

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

智慧型微型冷卻系統之感測與驅動技術開發(II)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-032-004-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：淡江大學機械與機電工程學系

計畫主持人：楊龍杰

計畫參與人員：張志成, 侯舜中, 林宏樺, 何仁揚, 許竣為, 楊伯強

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫涉及專利或其他智慧財產權，1年後可公開查詢

中 華 民 國 93 年 10 月 13 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

「智慧型微冷卻系統之感測與驅動技術開發(II)」

The techniques of sensors and actuators embedded in the smart micro-cooling system

計劃編號：NSC-92-2212-E-032-004

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

主持人：楊龍杰

碩士班研究助理：張志成、侯舜中、林宏樺、何仁揚、許竣為、楊伯強

執行機構：淡江大學機械與機電工程學系

E-mail: Ljyang@mail.tku.edu.tw

一、中英文摘要

本計劃擬利用三年期間，開發智慧型微冷卻系統(smart cooling system)之感測(sensing)與驅動(actuating)所需之製程技術，除了淡江大學既有的矽質體型微細加工(silicon bulk micromachining)、晶片鍵合(wafer bonding)技術，以及製作微感測器與驅動器之外，另行開發非矽質(non-silicon based)低溫面型加工技術，以進行微流道進出口系統等微結構之後加工製作。第二年的工作內涵包括：「壓力測試機台之研製」、「新型壓力感測晶片封裝」、「壓力感測陣列之微流道現地壓力量測」、「CMOS 壓力感測陣列之設計製作」、「低毒性明膠之微成型法」與「電液體驅動幫浦之製程改善」等。

關鍵字：壓力測試、現地量測、明膠、電液體驅動幫浦。

Abstract

This 3-year project develops a combined fabrication technique of the mature silicon bulk micro-machining and the newly developed, low temperature surface micromachining to make the "smart" micro-cooling system chip. Such the-state-of-art processing technique and the corresponding testing facility can provide a common experiment platform for implementing various applicable microfluidic systems including channels, chambers, reservoirs, actuating pumps.

Keywords: pressure testing, on-site measurement, gelatin, electro-hydro-dynamic (EHD) pump

二、計畫目標

淡江大學微機電研究群有鑑於現地量測技術(on-site measurement)已成為目前微熱流系統的必備要件，加上已過三年的整合計畫已有此方面之發展基礎，決定將微壓力、溫度感測器，以及電動流體驅動(EHD)幫浦，埋入所有的微管路中，配合後續控制技術，成為「智慧型微冷卻系統」。此地「智慧型」的定義包括「溫度壓力可現地量測」以及「流速可量度，可回授調整」。為達到上述「智慧型」微冷卻系統的目標，本計畫在前二年原來已發展以下工作項目：

[第一年][已於 NSC-91-2218-E-032-002 計畫執行完畢]

- (1) 光阻犧牲層配合聚對二甲苯結構層低溫製程之開發。
- (2) 光阻犧牲層配合明膠結構層低溫製程之開發。
- (3) 光纖玻璃犧牲層配合 SU-8 結構層低溫製程之開發。
- (4) 傳統體型加工之共用壓力感測陣列晶片之設計製作。

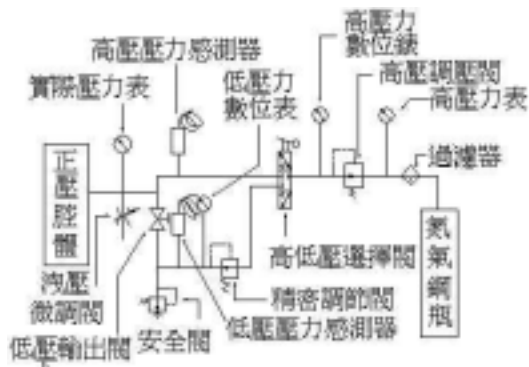
[第二年]

- (1) 傳統體型加工壓力感測陣列晶片之壓力測試。
- (2) CMOS 共用壓力感測陣列晶片之設計製作。
- (3) EHD 幫浦設計、製作、測試。
- (4) EHD 幫浦模擬與回授控制。

第一年 NSC-91-2218-E-032-002 計畫成果報告，已記載原先規劃之第一年第(1)~(3)部分以及第二年之第(3)部分成果。本第二年計畫，因應第二年第(1)部分之壓力測試工作，首先開發完畢「壓力測試機台」；針對第一年尚未完成之第(4)部分以及第二年第(2)部分，開發「新型壓力感測晶片的 PDMS 封裝」、「壓力感測陣列之微流道現地壓力量測」、以及「CMOS 壓力感測陣列之設計製作」；另外本報告亦連帶記載「電液體驅動幫浦之製程改善」等成果。

三、工作項目與成果

(一)壓力測試機台之研製



圖一、壓力測試平台之系統規畫。



圖二 組裝完畢之壓力測試機台。

本研究研製的壓力測試機台，如圖 1 與圖 2 所示，提供 0-300psi 的壓力，0-100 度 C 的溫度環境，以及 30 公分直徑、15 公分高度的測試空間，提供微型壓力計的晶圓測試使用。利用密封良好的群集式電流導入方式，對內提供工作偏壓，對外傳輸電訊號；並由外接之數據擷取器與電腦設備，進行大量壓力、溫度、與微感測器輸出訊號之記錄與儲存[1]。

