

微液體混合器的研發 (II)

計畫編號：NSC-89-2212-E-002-142

執行期限：89 年 08 月 01 日至 90 年 07 月 31 日

主持人：朱錦洲 國立台灣大學應用力學研究所

共同主持人：曾繁根 國立清華大學工程與系統科學研究所

研究助理：黃啟明，郭仕奇

一、摘要

傳統上用來幫助混合的手段，例如紊流、流場的三維性、與以外力方式來攪動流場，均無法有效的應用在微尺度的情況。本研究提出二種創新的方法，將巧妙地利用表面張力及微結構，大幅增加待混合的液體之接觸面，以及降低它們的混合尺度，使得混合在極短的時間內完成。第一種方法是利用電壓差的方式來改變流體與基材之間表面張力，進而驅動流體；第二種是在某些特定的地方提供熱能，使其該處的表面張力改變，進而驅動流體。

吾人所研發的的微液體混合器將可批量製造並能與積體電路或其他微流元件整合在晶片上，成為低成本的微機電流體系統。

關鍵字：親水性、疏水性、微液體通道、微液混合

二、理論基礎

通常要描述一個曲面，必需用到兩個曲率半徑；對球形而言，兩個曲半徑相同，圖 2-1 顯示一個任意曲面的一小部分。曲率半徑分別為 R_1 與 R_2 ，而且這塊表面小到 R_1 與 R_2 實際上是常數。現在如果把這表面向外移動一小段距離，面積的改變為

$$A=(x+dx)(y+dy) - xy=xdy+ydx$$

為形成這多出來的表面所作的功為

$$\text{功} = (xdy + ydx)$$

表面兩邊會有一壓力差 P ；它作用在面積 xy 上，經過一段距離 dz 。對應的功則為

$$\text{功} = P \cdot xy \cdot dz$$

由相似三角形比較，可得到

$$\frac{x+dx}{R_1+dz} = \frac{x}{R_1} \quad \text{或} \quad \frac{1}{x} \frac{dx}{dz} = \frac{1}{R_1}$$

以及

$$\frac{y+dy}{R_2+dz} = \frac{y}{R_2} \quad \text{或} \quad \frac{1}{y} \frac{dy}{dz} = \frac{1}{R_2}$$

如果表面呈機械平衡，上面所列的兩個功必須相等。令兩式相等得

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2-1)$$

這式就是毛細作用的基本方程式。

對於平坦表面而言，兩個半徑都可視為無限大，因此 P 為零；所以在平坦表面兩邊沒有壓力差存在。

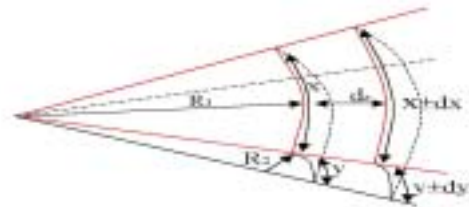


圖 2-1 兩個曲率半徑描述任一曲面

結論：由式(2-1)的推導結果，我們可以對任何一液體的曲面以壓力梯度的方式，來表示表面張力。

三、微通道之設計與製程安排

3.1 微通道之設計

採用的微機電製程是屬於表面微細型加工 (surface micro-machining) 的技術，先沈積金屬或是氧化層薄膜，再以黃光微影技術，將圖形轉移到矽晶片上，再配合溼式蝕刻與乾蝕刻，將圖形定義出來。

製程包括

- (1) 電壓差驅動流體結構之製程

(2) 熱能改變表面張力結構之製程

3.2 製程設計

3.2-1 親水材料的選擇

在一般情況下，水與材料之間的接觸角小於 90 度，吾人稱之為親水性材料，根據表 4-2，水與二氧化矽之間的接觸角小於 30 度，因此吾人選擇以二氧化矽(SiO₂)作為親水性材料，其親水性相當的好；此外此層的二氧化矽以集結式電漿輔助化學氣相沈積系統(PECVD)的方式沈積。

