

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

IGBT 的微流道散熱分析與最佳化設計

An analysis on Micro-Channel Cooling and Optimal

Design for IGBT



研究生：陳駿傑

指導教授：林振德

中華民國一百年七月

IGBT 的微流道散熱分析與最佳化設計

An analysis on Micro-Channel Cooling and Optimal Design for Insulate
Gate Bipolar Transistors (IGBT)

研 究 生：陳駿傑

Student : Chun-Chieh Chen

指 導 教 授：林振德

Advisor : Prof. Jenn-Der Lin



A Thesis

Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

in

Mechanical Engineering

July 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國壹佰年七月

IGBT 的微流道散熱分析與最佳化設計

研究生：陳駿傑

指導教授：林振德

摘要

本研究針對絕緣柵雙極電晶體 (Insulate Gate Bipolar Transistors, IGBT)，探討單層、雙層及三層的流道設計，在不同雷諾數下，改變流道高度、流道間距及流道寬度等對於微流道散熱效能的影響，以求得 IGBT 散熱的最佳化設計。在實際微流道散熱系統中，其入口端與出口端常有分流及匯流之流道結構，此處也是整體系統中最易形成氣泡的部分；若氣泡流入散熱流道中，將導致熱阻大幅上升而使得散熱效能下降。為避免此一情況發生，本文研究設計三種不同匯流角度之流道進行實驗研究，並比對出較不易產生氣泡之流道結構。研究結果顯示，多層微流道結構比起傳統單層微流道熱沉，其熱阻將至少降低 15%；三層結構微流道之流道寬度與間距比 (γ) 為 0.8 時熱阻值為最低；晶片配置過於密集將降低散熱效率；交匯流道之匯流角度為 240° 時將包覆較大的氣泡。

關鍵字：絕緣柵雙極電晶體、散熱效能、微流道熱沉

An analysis on Micro-Channel Cooling and Optimal Design for Insulate Gate Bipolar Transistors (IGBT)

Student: Chun-Chieh Chen

Advisor: Pro. Jenn-Der Lin

Abstract

This study purposes to investigate in detail the heat transfer at various values of Reynolds number, flow channel height and width, and channel spacing of double-tier and triple-tier flow channels, in order to achieve optimal design for heat dissipation of Insulate Gate Bipolar Transistors (IGBT). In practice, the divergence and/or convergence of fluid flows may occur in the micro-fluidic system, especially at the entrance and outlet of the channel structure of the systems, and the bubbles may be formed which will subsequently lead to significant decrease in the heat dissipation. In this study, we also address the issue of the bubbles formation in the micro-fluidic system, so that we may prevent the bubbles formation in the optimal design of heat dissipation for IGBT. We design the experiments in three different angles of convergence cannels and visualize the formation of the bubbles in channel structure. The results show that the multi-layer micro-fluidic structure, compared to the traditional single-layer micro-channel heat sink, may reduce the thermal resistance by at least 15%. At the ratio (γ) of three-tier structure of micro-flow channel width and spacing equal to 0.8; the heat resistance is the lowest. While the chips are too dense, the heat transfer rate would be depressed. The experimental results also show that at the convergence angle of the flow channel at the intersection equal to 240° , the volume of the bubble formed in the channel structure would be the largest.

Key Words: Insulate Gate Bipolar Transistors 、 heat dissipation 、 Micro-channel heat sink,

致謝

首先我要感謝我的家人，感謝父母的支持以及鼓勵，讓我能夠毫無後顧之憂的完成我的碩士學業，感謝指導老師 林振德教授在這三年間對我的指導，給予我的研究相當多建議與指導讓我能夠完成這篇碩士論文，同時也感謝口試委員成功大學大機械所 吳志陽教授、工研院機械所 蔡禎輝副所長和中華大學機械所 許隆結副教授提供許多寶貴的建議，讓我的論文能更加趨近完善，特別感謝涂文福學長以及賴志銘學長的勉勵與指導，讓我在學術知識獲益良多。

在這三年來感謝藍順隆、黃泰碩和黃文錚等諸位學長的照顧與經驗的傳承，讓我的研究生生活過得非常充實，也多謝凱涵學弟在諸多事物上的協助，另外多謝仕庭、勇州兩人在我生活上遇到困難時給予協助，最後也感謝交大提供如此優良的環境提供我學習。

目錄

摘要.....	I
英文摘要.....	II
致謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	V
圖目錄.....	VIII
符號表.....	XII
第一章 序論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 研究背景.....	3
1-2-1 IGBT 模組簡介.....	3
1-2-2 IGBT 散熱型式.....	4
1-2-3 微流道熱沉在 IGBT 的應用.....	5
1-3 研究目的.....	7
第二章 物理模式與數學模式.....	9
2-1 物理模式.....	9
2-2 統御方程式.....	9
2-3 邊界條件.....	11



2-3-1 動量方程式之邊界條件.....	11
2-3-2 能量方程式之邊界條件.....	11
2-4 熱阻定義.....	12
2-5 統御方程式之無因次化以及各無因次參數.....	12
第三章 數值模擬.....	15
3-1 前處理.....	15
3-2 求解分析.....	15
3-2-1 離散方程式.....	16
3-2-2 SIMPLEC 演算法.....	17
3-3 後處理.....	18
第四章 微流道散熱分析結果與討論.....	19
4-1 軟體數值碼的驗證與網格測試.....	19
4-2 不同高度之流道對散熱之影響.....	20
4-3 單層、雙層以及三層流道對散熱之影響.....	21
4-4 不同流道間距對散熱之影響.....	22
4-5 IGBT 晶片配置對散熱之影響.....	23
4-6 微流道熱沉材料與流體黏滯性對散熱之影響.....	25
第五章 微流道中氣泡形成之實驗研究.....	27
5-1 實驗方法.....	27

