

智慧型微冷卻系統之感測與驅動技術開發(I)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 91-2218-E-032-002-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

計畫主持人：楊龍杰

共同主持人：

計畫參與人員：王信雄、王俊民、戴霆樞

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

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：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、
列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：淡江大學機械與機電工程學系

中華民國 92 年 10 月 20 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(I)」

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

計畫編號：NSC-91-2218-E-032-002

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

主持人：楊龍杰 碩士班研究助理：王信雄、王俊民、戴霆樞

執行機構：淡江大學機械與機電工程學系

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

reservoirs, actuating pumps.

Keywords: low temperature surface
micromachining, parylene, electro-
hydro-dynamic (EHD) pump

一、中英文摘要

本計畫擬利用三年期間，開發智慧型微型冷卻系統(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)、晶片鍵合技術(wafer bonding technique)、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(low temperature surface micromachining)，以進行微流道進出口系統等微結構之後加工製作。第一年的工作內涵包括：「光阻—聚對二甲苯」之低溫面型微細加工、「SU8—光纖犧牲層」之微圓管製作與電動液體驅動(electro-hydrodynamic pump)幫浦之研製等。

關鍵字：低溫面型微細加工、聚對二甲苯、
電動液體驅動幫浦。

Abstract

This project describes a combined fabrication technique of the mature silicon bulk micromachining and the newly developed, low temperature surface micromachining to make the “smart” micro-cooling system chip. Such the-state-of-art processing framework can serve as a common experiment platform for implementing various applicable microfluidic systems including channels, chambers,

二、計畫目標

淡江大學微機電研究群有鑑於現地量測技術(in-situ 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，決定全面落實應用範疇，將微壓力/溫度感測器，甚至是發展中的電動流體驅動幫浦，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。

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，本計畫在第一年原來擬發展以下製程技術，作為微流體系統量測的技術實現憑藉：

流道低溫製程：微流道製程可彈性安排於最後一階段。

矽質體型加工之共用感測器陣列晶片：於其上直接實施上述微流道低溫後製程且可重複使用。

原計畫書預計擬完成之工作項目如下：

- (一) 光阻犧牲層配合明膠結構層低溫製程之開發。
- (二) 光阻犧牲層配合聚對二甲苯結構層

低溫製程之開發。

- (三) 純粹 SU-8 低溫製程之開發。
- (四) 光纖玻璃犧牲層配合 SU-8 結構層低溫製程之開發。
- (五) SOI-like 與 CMOS 之共用壓力感測陣列晶片之設計製作。

由於第(一)部分成果已提前完成並記載於前一年度的計畫成果報告(第五部分); 加上第(三)部分係清華大學工科系曾繁根教授已發展的技術, 經檢討對於本計畫無創新意義; 另外第(五)部分 SOI-like 與 CMOS 共用壓力感測陣列晶片開發, 因著合作業界的調整(由台灣矽微公司改為玉山奈米機電公司)而改變進度, 故將以上三部分之工作項目, 修正為較急切需要的電動液體驅動幫浦部分, 並一一說明如下:

三、工作項目與成果

(一) 光阻犧牲層配合聚對二甲苯結構層低溫製程之開發

傳統矽質面型微細加工傳統的做法, 多是以多晶矽(polysilicon)為結構層, 搭配磷酸玻璃(PSG)為犧牲層的方式製作[1], 或是以 CMOS 代工配合乾蝕刻掏空犧牲層的製程方式[2]為之, 但兩者技術上之進入障礙均不低。以「polysilicon-PSG」製程為例, 需要使用 LPCVD 等設備進行薄膜材料的成長; 該機台採購成本昂貴、且不易維護。再者, 「polysilicon-PSG」材料系統的製程溫度不低, 會衍生許多因高溫製程帶來的殘留應力(residual stress)問題。因此如果可以開發一種新的製程技術, 一則在薄膜製備時能很方便地應用在面型微細加工上, 再則大幅降一低製程溫度到 120 度 C 以下(得以直接使用正光阻為犧牲層材料), 將可以解決上述傳統面型加工的部分問題。

