

# 微流道蒸發現象之探討

陳育堂

德霖技術學院機械系

## 摘要

微流道二相對流熱傳可應用於許多領域如電子冷卻等，本研究探討微流道內之蒸發現象與毛細驅動熱，利用濕蝕刻技術於(110)矽晶片上製作長 75mm，流力直徑 100  $\mu\text{m}$  ~ 250  $\mu\text{m}$  之矩形流道，搭配成不同流力直徑尺寸之微流道試片，量測其在不同加熱功率以及工作角度下之流體蒸發率與試片溫度，並計算比較整體熱阻之差異。

經由實驗結果顯示出，當加熱功率亦即熱傳量增加之時，蒸發率會隨之升高而熱阻則隨之降低；在微流道尺寸差異所造成的影響則是得到較小之流力直徑尺寸設計同樣會使蒸發率上升與熱阻下降，另一方面本實驗也針對傾斜角度加以觀察並進行探討。實驗的結果與毛細力及毛細壓差的基礎理論趨勢吻合，也驗證了微流道流力直徑之尺寸設計與工作流體之接觸角是毛細驅動的重要指標。

**關鍵字：**微流道，蒸發，傾斜角，熱阻

## Study of Evaporation Phenomena in Micro Channels

Yu-Tang Chen

Department of Mechanical Engineering, De Lin Institute of Technology

### Abstract

Two-phase convective flow in micro channels has numerous promising applications such as electronic cooling. This study investigates evaporation phenomena and capillary-driven heat in a rectangular micro channels structure with hydraulic diameters of 100~250 $\mu\text{m}$  and length of 75mm. The micro channels made of (110)-orientated silicon is fabricated by bulk micromachining. The temperature distributions in micro channels chip structure, as well as the induced evaporation mass flow rate of water, were measured under different heat flux and inclination angle. Thermal resistance were calculated to evaluate the chip cooling performance.

The experimental results show that with an increase of the imposed heat flux, the evaporation mass flow rate increases and thermal resistance decreases. The effect of channel size and inclination angle on the heat transfer characteristics are also examined.

**Keywords:** evaporation, micro channels, inclination angle, thermal resistance

## 壹、前言

隨著高科技產業的蓬勃發展，微流道早已被做為毛細傳輸機制廣泛應用於散熱系統；爲了因應不同的產品需求，除了有效率的令散熱效能提昇之外，輕量化、耐久、無噪音的趨勢更顯示出如何在生產與成本考量之間，能簡化但確實的發揮散熱機制並開發更適用的材料來輔助，是目前相當關鍵的課題。

目前許多的散熱技術，多與微流體(micro-fluidic)密切相關，所謂微流體是指於微流道(micro channel)或微米等級元件中的流體流動，本研究希望利用 MEMS 技術於4吋(110)矽晶片上蝕刻微米尺度之流道來做為毛細傳輸的機制，探討採用不同的流道尺寸設計之微流道試片，應用於不同瓦數之加熱功率以及變化工作角度下熱傳散熱時，以實際所量測的工作流體蒸發率並藉由整體熱阻的計算來比較各尺寸設計的差異性；進而有助於微流道性質研究及應用於平板式熱管或均熱片等之毛細傳輸結構，期待能提供學術界及產業界理論探討或實際應用有實質的幫助與貢獻。

