

壓電致動無閥式微泵浦之設計與製作 (I)

The Design and Fabrication of Valve-Less Micropump with Piezoelectric Actuator(I)

計劃編號：NSC91-2218-E018-002

執行期限：91年8月1日至92年7月31日

主持人：林義成 教授 國立彰化師範大學機電工程學系

參與人員：陳世昌、邱國麟 國立彰化師範大學機電工程學系

摘要

微泵浦採用無閥式為設計基礎，利用壓電陶瓷片作為致動器。微泵浦製造利用微機電製程，包括 HNA 與 KOH 濕蝕刻，並以 Pyrex7740 康寧玻璃與矽晶片陽極接合，作為微泵浦流道蓋板，並組裝壓電致動器及出入口流道，完成壓電致動無閥式微泵浦雛形。當壓電致動器電極施加約 $100V_{pp}$ 正弦波電壓，即可趨動流體單方向流動。無閥式微泵浦之進出口並無實際閥門，而由擴流器取代，擴流器之截面利用濕蝕刻而形成半橢圓，擴流器之擴張角度以 ANSYS 求得最適設計。

關鍵詞：無閥式微泵浦、擴流器、壓電致動器、濕蝕刻、陽極接合

ABSTRACT

The valve-less micropump actuated by piezoelectric plate is designed and fabricated. The micropump fabrication makes use of Micro-Electro-Mechanical manufacturing process, including the HNA and KOH wet etching. The Pyrex 7740 glass plate is covered on the silicon chip surface with etching structure, and both are bonded by anodic bonding method. The actuator and inlet/outlet tube is assembled to pump body so that the micropump prototype is obtained. The peak-to-peak actuating voltage of about $100V_{pp}$ can result in net pumping flow because of the directing capability of dynamic passive valve, named diffuser. The diffuser is wet etched with half-elliptic cross sections. The ANSYS FEM software is used to simulate the flow characteristics of diffuser.

Keywords : valve-less micropump, diffuser, piezoelectric actuator, wet etching, anodic bonding

一、前言

壓電致動無閥式微泵浦(valve-less micropump)，以擴流器(diffuser)取代進出口閥門，並無實際閥門之開合動作，致動器使微膜片往覆振動造成泵浦腔體(chamber)出入口之壓力差，由於擴流器之反向為噴嘴(nozzle)，利用流體於此兩方向之流阻差異，使泵浦能有單方向之淨流量出現。

在 1997 年之前無閥式微泵浦僅能傳送液體，瑞典學者 Olsson 曾於 1997 發表第一個無閥式氣體微泵浦[1]，以五層極薄銅板疊合製成，針對空氣做測試，在 11kHz 共振頻率下操作，可得 5kPa 之最大氣壓及 8ml/min 之最大氣體流率。

在 2000 年以前有關無閥式微泵浦的設計[2-6]，微膜片較厚且腔體容積較大，操作電壓頻率均不超過 1.5kHz 左右，只能單方向傳送液體，無法壓送氣體所以無自我啟動(self-priming)的功能。Olsson 於 1996 年之研究[4]利用濕蝕刻矽晶片與玻璃陽極疊合(anodic bonding)製成擴流器，其截面由於等向性濕蝕刻(isotropic wet etching)而成半橢圓狀，探討不同流體性質及擴流器幾何對擴流器效率的影響，發現流體動黏滯係數(kinematic viscosity)愈小則愈大，即流體雷諾數愈大則愈大，而且擴流器之擴張角度愈大，其則愈大($6.8^\circ > 4.6^\circ > 1.9^\circ$)、而擴流器長度對影響不大。Jiang 則針對雷諾數大小及擴流器之擴張角度對的影響做理論分析[7]，提出相同尺寸擴流器之不受壓降影響，且發現在低雷諾數範圍($Re < 50$)，大於 1 且隨擴張角度(5° 至 40°)增加而增加；但在高雷諾數範圍($Re > 10^5$)，小於 1 且隨擴張角度(5° 至 40°)增加而減少，因而說明無閥式泵浦可以具有雙向操作的功能。

Olsson 於 2000 年之研究[8]對垂直側壁擴流器的效率進行實驗及數值分析 (ANSYS)，實驗發現 隨擴流器之擴張角度增大而減小($7^\circ > 9.8^\circ > 13^\circ$)，此趨勢與半橢圓截面之等向性蝕刻擴流器正好相反，不過仍須更多數據加以驗證，而垂直側壁擴流器長度對 之影響尚須深入探討，另外關於數值分析結果，在低雷諾數之情況下($Re < 400$)，數值分析與實驗數據有良好之一致性，然而高雷諾數之情況則有偏差產生，但仍不失流體之流動趨勢。另外有關小角度(10°)及大角度(70°)擴流器對 之影響的研究[5,8]，均利用有限元分析軟體 ANSYS 做模擬分析，證明大角度與小角度擴流器都可產生單方向淨流量，但是方向相反。

