上背向部分曝光可以增加截面形狀的變化，如同正向部分曝光的方式，先單獨測試背向部分曝光，並且觀察效果。

其測試程序如圖 4.13：(a) 先用 lift-off 方法製作背向曝光光罩，並塗佈上厚度 $110\mu\text{m}$ 的 SU-8，(b) 進行背向部分曝光，在這總共有三種劑量，(c) 顯影並得到設計結構。

其測試結果如圖 4.14，得到背向部分曝光與曝光深度之關係，**錯誤！找不到參照來源**。中顯示 SU-8 經過部分曝光後其水平表面不平整。

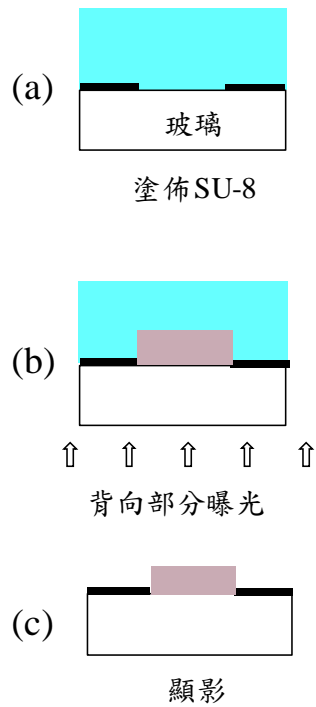


圖 4.13 背向部分曝光測試程序

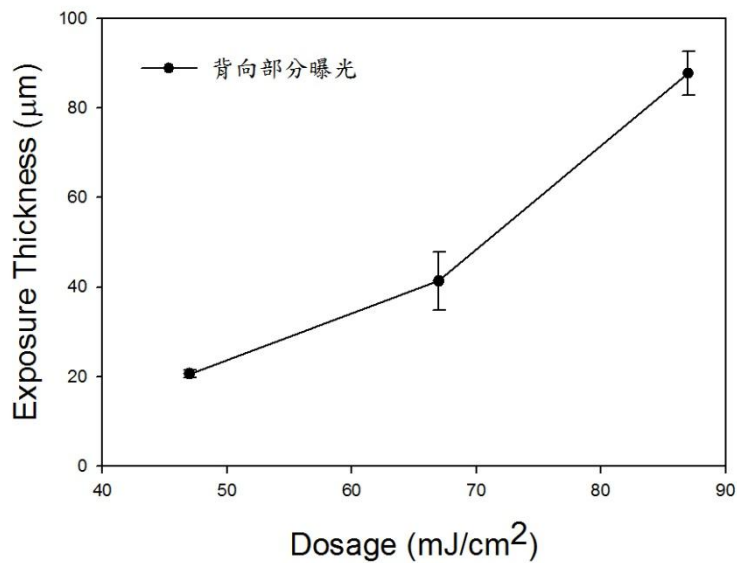


圖 4.14 背向部分曝光測試結果

4.3. 雙面部分曝光於封閉流道測試結果

運用正向與背向部份曝光結果，選定塗佈總厚度約為 150 μm ，曝光劑量如圖 4.15 分配所示，其 B 區的正向部份曝光劑量為 26 mJ/cm^2 ，當 C 區的背向部份曝光劑量 26 mJ/cm^2 時，結果如圖 4.16(a)無法成功做出封閉型微流道，但當把塗布總厚度提高到約 380 μm 時，配合相同的部份曝光劑量，就能成功的製作出多階層封閉型微流道結構。