微流道在熱傳流力領域研究的概念可說從1981年Tuckerman及Pease[1] 的發表成果中開始發展，其研究主要以半導體製程技術於(110)矽晶片基材蝕刻出高深寬比之矩型微流道，並使用陽極接合技術結合矽晶片與Pyrex玻璃，進行流力與熱傳特性之理論分析及實驗驗證，應用於超大型積體電路(VLSI)的散熱機制；1992年Stroes等人[2] 則針對舉行與三角形流道進行深入的毛細力實驗研究。1996年，Peng與Peterson[3] 探討了在不鏽鋼材質，流力直徑在0.133mm~0.367mm的矩型微流道中水的單相對流熱傳，經由不同的流道截面設計來探討摩擦係數，壓力降，雷諾數等流力性質；其中除了仍顯示出流力直徑與流道間中心位置距離比值的重要性外，結果中更提出在達到紊流的範圍時，流道截面的深與寬若比值是0.5，則所計算出之摩擦係數會小於其他深寬比例。1999年，Liao與Zhao[4] 對於加熱之溝槽毛細結構進行熱傳探討；2000年，Peles與Haber[5] 針對三角形微流道進行二相流之一維模擬分析；Tso與Mahulikar[6] 提出環型微流道中，結合蒸氣液面驅動之對流與輻射性質運用於電子冷卻系統；同年，Puncochar與Drahos[7] 則提出對毛細傳輸極限對應壓力降之關係探討。2002年，Kim等人[8] 提出考量表面張力的毛細微流道性質分析，其研究利用SU-8厚膜光阻製作許多不同幾何形式之微流道試片，對壓力梯度、黏滯力、表面張力等來進行分析，同時也以模擬分析軟體進行流體通過微流道整體之流場分析；同年，Judy等人[9] 則研究驅動蒸餾水、甲醇和丙醇三種工作流體透過圓形、矩形之微流道壓降值影響。

2003年，淡江大學楊龍杰副教授[10] 提出了在微流道中毛細液前緣速度型態探討，文中經由毛細力的理論基礎輔以微機電製程製作之高分子微流道實際測試，將表面張力及重力對毛細推動之影響，同時考量不同表面性質之差異下，進行分析並推導出毛細液前緣行進之速度關係式。同年，Park 與 Lee[11] 提出對受加熱的長直毛細微流道流力與熱傳的性質分析研究，其結果顯示流體在新月形式液面區域熱傳率會遠大於在貼附流道壁之薄膜形式區域，而熱傳遞係數會出現在液面成薄膜形式之區域，然而最大液體流速則出現在新月形式液面區域約 40%之處。2004年，Nilson 等人[12] 更提出了應用於蒸發冷凝機制的軸向漸縮式的微流道設計模擬分析，其結果呈現出漸縮式的矩型微流道設計，經由計算熱通量顯示冷卻效果比照一般的長直矩形流道爲佳。

## 貳、理論介紹

在微流道相關的產品應用方面，微流道之毛細力是設計上一個重要的參考指標，爲了解基本之微流道毛細現象，在本研究中將微流道之毛細力與毛細壓差輔以實驗相互比較。毛細力與

毛細壓差是微流道輸送工作流體之主要動力；一般而言，較小等效孔徑之微流道具備有較大的毛細力特性；然而，縮小孔徑將伴隨液體與微流道結構間摩擦力的遽增，因而，欲達較佳之自身輸送液體能力，微流道尺寸不一定愈小愈好。此外，重力場的效應亦影響微流道自身輸送工作流體的能力；較佳的微流道元件設計更須具備能抵抗重力場的影響，使其處於任意傾斜角度仍可正常運作。

毛細力分析是在微流道相關設計上一個重要的考量因素。為了解基本之微流道毛細現象，在此本文將微流道之毛細力與毛細壓差進行一理論上的介紹並輔以實驗觀察比較。毛細力( $F_{cap}$ )是藉由總表面能對流體傳輸方向進行一次微分而求得，總表面能可表示為：

$$E_s = E_0 + A_{sl}\gamma_{sl} + A_{la}\gamma_{la} + A_{sa}\gamma_{sa} \quad (1)$$

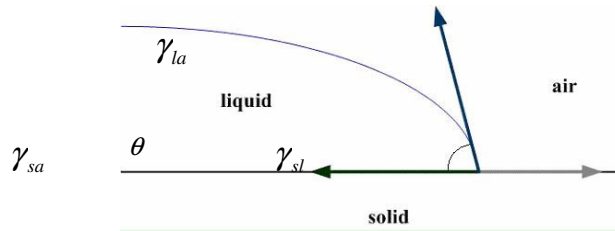
其中  $A_{sl} \gamma_{sl}$  為固體和液體的接觸面積及表面張力