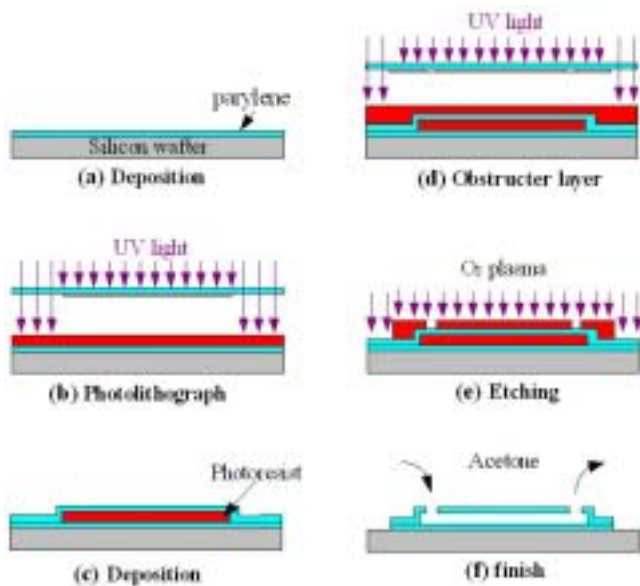
符合上述要求的低溫製程與材料之中, 聚對二甲苯(parylene)是近年來廣受注意

的一例, 如運用在 check-valve[3], 或是微小飛行器的機翼蒙皮[4], 至於應用於微流道的製作, 更是簡便[5]。因為使用 parylene 材料製程, 而大幅縮短寶貴的研發與製作時間, 加速了探索微流道相關的研究深度的例子已經屢見不鮮[6]。最重要的是, parylene 鍍膜機的價格不及 LPCVD 價格的 10%, 非常低廉實惠, 適合一般微機電研究群採購使用。圖一是本計畫接受國科會 50 萬元補助, 加上淡江大學工學院 36 萬元儀器費配合款, 以及自籌款 30 萬元所採購的美國 SCS 廠 PDS-2010 型聚對二甲苯鍍膜機(淡江大學另外補助購買 20 萬元的機械式致冷機配件)。該機台已經在年度中完成採購與製程參數設定, 並且自行開發四吋晶圓專用的晶舟(wafer boat), 以及適當(厚度不均勻度 2% 以下)的擺放方式(本成果已經準備發表於 90 年 12 月機械工程學會全國學術研討會[7])。



圖一、本計畫採購之美國 SCS 廠 PDS-2010 型聚對二甲苯鍍膜機。

以 parylene 薄膜配合光阻犧牲層的面型加工, 製作懸浮(free-standing or suspended)微結構的流程, 如圖二所示:

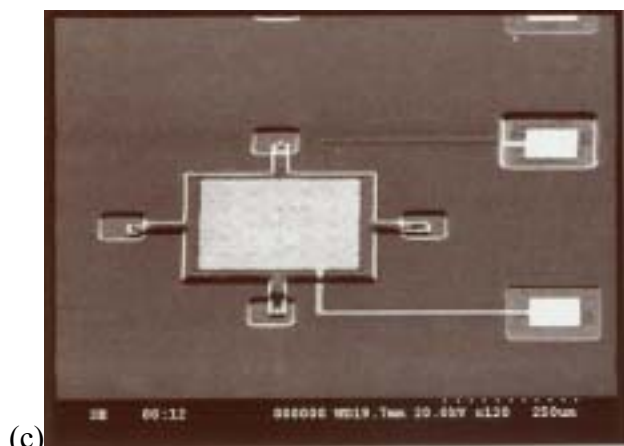
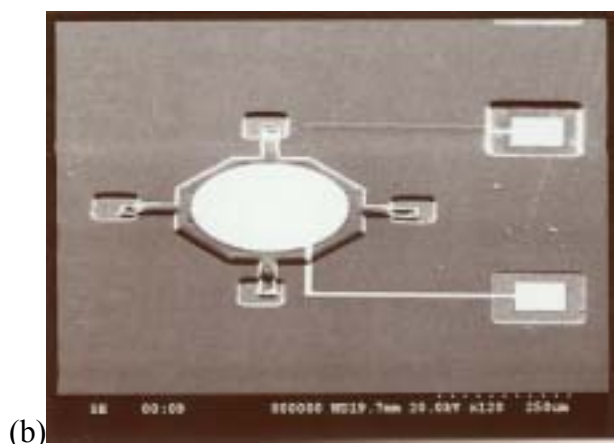
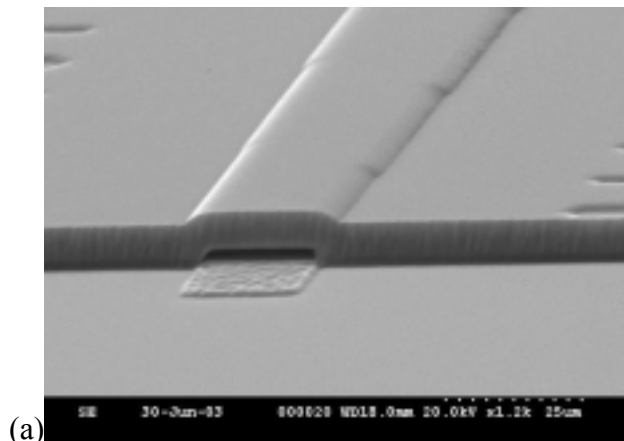