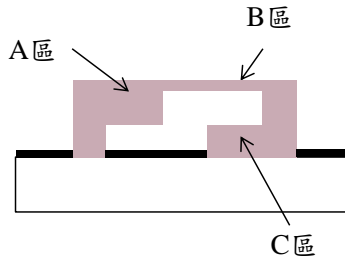
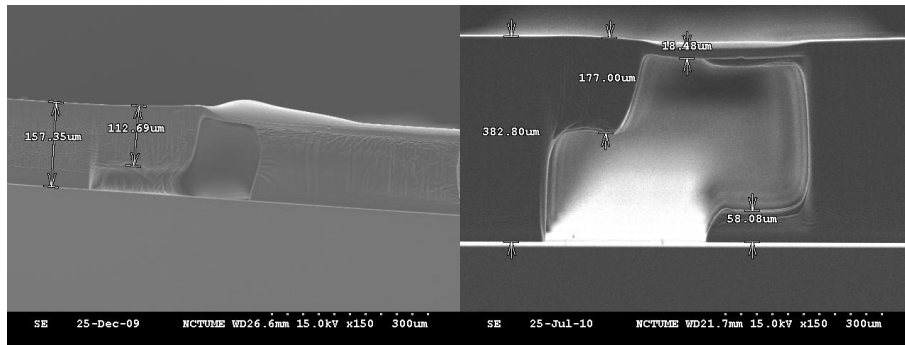


圖 4.15 曝光劑量區域定義



(a)

(b)

圖 4.16 雙面部分曝光結構圖

5. 結論

對於用正型厚膜光阻 AZ9260® 當結構層來製作高分子垂直式梳狀致動器的一連串研究，我們可知運用雙面多重部份曝光方法來製作上層的懸浮梳齒與下層固定的梳齒，且無須額外的犧牲層與蝕刻步驟，成功地製作出垂直式梳狀致動器，也建立了適合製作高分子垂直式梳狀致動器的製程參數，且沈積在結構層的金屬層也能成功的使得垂直式梳狀致動器作動，而根據量測結果，當輸入電壓為 158.3V 時，可得到旋轉角 2.31° ，其也符合模擬結果，因此，我們所做的結果驗證了本計畫所開發的製程方法，可達到用光感高分子材料來製作垂直式梳狀致動器。而在負型厚膜光阻 SU-8 則成功地建立出封閉型具高低差流道，在規畫好曝光區域後運用塗佈的技術、正向部分曝光、背向部分部分曝光以及控制好曝光劑量等，可以完成希望的截面結構，也驗證了本計畫所開發的製程方法，可達到用光感高分子材料來製作封閉型微流道結構。

6. 參考資料

- [1] Tang W C, Nguyen T H and Howe R T 1998 Laterally driven polysilicon resonant microstructures *Tech. Dig. IEEE Micro Electro Mech. Syst. Workshop (Salt Lake City)* pp 53–9
- [2] Ye W, Mukherjee S and MacDonald N C 1998 Optimal shape design of an electrostatic comb drive in microelectromechanical systems *J. Microelectromech. Syst.* 7 16–26