5-2 匯流角度對氣泡包覆程度之影響.....	28
5-3 流體黏滯性對氣泡包覆程度之影響.....	29
第六章 結論與未來展望.....	30
6-1 結論.....	30
6-2 未來展望.....	31
參考文獻.....	32



表目錄

表 2-1 IGBT 模組各部元件尺寸.....	36
表 2-2 各材料性質.....	36
表 4-1 單層流道幾何圖形與尺寸.....	37
表 4-2 雙層流道幾何圖形與尺寸.....	37
表 4-3 三層流道幾何圖形與尺寸.....	38
表 4-4 網格測試.....	38
表 4-5 網格測試.....	39
表 4-6 微流道熱沉材料性質.....	39



圖目錄

圖 1-1 IGBT 基本結構.....	40
圖 1-2 IGBT 等效電路圖.....	40
圖 2-1 IGBT 微流道熱沉之結構剖面示意圖.....	41
圖 2-2 模擬結構圖.....	41
圖 3-1 模擬分析流程.....	42
圖 3-2 CFD-RC 求解流程.....	43
圖 4-1 文獻[19]比對之幾何圖形與尺寸.....	44
圖 4-2 文獻[19]Wall A 與 CFD-RC 之溫度比較.....	44
圖 4-3 文獻[19]Wall a 與 CFD-RC 之溫度比較.....	45
圖 4-4 文獻[19]Wall c 與 CFD-RC 之溫度比較.....	45
圖 4-5 文獻[19]Wall C 與 CFD-RC 之溫度比較.....	46
圖 4-6 相同流量下不同流道高度與不同流速對散熱效能影響之比較.....	46
圖 4-7 改變微流道高度對熱傳之影響.....	47
圖 4-8 不同高度微流道之雷諾數與摩擦因子變化關係.....	47
圖 4-9 比較單層與雙層及三層流道在不同雷諾數下之熱阻變化 ($H_{ch}=300 \mu m$).....	48

圖 4-10 比較單層與雙層及三層流道在不同雷諾數下之熱阻變化 ($H_{ch}=500 \mu m$).....	48
圖 4-11 比較單層與雙層及三層流道在不同雷諾數下之熱阻變化 ($H_{ch}=700 \mu m$).....	49
圖 4-12 不同 γ 對熱阻影響之比較($H_{ch}=300 \mu m$).....	49
圖 4-13 不同 γ 對熱阻影響之比較($H_{ch}=500 \mu m$).....	50
圖 4-14 不同 γ 對熱阻影響之比較($H_{ch}=700 \mu m$).....	50
圖 4-15 IGBT 晶片間距對熱阻之影響.....	51
圖 4-16 IGBT 晶片三層流道之溫度分佈($d^*=7.14, H_{ch}=700 \mu m$)..	51
圖 4-17 IGBT 晶片三層流道之溫度分佈($d^*=54.2, H_{ch}=700 \mu m$)..	52
圖 4-18 IGBT 晶片三層流道之溫度分佈($d^*=75.7, H_{ch}=700 \mu m$)..	52
圖 4-19 IGBT 晶片三層流道之溫度分佈($d^*=93.8, H_{ch}=700 \mu m$)..	53
圖 4-20 微流道熱沉結構寬度對熱阻變化之影響.....	53
圖 4-21 各種微流道熱沉材料對熱阻變化之影響.....	54
圖 4-22 不同黏度之流體對熱阻變化之影響.....	54
圖 5-1 實驗架構示意圖.....	55
圖 5-2 可程式控制注射幫浦.....	55
圖 5-3 顯微實驗平台及高速攝影機.....	56
圖 5-4 流量 0.08 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 120°).....	56

圖 5-5 流量 0.16 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 120°).....	57
圖 5-6 流量 0.32 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 120°).....	57
圖 5-7 流量 0.08 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 180°).....	58
圖 5-8 流量 0.16 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 180°).....	58
圖 5-9 流量 0.32 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 180°).....	59
圖 5-10 流量 0.08 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 240°).....	59
圖 5-11 流量 0.16 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 240°).....	60
圖 5-12 流量 0.32 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 240°).....	60
圖 5-13 三種濃度蔗糖溶液對 PDMS 之靜態接觸角.....	61
圖 5-14 流體之蔗糖濃度 10%在匯流角度 120° 之氣泡包覆過程 (流量 0.32 ml/min).....	62
圖 5-15 流體之蔗糖濃度 10%在匯流角度 180° 之氣泡包覆過程 (流量 0.32 ml/min).....	62
圖 5-16 流體之蔗糖濃度 10%在匯流角度 240° 之氣泡包覆過程 (流量 0.32 ml/min).....	63
圖 5-17 流體之蔗糖濃度 50%在匯流角度 120° 之氣泡包覆過程 (流量 0.32 ml/min).....	63
圖 5-18 流體之蔗糖濃度 50%在匯流角度 120° 之氣泡包覆過程 (流量 0.32 ml/min).....	64

圖 5-19 流體之蔗糖濃度 50%在匯流角度 120° 之氣泡包覆過程

(流量 0.32 ml/min)..... 64



符號表

A	面積
C_p	等壓比熱
D_h	水力直徑
d	上下層流道間距
F	力之源項
g	物體重力
h	焓
H	高度
I	單位張量
k	熱傳導係數
\dot{m}	質量流率
P	壓力
Q	熱量
Re	雷諾數
R_{th}	熱阻
S_h	熱源
T	溫度
u	x 方向速度



v	y 方向速度
w	z 方向速度
W	寬度
γ	流道間距與流道寬度比
μ	黏滯係數
ρ	密度
$\bar{\tau}$	應力張量
Φ	任意相關變數
Φ_{nb}	鄰近格點的任意相關變數
上標	
*	預測值
'	修正值
下標	
ch	流道
f	流體
in	入口
out	出口