圖二、以光阻為犧牲層，聚對二甲苯為結構層之低溫面型微細加工程序。

- 使用由硫酸和雙氧水配製成的 80°C Piranha，清潔基板，後經去離子水 (D.I.Water) 沖洗並以氮氣吹乾，並加熱烤乾，完成基板的清潔，然後將基板預先浸潤 A-174 黏著劑，烘乾後放入聚對二甲苯沈積腔中，沈積第一層 parylene 薄膜當結構底材。
- 在 parylene 上塗佈 AZ4620 正光阻，搭配光阻犧牲層光罩，完成曝光顯影。光阻犧牲層的厚度決定最後微結構懸浮的高度。
- 沉積頂層 parylene 薄膜當作結構層的頂蓋。
- 使用蝕刻進出窗口光罩，黃光微影 AZ4620 正光阻阻擋層，定義出光阻犧牲層的清除進出窗口圖形。
- 利用(離子蝕刻機的) O_2 電漿，進行頂層 parylene 的開洞。要注意 parylene 與光阻遭受 O_2 電漿蝕刻的選擇度(selectivity)好壞。
- 再上一層光阻(防止晶片遭切割時之污染)，進行晶片切割。最後利用丙酮循 parylene 薄膜上的進出口，同時溶除薄膜內外的光阻，即可得到 parylene 為材質的懸浮微結構。

利用圖二程序，本計畫完成圖三所示之聚對二甲苯微流道與微腔體結構。前者作為微流道系統之本體，後者可應用到微驅動幫

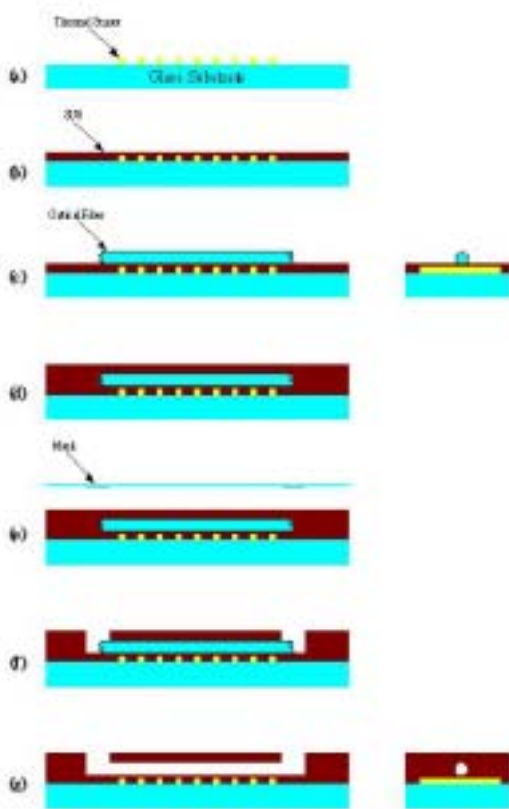
浦之可動元件。



圖三、按圖二程序加工完成之聚對二甲苯材質的(a)微流道與(b-c)微腔體。圖(a)微流道高度與圖(b-c)微腔體之內部高度，全由光阻犧牲層決定，約為 3-6 微米；聚對二甲苯材質的微結構厚度約為 5-8 微米。

(二)光纖玻璃犧牲層配合 SU-8 結構層 低溫製程之開發

此部分製程研發係針對微圓管之需要。基於犧牲層觀念與 SU-8 材質抵抗 HF 能力佳的特性(除了「硫酸-雙氧水」piranha 外，少有可去除 SU-8 之化學藥劑)，設計之低溫製程如圖三。圖三中微圓管的犧牲模仁為光纖或是毛細玻璃管，待四周充斥 SU-8 並交聯(cross-linking)固化後，開窗於圓管首尾，最終以 HF 酸液去除玻璃材質，完成微圓管。圖三之製程細節描述如下：