$A_{la} \gamma_{la}$  為液體和氣體的接觸面積及表面張力

$A_{sa} \gamma_{sa}$  為固體和氣體的接觸面積及表面張力

表面張力間的關係式如圖一表示為：

$$\gamma_{sa} - \gamma_{sl} = \gamma_{la} \cos \theta \quad (2)$$



圖一 表面張力與接觸角示意圖

將表面能式微分可求得毛細力：

$$F_{cap} = -\frac{dE_s}{dx} \quad (3)$$

再將毛細力除以流道截面積( $A_c$ )即可得到毛細壓差如下：

$$\Delta P_{cap} = \frac{F_x}{A_c} \quad (4)$$

從本實驗中之矩形微流道考慮寬度與深度分別為( $W$ )及( $D$ )，並假設 ( $\sigma = \gamma_{la}$ )，其工作流體與流道表面間的毛細力( $F_{cap}$ )與毛細壓差( $\Delta P_{cap}$ )則可分別表示為：

$$F_{cap} = \sigma[\cos \theta(2D + W) - W] \quad (5)$$

$$\Delta P_{cap} = \sigma[\cos \theta(2D + W) - W] / DW \quad (6)$$

其中， $\sigma$  與  $\theta$  分別表示液體之表面張力(surface tension)與介面間的接觸角(contact angle)。

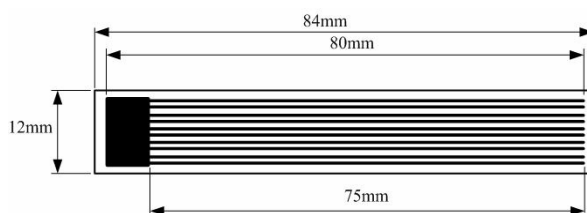
本實驗除了在微流道尺寸上設計外，其中用來比較的一個依據就是整體熱阻值的差異，並著重於在不同瓦數之加熱功率及工作角度下的探討；然而，整體熱阻可以經由以下簡式，即熱源溫度( $T_s$ )減去環境溫度( $T_A$ )再除以加熱功率( $Watt$ )求得：

$$R = (T_s - T_A) / Watt \quad (7)$$

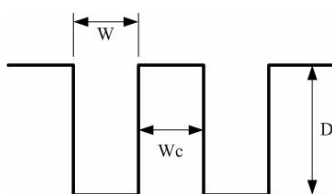
## 參、實驗設計與架設

### I.3.1 微流道設計

利用 MEMS 技術於 4 吋(110)矽晶片上蝕刻微米尺度之流道來做為毛細傳輸結構，整體試片結構尺寸為長( $L$ ) 84mm 與寬( $H$ ) 12mm，內部流道全長 75mm，如圖二所示；共有 16 種流道尺寸，分別為 4 種流道寬度( $W$ ) 100  $\mu$ m, 150  $\mu$ m, 200  $\mu$ m, 250  $\mu$ m，並對應四種流道深度( $D$ )則分別為 100  $\mu$ m, 150  $\mu$ m, 200  $\mu$ m, 250  $\mu$ m，而流道間隙( $W_c$ )與流道寬度( $W$ )比設計為 1:1，如圖三所示，依此規則將流道分散至試片寬度，而產生四種對應於流道寬度之不同之流道數目。本實驗中微流道試片在接合 7740 玻璃時並非完全覆蓋，而是局部接合如圖四所示，在微流道末端預留 2mm 寬度讓試片在加熱蒸發區域所產生之蒸汽得以散出，另一方面供水端位置上方之 7740 玻璃只覆蓋到矩形區域面積之一半，此做法除了作為工作流體在進入微流道之前的一個緩衝，亦是為了在水平測試時避免燒杯內工作流體液面的波動額外推動而影響毛細力的自然傳輸。



圖二 流道尺寸設計示意圖



圖三 流道截面設計示意圖



圖四 接合 7740 玻璃後之測試試片

## II. 3.2 實驗架設與測試

### 3.2.1 毛細傳輸

在進行微流道試片加熱測試前，觀測各種不同流道尺寸之試片在不同測試角度下( 0°, 45°, 90°)的毛細輸水情形。本實驗所使用之工作流體為純水，試片在測試前均須使用丙酮與異丙醇進行兩次沖洗，最後再用純水連續沖洗五分鐘之後烤乾，置於毛細測試平台上。測試時需注意的是，在給定純水進入微流道前必須減少晃動並儘可能穩定的進行。本研究所採用的測試平台，用以記錄各微流道試片毛細力輸水長度位置，以利在加熱測試前清楚了解何種尺寸之試片在做角度變化時無法將工作流體帶到加熱區。