(二)新型壓力感測晶片的 PDMS 封裝

常用的壓力腔體封裝方式有二：一是利用陽極接合(anodic bonding)方式以#7740 玻璃進行封裝[2]，另一則是以低熔點玻璃作為矽與矽間的黏著層[3]；以上兩種接合方式動輒溫度都高達 400-500 ，如此高的溫度容易產生殘留熱應力。

矽膠(PDMS ; polymethylsiloxane)具有以下特性：經過氧氣電漿處理後，具親水性的表面，可與矽、玻璃、氮化矽與氧化矽等表面，接合良好[4]。本研究利用 PDMS 此特性，嘗試取代#7740 玻璃，與體型微加工後的矽晶片進行室溫封裝接合，完成新型 PDMS 封裝的壓力感測器製作。封裝流程如圖 3 所示。成品的晶圓與晶粒參見圖 4 與圖 5。

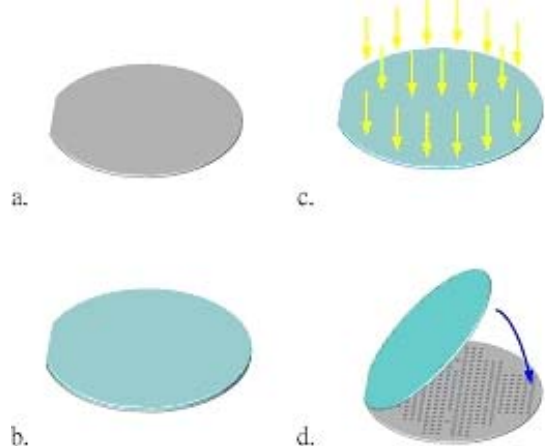


圖 3. PDMS 封裝製程流程：a. 底板晶圓清潔；b. 旋轉塗佈 PDMS，並烘乾成膜；c. PDMS 脫膜，並以氧氣電漿進行親水處理；d. 與壓力計矽晶片進行室溫接合。

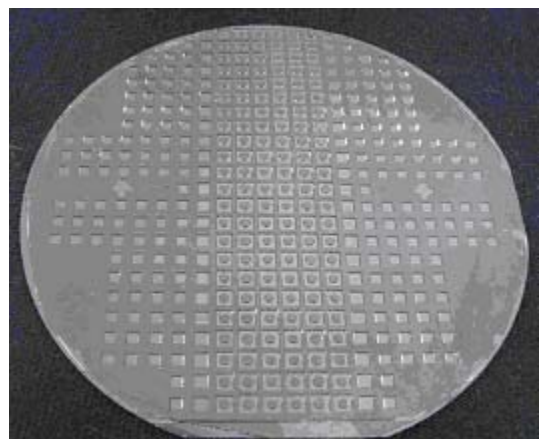


圖 4. 四吋壓力計晶圓與 PDMS 膜片封裝結合。

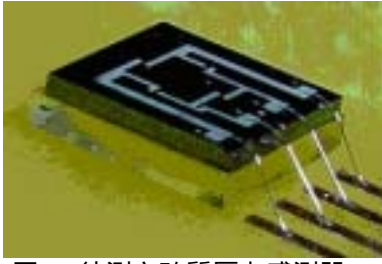


圖 5. 待測之矽質壓力感測器。

為驗證本新型 PDMS 封裝之可行性，將圖 5 之壓力感測器放入圖 2 的壓力測試機台進行實測。外加壓力負載由 0 psi 升至 300 psi，再由 300 降至 0 psi；增壓或減壓皆儘量合緩，確保壓力腔體內部之溫度不至變化過大。整體實驗環境溫度為 21~25，輸出電壓經數據擷取器以每隔 500 μ s 的時間間隔動態記錄，每兩千點取其方均根。圖 6 即是壓力計輸出電壓曲線圖。

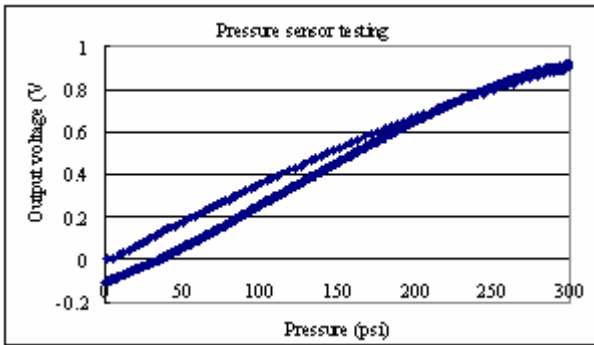


圖 6. 壓力計輸出曲線。

表 1 是新型 PDMS 封裝方式壓力計與陽極鍵合封裝之商用矽質胎壓計比較之結果。除了遲滯的原因尚未釐清之外，有關新型壓力計的輸出特性，初步看來並不遜於 #7740 玻璃封裝的壓力計，且其製程快速、成本低廉，相信可以當作傳統壓力計封裝製程外的另一選擇。