圖三、以光纖為犧牲層，SU8 負光阻為結構層之低溫微細加工程序。

(a)在玻璃基材上製作白金薄膜溫度感測器 (thermal Sensor) 陣列，或者已經製妥壓力計陣列之 SOI-like 玻璃片。

(b)在陣列的白金薄膜溫度感測器基材上，利用旋轉塗佈機塗佈一層 SU8 光阻層，當作流道底部結構層。進行光阻塗佈時，必須以快慢兩階段的方式進行光阻塗佈，慢速旋轉 (250~1000rpm; 15 秒) 使光阻慢慢懸開，再快速旋轉 (1000~2000rpm; 1~2 秒) 增加光阻的均勻性，減薄光阻

至所需厚度。光阻塗佈完成後，在熱墊板上進行軟烤，去除光阻層內的溶劑，使光阻由原本的液態變成固態的薄膜，增加其對基材的附著能力。光阻軟烤溫度為 80~90°C，而時間則依照光阻厚度來決定。軟烤後靜置徐冷數小時，使光阻膜固化後，再將其置於曝光機下，利用 350~400nm 波長的紫外光進行曝光，使 SU-8 光阻產生鏈結，使其結構加強而不溶於顯影液。

(c-d)將不同直徑(36/80/125 μm)的犧牲層光纖(最後圓形流道的管徑取決於光纖的直徑)放置於 SU8 之上，並塗佈另外一到二層的 SU-8 光阻，以便將光纖整個包覆，再重複 (b) 的軟烤步驟。

(e)第二層 SU-8 光阻經軟烤固化後，使用設計好的 Mask 光罩，利用紫外光對準曝光儀，在第二層光阻上曝光出流道的進出口。經由曝光後的 SU-8 光阻在顯影前，必須再次經過曝後烤 (post-exposure-baking; PEB) 程序；曝後烤的主要目的乃藉由升溫加速曝光光阻的鏈結，溫度為 95°C。

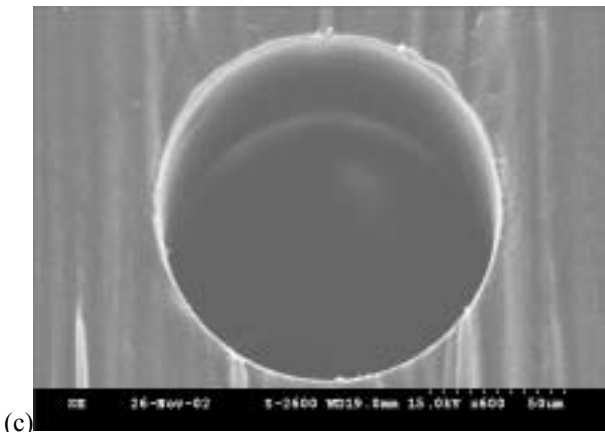
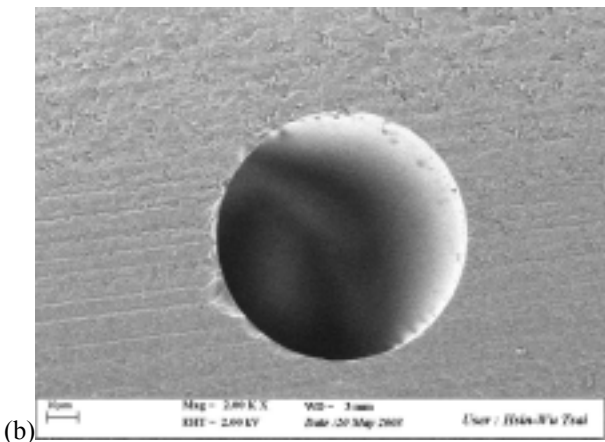
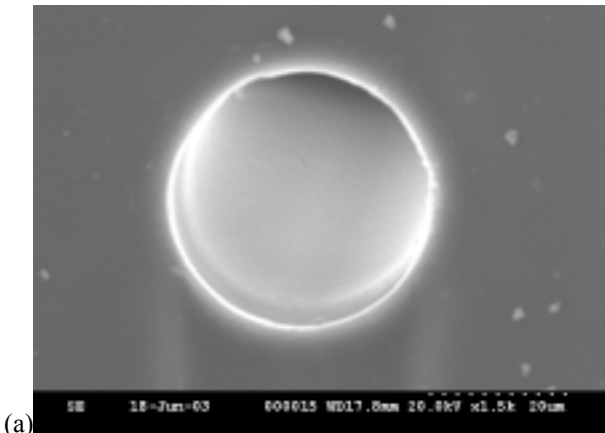
(f)光阻經由硬烤後，即可浸泡於顯影液 PGMEA (Propylene glycol monomethyl etheracetate) 中，將第二層光阻上未被曝光到的流道進出口溶除。由於 SU-8 為負光阻，在進行顯影時顯影劑會進入以鏈結的光阻分子內，造成體積膨脹而影響尺寸解析度，因此需再另外浸泡於光阻稀釋劑 (GBL thinner) 及異丙醇 (IPA; Isopropanol) 中約一分鐘。