二、分析與製程

微泵浦可傳送微小流量之流體，其中之止回被動閥乃重要之元件，其使流體單向流動而不回流。無閥式微泵浦之設計重點在致動器、微膜片及擴流器之幾何設計。

本研究利用 ANSYS 有限元模擬，找出適當相關泵浦尺寸，以減少嘗試錯誤之次數，並再用模擬結果以 HNA 濕蝕刻、KOH 濕蝕刻方式將微泵浦的形狀結構製造出來。

ANSYS 有限元模擬分析擴流器尺寸對擴流器效率()之影響，擴流器效率必須大於 1，才有單方向淨流率產生，且效率愈高則產生淨流率愈大，擴流器之設計幾何包括擴張角度、截面尺寸及長度，所以利用數值方法可快速變化尺寸進行分析以求得最適當設計。

製造微泵浦結構製程利用二種濕蝕刻方法，第一種使用 HNA 濕蝕刻液方法，第二種使用 KOH 濕蝕刻液方法，將矽蝕刻成所需要的微結構。有關無閥式微泵浦之設計如圖 1 所示，其製作材料使用 4 吋矽晶圓及型號 Pyrex 7740 之 4 吋康寧玻璃，厚度均為 $500\mu\text{m}$ ，矽晶圓經多道蝕刻後與玻璃陽極接合成微泵浦主體，矽晶圓主要製程包括 LPCVD 長氮化層、HNA 濕蝕刻、KOH 濕蝕刻、陽極接合封裝。

2.1 微泵浦有限元模擬

利用 ANSYS 有限元模擬，分析擴流器尺寸對擴流器效率()之影響，以得到最佳

擴張角度、截面尺寸及長度，所以利用數值方法可快速變化尺寸進行分析，找出適當相關泵浦尺寸，以減少嘗試錯誤之次數，求得最適當設計。

2.1.1 微泵浦原理

利用壓電致動器驅動微膜振動片 (diaphragm) 來漲縮微泵浦腔容體積，及利用設置於腔體出入口之擴流器，來達成驅動流體之目的，主要原理利用擴流器之揚程損失小於噴嘴，或說擴流器流阻較噴嘴小之特性，使流體往擴流器方向流動 (正方向) 而不往噴嘴方向 (逆方向)，如圖 2 所示。圖 2(b) 為汲取狀態，致動器使微膜片往上造成腔體容積增加並產生負壓，由於擴流器流阻較噴嘴小，造成入口吸入流體量大於出口，圖 2(c) 為壓出狀態，出口壓出流體量大於入口，整個過程因而產生單方向之淨流量。

2.1.2 擴流器原理

擴流器示意如圖 3，流體經過其中之揚程損失定義為 $h_d = \xi_d (V_t^2 / 2g)$ ，其中 h_d 及揚程損失係數 ξ_d 可分為入口、過程及出口三部分，即 $h_d = h_{di} + h_{dp} + h_{do}$ ； $\xi_d = \xi_{di} + \xi_{dp} + \xi_{do}$ 。入口揚程損失係數 ξ_{di} 在有圓角入口狀況下會大為降低，在圓角半徑大於 0.2 倍通道寬度時 ξ_{di} 將降至 0.05 以下。至於出口揚程損失係數 ξ_{do} ，由於流體進入之通道截面積遠大於擴流器出口截面積，流體可視為進入淹沒流場，所有速度揚程 ($V_e^2 / 2g$) 因黏性摩擦而損失殆盡，即 $h_{do} = (V_e^2 / 2g)$ ，又 $h_{do} = \xi_{do} (V_t^2 / 2g)$ ，所以 $\xi_{do} = (V_e / V_t)^2$ ，再基於擴流器進出口質量守恆則 $\xi_{do} = (A_t / A_e)^2$ ，若為非等向性蝕刻所產生垂直側壁之方形截面流道，則 $\xi_{do} = (W_t / W_e)^2$ ；若為等向性蝕刻所產生之近似圓形截面流道，則 $\xi_{do} = (W_t / W_e)^4$ 。流體經擴流器內部路徑過程之損失係數 ξ_{dp} ，可由 ANSYS 數值分析所得擴流器壓力恢復係數 C_p 求得，即 $\xi_{dp} = 1 - C_p - \xi_{do}$ ，其中 $C_p = (\Delta P / \rho g) / (V_t^2 / 2g)$ ，即壓力恢復揚程與入口速度揚程之比值。反向經過擴流器之流體即如同流經噴嘴，其揚程損失定義為 $h_n = \xi_n (V_t^2 / 2g)$ ，同樣地，將 h_n 及 ξ_n 分為入口、過程及出口三部分，即 $h_n = h_{ni} + h_{np} + h_{no}$ ； $\xi_n = \xi_{ni} + \xi_{np} + \xi_{no}$ 。其中 $\xi_{ni} + \xi_{np}$ 可由 ANSYS 之分析結果計算而得，至於 ξ_{no} 同於之前擴流

器出口之敘述，流體經噴嘴出口進入淹沒流場，所有速度揚程($V_f^2/2g$)因黏性摩擦而損失殆盡，所以 $\xi_{no}=1$ 。通常定義噴嘴與擴流器之揚程損失係數比為 ξ_n/ξ_d ，亦稱擴流器效率，擴流器效率愈高則產生淨流率愈大。