表 1. 新型封裝壓力計與商用壓力計之比較(5V 偏壓，最大測試壓力 100 psi)

實驗元件	商用壓力計	新型封裝壓力計
最大壓力範圍	$\times 2$ rated pressure	$\times 3$ rated pressure
輸出電壓範圍	160~220mV	350mV
壓電阻阻值	4.5 ± 0.9 k Ω	0.8k Ω
線性度	$\pm 0.5\%$ span	0.49% span
遲滯	$\pm 0.3\%$ span	1.3% span

(三)壓力感測陣列之微流道現地壓力量測[5]

本部份研究係揭示一種新的微流道現地壓力量測技術，將成熟的體型微細加工感測器，以及 PDMS 的微流道製作，利用 PDMS 與矽質基板室溫接合良好的特性，來製作兼具高設計彈性、低製作成本的新式微流道現地壓力量測平台，如圖 6 所示。

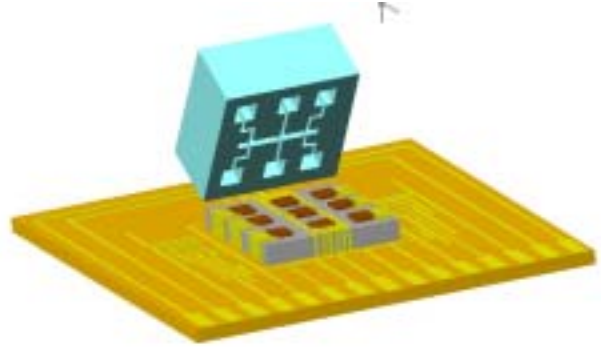


圖 6. 壓力感測陣列晶片應用於微流道現地壓力量測之示意圖。

圖 7 即是成熟的體型微細加工技術完成之 3 \times 3 壓力感測陣列晶片，尺寸為 1.2cm \times 1.2cm。每一枚壓力感測器皆具有四只壓電阻，且連接成 Wheatstone 電橋，但為了現地量測之封裝方便起見，所有對外之金屬接點(bonding pad)，皆安置在晶片邊緣。另外壓力感測陣列晶片上所有的九枚壓力感測器，都需要事先個別紀錄輸出電壓對應外加壓力之關係曲線，如圖 8 所示，以便未來進行實地的壓力監控時，由個別感測器的輸出電壓，除以個別的靈敏度(sensitivity)，即可得知局部之壓力值。



圖 7. 已加工完畢之 3 \times 3 壓力感測陣列晶片(總尺寸 12mm 見方)。每一枚壓力感測器皆具有四只壓電阻連接而成之 Wheatstone 電橋。

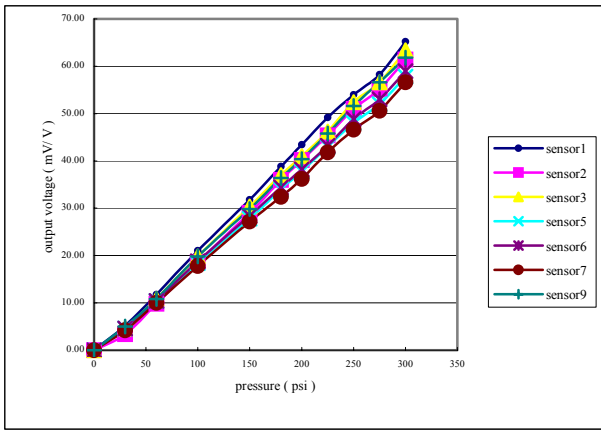


圖 8. 壓力感測陣列晶片上九枚壓力感測器之輸出電壓對應壓力之校正曲線。

圖 7 之壓力感測陣列晶片上，最後得乘載 PDMS 的微流體渠道，該渠道要事先定義出包括主要微流道、壓力感測器空腔、連絡引道、以及進出口等流道微結構。一個應用於本研究的長直微流道及其相關微結構的佈局，如圖 9 所示。上下 6 個方塊代表各個壓力感測器的空腔，各備有引道連接到中央微流道；中央微流道之寬度為 200 微米，全長 5000 微米。6 支連接主流道的引道，在接口觸的尺寸設計為 10 微米，一則對於 SU-8 與 PDMS 的成形技術而言，完全沒有加工上的困難；二則尺寸不會過大，影響主流道的流況；三則尺寸不會小到接近工作流體的平均自由路徑(mean free path；此地空氣常態為 60 奈米)，而無法真實傳輸出主流道的壓力訊息到微感測器上。

本技術最為便利實惠之處，在於利用同一種壓力感測陣列晶片設計(微感測器的製作成本較為昂貴)，每當應付不同的微流道系統，只需改變 PDMS 的流道佈局(成本遠為低廉)，佐以簡單的 PDMS 晶片接合，即可進行一種新的微流道系統現地壓力監控。本技術預期將大大降低微感測器量測技術之進入障礙，對於微流體系統的研究與進展將有所裨益。