s 固體

Γ 界面

無因次參數

d^* 無因次 IGBT Chips 間距

f 摩擦因子

k^* 無因次熱傳導係數

Pe 佩克萊特數

Re 雷諾數

R_{th}^* 無因次熱阻

W^* 無因次微流道熱沉寬度

γ 微流道之間距與寬度比



第一章 序論

1-1 前言

絕緣閘雙極性電晶體(Insulate Gate Bipolar Transistors, IGBT)是 1980 年代中期所發展起來的一種新型的複合元件，它綜合了金氧半場效電晶體(Metal Oxide Semiconductor Field Transistor, MOSFET)與雙極性電晶體(Bipolar Junction Transistor, BJT)的優點，故具有高輸入阻抗、容易驅動、切換速度快、低導通電壓降、及耐高壓與大電流等特性。目前其電壓與電流發展的等級已經可以達到 6500V/2400A，開關切換時間 40ns，工作頻率 40kHz，且仍在持續改進中[1]。這些優越的特性使其成為大功率電力電子裝置的理想功率元件，在實際應用上，IGBT 可應用於不斷電系統 (UPS)、空調系統的馬達控制、工廠自動化及機器人；如果元件的功率再大幅的提高，將可應用於電動車及捷運電聯車的控制使用上。然而，隨著功率的提升，過熱問題也越來越嚴重，於是造成了產品的可靠度降低以及壽命的減少，所以散熱問題也成為功率元件的一大挑戰。根據美國 1995 年所發表的研究報告中指出[2]，造成超過 50%的電子元件損壞或缺陷的主要原因來自於熱的問題。許多相關熱所造成損壞與缺陷的文獻，於各知名的期刊以及國際研討會之文獻之中歷歷可見[3][4]。

微機電系統(micro-electro-mechanical systems, MEMS)在歐洲被稱為微系統科技 (micro system technology)，其發展溯自著名的費曼博士(1965 年諾貝爾物理獎得主)在 1959 年美國物理學年會上發表「There' s plenty of room at the bottom」的專題演講，首先提到把機器微型化的概念，而「微機器(micromachines)」此一名詞在 1978 年首次正式出現在國際學術研討會的名稱中；接著彼德森博士在 1982 年發表了著名的「以矽為機械材料(silicon as a mechanical material)」研究報告，1989 年猶他州鹽湖城(Salt Lake City)的一場研討會(Micro-Tele-Operated Robotics Workshop)中，更具體提出「微機電系統」此一名稱。微機電系統是一種結合機械、電子、材料、控制、物理、生醫、化學、光學等多重技術整合的研發領域，其特色為兼具微小化，可量產之新製造技術，可以有效協助製造業改善製程，使產品提品質，性能以及可靠度。

就微流體系統而言(Micro-Fluidics system)，以微流道 (micro-channel) 做為新型的熱沉 (heat sink) 與熱管 (heat pipe) 之構型，已有相當多的研究成果。近幾年許多文獻指出，層流流體在微流道熱沉中的熱傳效果極佳，而相變化所帶走的熱量更高，足以應付高功率電子元件的散熱問題。

1-2 研究背景

1-2-1 IGBT 模組簡介

絕緣閘雙極性電晶體(IGBT)是一種場控元件，圖 1-1 及 1-2 分別是 IGBT 的基本結構圖之案例及等效電路，由圖 1-1 可以看出 IGBT 的結構為四層 p-n-p-n，它與傳統 n-p-n 電晶體不同之處，在於導通時如同閘流導通機制，少數載子由 p+ 磊晶層注入 n- 磊晶層，幫助閘流體快速導通，而 n-p-n 沒有此機制，因此會有相當大的損耗在 n- 區域；它的導通和關斷由閘極 (G) 與射極 (E) 間的電壓 (V_{GE}) 來決定，當 V_{GE} 為正且大於開啟電壓 V_{th} 時，在 p 層區域內聚集許多自由電子形成反向層，使得閘極和射極之間形成一條通道，於是電子流從 IGBT 的集極 p+ 層流經 n+ 層到達射極，進而使 IGBT 導通。此時，從 P+ 區注入 n- 區的電洞對 n- 區進行電導控制，減小 n- 區的電阻 R_N ，使高耐壓的 IGBT 也具有很小的導通狀態壓降。當閘射極間不加信號或加反向電壓時，此時 p 層區域內的反向層便會消失，而集極到射極的通道也隨之消失，pnp 電晶體的集極電流被切斷，IGBT 即關斷。

IGBT 的元件結構中的 n- 層，其載子濃度關係著 IGBT 導通時的電壓降，同時也決定了 IGBT 元件耐壓的大小，所以當 n- 層越薄或是載子濃度越高時，便造成 IGBT 的耐壓降低，因此 IGBT 元件耐壓要提高時，就必須提高 n- 層的厚度或是降低該層的載子濃度。

1-2-2 IGBT 散熱型式

目前 IGBT 的散熱型式主流大約可歸納為兩種，一種是 (1) 熱對流，其機制是將冷卻液以強制對流的方式直接將熱源的熱帶走；而另一種則是 (2) 沸騰熱傳，利用冷卻液的相變化過程將熱量吸收帶走。

(1) 熱對流

一般功率元件散熱最常採用的方式，便是加裝微流道熱沉，最早提出結合微機電系統與微流道熱沉技術概念的是 1981 年的 Tuckerman 和 Pease[5]，他們探討微流道熱沉的熱傳性能，他們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形微流道，進行流體與熱傳特性之理論分析與實驗驗證，結果顯示出其最大熱通量可以達到 790 W/cm^2 ，可應用於高功率密度的超大型積體電路 (VLSI) 上，這一類型散熱方式的優勢在於其結構簡易，設計者可以針對自己的需求來定義熱沉的幾何參數，然而，再考量到功率系統整體效率以及空間問題，其附屬的散熱系統的整體尺寸都會被侷限，因此，如何在有限的空間中作出最佳的散熱效率變是微流道熱沉的一大課題。