2.1.3 微泵浦分析方法

微泵浦擴流器之流場分析，於進出口施加固定流體壓力，觀察流體經過擴流器之壓力及速度變化情形，並計算擴流器壓力恢復係數(C_p)及揚程損失係數(ξ_d)隨擴流器擴張角度變化情形；若流體反向經過擴流器即如同通過噴嘴，其過程之揚程損失係數(ξ_n)亦被計算。

2.1.4 數值模型與邊界條件

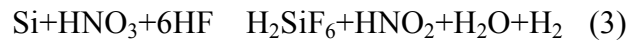
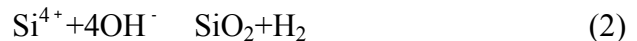
有關二維流場分析之擴流器幾何示意如圖 1 所示，以 ANSYS/Flotran 之 Fluid141 二維元素將分析區域網格化後共 2388 個元素，如圖 4 所示，進出口施加流體壓力負荷，其餘邊界條件均設為零速度。

2.2 微泵浦製程

微泵浦正面製程採用 HNA 濕蝕刻，氫氟酸(Hydrofluoric acid)、硝酸(Nitric acid)及醋酸(Acetic acid)三種溶液混合體積比採用 1:2:1 蝕刻液。微泵浦背面製程採用 KOH 濕蝕刻，氫氧化鉀蝕刻液為 8M 莫耳濃度之溶液，加熱至 70 並攪拌進行蝕刻。

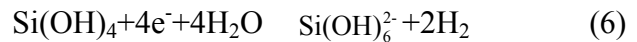
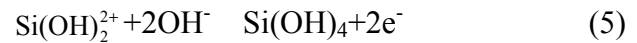
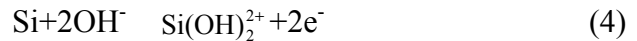
2.2.1 HNA 濕蝕刻

HNA 等向性濕蝕刻溶液早在 1960 年代即有詳細之研究[9-12]，此系統主要由氫氟酸(Hydrofluoric acid)、硝酸(Nitric acid)及醋酸(Acetic acid)三種溶液混合而成，亦有以水代替醋酸，不過水會加速硝酸分解而降低硝酸之氧化能力，所以對於需長時間深蝕刻微結構場合，通常以醋酸當稀釋液為佳。此蝕刻系統中硝酸為氧化劑，會自發反應地提取矽表面之共價電子，造成表面矽之電洞聚集(電洞注入、hole injection)，亦即使矽表面氧化，利用 OH^- 與其反應成二氧化矽，如式(1)及(2)，二氧化矽再與氫氟酸反應成溶於水之 H_2SiF_6 ，其總反應式如式(3)。

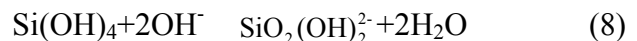
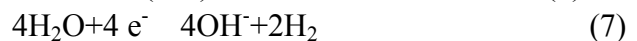
$$HNO_3+H_2O+HNO_2 \rightarrow 2HNO_2+2OH^-+2H^+ \quad (1)$$


2.2.2 KOH 濕蝕刻

KOH 濕蝕刻的主要機制為矽表面水溶液中 OH^- 陰離子使矽氧化成 $Si(OH)_4$ ， $Si(OH)_4$ 再以矽酸鹽型態 $Si(OH)_6^{2-}$ 溶於水中，如反應式(4)至(6)。



反應式(4)及(5)涉及四個電子必須從矽表面被釋放出來，當矽晶片浸至 KOH 溶液，表面原子能隙降低使電子容易提升至導電帶，而被 OH^- 陰離子氧化成 $Si(OH)_4$ ，其中釋放出四個電子進入水溶液中並與水反應成 OH^- 與氫氣，如反應式(7)，其中 OH^- 再用來氧化 Si，而 KOH 強鹼溶液中之 OH^- 大部分未用來進行 Si 之氧化反應[13-14]，而主要用來 $Si(OH)_4$ 之溶解反應，如反應式(8)。



2.2.3 陽極接合封裝

將玻璃與矽晶片清洗，利用硫酸加雙氧水體積比 3:1 來清洗，目的是要增加玻璃和矽晶片的親水性，使兩者接觸能更為緊密，清洗完用氮氣槍吹乾，馬上將玻璃覆蓋在矽晶片上，並放於石墨電極上加熱至實驗溫度，並施加電壓以完成接合。

玻璃-矽接合係利用電場輔助，也稱之為陽極接合(Anodic Bonding)，在低於玻璃的軟化點將玻璃與矽接合的一種方式[15-17]。這二個接合面，其表面粗度必須小於 1 微米，才能使此二個接合面緊密的貼在一起。此欲接合的部份先被組合後，置於電熱板上，從室溫加熱至 400，將直流電源供應器的正極接在矽晶片上，而相對於玻璃則為負極，當施加於玻璃與矽的電壓 500 伏特時，此玻璃與矽界面接合在一起。圖 5 是此實驗設備設置圖。