根據圖 10 的組裝程序，所完成之微流道實驗系統晶片，如圖 11 所示。圖 12 則為長直微流道的壓力隨位置變化的實驗值(本微流道實驗系統晶片數據)與理論值(Hagen-Poiseuille 定律)之比較。該長直微流道之水利直徑為 $58\mu\text{m}$ ；實驗的體積流率為

6ml/min ，工作流體為空氣。由於水利直徑仍不夠微小，基本上本研究的實驗數據，仍在傳統流體力學理論預測的範圍。我們預期若持續降低微流道的尺寸，會出現非線性的壓力分佈(或非定值之壓力梯度)現象[6]。

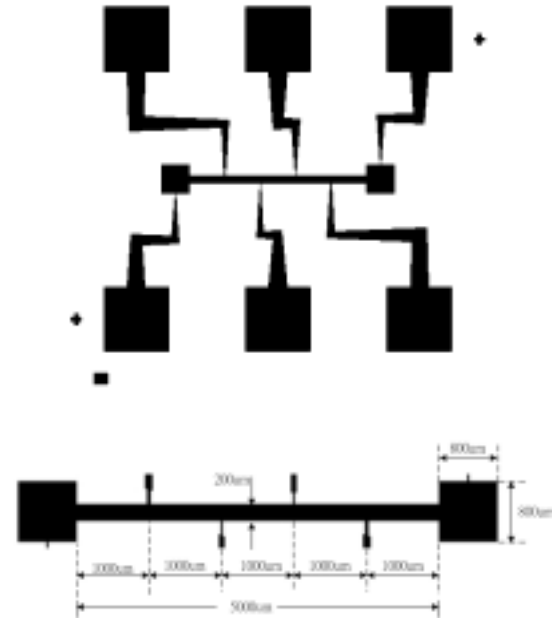


圖 9. SU-8 微流道凸模圖樣: (a)中央具有長直微流道之佈局，上下 6 方塊代表壓力感測器的空腔，各備有引道連接到中央微流道; (b)中央微流道之詳細尺寸。

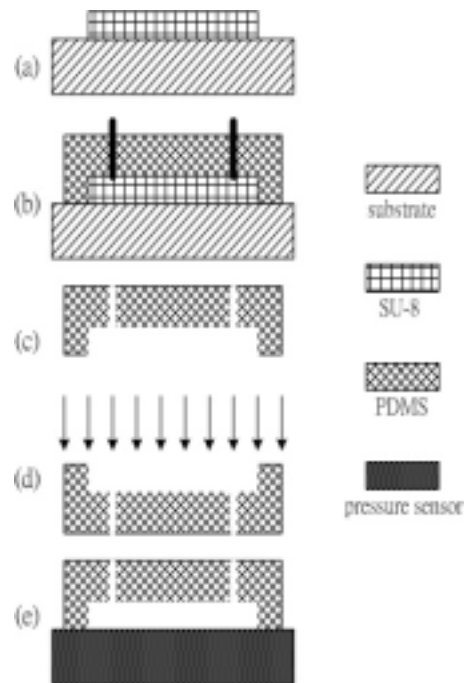


圖 10. 微流道實驗系統晶片之組裝: (a)在一矽晶片上成型 SU-8 微流道凸模; (b)塗佈 PDMS 在 SU-8 凸模上，並定義進出口位置; (c)將 PDMS 微流道自 SU-8 晶片上脫模; (d) 利用 O_2 電漿氧化 PDMS 表面; (e)室溫接合 PDMS 微流道與壓力感測陣列晶片。



圖 11. 完成組裝之微流道實驗系統晶片。

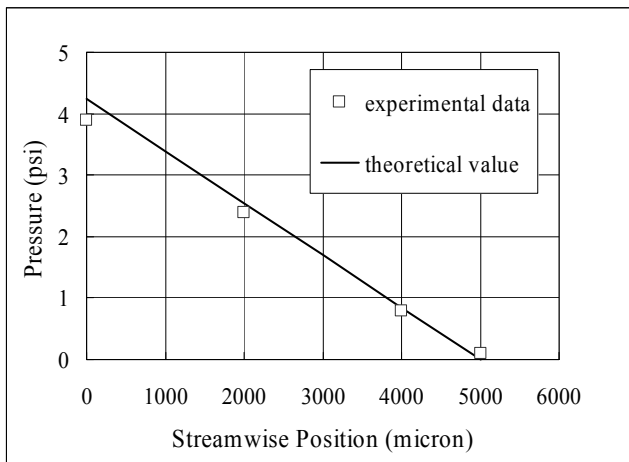


圖 12. 長直流道的壓力隨位置變化的實驗值(本微流道實驗系統晶片數據)與理論值 (Hagen-Poiseuille 定律) 之比較。該長直流道之水利直徑為 $58\mu\text{m}$ ；實驗的體積流率為 $6\text{ml}/\text{min}$ ，工作流體為空氣。