### 3.2.2 加熱測試

本實驗係設定在開放式環境底下探討各種微流道尺寸之試片於不同加熱功率與工作角度下熱阻值與蒸發率的差異。首先將試片固定於加熱裝置並置於角度旋轉平台上，再接上電源供應器設定功率以及溫度感測線，經由溫度擷取器傳送至電腦記錄，而後在工作流體的提供方面則是由燒杯盛裝工作流體純水，置於微量電子秤上並在燒杯上加以覆蓋避免揮發，最後同時藉由微量電子秤量測工作流體的消耗量。值得注意的是，本實驗室在開放式條件下進行，因此工作流體的角度設定是以負角度為原則，即是加熱蒸發端在上方而供水端位置在下方來進行，預期讓工作流體完全藉由微流道試片本身的毛細力來做為傳輸機制。

實驗架構設計如下:

1. 加熱方式:採用陶瓷加熱片作為熱源，切割成所需尺寸，將除了與試片加熱時接觸以外之部分，以絕熱棉包覆減少加熱源的熱散失，再將試片與加熱片接觸部位均勻塗抹散熱膏，使之緊密貼合減少空氣熱阻之影響，並以電源供應器分別供給 4W, 6W, 8W 的功率做加熱。(本實驗陶瓷加熱片之工作溫度上限為 150°C)
2. 工作流體輸送方式:以燒杯盛裝工作流體純水置於微量電子秤上並在其上加以覆蓋避免揮發，藉由微流道試片本身的毛細力來做為傳輸機制，儘可能減少外界額外影響毛細傳輸之因子。
3. 溫度擷取:使用溫度擷取器(imc  $\mu$  MUSYCS 2.0)，並使用 T-type 之熱電偶線(Thermocouple) (Range: -100°C ~ 400°C)及桌上型電腦進行記錄。將量測之接觸點位置塗抹些許散熱膏，分別記錄加熱源溫度，加熱源上方之試片溫度，流道中央溫度以及供水端溫度，取樣時間為每秒記錄一次。
4. 蒸發量求取:使用微量電子秤，精確度設定為小數點下 4 位，並於每組狀態量測完畢時，做歸零動作再進行下一次實驗。
5. 測試條件:測試環境在恆溫恆溼的無塵室下進行，控制室溫在 19.5°C，相對溫度在 68% ~ 78% 之間，每一條件測試設定之穩態時間為 40min，之後再進行蒸發量的求取，時間為 30min，每一條件均量測 2 次求得平均值以記錄。

在此架設下，預期藉由量測單位時間由微量電子秤所得到工作流體消耗之蒸發量，用以計算工作流體的蒸發率，並經由熱源溫度與環境溫度之溫差來求得整體熱阻，做為比較各種尺寸試片作動差異的依據。

## 肆、結論

### 4-1 毛細測試觀察

在本實驗過程當中，可以發現微小流道的毛細吸收情形受到環境的因素影響甚鉅，諸如水溫、室溫、相對溼度、試片潔淨過程等，都是造成效果差異甚至不易觀測的因素；而觀測的問題也同樣不可小覷，特別是在非水平角度量測毛細力輸水情形時，真實液前緣位置與肉眼及拍攝器具所得到的結果往往不盡相同。

經由毛細傳輸工作流體純水之實驗觀察，在未加熱的情況下，我們先得知了某些尺寸的流道設計在角度增加的同時，毛細力所提供的傳輸現象已經無法使工作流體佈滿整個流道，這也代表了在此些情形下工作流體無法經由毛細力輸送至加熱蒸發區域，便無法帶走熱源所產生之熱量。如表一所示，在水平測試條件下，工作流體皆可順利傳輸，在角度 45° 情況之下流力直徑大於 222 μm 之尺寸則出現問題，而垂直角度 90° 下流力直徑大於 188 μm 之尺寸亦無法傳輸。

因此，本實驗依照毛細力經由工作流體的表面能來推算，進而經由第二章之理論公式求得毛細壓差如表二，並由毛細壓差(ΔP)與流力直徑(Dh)，假設水的表面張力 σ=0.0728 N/m，並經由實驗拍攝得到接觸角 θ 平均值為 31.5°。