3-2-2 打線區金屬的選擇

容易導電、硬度不高是選擇此材料的原則，因此吾人將金、銅、鋁等列入考量，而最後選擇金做為此區的材料，因為金的材料性質：導電容易、硬度也不高、較耐酸鹼，而不選擇銅、鋁的最大原因是因為它們很容易被弱酸、弱鹼蝕刻掉，就算沒有被完全蝕刻完，恐怕在後續繁複的製程中，因為使用其他化學藥品而使厚度不斷的降低。

3-2-3 加熱源的金屬選擇

吾人選擇以鉻做為提供熱源的金屬，因為其電阻值比較高，故適合當作熱源。

3-2-4 提供電壓差的金屬選擇

在此選擇容易導電的金屬鋁，因為其導電性佳且價錢便宜。

3-2-5 疏水性材料的選擇

選擇鐵弗龍(Teflon)作為疏水性的材料，水在鐵弗龍的表面上接觸角大約是 108 度，其疏水性相當的不錯。

3-2-6 墊高厚度的材料選擇

選擇以厚光阻 SJR5740 或 S1813 當作墊高的材料，可輕易地以轉速來控制光阻的厚度，而且只需要曝光顯影即可，不需要其他的步驟，所需的厚度最高不超過 16 μm。

四、結果與討論

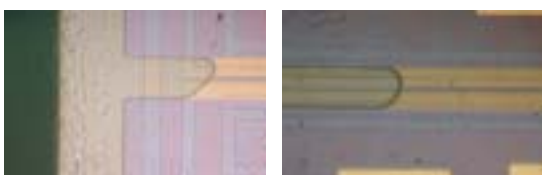


圖 4-1 加蓋高度 5 μm 的疏水間隔

4-1 疏水間隔無法發揮作用

其原因：疏水間隔的高度：大約 250A 儲水區水的高度：2.5 μm 或 5 μm

→高度比 疏水間隔高度：儲水區高度 = 1:100

疏水間隔寬度：20 μm、30 μm、40 μm、50 μm

儲水區寬度：2400 μm

→寬度比 疏水間隔寬度：儲水區寬度=1:100
1:50

經由以上的比較，吾人可以發現無論是高度或寬度，兩者的比例都相差懸殊，也就是說要以這樣的疏水間隔來突破儲水區的表面張力，將水分隔開，這是相當困難的。

解決之道：最根本的解決辦法就是在一開始的時候，就將儲水區分開，也就是說單一通道擁有一個獨立的儲水區，不與其它通道共用。

4-2 金屬的高度對流道的影響：

由圖 4-2 中顯示，流道中的水似乎被金屬的導線所造成的高度差（1000A）所擋住，但是在經過仔細分析之後，認為雖然此高度差有造成影響，但是並不是水停滯不前的主因。吾人分析如下：在鋪設流道之前，已經先將金屬導線鋪設完畢，此金屬導線的高度大約是 1000A，因此在鋪設好流道之後，流道的表面並不平坦，遇到有金屬經過的地方，就會有如一個小台階一般，但是此高度相較於流道的寬度而言應是微不足道的，因為流道的寬度最小有 20 μm，其比例為流道因金屬的突起：流道的寬度 = 1:200

若是針對加蓋高度 2.5 μm 而言，也就是說水的高度有 2.5 μm，其比例是流道因金屬的突起：水的高度 = 1:25

如此的比率的確是會造成流道上的阻礙，但是吾人認為影響並不大，造成水停滯不前的主因是加蓋高度的關係，雖然吾人在蓋玻片的另一側施加重物（以免妨礙觀察），但是當水滲入蓋玻片下面的儲水區之後，仍會將蓋玻片撐起，造成高度上升，若是高度只有 2.5 μm 的時候，此陰影區會變成一條黑線。