(四)CMOS 壓力感測陣列之設計製作

本研究利用台積電公司 (TSMC) 之 CMOS $0.35\mu\text{m}$ 2P4M 標準製程，設計製作一 50 微米尺寸的壓阻式壓力感測器。利用面型微加工技術的犧牲層概念，將標準 CMOS 製程的金屬當作犧牲層進行後加工，以晶片正面蝕刻的方式，獲得感測器的薄膜結構。圖 13 為 CMOS 晶片後加工的示意圖。圖 13-a 為清潔晶片。圖 13-b 則是調配適當的蝕刻來進行金屬犧牲層之清除，懸空薄膜之大部分面積，並露出矽基板。圖 13-c 則使用 TMAH [7]來進行非等向性濕式蝕刻，在矽晶正面 CMOS 底層蝕出倒金字塔型凹槽，不僅當作壓力感測器薄膜向下伸張形變的空間，更將薄膜的多晶矽壓電阻部位徹底懸空。

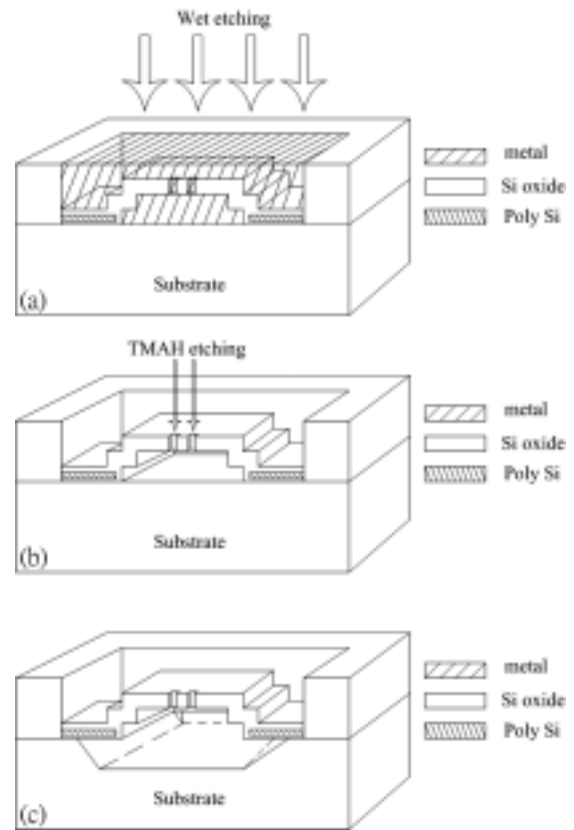


圖 13. CMOS 晶片後加工的示意圖。

有關佈局的設計，根據 CMOS 的佈局規則 (design rule) 與有限元素分析軟體 ANSYS 之模擬分析進行。由 ANSYS 應力分析，可知薄膜受壓後應力值 x 與 y 之分佈，如圖 14 所示。在佈局圖中適當地定義金屬犧牲層與多晶矽壓電阻的位置，如圖 15~圖 16 所示。

在圖 15 CMOS 壓力計晶片之剖面示意圖中，選用四層金屬層 (metal) 與三層灌孔層 (via)、一層接觸層 (contact) 當作犧牲層；夾層其間的氧化層當作薄膜結構；多晶矽層 (poly) 則作為壓電阻的材料。犧牲層係用以懸空壓力薄膜而設計的，須以後加工處理 (濕式蝕刻) 得之。圖 16 為藉由積體電路設計軟體 Cadence 進行佈局和驗證，所完成的壓阻式壓力感測器之佈局圖。圖 17 為完成標準 CMOS 製程後的晶片。

蝕刻金屬犧牲層使用的蝕刻液，須具有選擇性 (只腐蝕金屬，而不傷害單晶矽、氧化矽、氮化矽的蝕刻液，例如：磷酸、硝酸、醋酸、去離子水等四種成分所調成的溶液 [8][9])。蝕刻單晶矽基板，則採用不傷害金屬