(2) 沸騰熱傳

熱管是現今沸騰熱傳散熱技術應用的代表，其優勢在於冷卻液在相變化過程中能吸收大量的熱量，而毛細現象的應用，使得

熱管的冷卻液不需驅動源，針對 IGBT 應用，Schulz-Harder 等人 [6]，更提出將熱管的結構建置在 IGBT 的鍍銅陶瓷基板 (Direct Bond Copper, DBC) 之中；另外，沸騰熱傳除了在熱管的應用之外，亦有直接將熱源浸泡在冷卻液之中，Kima 等人 [7] 便以 FC-72 作為冷卻液，以探討其冷卻效能；然而，沸騰熱傳亦有其缺點所在，其中熱管便有所謂的導熱極限，當熱通量增加到一定的極限時，熱管內部流場會無法順利流動，致無法正常運作，而浸泡式的散熱方式有介電方面的問題，因此，在冷卻液方面有所限制。

1-2-3 微流道熱沉在 IGBT 的應用

Hocine 等人 [8] 提到現今 IGBT 的熱通量，以每一晶片為單位可以達到 $1\sim 3 \text{ W/mm}^2$ ，然而，隨著近幾年微機電技術昌盛，散熱的熱通量要超過 4 W/mm^2 並非難事，1997 年 Meysenc 等人 [9] 便對於高熱通量 IGBT 的微流道熱沉散熱進行研究，他們比較矩形流道的各種截面高寬比，其結果顯示高寬比越大散熱效能也越好。

Gillot 等人 [10] 在 1999 年針對單相以及雙相流的冷卻流體，其對於 IGBT 的散熱影響進行分析，他們分別使用水以及 FC72 作為冷卻流體，各自對其單相及雙相的散熱性能做出比較，發現雙相的 FC72 擁有較佳的散熱效果。

除了單、雙相流的比較之外，Gillot 等人 [11]以及 Steiner 和 Sittig[12]也各自針對雙側微流道熱沉應用於 IGBT 的散熱效能加以研究，其結果顯示雙側微流道熱沉比起單側微流道熱沉，確實擁有較佳的散熱效果，其散熱量比起單層提升了 76%，而晶片的溫度亦降低了 30%。

以上提到的都是平行型流道，為了增加冷卻液與散熱面的接觸面積以提升散熱效果，Yun 等人[13]與 Leet 等人[14]分別將流道設計成蛇型流道，皆有不錯的散熱效果。

另外 Vafai and Zhu[15]兩位學者將微流道設計為上下兩層，並採用上下對流方式導入流體，以觀測上下層流體在相同截面下之溫度分佈，並且與單層微流道之熱阻比較，其結果顯示雙層微流道確實有效的提升散熱的效果。

Li 和 Peterson[16]兩位學者則是在有限的體積之內，藉著改變微流道寬度與其間距之間的比例，比較在相同微流道數量下，該比例對散熱效應之影響，該研究結果顯示，增加一定比例的流道寬度，可以有效的降低熱阻提升微流道的散熱效能，但是，當流道寬度的比例增加到一定程度後會產生反曲點，使得微流道的熱阻開始上升，致使其散熱能力下降。

1-3 研究目的

發熱量與散熱為影響電子元件的可靠度及壽命的主要因素，根據「10°C理論」[17]，當電子元件每升高10°C，其壽命則相對減少一半，可見溫度對IC的重要性，這也是熱管理(Thermal Management)技術日益受到重視的原因。所謂「熱管理」指的是電子元件中熱的產生與熱控制的一門技術，它主要的目的是使電子元件晶片的接合處溫度(Junction Temperature)維持在容許的範圍內，使得電子元件的可靠度與壽命提升，因此，電子元件熱控制是相當重要的一大課題。電子產品的熱生成主要是由於晶片中百萬個電晶體運作時所產生的，這些問題雖然可由降低電壓的方式來減少發熱量，但是仍然不能解決因功率提升以及體積縮小所產生發熱密度增加的問題。

在之前的文獻之中對於微流道熱傳的相關研究，其研究範圍均針對相同流道形狀進行探討，並未對不同流道間距加以比對熱傳現象，因此本文研究將應用張智通學長[18]的微流道之幾何截面設計，並將其延伸至本研究之完整的IGBT與微流道熱沉之散熱結構，以尋求完整分析各項參數及操作條件對IGBT散熱之影響，並尋求一最佳化設計，在此我們針對理論分析之參數，定義實驗模擬中的固定參數以及操作參數如下：

固定參數為(1)IGBT晶片之發熱量，(2)IGBT模組之材料參數，(3)

流道排列方式，以及(4)流道寬度。

操作參數有(1)流體之物理參數，(2)微流道熱沉之材料參數，(3)流道高度，(4)流道間距，(5)流體流量，(6)流道層數，(7)IGBT 模組與微流道熱沉之結構寬度，以及(8)IGBT 晶片之間距。



第二章 物理模式與數學模式

2-1 物理模式

本研究主要針對不同幾何結構之微流道對 IGBT 散熱之影響，探討在不同流量之下，IGBT 的溫度以及熱阻之變化情形；模擬之結構圖如圖 2-1 所示，結構尺寸如表 2-1 所示。最上層的四塊元件中，靠近結構兩端的是 IGBT 晶片，靠近結構中心的兩塊元件為二極體，其材料皆為矽(silicon)，元件下方為基板的多層結構，由上至下依序為銅(copper)、氮化鋁(AlN)、銅(copper)，基板與各晶片之間以焊料(solder)黏著，基板下方再以焊料黏著微流道熱沉，其材料則為銅(copper)，工作流體為水，模擬中的各個材料性質如表 2-2 所示。

2-2 統御方程式

對於本研究欲模擬結構之物理模式，其統御方程式如下所示：

連續方程式：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (2-1)$$

動量方程式：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot \left(\frac{\tau}{\rho} \right) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2-2)$$