(g)最後浸泡 HF 或 BOE 去除光纖犧牲層 (為避免 HF 會蝕刻玻璃基材，故使用一個鐵氟龍的保護夾具，將基材包覆)，成品完成。

圖四為利用圖三加工程序，所製作完成之微型圓管，直徑分別為 36 μm , 80 μm 與 125 μm ，總圓管長度則大至 3cm；不僅長度對直徑比值超過以往相關微製造文獻 [8-11]，此地 100 微米尺寸左右的圓管特殊構型，也是其他文獻所未曾記載！

圖五紀錄不同直徑光纖犧牲層的平均腐蝕速率，對應不同 HF 濃度與溫度的結果。在固定光纖犧牲層的直徑之下，平均腐蝕率隨 HF 溫度呈指數函數的增加，代表在 100 微米左右的尺寸，圓管道內腐蝕的擴散效應還不夠明顯，溫度高低可以左右整體的腐蝕速率；另一方面，在固定 HF 的濃度之下，光纖腐蝕速度卻似乎不呈現隨溫度指數函數

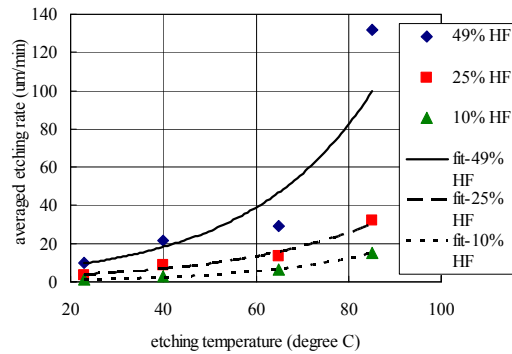
的增加，反而越粗的光纖犧牲層，在 HF 中的溶除速率越低，此亦代表 HF 溶除光纖二氧化矽的過程，才是此地反應的瓶頸所在。



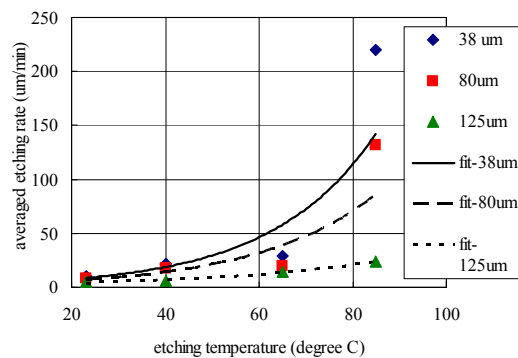
圖四、利用圖三加工程序製作完成之微型圓管，直徑分別為：(a)36µm,(b)80µm, (c)125µm

本計畫將製妥的微圓管截面，以光學顯微鏡攝影，圓孔影像進一步數據分析，得到了真圓度(roundness deviation)數據如表一。表一顯示：真圓度都在 8 %以內！另外，本計畫也將微圓管進行剖開，以 Alpha-step

surface profiler 掃描量測微圓管內壁的平均粗糙度(averaged surface roughness)，發覺都在 10 奈米以下。



(a)



(b)

圖五、光纖犧牲層平均腐蝕速率在不同腐蝕溫度下之變化：(a) 針對直徑 38µm 的微圓管在不同濃度 HF 下的情形（幾乎隨溫度指數增加）；(b) 在固定 49%濃度 HF 下對於不同微圓管直徑的情形（似乎不隨溫度指數增加）