接點(pad)之非等向性蝕刻液，如 TMAH。

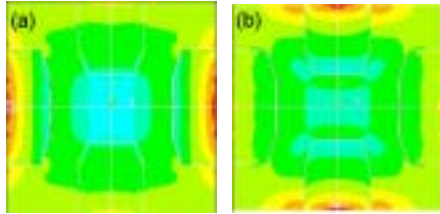


圖 14.以 ANSYS 對薄膜做受負載分析:(a) 紅色區塊為薄膜在 X 軸向應力集中之位置;(b) 紅色區塊為薄膜在 Y 軸向應力集中之位置。

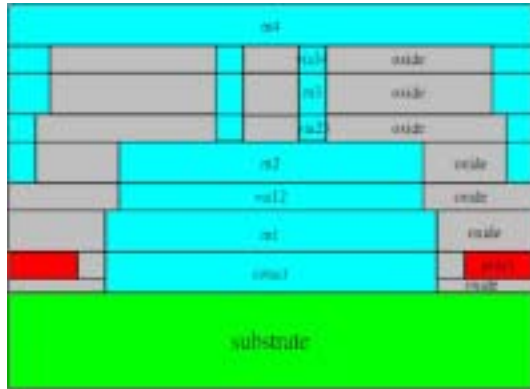


圖 15. CMOS 壓力計晶片之剖面示意圖。

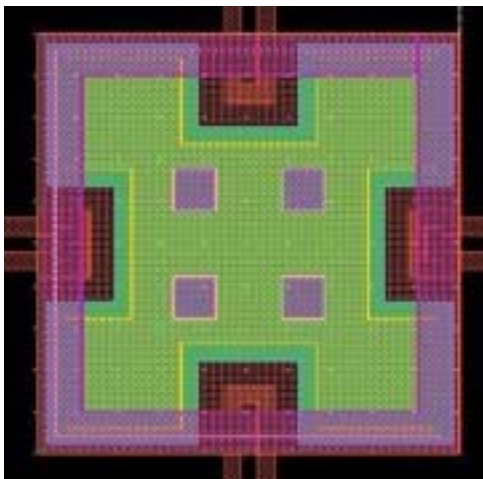


圖 16. CMOS 壓力計晶片之佈局圖。

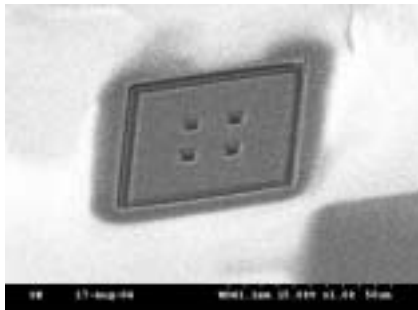


圖 17. CMOS 壓力計晶片之 SEM 圖片。

在封裝的部份，在後加工之後，續以聚亞醯胺 (polyimide) [10]、聚對二甲苯

(parylene) [11]、及明膠 (gelatin) [12]等三種材料，來填塞薄膜上的蝕刻孔洞。

50 微米尺寸的壓力感測器或陣列，將可進一步整合在微流體系統(microfluidics)當中，提供微流道中的現地(on-site)壓力量測之新銳功能。

(五)電液體驅動幫浦之製程改善

本計畫在第一年使用氧化銻錫 (ITO) 當作電極材料來解決幫浦的老化問題，實驗結果顯示，直流電壓為 61 伏時，酒精可達到 365 nl/min 的體積流速，然而其晶片是採高溫 (400 -550)的陽極鍵合方式來封裝，如此的高溫可能會影響驅動電極的穩定性，因此無論是鉻/金或是 ITO 電極皆只能維持 20 分鐘左右的工作時間。本研究改以載玻片玻璃為基材，在其上利用電子槍蒸鍍機鍍著鉻/金電極，並利用光蝕微影技術將鉻/金電極形成梳狀電極。接著分別鍍著高分子材料 parylene 與明膠，最後再將要裸露在流道中的電極開洞即完成電極玻璃晶片之製作，其中 parylene 是以光阻為阻擋層並利用氧氣電漿來開洞，而明膠則是加入重鉻酸鉀後會有負光阻之特性，利用紫外光曝光後即交聯，未交聯部份則溫水顯影(溫度為 60)。微流道部分則是利用 PDMS 翻模技術來製作，以 SU-8 當作母模，再將 PDMS 的 A 劑與 B 劑以 10 : 1 的比例混合攪拌後，倒在 SU-8 母模上，並放置到真空烤箱中，加熱至 120 ， 20 分鐘使其硬化，隨後取出且將 PDMS 與 SU-8 流道模仁分離，便完成微流道製作。最後利用電漿清潔機(plasma cleaner；一般的 RIE 亦可)，將製作完成的 PDMS 微流道做表面氧化動作，使其表面產生親水基，再與電極晶片接合，並將電極接點(pad)焊上電線，即完成整個 EHD 幫浦之製作，圖 18 為微流道與電極晶片接合示意，圖 19 則為整個 EHD 幫浦實體，圖 20 則為微幫浦操作示意。