能量方程式：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho h \vec{V}) = \nabla \cdot [(k + k_t) \nabla T] + S_h \quad (2-3)$$

其中 g 表物體重力 (Body Force)， p 表靜態壓力 (Static Pressure)， $\bar{\tau}$ 表應力張量 (Stress Tensor)， $\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} I \right]$ ， I 表單位張量 (Unit Tensor)， F 表力之源項 (Source Term)， S_h 表熱源， h 表焓。

本研究中，我們考慮穩態狀態，流場為不可壓縮流場並忽略重力，因熱源向置於邊界條件之完全發展流，統御方程式可以改為：

連續方程式：



$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2-4)$$

動量方程式：

$$\rho \nabla \cdot (\vec{V} \vec{V}) = -\frac{dP}{dx} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2-5)$$

能量方程式：

$$\rho \nabla \cdot (h \vec{V}) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (2-6)$$

對於固體區內，因無流動現象，統御方程式為：

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (2-7)$$

2-3 邊界條件

本研究模擬之作標原點如圖 2-1 所示，其中在 Y 大於零的區間為 IGBT 模組， Y 小於零則是微流道熱沉，流場主流方向為 X 。

2-3-1 動量方程式之邊界條件

在流道壁面我們假定為無滑移條件，因此 $V = 0$

流場入口, $x=0$, $u = u_{in}$

$$v = 0$$

$$w = 0$$

其中 u 、 v 、 w 表 x 、 y 、 z 方向速度； T_{in} 表入口溫度

流場出口, $x=L_x$, $\frac{\partial u}{\partial x} = 0$

$$P = 1 \text{ 大氣壓}$$

2-3-2 能量方程式之邊界條件

$x=0$, 且 y, z 在流道區域, $T = T_{in}$,

$$\text{流體入口外之固體邊界皆為絕熱 } -k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0$$

$x=L_x$, 且 y, z 在流道區域, $k_f \frac{\partial T_f}{\partial x} = 0$,

$$\text{流體出口外之固體邊界皆為絕熱 } -k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} = 0$$

$$y=0, \quad -k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = 0, \quad ,$$

$$y=L_y, \quad \text{且 } x, z \text{ 在 IGBT 晶片區域, } k_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = q_0$$

$$z=0, \quad -k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = 0, \quad ,$$

$$z=L_z, \quad -k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} = 0$$

在固體與液體之介面處其物理量為連續，即溫度與能量連續，

其數學式表示為：

$$\begin{aligned} T_{s,\Gamma} &= T_{f,\Gamma} \\ -k_s \frac{\partial T_s}{\partial n} \Big|_{\Gamma} &= -k_f \frac{\partial T_f}{\partial n} \Big|_{\Gamma} \end{aligned} \quad (2-8)$$

上述式中之下標：s 表固體，f 表流體，T 表溫度， Γ 表界面。

2-4 熱阻 (Thermal Resistance, R_{th}) 定義

本研究之熱源位於兩塊 IGBT 晶片之上表面，從整體結構來看屬於非均勻熱源分佈，在探討散熱效益時，若以溫度場來探討將過於籠統，因此，將採用熱阻之形式來討論，其定義如下：

$$R_{th} = \frac{T_{\max} - T_{in}}{Q} \quad (2-9)$$

其中 T_{\max} 為 IGBT 晶片上之最高溫度， T_{in} 為微流道之入口溫度， Q 則為 IGBT 晶片之發熱量。

2-5 統御方程式之無因次化以及各無因次參數

為了有效整合模擬結果，並且尋求影響散熱效能之主要變量，

在此，我們將以下無因次變數帶入統御方程式以進行無因次化：

$$V^* = \frac{V}{u_{in}}, \quad x^* = \frac{x}{D_h}, \quad y^* = \frac{y}{D_h}, \quad z^* = \frac{z}{D_h},$$

$$\nabla^* = D_h \nabla, \quad \nabla^{2*} = D_h^2 \nabla^2, \quad T^* = \frac{T - T_{in}}{T_w - T_{in}}, \quad k^* = \frac{k}{k_f}.$$

無因次化連續方程式：

$$\nabla^* \cdot \vec{V}^* = 0 \quad (2-10)$$

無因次化動量方程式：

$$\vec{V}^* \cdot (\nabla^* \cdot \vec{V}^*) = -2f + \frac{1}{\text{Re}_{D_h}} \nabla^{2*} \vec{V}^* \quad (2-11)$$

無因次化邊界條件：

$$\begin{aligned} \text{微流道入口處, } x^* = 0, \quad u^* = 1 \\ v^* = 0 \\ w^* = 0 \end{aligned}$$

$$\text{微流道出口處, } x^* = \frac{L_x}{D_h}, \quad \frac{\partial u^*}{\partial x^*} = 0$$

流場之無因次化能量方程式：

$$\vec{V}^* \cdot (\nabla^* \cdot T^*) = \frac{1}{\text{Pe}_{D_h}} \nabla^* \cdot (k^* \nabla^* T^*) \quad (2-12)$$

固體之無因次化能量方程式：

$$0 = \nabla^* \cdot (k^* \nabla^* T^*) \quad (2-13)$$

無因次化邊界條件：

$$x^* = 0, \quad T = T_{in} \rightarrow T^* = 0$$

$$y^* = \frac{L_y}{D_h}, \quad -k \frac{\partial T}{\partial y} = q_0 \rightarrow -k^* \frac{\partial T^*}{\partial y^*} = \frac{q_0 D_h}{k_0 (T_w - T_{in})} = q_0^*$$

$$\text{固液交接介面處,} \quad T_{s,\Gamma} = T_{f,\Gamma} \rightarrow T_{s,\Gamma}^* = T_{f,\Gamma}^*$$

$$\left(-k^* \frac{\partial T^*}{\partial n^*} \right)_s = \left(-k^* \frac{\partial T^*}{\partial n^*} \right)_f$$