三、結果與討論

3.1 擴流器流場分析結果

圖 6 所示為固定擴流器之 W_t 及 L (圖 1 定義)條件下，其揚程損失及效率隨擴張角

度變化情形，由效率曲線之變化及流場之觀察，將擴張角度分為四個區間，第一區間為 4 至 12 度之範圍，效率隨角度之增加而增加，其典型速度場如圖 7(a)所示，在其邊界層無分離(separation)及回流(backflow)發生，即所謂之無失速流(no stall)；第二區間為 12 至 16 度之範圍，乃最佳效率發生之區間，其壓力恢復較大，亦即擴流損失低，代表速度場如圖 7(b)所示，可發現流體在下方出口壁面之邊界層有分離產生，且開始產生些微回流；第三區間為 16 至 26 度之範圍，效率大幅下降，由流場之觀察可發現其分離點之發生隨角度之增加而往入口靠近，且邊界層快速增厚，造成流體之黏性損失逐漸增加，此區間即所謂之失速流過渡區(transitory stall)，圖 7(c)所示為角度 20 度之速度場；第四區間為 26 至 40 度之範圍，效率趨於平緩，流體分離點之發生已非常靠近入口而不再往前推進，僅邊界層之增厚，流場中大量之回流在擴流器之兩邊反覆產生，時而在左，時而在右，造成大量黏性損失而導致效率低落，此區間即所謂之雙穩定穩態失速區(bistable steady stall)，圖 7(d)所示為角度 32 度之速度場。

3.2 微泵浦正面 HNA 濕蝕刻製程結果

目前對於微泵浦正面之 HNA 製程，混合蝕刻液採用氫氟酸(Hydrofluoric acid)、硝酸(Nitric acid)及醋酸(Acetic acid)三種溶液混合，體積比採用 1:2:1 蝕刻液，矽晶片約可獲得 $5 \mu\text{m}/\text{min}$ 之蝕刻速率。HNA 以 LPCVD 氮化矽為蝕刻遮罩，氮化矽的蝕刻率約 $300 \text{Å}/\text{min}$ ，所以有 100 以上之選擇比，由於微結構之蝕刻深度甚深，所以使用較厚之氮化矽遮罩層，且必須為低應力之 Si-rich Nitride。以約 6000Å 厚之 LPCVD 低應力 Si-rich Nitride 為遮罩層，進行微泵浦正面之 HNA 濕蝕刻製程如圖 8 所示，RIE 氮化矽時以 AZP4620 光阻當遮罩圖案。正面微結構之 SEM 結果如圖 9、圖 10 所示。

3.3 微泵浦背面之 KOH 製程

微泵浦背面 KOH 濕蝕刻，氫氧化鉀與純水溶液混合體積比採用 1:2，將矽晶片正面結構利用 LPCVD 長 2000Å 氮化層保護，RIE 氮化矽時以 AZP4620 光阻當遮罩圖案，

其遮罩層以 LPCVD Nitride 厚度 6000Å ，進行微泵浦背面之 KOH 濕蝕刻製程及組裝如圖 11 所示。KOH 對於矽晶片約可獲得 $1 \mu\text{m}/\text{min}$ 之蝕刻速率，以 LPCVD 低應力之 Si-rich Nitride 為蝕刻遮罩，KOH 幾乎不蝕刻氮化矽，蝕刻厚度以時間控制，圖 12 為 KOH 背面蝕刻結構圖，圖 13 為 KOH 背面蝕刻矽流道口。

3.4 陽極接合封裝

陽極接合主要用於玻璃-矽接合，接合玻璃選用熱膨脹係數與矽相近及玻璃中鹼金屬離子含量高的，一般選用 Pyrex7740 康寧玻璃，因為 Pyrex7740 康寧玻璃與矽晶片的厚度及熱膨脹係數相近如表 1 所示。

基本上 Pyrex7740 康寧玻璃與矽晶片接合溫度於 $300 - 500$ 及電壓 $300\text{V}-700\text{V}$ 都能產生接合，如圖 14 所示為 Pyrex7740 與矽晶片陽極接合 SEM 照片，而如果有不接合區域則因光的干涉產生牛頓環及氣泡現象如圖 15 所示，可能原因有表面不清潔、氣泡或玻璃中鈉離子已完全解離。牛頓環的產生會導致微泵浦腔體中的流體洩漏，密閉性降低，影響單方向之淨流量。

3.5 微泵浦組裝結果

背面製程及黏結組裝如圖 16 所示，以 Pyrex7740 康寧玻璃與矽晶片陽極接合作為微泵浦流道蓋板如圖 17 所示，利用 LOCTITE 瞬間接著劑黏結毛細管。壓電片利用銀膠黏至矽微膜振動片，至於泵浦流體出入口將以毛細管黏結至矽晶片，再串接矽膠軟管來導引流體，當壓電致動器電極施加約 100V_{pp} 正弦波電壓，即可趨動流體單方向流動，可看到微泵浦出口端之毛細管液面有上升之現象，圖 18 為實際製造的微泵浦。

四、結論與建議

本研究利用 ANSYS 有限元分析提出無閥式微泵浦之擴流器設計最佳化相關數據，並製造出微泵浦雛形。主要結論有下列幾點：

- (1) 擴流器流場邊界層之速度分離造成回流及邊界層增厚，將會使流體黏性損失增加，擴流器效率降低。

- (2)分析結果顯示微泵浦之最佳擴流器效率約發生 12-16 度之擴流器角度，不過尚須實驗證實。
- (3)微泵浦正面之 HNA 製程為非等向性蝕刻，擴流器側壁產生圓弧狀，會影響擴流器效率()。
- (4)微泵浦背面可利用 KOH 蝕刻成振動膜，並黏結壓電致動器於其上。
- (5)陽極接合因表面不清潔、氣泡或玻璃中鈉離子已完全解離而產生不接合區域，因光的干涉有牛頓環及氣泡現象。
- (6)Pyrex7740 康寧玻璃與矽晶片接合溫度於 300 -500 及電壓 300V-700V 都能產生接合。
- (7)本研究提出之製程對 無閥式微泵浦之製作是可行的。