表一、總長度 3cm 的微圓管，製作完後的真圓度的量測數據：

measuring position	Inlet			Outlet	Averaged roundness deviation
	1/3 portion from the inlet	2/3 portion from the inlet			
36µm channel	2.1µm (5.8%)	2.4µm (6.7%)	2.0µm (5.6%)	1.7µm (4.7%)	2.3µm (6.4%)
80µm channel	3.1µm (3.9%)	4.2µm (5.3%)	4.1µm (5.1%)	4.5µm (5.6%)	4.0µm (5.0%)
125µm channel	10.0µm (8.0%)	7.6µm (6.1%)	7.0µm (5.6%)	10.5µm (8.4%)	8.8µm (7.0%)

(三) 電動液體驅動幫浦之研製

在微機電的微幫浦研究領域裡面，除了屬於機械推動的構式之外，另有一類是運用電化學或是感應電場來驅動液體，共有的特色是以固定的電極構造，藉由施加電壓產生電場來推動液體，而不需要任何之可動組件(no moving parts)[12]。電動液體驅動幫浦(EHD pump)驅動力和被驅動液體的電性息息相關，其影響因素包括：液體的導電度 σ 、介電常數 ϵ 以及黏滯係數 μ 。一般來說，被驅動的液體具有高的介電常數 ϵ 以及低的黏滯係數 μ ，將可以提高 EHD 幫浦的驅動效能[13]。當被驅動的液體是層流(laminar flow)時，其流體流動最大的速度大約和電場強度平方成正比如下[14]：

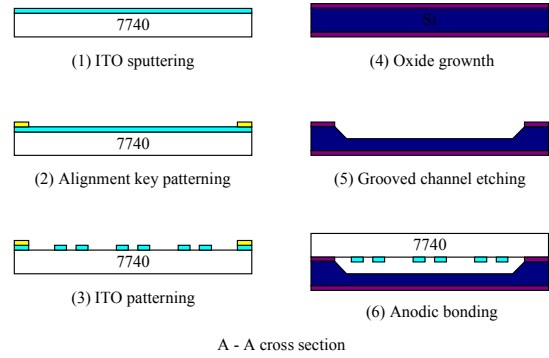
$$U \approx \frac{\epsilon E^2 d^2}{12\mu L} \quad (1)$$

本計畫參考文獻[14]將驅動電極設計成梳狀結構(comb structure)，電極的長度為 550 微米，寬度 80 微米，電極的厚度 0.1 微米。每一電極對其正負電極之間的間隙為 80 微米，電極對與電極對之間的間隔為 160 微米，所有的正負電極對總共有 20 對，平面的電極對所分佈的區域在全長 1.5 公分長的流道中佔有 6.08 公釐，梳狀結構的電極對剛好可以跨於寬度 100 微米的流道上。

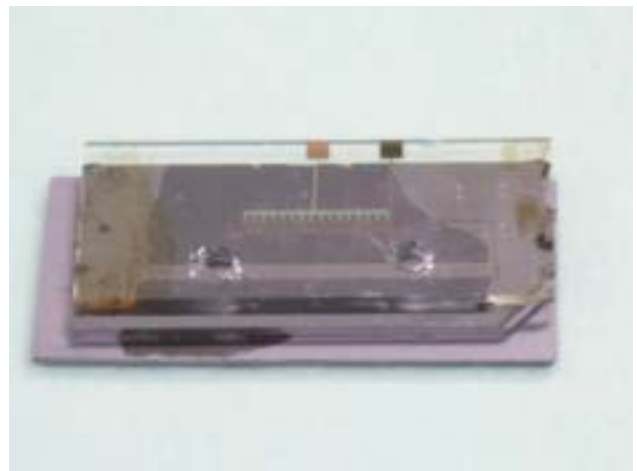
本電動液體驅動幫浦由於構型簡單，故使用矽質體型微細加工製作。加工製作程序如圖六所示，微流道製作在矽晶圓上，電極製作在 7740 玻璃上，二者再進行對準與陽極鍵合(anodic bonding)。圖六製程中另外已經考慮到電極要直接暴露在受驅動的液體環境中，恐有遭到氧化之虞，所以使用氧化銻錫(ITO; Indium-Tin-oxide)作為驅動電極之陽極，配合原先的金鉻作為驅動電極之陰極，來大幅延長微幫浦之驅動壽命。圖七為完成陽極鍵合後的微幫浦晶片。驅動電極附近放大後的圖像如圖八所示。