由無因次化之統御方程式，我們可整理出以下之無因次參數

$$\text{Re}_{D_h} = \frac{\rho u_{in} D_h}{\mu} \quad \text{為雷諾數 (Reynolds number),} \quad (2-14)$$

$$f = \frac{D_h}{2\rho u_{in}^2} \frac{\Delta P}{L_x} \quad \text{為摩擦因子(friction factor),} \quad (2-15)$$

$$\text{Pe}_{D_h} = \frac{u_{in} D_h}{\alpha} = \frac{\rho u_{in} D_h}{\mu} \cdot \frac{\nu}{\alpha} = \text{Re}_{D_h} \cdot \text{Pr} \quad \text{為佩克萊特數(Peclet number).} \quad (2-16)$$

式中 D_h 代表水利直徑，作為本研究之特徵長度，其定義為：

$$D_h = \frac{2(H_{ch} \cdot W_{ch})}{H_{ch} + W_{ch}} \quad (2-17)$$

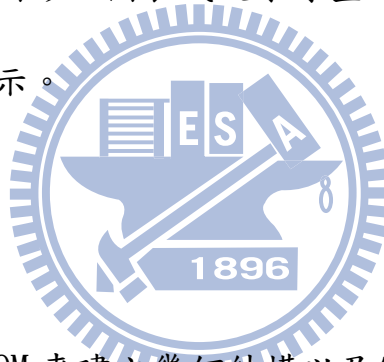
為使模擬之結果較具整合性，故將熱阻進行無因次化：

$$R_{th}^* = \frac{R_{th}}{k_f \cdot D_h} = \frac{T_{\max} - T_{in}}{Q / (k_f \cdot D_h)} \quad (2-18)$$

第三章 數值模擬

本研究採用 CFD-RC 軟體為研究工具，以模擬 IGBT 在微流道熱沉的散熱效應。模擬的架構一般可分為三個流程：即(1)前處理(Pre-Processing)，主要工作為幾何模型的建立以及網格切割；(2)分析求解(Solve)，主要是各個模組的材料性質給定，邊界條件設定，以及分析型態之訂定；(3)後處理(Post-Processing)，主要將分析結果以圖形、圖表或文字等型式表現出來。其整體模擬流程如圖 3-1 所示。

3-1 前處理



CFD-RC 以 GEOM 來建立幾何結構以及網格切割，本研究即以此來建立 IGBT 以及微流道熱沉的幾何模型；在網格切割方面，將晶片溫度作為觀察對象，由於該處之溫度梯度變化最為顯著，因此採用結構性之非均勻網格在靠近晶片上表面，以及流道之固液交界面處加密網格。

3-2 求解分析

CFD-RC 的求解步驟是，運用對控制體積積分的技巧，先將統

御方程式離散成代數方程式，也就是一般所稱的離散方程式 (Discretization Equations)，然後以 SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation Consistent) 演算法求得其正確壓力、速度場與溫度場，計算過程如圖 3-2 所示。較詳細的求解方式將在下面各節討論。

3-2-1 離散方程式

離散方程式是由統御方程式對每一個控制體積做積分所求得。

以穩態的統御方程式為例，對一任意的控制體積 V 積分的型式如下：

$$\oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_{\phi} \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_{\phi} dV \quad (3-1)$$

其中 ϕ 表任意相關變數， \vec{v} 表速度向量， \vec{A} 表面積向量以及 Γ_{ϕ} 表擴散係數， S_{ϕ} 表源項。

式(3-1)可運用到計算區域的每一個控制體積。以二維三角格點為例，式(3-1)可離散成下式：

$$\sum_f^{N_{faces}} \rho \vec{v}_f \phi_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_{\phi} (\nabla \phi)_n \cdot \vec{A}_f + S_{\phi} V \quad (3-2)$$

其中 N_{faces} 表格點的面數， ϕ_f 表透過面 f 轉換的 ϕ 值， $\rho \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$ 表每個面的質量通量， \vec{A}_f 表面 f 的面積向量， $(\nabla \phi)_n$ 為 $\nabla \phi$ 於面 f 的垂直方向分量。

ϕ 值是基於離散後所獲得格點中心的值，對於(3-2)式 ϕ_f 值需進一步根據格點中心的值，運用上風法(upwind scheme)作修改。

一般而言，式(3-2)仍然可能還是非線性，因此進一步線性化的形式可表示為：

$$a_p \phi = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (3-3)$$

其中下標 nb 指的是鄰近的格點， a_p 及 a_{nb} 是對於 ϕ 與 ϕ_{nb} 線性化的係數，b 為源項。

3-2-2 SIMPLEC Algorithm

壓力與速度修正主要是使在迭代的過程中，能滿足連續與動量方程式，計算出較符合實際狀況的值，其修正過程如下：

1. 首先對 P^* 作預測。
2. 將 P^* 帶入動量方程式求得相關的速度場 u^* 、 v^* 與 w^* 。
3. 求得的 P^* 、 u^* 、 v^* 與 w^* 並不滿足連續方程式，因此運用連續方程式建構壓力修正 P' ，相關的速度修正 u' 、 v' 、 w' 進而獲得，因此可得到正確的壓力與速度場，如下所示：

$$P = P^* + P' \quad (3-4)$$

$$u = u^* + u' \quad (3-5)$$

$$v = v^* + v' \quad (3-6)$$

$$w=w^*+w' \quad (3-7)$$

4. 假如計算出的值會因流體性質與源項影響流場，必須先解其他的變數(如溫度、濃度、紊流量)，若流場不被影響，其餘變數值待其收斂後再進行求解。
5. 將計算出的壓力 P 當為新的預測值，重複步驟 2 到 4 直到其解收斂為止。