參考文獻

- [1] A. Olsson, G. Stemme and E. Stemme, The first valve-less diffuser gas pump, Proc. 10th Int. Workshop Microelectromechanical Systems (IEEE MEMS '97), Nagoya, Japan, 26-30 Jan., pp.108-113, (1997).
- [2] A. Olsson, G. Stemme and E. Stemme, A valve-less planar pump with two pump chambers, Sensors and Actuators A, 46-47, pp.549-556, (1995).
- [3] A. Olsson, P. Enoksson, G. Stemme and E. Stemme, A valve-less planar pump in silicon, Proc. 8th Int. Conf. Solid-State Sensor and Actuators (IEEE Transducers '95), Stockholm, Sweden, 25-29 June, pp. 291-294, (1995).
- [4] A. Olsson, G. Stemme and E. Stemme, Diffuser-element design investigation for valve-less pumps, Sensors and Actuators A, 57, pp.137-143, (1996).
- [5] A. Olsson, P. Enoksson, G. Stemme and E. Stemme, Simulation studies of diffuser and nozzle elements for valve-less micropumps, Proc. 1997 Int. Conf. Solid-State Sensor and Actuators (IEEE Transducers '97), Chicago, USA, 16-19 June, pp. 1039-1042, (1997).
- [6] A. Olsson, P. Enoksson, G. Stemme and E. Stemme, An improved valve-less pump fabricated using deep reactive ion etching, Proc. 9th Int. Workshop Microelectromechanical Systems (IEEE MEMS '96), San Diego, USA, Jan., pp.479-484, (1996).
- [7] X. N. Jiang, Z. Y. Zhou, X. Y. Huang, Y. Li, Y. Yang and C. Y. Liu, Micronozzle/diffuser flow and its application in micro valveless pumps, Sensors and Actuators A, 70, pp.81-87, (1998).
- [8] A. Olsson, G. Stemme and E. Stemme, Numerical and experimental studies of flat-walled diffuser elements for valve-less micropumps, Sensors and Actuators A, 84, pp.165-175, (2000).
- [9] H.Robbins and B.Schwartz, "Chemical Etching of Silicon-I. The System, HF, HNO₃ and H₂O", J. Electrochem. Soc. 106, 505-508, (1959).
- [10] H.Robbins and B.Schwartz, "Chemical Etching of Silicon-II. The System, HF, HNO₃, H₂O and HC₂C₃O₂", J. Electrochem. Soc. 107, 108-111, (1960).
- [11] B.Schwartz and H.Robbins, "Chemical Etching of Silicon-III. A Temperature Study in the Acid System", J. Electrochem. Soc. 108, 365-372, (1961).
- [12] B.Schwartz and H.Robbins, "Chemical Etching of Silicon-IV. Etching Technology", J. Electrochem. Soc. 123, 1903-1909, (1976).
- [13] H.Seidel, L.Csepregi, A.Heuberger and H.Baumgartel, "Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solution-Part II. Influence of Dopants", J. Electrochem. Soc., 137, 3626-3632, (1990).
- [14] H.Seidel, L.Csepregi, A.Heuberger and H.Baumgartel, "Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solution-Part I. Orientation Dependence and Behavior of Passivation Layers", J. Electrochem. Soc., 137, 3612-3626, (1990).
- [15] D.E. Carlson, K.W. Hang, and G.F. Stockdale, Ion Depletion of Glass at a Blocking Anode: II, Properties of Ion-Depleted Glass, J. Amer. Ceram. Soc., Vol. 57, No. 7, pp 295-300 July, (1974).
- [16] Y.C. Lin: Ph.D. Dissertation, University of Illinois at Chicago, (1996).
- [17] S.M. Sze: Semiconductor Sensors, New York, John Wiley & Sons, Inc., (1994).

表 1. Pyrex7740 及矽晶片厚度及熱膨脹係數

材料	厚度(μm)	熱膨脹係數
Pyrex7740	500±25	3.25×10 ⁻⁷ /
矽晶片	500±25	3.09×10 ⁻⁷ /

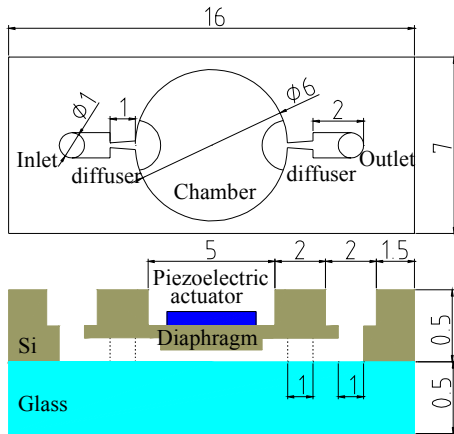


圖 1. 無閥式微泵浦設計圖 (單位：mm)