圖九則是量測 EHD 微幫浦流速之實驗設備。包括光學顯微鏡與其影像擷取系統、以及直流電源供應器。將 EHD 微幫浦晶片填充乙醇(酒精)之後，徐徐增加電壓，觀察酒精液

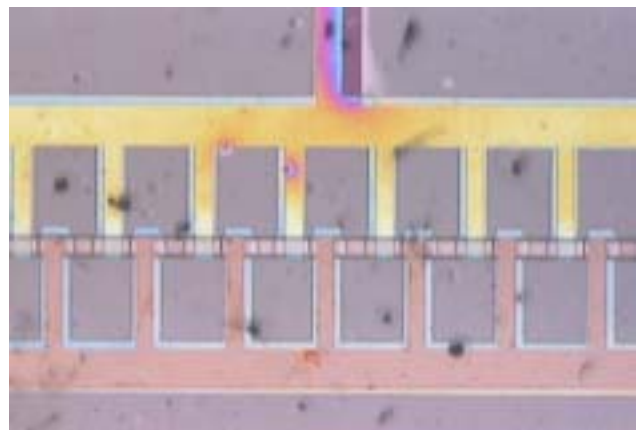
體流速變化。



圖六、利用 ITO 電極製作電動液體驅動幫浦的矽質體型加工程序。



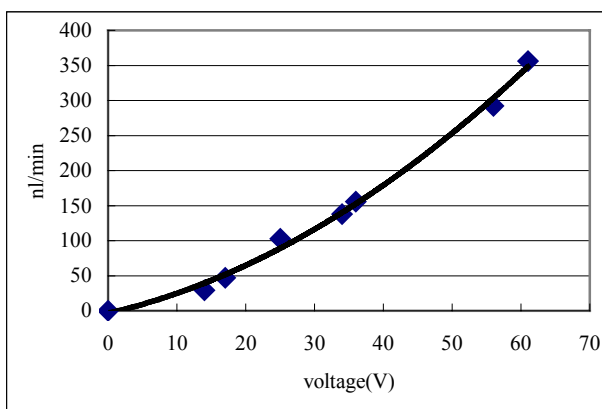
圖七、製作完成之電動液體驅動幫浦，其包括一個儲液槽(reservoir)的微流道迴路，與 20 對 ITO 驅動電極；下方兩個玻璃上的圓孔係當作液體充填出入口。



圖八、ITO-Au 複合式電極應用於改良型式 EHD 幫浦，電極寬 80 μm ，電極間距也是 80 μm ，東西橫跨一條 100 微米寬、30 微米深的矽質微流道。



圖九、量測 EHD 微幫浦流速之實驗設備。



圖十、改良型 EHD 幫浦的驅動乙醇數據。

由於乙醇透明，在低電壓的情形下，無法確知微幫浦的驅動情形。一直當直流電壓增加到 13 伏特以上，電極才開始出現有利觀察流速的氣泡；該氣泡會隨著電場的方向往前或往後流動，故在此地暫時作為液體驅動的追蹤參考依據。吾人紀錄氣泡隨時間變動的位置，再乘以微流道截面積，即為體積流率，其對應不同驅動直流電壓的結果如圖十所示。圖十顯示，本計畫所製作之微幫浦最大驅動 60 伏特之下，可得近乎 360nl/min 的體積流率，比起文獻[15]的推動效率，由 33% 進步為 57%。另外，圖十可以用一條二次曲線進行逼近，其性能特性也與公式(1)之理論定性預測相符！

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(已接受) 2 篇[16-17]、國際(IEEE 微機電)會議論文

1 篇[15]、國內會議論文 2 篇[7, 18]，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[19-21]。

在實質的微機電製程技術方面，本年度計畫建立了聚對二甲苯的鍍膜技術能量，以及相關的製程資料庫。也開發成功「光纖-SU8」微圓管製作技術。更提前完成電動液體微幫浦的初步驅動。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、國家毫微米實驗室、與交通大學半導體中心，提供半導體製程機台的服務或代工；同時感謝玉山奈米機電公司提供部分的經費補助。