- [3] Hirano T, Furuhashi T, Gabriel K J and Fujita H 1992 Design, fabrication, and operation of submicron gap comb-drive microactuators *J. Microelectromech. Syst.* **1** 52–9
- [4] Lin L, Howe R T and Pisano A P 1998 Microelectromechanical filters for signal processing *J. Microelectromech. Syst.* **7** 286–94
- [5] Park K Y, Lee W C, Jang H S, Oh Y S and Ha B J 1998 Capacitive sensing type surface micromachined silicon accelerometer with a stiffness tuning capability *Dig. IEEE/ASME MEMS Workshop (Heidelberg, Germany)* pp 637–42
- [6] Tanaka K, Mochida Y, Sugimoto M, Moriya K, Hasegawa T, Atsuchi K and Ohwada K 1995 A micromachined vibrating gyroscope *Sensors and Actuators A* **50** 111–5
- [7] Juan W -H and Pang S W 1998 High-aspect-ratio Si vertical micromirror arrays for optical switching *J. Microelectromech. Syst.* **7** 207–13
- [8] Hah D, Huang S T -Y, Tsai J -C, Toshiyoshi H and Wu M C 2004 Low-voltage, large-scan angle MEMS analog micromirror arrays with hidden vertical comb-drive actuators *J. Microelectromech. Syst.* **13** 279–89
- [9] Selvakumar A and Najafi K 2003 Vertical comb array microactuators *J. Microelectromech. Syst.* **12** 440–9
- [10] Lee J -H, Ko Y -C, Kong D -H, Kim J -M, Lee K B and Jeon D -Y 2002 Design and fabrication of scanning mirror for laser display *Sensors and Actuators A* **96** 223–30
- [11] Yeh J -L A, Jiang H and Tien N C 1999 Integrated polysilicon and DRIE bulk silicon micromachining for an electrostatic torsional actuator *J. Microelectromech. Syst.* **8** 456–65
- [12] Hah D, Choi C -A, Kim C -K and Jun C -H 2004 A self-aligned vertical comb-drive actuator on an SOI wafer for a 2D scanning micromirror *J. Micromech. Microeng.* **14** 1148–56
- [13] Milanović V 2004 Multilevel beam SOI-MEMS fabrication and applications *J. Microelectromech. Syst.* **13** 19–30
- [14] Zhang Q X, Liu A Q, Li J and Yu A B 2005 Fabrication technique for microelectromechanical systems vertical comb-drive actuators on a monolithic silicon substrate *J. Vac. Sci. Technol. B* **23** 32–41
- [15] Kim J, Park S and Cho D 2001 A novel electrostatic vertical actuator fabricated in one homogeneous silicon wafer using extended SBM technology *Transducers '01* pp 756-9
- [16] Tsai J M -L, Chu H -Y, Hsieh J and Fang W 2004 The BELST II process for a silicon high-aspect-ratio micromachining vertical comb actuator and its applications *J. Micromech. Microeng.* **14** 235–41

- [17] Jeong K -H and Lee L P 2005 A novel microfabrication of a self-aligned vertical comb drive on a single SOI wafer for optical MEMS applications *J. Micromech. Microeng.* **15** 277–81
- [18] Hah D, Patterson P R, Nguyen H D, Toshiyoshi H and Wu M C 2004 Theory and experiments of angular vertical comb-drive actuators for scanning micromirrors *J. Selected Topics In Quantum Electronics* **10** 505–13
- [19] Kim J, Choo H, Lin L and Muller R S 2003 Microfabricated torsional actuator using self-aligned plastic deformation *Transducers '03* pp 1015–8
- [20] Becker H and Heim U 2000 Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures *Sensors and Actuators A* **83** 130–5
- [21] Lee G -B, Chen S -H, Huang G -R, Sung W -C and Lin Y -H 2001 Microfabricated plastic chips by hot embossing methods and their applications for DNA separation and detection *Sensors and Actuators B* **75** 142–8
- [22] Becker H and Gärtner C 2000 Polymer microfabrication methods for microfluidic analytical applications *Electrophoresis* **21** 12–26
- [23] Abgrall P 2007 Lab-on-chip technologies: making a microfluidic network and coupling it into a complete microsystem—a review *J. Micromech. Microeng.* **17** R15–49
- [24] Zhao Y and Cui T 2003 Fabrication of high-aspect-ratio polymer-based electrostatic comb drives using the hot embossing technique *J. Micromech. Microeng.* **13** 430–5
- [25] Dai W, Lian K and Wang W 2007 Design and fabrication of a SU-8 based electrostatic microactuator *Microsyst. Technol.* **13** 271–7
- [26] Jeong S J and Wang W 2004 Microaccelerometers using cured SU-8 as structural material *Proc. SPIE* **5344** 115–23
- [27] Eberhardt W, Gerhäußer Th, Giousouf M, Kück H, Mohr R and Warkentin D 2002 Innovative concept for the fabrication of micromechanical sensor and actuator devices using selectively metallized polymers *Sensors and Actuators A* **97–98** 473–7