表一 毛細傳輸工作流體在各角度下佈滿流道之情形

流道寬(W) (μm)	流道深(D) (μm)	流力直徑 (μm)	工作角度 0°	工作角度 45°	工作角度 90°
100	100	100	O	O	O
	150	120	O	O	O
	200	133	O	O	O
	250	143	O	O	O
150	100	120	O	O	O
	150	150	O	O	O
	200	171	O	O	O
	250	188	O	O	X
200	100	133	O	O	O
	150	171	O	O	O
	200	200	O	O	X
	250	222	O	X	X
250	100	143	O	O	O
	150	188	O	O	X
	200	222	O	X	X
	250	250	O	X	X

註： O：代表毛細力可令微流道完全佈滿工作流體使之傳送到蒸發區域

X：代表毛細力無法令微流道完全佈滿工作流體使之傳送到蒸發區域

表二 理論計算各流道尺寸設計之毛細力與毛細壓差

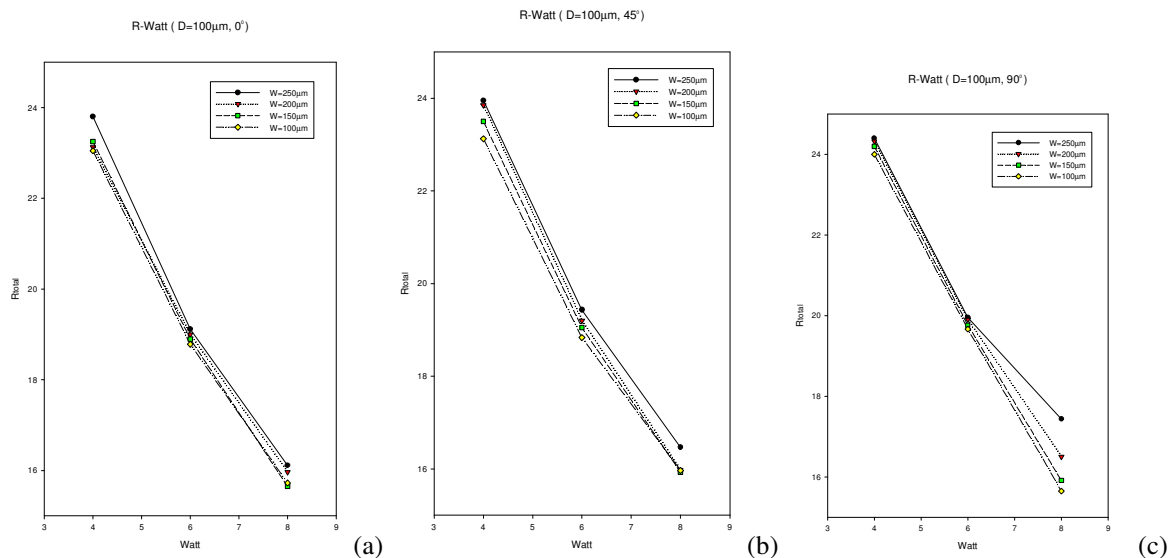
流道寬(W) ( $\mu\text{m}$ )	流道深(D) ( $\mu\text{m}$ )	流力直徑 ( $\mu\text{m}$ )	表面張力 $\sigma$ (N/m)	$\cos\theta$	毛細力 F (N)	毛細壓差 P (N/m <sup>2</sup> )
100	100	100	0.0728	0.8526	2.57E-05	2571
	150	120	0.0728	0.8526	3.21E-05	2142.5
	200	133	0.0728	0.8526	3.86E-05	1928.25
	250	143	0.0728	0.8526	4.50E-05	1799.7
150	100	120	0.0728	0.8526	3.21E-05	2142.5
	150	150	0.0728	0.8526	3.86E-05	1714
	200	171	0.0728	0.8526	4.50E-05	1499.75
	250	188	0.0728	0.8526	5.14E-05	1371.2
200	100	133	0.0728	0.8526	3.86E-05	1928.25
	150	171	0.0728	0.8526	4.50E-05	1499.75
	200	200	0.0728	0.8526	5.14E-05	1285.5
	250	222	0.0728	0.8526	5.78E-05	1156.95
250	100	143	0.0728	0.8526	4.50E-05	1799.7
	150	188	0.0728	0.8526	5.14E-05	1371.2
	200	222	0.0728	0.8526	5.78E-05	1156.95
	250	250	0.0728	0.8526	6.43E-05	1028.4