參考文獻

- [1] Howe, R. T. "Surface micromachining for microsensor and actuators", *J. Vac. Sci. Technol. B*, Vol. 6, No. 6., pp.1809~1813 November 1989
- [2] Yang, L.J., Huang, T. W. and Chang, P. Z., "CMOS microelectromechanical bandpass filters", *Sensors and Actuators A*, Vol.90, No.1~2, pp.148~152, 2000
- [3] Wang, X. Q., Lin, Q. and Tai, Y. C. "A Parylene micro check valve", *Proceeding of the 12TH IEEE MEMS*, pp.177-182, 1999.
- [4] Pornsin-Sisirak, T.N., Tai, Y. C., Nassef, H. and Ho, C.M., "Flexible parylene actuator for micro adaptive flow control", *Proceeding of the 14TH IEEE MEMS*, pp.511-514, 2001
- [5] Walsh, K., Norville, J. and Tai Y. C., "Photoresist as a sacrificial layer by dissolution in acetone", *Proceeding of the 14TH IEEE MEMS*, pp.114-117, 2001
- [6] Yang L. J., Yao, T. J., Huang, Y. L., Xu Y. and Tai Y. C., "Marching velocity of capillary meniscuses in microchannels", *Proceeding of the 15TH IEEE MEMS*, Jan 20-24, pp. 93-96, 2002.
- [7] 黃恒賚、楊龍杰，聚對二甲苯鍍膜製程之膜厚均勻度探討，第二十屆機械工程研討會論文集，中華民國九十二年十二月五日~六日，臺灣·台北，國立台灣大學。
- [8] L.J. Guerin, M. Bossel, S. Calmes, M. Demierre and P. Renaud, "Simple and low cost fabrication of embedded micro-channels by using a new thick-film photoplastic", *Solid State Sensors and*

- Actuators, 1997. TRANSDUCERS '97 Chicago, 1997 International Conference, Vol. 2, Jun 1997, pp.16-19.
- [9] Y. Joo, K. Dieu, C-J Kim, "Fabrication of Monolithic Microchannels for IC Chip Cooling", Proc. MEMS'95, 1995, pp. 362-367.
- [10] J.J. Rebecca, M. F. Tamara, G. Reza, A.S. Martin, F. J. Klavs, "Microfluidic systems with on-line UV detection fabricated in photodefinable epoxy", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 11 (2001), pp. 263-269.
- [11] E. H. Tay Francis, J A van Kan, F Watt, W. O. Choong, "A novel micro-machining method for the fabrication of thick-film SU-8 embedded micro-channels", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 11(2001), pp. 27-32.
- [12] Gregory T.A. Kovacs, *Micromachined Transducers Sourcebook*, chapter. 9, pp.845, McGraw-Hill, 2000.
- [13] Joseph M. Crowley, Graham S. Wright, and John C. Chato, Selecting a Working Fluid to Increase the Efficiency and Flow Rate of an EHD Pump, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 26, No. 1, January/February, 1990.
- [14] Si-Hong Ahn and Yong-Kweon Kim, Fabrication and experiment of a planar micro ion drag pump, *Sensors and Actuators A*, 70, pp.1-5, 1998.
- [15] Lung-Jieh Yang, Jiun-Min Wang and Yu-Lin Huang, 2003, "The micro ion drag pump using ITO electrodes", Proceeding of the 16TH IEEE MEMS, Kyoto, Japan, Jan 20-23, pp.112-115.
- [16] Lung-Jieh Yang, Jiun-Min Wang and Yu-Lin Huang, "The micro ion drag pump using ITO electrodes to resist aging", to appear in *Sensors and Actuators A: Physical*.
- [17] Lung-Jieh Yang, Tze-Jung Yao and Yu-Chong Tai, "The marching velocity of the capillary meniscus in a microchannel", to appear in *Journal of Micromechanics and Microengineering*.
- [18] Hung-Yin Chen, Lung-Jieh Yang, Shung-Wen Kang, Yu-Tang Chen and Yi-Chung Wang, "Fabrication of SU-8 Embedded Microchannels with Circular Cross-Section", 2003 年奈米工程暨微系統技術研討會，國立台灣大學，11月20-21日。
- [19] 戴霆檉，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。
- [20] 王俊民，離子牽引式微幫浦的研製，淡江大學機電工程學系碩士論文，民國 92 年六月。
- [21] 王信雄，新型高壓力負載微型壓力計之設計

製造，淡江大學機電工程學系碩士論文，民國 92 年六月。