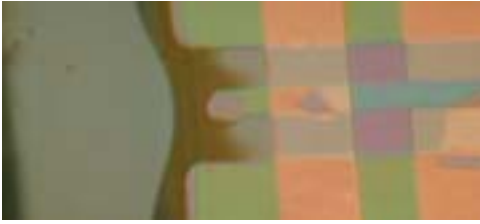


圖 4-2 金屬對流道的影響

圖 4-2 之中的流道前端有少量的水被表面的不平坦所侷限住，其原因是流體因蓋玻片的高度過高，造成停滯在流道入口之後，而本身往前進的液體前緣 (liquid front) 是以有斜度的方式前進，因此是流體前端少量的水被此金屬高度所侷限住，並不是全部的水都被此金屬高度所擋住，如下圖 4-3 所示 (此圖純粹只是示意圖，不按照比例)。

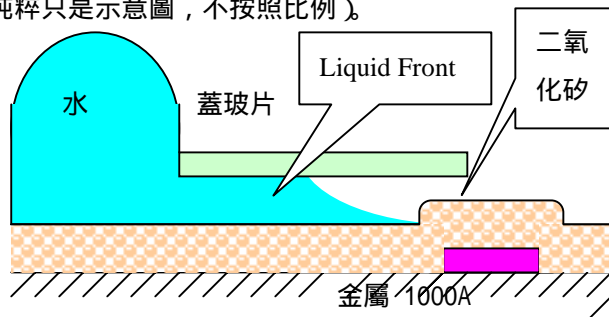


圖 4-3 Liquid Front

力量比值分析：

儲水區和流道內的壓力梯度的比值約為

$$[(1/66) : (1/44)] = 1 : 1.5 \quad (\text{高度 } 16 \mu\text{m})$$

若降低蓋玻片的高度，則流道內的曲率半徑就會變小，因此流道內的壓力梯度會更大於儲水區內的壓力梯度，不過這兩個力都是使流體前進的力量。

而流道內的表面張力可分為：親水性流道的前進力量與蓋玻片上的斥水力量，此二力的比值可估算為：

$\cos 20^\circ : \cos 105^\circ = 3.63 : 1$ ，所以親水的吸力會永遠大於鐵弗龍所造成的斥力。因此吾人將蓋玻片塗佈一層鐵弗龍並不會造成太大的阻力。

4-3 加熱驅動流體測試

此部分的測試，由於疏水間隔無法發揮作用，與氣泡並沒有成功截斷流體，所以加熱驅動流體的效果並不明顯，反而大部分的流體都因為加熱而蒸發掉了。因此該部分的實驗並未如預期。

推究其原因，仍是所施電壓不足，而加熱的時間又太長的結果，如果能夠驅動流體使其跨過疏水間

隔，此動作的時間應該會在很短的時間內達成。

4-4 腔體高度與流場關係

本實驗利用光阻鋪設不同的高度，了解在何種高度下流體可以流動，其中實驗的親水流道寬度為 100um。當同樣流道高度下，上蓋材料為玻璃或鐵氟龍的分別。當上蓋為玻璃時，造成流體整個充滿間隙，不能照著設計的路線流動，主要原因是流體將順著親水性的玻璃滲入。上蓋為鐵氟龍的情況時，流道寬度為 100um，其高度在 15um 左右才可以流入，如大於 15um 的高度時流體不會前進，其原因主要為當流道高度越高時，流體前緣的空氣接觸面積加大造成曲率半徑加大，表面張力所造成的壓差無法驅動流體前進。



圖 4-4 SJR5740 1500rpm 厚度約 15um 之流場圖



圖 4-5 SJR5740 2000rpm 厚度約 10um 之流場圖



圖 4-6 SJR5740 2000rpm 厚度約 5um 之流場圖

4-5 結論

綜合以上實驗結果，除了需要在流道的設計上做改進之外，仍必須找出有效的方法來截斷流道，因為若不先截斷流道，則流道內的液體必定會受到兩端儲水區的牽制，就算提供外力也無法跨越疏水流道達到混合。