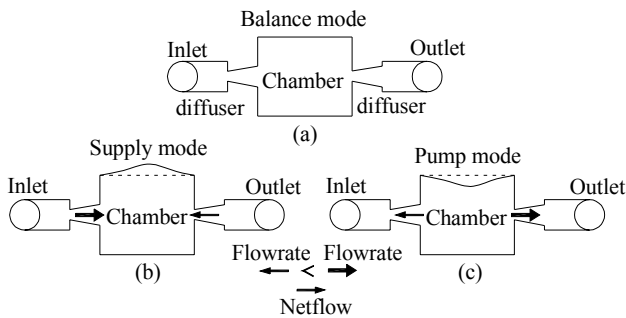


圖 2. 無閥式微泵浦工作原理示意圖

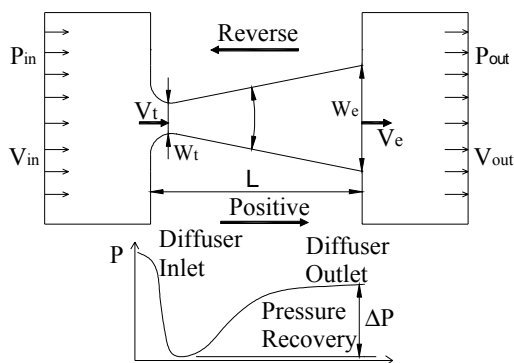


圖 3. 擴流器示意及相關符號

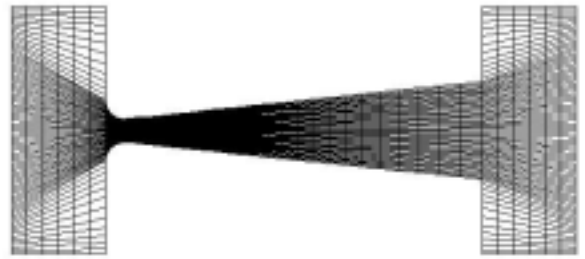


圖 4. 擴流器之流場分析網格

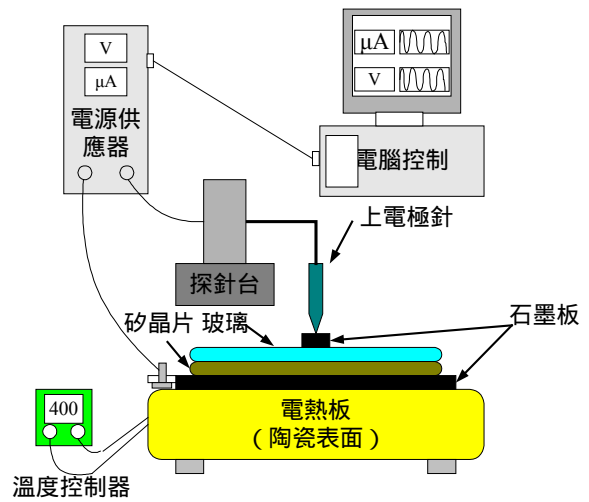


圖 5. 陽極接合實驗設備裝置圖

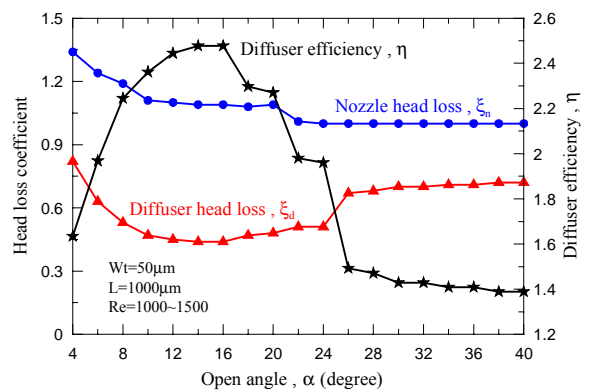


圖 6. 擴流器角度對損失係數及效率之影響

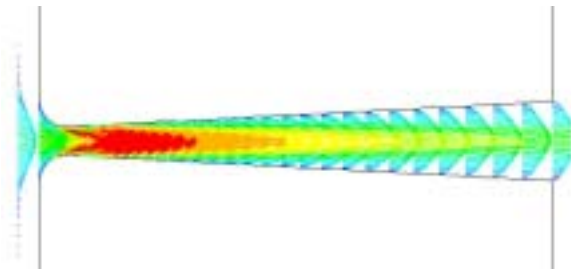


圖 7(a). $\alpha=6^\circ$ 之擴流器速度場分佈圖

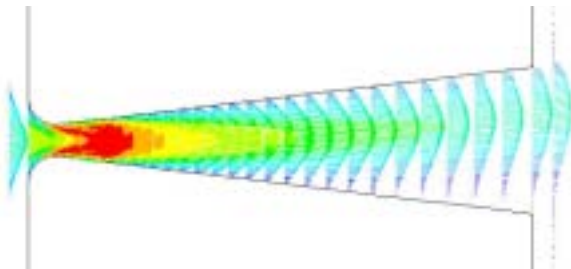


圖 7(b). $\alpha=14^\circ$ 之擴流器速度場分佈圖