3-3 後處理

利用 CFD-RC 中的 VIEW 來查看求解結束後 IGBT 晶片表面的溫度分布和平均溫度，以及微流道熱沉之入出口壓力。



第四章 微流道散熱分析結果與討論

本研究採用水為工作流體，主要探討微流道在不同微流道高度，以及在相同的流道高度下，比較單層、雙層和三層的流道對 IGBT 的散熱效果，此外，改變流道間距以比較其差異性，其幾何圖形與尺寸如表 4-1 至表 4-3 所示。

4-1 軟體數值碼的驗證與網格測試

為了判定 CFD-ACE(U) 能運用於微米等級模擬與測試如何分布格點的疏密，以捕捉正確的物理現象，本文引用文獻[19]的例子加以比較，其幾何圖形與尺寸如圖 4-1 所示。在此之比對，主要是針對文獻所求得之各面的溫度加以比較，運用格點數為 $700*10*85(x, y, z)$ 。由圖 4-2 至 4-5 的溫度場分佈，我們可以看出在相同位置上，溫度的誤差均位於 0.1% 以下，由此可證明，CFD-ACE(U) 能運用於微米等級模擬。此外，對於微流道熱沉的物理現象的捕捉相當正確。

此研究在單層流道時，其網格測試以總網格數 1,573,120 為基準，分別針對 1,163,360 以及 1,655,072 來做比較，比較物理之參數分別為 IGBT 表面溫度、微流道出口平均速度以及微流道入出口壓力差，比較結果分別在表 4-4 及 4-5 中。而根據表中的比較結果顯示，

1,573,120 與 1,163,360 的網格數，其各項比較物理參數，最大誤差達到 14.06%，而在 1,573,120 與 1,655,072 兩者之間的誤差則都小於 0.02%，因此，由該結果顯示 1,573,120 即為本實驗的最佳網格數；上述之網格測試為單層流道的測試結果，本研究另外討論之多層流道，以及流道間距改變之模組，因其模組元件數量以及尺寸改變，在繪製網格時亦作過些許調整，因此，每一組重新繪製之網格都須作網格測試，而其模組之數量眾多，故其測試結果便不在此一一呈現。

4-2 不同高度之流道對散熱之影響

微流道熱沉擁有較佳的散熱效果，已經由許多文獻所證實。本節針對不同高度之矩形流道對散熱的影響加以探討。

為了瞭解對流的效應以及傳導介面面積，兩者在微流道熱沉中對散熱效果之影響，我們設計一組對照組之實驗參數，如圖 4-6 所示，在相同的流量為基準下，實驗 a 為固定入口流速改變流道高度分別為 $1000\ \mu\text{m}$ 、 $1500\ \mu\text{m}$ 以及 $2000\ \mu\text{m}$ ，實驗 b 則為固定流道高度為 $2000\ \mu\text{m}$ 、改變入口流速，兩組實驗結果的熱阻變化趨勢產生若干差異，我們可以發現實驗 a 的熱阻變化較為劇烈，而實驗 b 的熱阻變化則較趨平緩，這表示在微流道熱沉的散熱機制之中，傳導介面面積的改變將比對流強度的改變，更能主導微流道熱沉散熱的效應。

圖 4-7 為矩形流道在固定其寬度為 $300\ \mu\text{m}$ ，以及流道間距與流道寬度比為 1:1 為基準，在不同高度之流道在固定之入口流速下，其 IGBT 晶片熱阻之比較結果；由圖中結果可知，高寬比越大的微流道熱沉將會擁有越好的散熱效果。

圖 4-8 為各種高度之微流道，其雷諾數與摩擦因子之變化關係，我們可以發現無論是何種尺寸之流道，當雷諾數越大時，摩擦因子將越小。

4-3 單層、雙層以及三層流道對散熱之影響

在 4-2 小節之中，我們發現高寬比越大之微流道具有越好的散熱效果，這是因為高寬比越大，擁有越大的介面面積可進行傳導帶走熱量，因此，在本小節之中將探討相同高度之流道，擴增至第二層以及第三層時，其增加之熱傳面積對 IGBT 散熱效能之影響。

圖 4-9 至 4-11 分別為流道高度 $300\ \mu\text{m}$ 、 $500\ \mu\text{m}$ 、 $700\ \mu\text{m}$ 、在不同雷諾數之下，單層、雙層以及三層流道之間的熱阻值比較結果；其中，在流道高度 $300\ \mu\text{m}$ 這組實驗之中，在 $Re=500$ 時雙層的熱阻比單層的熱阻降低了 19%，而三層的熱阻更是比單層的熱阻降低了約 25.8%，由結果可以發現，雙層結構之微流道，其散熱效果明顯優於單層結構之微流道，而三層結構之微流道更是優於上述二者，也證實

了增加傳導介面面積，可以有效的提升散熱效能；而在 $Re=1000$ 以及 1500 時，其單層與雙層之熱阻，分別降低了 17% 及 16% ，而單層和三層之熱阻比較，則個別降低了 23% 以及 22% ，其熱阻降低的幅度則略低於 $Re=500$ ，這是因為對流強度的增加，造成對流區的熱阻降低，而略為縮小了整體熱阻的差距，由此現象，我們亦可以發現在層流的狀態下，其流道層數越多時，對流達到一定強度之後，對流效應的強弱對散熱的影響也越來越小，由流道高度 $500\ \mu\text{m}$ 以及 $700\ \mu\text{m}$ 兩組實驗之結果（圖 4-10 和圖 4-11）也呈現出與流道高度 $300\ \mu\text{m}$ （圖 4-9）相同之趨勢，同時印證了上述之論點。