在流道設計上，也應該重新設計成單一流道擁有

單一的儲水區，如此就不會有分流的困擾，加熱或加電壓之後，就可以清楚看出水有沒有跨過疏水區。

關於電阻過大的問題，如前所述，要縮短銘的長度，只留下與流道作用的區段就可以了，如此可以有效降低電阻值。在金屬的鋪設上，其數目應該要更多，寬度要更小，譬如：在寬度 100 μm 的流道上，金屬的寬度應該以 5 μm 的寬度與間隔來鋪設，透過順序加電壓或熱能的方式，更能清楚的看見其影響。

以加熱效應來驅動流體的方式似乎較為困難，雖然加熱會使其接觸角變小，但是由於液體是在親水的流道上，在尚未加熱前其接觸角大約是 20 度，加熱之後我們能使接觸角再變小的範圍很小，因此要靠此角度的改變來將液體往另一側推擠，使其與相鄰的流道上的水互相接觸，較為困難。此外，要在瞬間輸入很大電壓，恐有造成電阻絲斷裂的可能，如此少量的液體也很快會因為加熱的關係而蒸發。

五、結語及未來展望

目前的實驗結果仍未到達測試混合的階段，因此需針對原新的設計做改良，除了儲水區與流道的更改之外，也應就目前的流體截斷方式做改良，另外為了測式的時候更加方便，應該擴大打線區域與導線的連接線的距離，如此在加上蓋玻片的時候才會更佳方便。

本研究已完成單一螺旋狀流體通道製程與流體測試、玻璃的電鍍測試、濕式蝕刻測試、乾式蝕刻測試、對準預接合系統測試、第二代直線流道混合器元件完成等工作，未來將利用微粒子速度量測儀來量測流體混合的結果。

此外，目前在蓋玻片塗佈鐵弗龍的目的是為了不讓水吸附在蓋玻片上，但是卻會對流道造成阻力，因此，較理想的方式是希望能夠在蓋玻片上也能有親疏水的間隔，亦即在蓋玻片上也有流道的定義並且與晶片的位置相契合，如此，相信液體往前進的速度會更快，更有助於縮短混合的時間。

未來如果可以達到驅動流體的目的之後，就可以使用兩種不同激發波長的螢光染料，用螢光顯微鏡觀察其混合的優劣，並找出如何在越短的時間之內，增

加最多的混合面積，達到最好的混好的效果。

在理論分析方面，應該建立一套完整的理論分析方法，充分瞭解流體在所設計的流道內所受到各種力量的交互作用，如此才能判別流體該往哪走，並與實驗結果互相比較。

參考直流道的的結果，著手進行研發新一代的混合器，並找出最適合此混合器的封裝方式，同時探討此混合器在未來生物晶片可能的應用方式。

- 1、成功地設計並製造出應用於微混合的新型通道。
- 2、搭配使用親水與疏水性材料的特性，巧妙運用表面張力，可以明顯看出控制微液體的流動是可行的。奠定了日後尋找親水性更佳或疏水性更明顯之材料，在製程亦可掌握之材料，可使微流系統多一種微通道方式。
- 3、實驗結果證實此通道的可行性與通道參數設計。
- 4、對於微液體通道量測實驗，本研究已對實驗上所遭遇的困難提出了問題的原由與解決方法。將對未來從事此相關實驗時，提供一個實驗方法。

六、感謝

本計劃承蒙國科會研究計畫 NSC 89-2212-E-002-142 的大力支持，始得順利進行，在此特表感謝。研究期間交大半導體中心的陳聯珠小姐，美商 3M 陳人瑞先生提供 FC-40，方能順利完成，在此一併感謝。

七、參考文獻

- [1]黃啟明，微液混合器的研發，2001 年台灣大學應用力學研究所碩士論文
- [2]郭仕奇，流體拉伸式微液體混合器之研發，2001 年清華大學工科所碩士論文。
- [3]陶雨台（譯），表面物理化學，千華出版社。
- [4]郭兆林，周念榮（譯），固、特、異的物質，天下文化。
- [5] Lee, J.; Moon, H.; Fowler, J.; Chang-Jin Kim; Schaeffer, T. Addressable micro liquid handling by electric control of surface tension. the proceedings of 14th IEEE International Conference on MEMS, 2001.