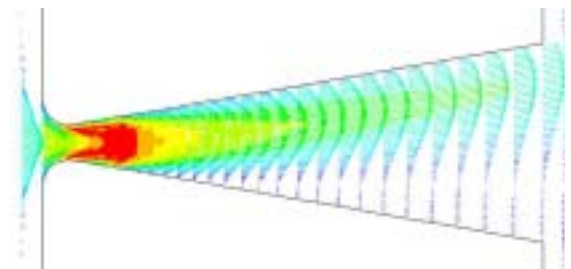


圖 7(c). $\alpha=20^\circ$ 之擴流器速度場分佈圖

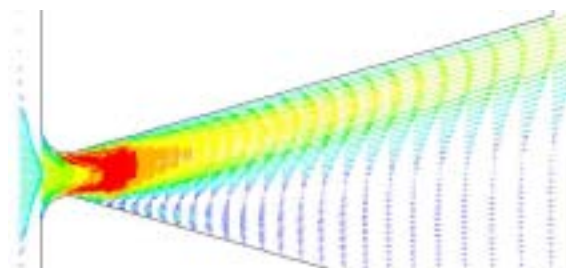


圖 7(d). $\alpha=32^\circ$ 之擴流器速度場分佈圖

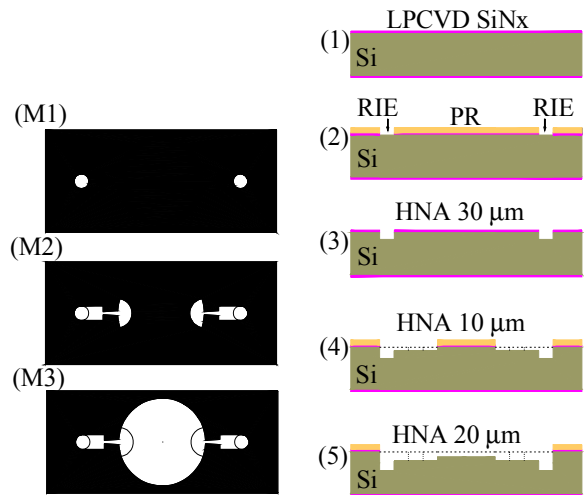


圖 8. 微泵浦正面之 HNA 製程

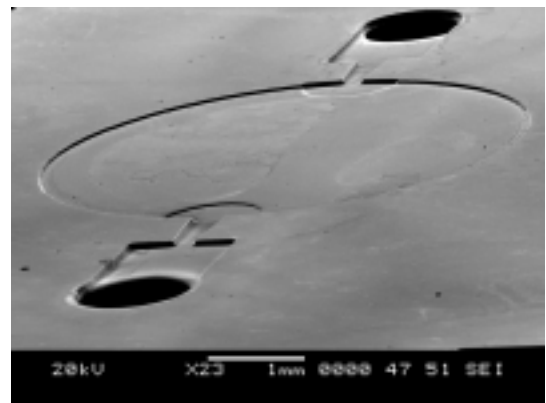


圖 9. 微泵浦正面微結構之 SEM 照片(HNA)

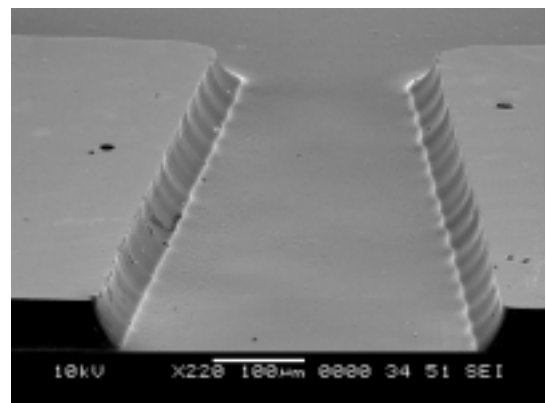


圖 10. 微泵浦擴流器之 SEM 照片(HNA)

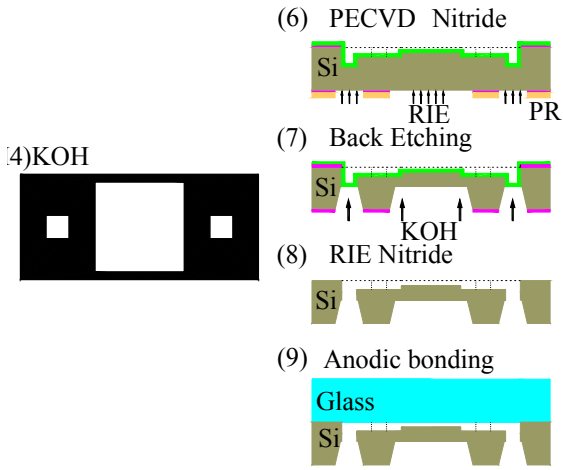


圖 11. 微泵浦之背面之 KOH 製程

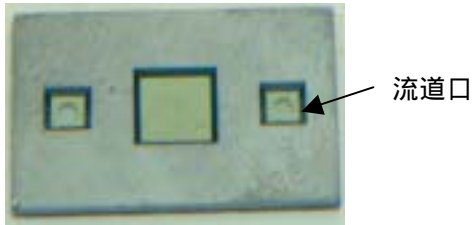


圖 12. 背面蝕刻結構圖(KOH)