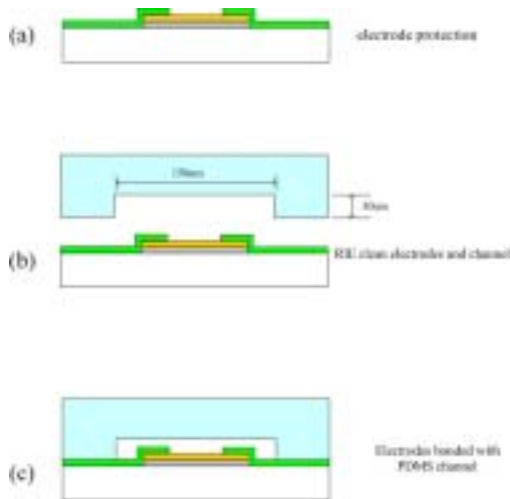


圖 18. 微流道與電極晶片接合示意圖。

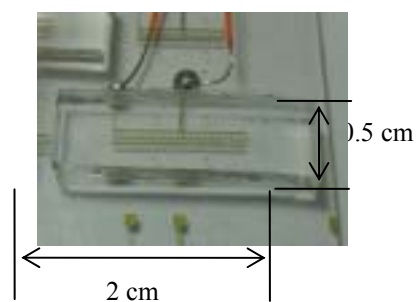
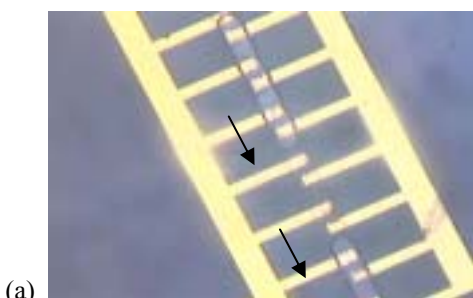
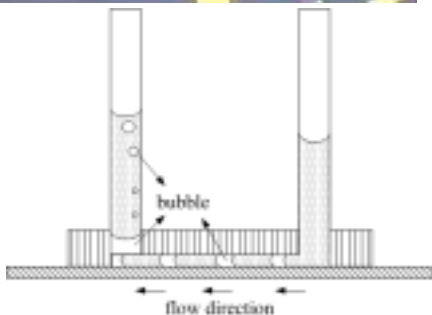


圖 19. 製作完成之 EHD 微幫浦。



(a)



(b)

圖 20. EHD 幫浦操作示意圖：(a)驅動過程中截取之影像；(b)流速量測示意圖。

測試實驗分為無高分子保護層、parylene 保護層與交聯之明膠保護層三種，其電壓與流速之關係如圖 21 所示。圖 21 顯示流速與電壓成二次方之關係，與(3)式相符。此外由

圖中亦可觀察到無高分子保護層的幫浦，隨驅動電壓增加時其流速上升較為穩定，但以高分子保護層之幫浦，流速隨電壓上升卻呈不穩定狀態，會有較明顯之高低變化情形。

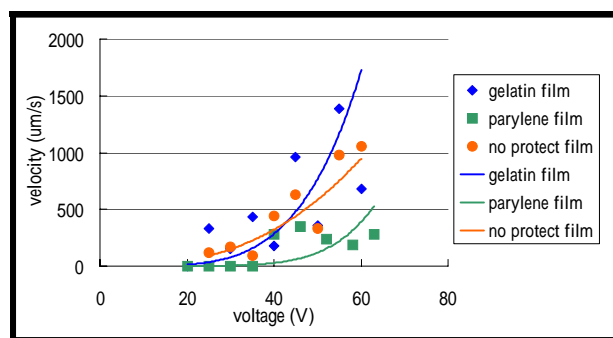


圖 21. 不同高分子保護層之 EHD 幫浦其電壓與流速之關係圖。

另外由於微流道材質皆改為 PDMS，故流道內的親疏水性對流速影響頗大：同樣以 40 伏進行驅動：無高分子保護層之幫浦，其流速約為 450 um/sec；而以 parylene 為保護層之幫浦，其流速為 285 um/sec；至於以交聯之明膠保護層之幫浦流速只有 200 um/sec。此因純粹黃金表面的疏水性較強，parylene 則偏弱疏水性，而明膠為親水性，其表面接觸角如表 2 所示。

表 2. 不同高分子材質之表面接觸角：

Surface	PDMS	parylene	gelatin
接觸角	108° (經過氧氣電漿改質後為 30°)	80°-95°	60°

本研究目的在於製作出一個長時間運作效率良好、成本低廉和製程簡單的微 EHD 幫浦。承襲文獻[13]的 EHD 幫浦構型下，本研究將梳狀電極的材質全改為金質，並將電極邊緣易氧化的區域用高分子薄膜加以保護，而微流道則改利用 SU-8 製作模仁和 PDMS 翻模技術來製作。另外高分子薄膜材質親疏水性，對流速之影響頗大，且初步判斷：乙醇隨氣泡依電場方向前進的模式，可能偏好疏水性表面。

計畫自評與結論

本年度計畫的研究成果，經投稿國內外期刊與會議，總計發表在 SCI 國際期刊 2 篇

[13-14]、國際(IEEE MEMS 2004 與 ICEE APCOT 2004)會議論文 4 篇[5,15-17] 國內會議論文 6 篇[18-23]，主持人並藉由本計畫之資助，完成三位碩士研究生碩士學位論文之指導[1, 24-25]。

在實質的微機電製程技術方面，本年度建立了 PDMS 的製程技術能量，以及相關的製程資料庫。以上成果將有利於加速本三年期「智慧型微冷卻系統」計畫之往前推展。

感謝詞

感謝台大奈米機電系統研究中心、交通大學半導體中心、宇照公司、工研院電子所微系統實驗室、國家晶片設計中心與淡江大學儀器暨實驗中心，提供半導體製程/量測機台的服務或代工；同時感謝淡江大學工學院與玉山奈米機電公司提供部分的經費補助。