#### 4-2 加熱測試實驗結果

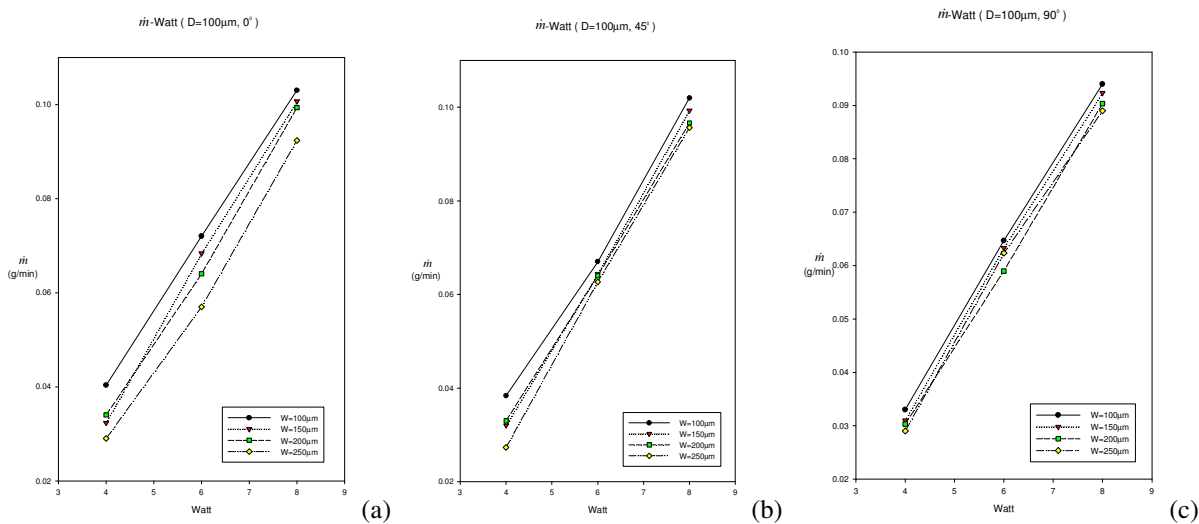
在加熱過程當中本實驗可明顯發現無論是整體熱阻差異，蒸發率的比較或是工作角度改變之影響，著實與流力直徑相關；可以經由實驗數據如附錄所示，無論尺寸設計如何改變，造成此些結果的變因都在於流力直徑的大小，也同時決定了數據結論的趨勢，可以從本節下列的圖例來探討。

不同流道寬度對應整體熱阻與蒸發率之差異在比較各工作角度下，流道尺寸設計之差異如圖五所示，在流道深度同為  $100\ \mu\text{m}$ ，四種流道寬度為  $100\ \mu\text{m}$ ， $150\ \mu\text{m}$ ， $200\ \mu\text{m}$ ， $250\ \mu\text{m}$  的微流道試片分別對應(a)  $0^\circ$ ，(b)  $45^\circ$ ，(c)  $90^\circ$  三種工作角度下，表示出整體熱阻與加熱功率的關係曲線；同時，在圖六是在與圖五相同的條件下來比較蒸發率與加熱功率的關係曲線。其中，由本實驗結果可以發現，在同樣的流道深度尺寸條件下，越小的流道寬度設計(流力直徑越小)會造成整體熱阻的值越低，而蒸發率則是越大；而從加熱功率的瓦特數上升也同樣發現到熱阻隨之降低，而蒸發率隨之升高的相同趨勢。

同樣的趨勢我們可以再推廣到其他深度尺寸下的結論，都同樣顯示出熱阻值的降低與蒸發率的提高都決定於流道尺寸的減少及加熱功率數的增加。



圖五 流道深度為 100µm 整體熱阻與加熱功率之關係  
 (a)水平角度 (b)角度 45° (c)角度 90°



圖六 流道深度為 100µm 蒸發率與加熱功率之關係  
 (a) 水平角度 (b)角度 45° (c)角度 90°

### 4-3 結論與探討

從本章 4-2 節之實驗圖表中可發現，雖然熱阻值與蒸發率的曲線走勢會隨著流徑直徑與加熱功率來變化，但其中仍存在著少數脫離趨勢的數值，然而造成這些落差的原因可以歸類為下列幾點：