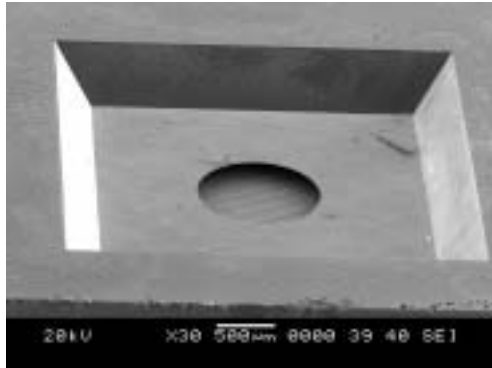


圖 13. 蝕刻矽流道口 SEM 照片(KOH)

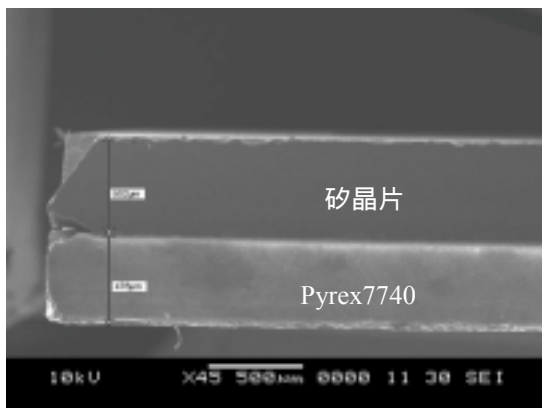


圖 14. Pyrex7740 與矽晶片陽極接合 SEM 照片

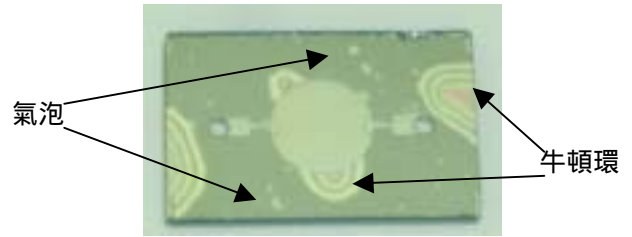


圖 15. 接合區域牛頓環及氣泡

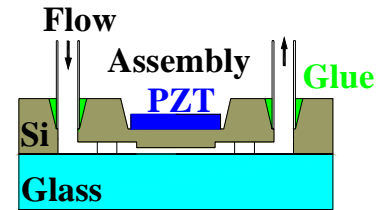


圖 16. 微泵浦黏結組裝示意圖

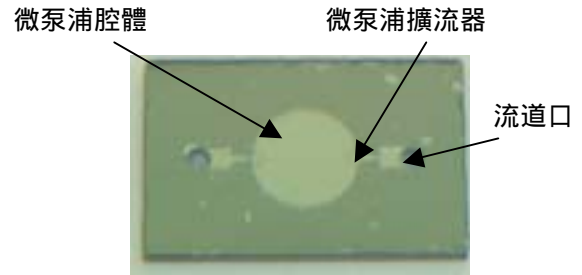


圖 17. 微泵浦正面 Pyrex7740 與矽晶片陽極接合

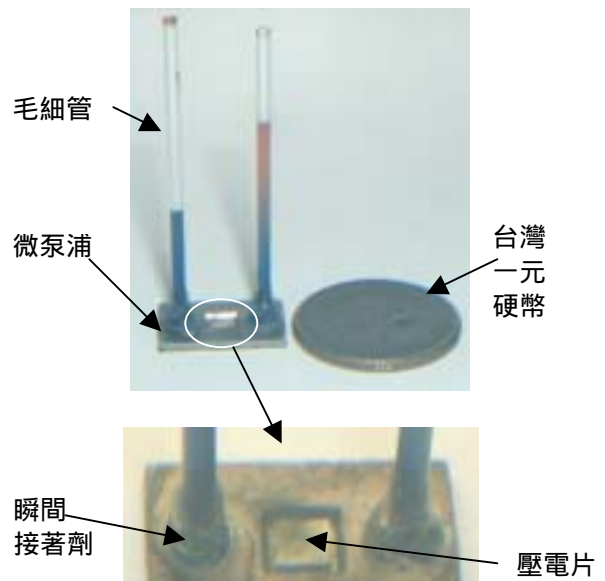


圖 18. 為實際製造的微泵浦

【計畫成果自評】

本計畫最主要目標是壓電致動無閥式微泵浦之可行性研究，在本年度完成無閥式微泵浦之設計與雛形製作，涉及專利申請之技術內容將一併於 92 年國科會之延續計畫 (NSC-92-2212-E-018-001) 中報告，以下為本年度之相關發表著作：

1. 陳世昌、邱國麟、林義成、鄭江河，壓電致動無閥式微泵浦之有限元分析，ANSYS2002 論文發表會，墾丁，民國 91 年 11 月，pp.301-306
2. 陳世昌、鄭江河、邱國麟、林義成，壓電致動無閥式微泵浦之分析與製作，第三屆精密機械製造研討會論文集，高雄國立中山大學，民國 92 年 11 月