參考文獻

- [1] 張志成，”微機電感測元件之可調壓調溫測試系統研製”，淡江大學機電工程學系碩士論文，民國 93 年 6 月。
- [2] K.S. Henriksen, G.U. Jensen et al., “Sodium contamination in integrated MEMS packaged by anodic bonding”, Proc. IEEE MEMS’2003, pp. 626-629.
- [3] C. Hiescu, J. Miao and F.E.H. Tay, “Low cost wafer level packaging of MEMS devices [piezoresistive pressure sensor example]”, Proc. EPTC2003 Conference, pp. 287-290.
- [4] D. Armani, C. Liu and N. Aluru, “Re-configurable fluid circuits by PDMS elastomer micromachining”, Proc. IEEE MEMS’1999, pp. 222-227.
- [5] Hsin-Hsiung Wang, Po-Chiang Yang and Lung-Jieh Yang, “Pressure-sensor array used as an experiment platform for microfluidics”, APCOT MNT 2004, Jul. 4-8, 2004, Sapporo, Japan, pp. 362-367.
- [6] J.Q. Liu, Y.C. Tai, K.C. Pong and C.M. Ho, “Micro-machined channel/ pressure sensor systems for micro flow studies”, Proc. of Transducer’93, pp.995-997.
- [7] Osamu Tabata, “Anisotropic etching of Si in TMAH solutions”, *Sensors and Materials*, Vol. 13, No. 5, pp. 271-273, 2001.
- [8] 施敏原著，黃調元譯，半導體元件物理製作技術(第二版)，第 12 章，pp.645 (民 91)。
- [9] <http://www.ee.byu.edu/cleanroom/chemical.html>
- [10] C. T. Peng, C. C. Lee and K. N. Chiang, “A novel silicon base piezoresistive pressure sensor using front side etching process,” 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, D.C., USA, Nov., pp. 17-22, 2003.
- [11] 戴霆樞，利用聚對二甲苯微機電技術製作微感測

- 器與微制動器，淡江大學機電工程學系碩士論文，民國 92 年六月。
- [12] L.J. Yang et al., “Photo-patternable gelatin as the materials for the low temperature surface micromachinings,” *Sensors and Actuators A: Physical*, v.103, n.1-2, pp.284-290, 2003.
- [13] Lung-Jieh Yang, Jiun-Min Wang and Yu-Lin Huang, “The micro ion drag pump using ITO electrodes to resist aging,” *Sensors and Actuators A: Physical*, v.111, n.1, pp.118-122, 2004.
- [14] Lung-Jieh Yang, Shung-Wen Kang, Yu-Tang Chen and Yi-Chung Wang, “Fabrication of SU-8 embedded microchannels with circular cross-section,” *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, v. 44, pp. 1109-1114, 2004.
- [15] Wei-Chih Lin and Lung-Jieh Yang, 2004, “The patterning of glutaraldehyde cross-linked gelatin”, Proceeding of the 17TH IEEE MEMS, Maastricht, Netherlands, Jan 25-29, pp. 173-176.
- [16] Hung-Yin Chen, Shin-Shong Wang, Yi-Chung Wang, Lung-Jieh Yang and Shung-Wen Kang , “Fabrication of SU-8 embedded microchannels with circular cross-section,” APCOT MNT 2004, Jul. 4-8, 2004, Sapporo, Japan, pp. 423-427.
- [17] Jiun-Min Wang, Hung-Hua Lin, Lung-Jieh Yang , “A new method of anti-stiction for parylene MEMS process,” APCOT MNT 2004, Jul. 4-8, 2004, Sapporo, Japan, pp. 563-567.
- [18] 楊龍杰，何仁揚，王冠儒，馮國華，施宏明，”拍撲式微飛行器之設計與製作”，第四屆海峽兩岸航空航天學術研討會，南京/上海，2004 年 8 月 28-9 月 2 日，pp. 36-41.
- [19] 王俊民，侯舜中，楊龍杰，”高分子薄膜材料應用於電流體驅動(EHD)幫浦之研製，” 中華民國微系統暨奈米科技學術研討會，2004 年 12 月，清華大學。
- [20] 陳虹吟，柯凱鐘，林郁桓，楊龍杰，”微圓管非平面電極之研製，”中華民國微系統暨奈米科技學術研討會，2004 年 12 月，清華大學。
- [21] 楊伯強，王信雄，歐育誠，楊龍杰，”PDMS 應用於壓阻式壓力感測器之新型封裝，” 中華民國微系統暨奈米科技學術研討會，2004 年 12 月，清華大學。
- [22] 許竣為，王信雄，楊龍杰，”50 微米尺寸的 CMOS 微型壓力感測器，” 中華民國微系統暨奈米科技學術研討會，2004 年 12 月，清華大學。
- [23] 劉冠君，柯凱鐘，王俊民，林宏樺，楊龍杰，”聚對二甲苯可彎折式閥門，” 中華民國微系統暨奈米科技學術研討會，2004 年 12 月，清華大學。
- [24] 陳虹吟，”非平面電極之研製及其微流體驅動之應用”，淡江大學機電工程學系碩士論文，民國 93 年六月。
- [25] 侯舜中，”高分子薄膜材料應用於電流體幫浦之研製”，淡江大學機電工程學系碩士論文，民國 93 年六月。