- (1) 微流道之製作程序中的參數控制，使得蝕刻表面些微的差異造成工作流體輸送時會有所變化。
- (2) 在試片固定於加熱裝置後，三軸方向的水平是否確實掌握以減少誤差。



- (3) 試片的潔淨過程或是工作流體純水中是否有殘留顆粒或物質停滯在流道內部，造成工作流體無法順利通過每條微流道。
- (4) 環境溫度與相對溼度的控制是否得宜。

上述四點是影響本實驗進行最重要的控制因子，因此在實驗的準備、架設與進行時均需格外注意；其中，工作流體能否確實在每一試片當中佈滿所有之微流道，使傳輸機制發揮最大效能對於實驗的結果影響甚鉅，在測試的過程中的發現，微流道試片在進行實驗前的預濕動作對於毛細作動相當重要，然而在較高功率測試時，必定先使微流道內先佈滿工作流體，此一步驟可避免燒乾(dry-out)現象發生；另一方面，在進行加熱測試的同時，保持試片的水平與平衡是相當重要的，因為重力對於微流道之影響會造成試片當中工作流體的整體傳輸變動，而試片的清潔過程與測試環境更是決定試片內所有微流道能否全部作動的關鍵，倘若有僅數條微流道未作動或是傳輸不連續都會造成整體熱阻的上升與蒸發量的下降，使之效能減弱無法如預期降低熱源溫度，甚至是無法達到穩態平衡。

## 伍、參考文獻

1. D. B. Tuckermann and R. F. W. Pease, "High Performance Heat Sinking for VLSI," IEEE Electron Device Lett., EDL-2, pp. 126-129, 1981.
2. G. R. Stroes, T. J. Rohloff, and I. Catton, "An Experimental Study of the Capillary Forces in Rectangular Versus Triangular Channels," Proceedings of the 28th National Heat Transfer Conference, HTD-Vol. 200, ASME, pp. 1-7, 1992.
3. X. F. Peng and G. P. Peterson, "Convective Heat Transfer and Flow Friction for Water Flow in Microchannel Structures," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 39, No. 12, pp. 2599-2608, 1996.
4. Q. Liao and T.S. Zhao, "Evaporative Heat Transfer in a Capillary Structure Heated by a Grooved Block," J. of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 13, No. 1, 1999.
5. Y. P. Peles, and S. Haber, "A Steady One Dimensional Model for Boiling Two Phase Flow in a Triangular Microchannel," Int. J. Multiphase Flow, Vol. 26, pp. 1095-1115, 2000.
6. C. P. Tso and S. P. Mahulikar, "Combined Evaporating Meniscus - driven Convection and Radiation in Annular Microchannels for Electronics Cooling Application," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 43, pp. 1007-1023, 2000.
7. M. Puncochar, J. Drahos, "Limits of applicability of capillary model for pressure drop correlation," Chemical Engineering Science Vol. 55, pp. 3951-3954, 2000.
8. D. S. Kim, K. C. Lee, T. H. Kwon and S. S. Lee, "Micro-channel Filling Flow Considering Surface Tension Effect," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 12, pp. 236-246, 2002.
9. J. Judy, D. Maynes and B. W. Webb, "Characterization of frictional pressure drop for liquid flows through microchannels," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45, pp. 3477-3489, 2002.
10. L. J. Yang, T. J. Yao, Y. C. Tai, "The Marching Velocity of the Capillary Meniscus in a Micro-channel," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 14, pp. 220-225, 2004.

11. K. Park and K. S. Lee, "Flow and Heat Transfer Characteristics of the Evaporating Extended Meniscus in a Micro-capillary Channel," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 4587-4594, 2003.
12. R. H. Nilson, S. K. Griffiths, S. W. Tchikanda and M. J. Martinez, "Axially Tapered Microchannels of High Aspect Ratio for Evaporative Cooling Devices," *Journal of Heat Transfer*, ASME Vol. 126, pp. 453-462, 2004.