4-4 不同流道間距對散熱之影響

同樣的引用 4-2 小節之結果，為了增加熱傳面積，在這個小節我們將觀察，在相同的流道高度以及層數的狀況下，改變微流道之間距與流道寬度之比例，在此定義為 γ ，其數學式如下：

$$\gamma = \frac{W_{fin}}{W_{ch}} \quad (4-1)$$

藉著改變 γ 來增加傳導的介面面積，以觀察其對 IGBT 散熱效能之影響，同時，為了避免微流道熱沉製作上的困難，將 γ 之最小值限定為 0.5 。

圖 4-12 至圖 4-14 分別為 $H_{ch} = 300\ \mu\text{m}$ 、 $500\ \mu\text{m}$ 、 $700\ \mu\text{m}$ ，其

單層、雙層以及三層流道，在 $Re = 1500$ 時改變 γ 後各自熱阻值的變化，由圖中我們可以發現，在單層微流道結構時， γ 值越小其熱阻值會有不斷下降的趨勢，這與我們之前所預期的結果是完全符合的，；而在三層微流道結構中， $H_{ch} = 300 \mu m$ 時，與單層以及雙層微流道結構有相同的趨勢，其熱阻隨著 γ 變小而降低，然而，在 $H_{ch} = 500 \mu m$ 以及 $H_{ch} = 700 \mu m$ 這兩組實驗之中，在 $\gamma = 0.8$ 時熱阻卻略低於 $\gamma = 0.5$ 時之熱阻。

根據上述結果來看，多層結構之微流道的 γ 值，也就是流道間距與流道寬度的比例，在特定比例之下，會有最好的散熱效果，從圖 4-13 至 4-17 可以看出，三層微流道結構在 $\gamma = 0.8$ 時，其熱阻值最低，擁有最好的散熱效果。

4-5 IGBT 晶片配置對散熱之影響

在微系統散熱的課題之中，通常需要考慮到複數的發熱元件，因此，熱源之間的配置將會影響散熱元件的效果，熱源過於接近，將會增加熱源密度，增加散熱的困難，而熱源太過分散則會造成材料上不必要的浪費，為避免上述兩種情況發生，本小節將調整 IGBT 晶片彼此之間間距以及微流道熱沉結構的寬度，針對以上兩項參數之影響來進行討論。

圖 4-15 為 $H_{ch} = 700 \mu\text{m}$ 、 $Re = 1500$ 以及各種 γ 值之三層微流道結構，分別針對不同 IGBT 晶片間距所作的散熱效果比較，圖中在 d^* 越小表示晶片的間距越小，反之則表示間距越大，其中 $d^* = 75.14$ 處為本研究之原始晶片間距，而在 $d^* = 93.8$ 則是 IGBT 晶片座落於微流道熱沉結構邊界上之間距，由圖中可知 d^* 小於 20 時，隨著 d^* 減小熱阻會逐漸上升，這是因為當 d^* 小於 20 時，晶片之間間距過小，熱源之間的熱通量之間彼此互相干涉，該現象如圖 4-16 之截面圖所示，圖中是將左右兩側的元件配置互相調換，並將 IGBT 晶片之間的距離縮短至 $d^* = 7.142$ ，很明顯的我們發現，兩塊熱源傳導至微流道結構的熱通量產生了重疊，使得該區域的微流道所需帶走的熱量增加，造成整體散熱的效果下降；當 d^* 介於 20 與 80 時，熱阻的變化將趨近於平緩，然而，當 d^* 大於 80 之後熱阻將開始急遽的上升，這是因為晶片逐漸靠近微流道熱沉之邊界，熱量逐漸囤積於邊緣，使得熱量無法完全的消散，其中，圖 4-17 為原始 IGBT 模組之原件配置，我們可以發現，原始配置之 IGBT 由於較靠近微流道熱沉結構兩端之邊界，因此，會有些許熱量囤積在微流道熱沉的邊緣上，而圖 4-18 則是將原始配置之 IGBT 晶片分別往內移動使 d^* 減小至 54.286，從圖中的溫度分佈來看，由 IGBT 晶片所散發的熱量可以完整的傳導至為流道熱沉，使得微流道熱沉達到較好的散熱效果；而圖 4-19 便是熱

量囤積於邊界上之極端實例。

在固定晶片之間距離的條件下，本研究考慮將微流道熱沉的結構加寬，以避免熱量囤積於結構邊緣，圖 4-20 是在 $H_{ch} = 700 \mu\text{m}$ 、 $Re = 1500$ 以及各種 γ 值之三層微流道結構條件下，改變微流道熱沉結構的寬度來比較散熱的效果，由圖中結果顯示，在 $\gamma = 1$ 的條件下，當 W^* 超過 143 之後，熱阻便急劇的下降，這表示原本囤積於結構邊緣的熱量，被加寬的微流道熱沉給帶走，使得整體的溫度下降，而在 $\gamma = 0.8$ 以及 $\gamma = 0.5$ 條件下的微流道熱沉，其熱阻也分別在 $W^* = 145$ 以及 $W^* = 148$ 時產生明顯下降的趨勢。

根據以上兩組模擬的結果，我們發現，晶片配置過度集中，將造成熱源密度上升，使得散熱變得困難，若將配置過度分散，而靠近微流道熱沉結構邊緣，亦會導致熱量囤積於基板以及微流道熱沉結構邊緣的情況，並且，將會使得中間的微流道熱沉無法達到散熱的功用，造成材料上的浪費。

4-6 微流道熱沉材料與流體黏滯性對散熱之影響

在熱傳導之中，我們知道擁有較高的熱傳導係數的材料會有較佳的導熱性，而在熱對流之中，動量較大的流體亦能帶走較多的熱量，因此本節將針對不同材料之熱傳導係數、以及流體的動黏滯係數，以

上述兩種物理參數，來進行對散熱效應的探討。

圖 4-21 是針對 $H_{ch} = 700 \mu\text{m}$ 、 $Re = 1500$ 以及各種 $\gamma = 1$ 之微流道結構，其各種材料的熱傳導係數對散熱之影響進行比較，本實驗分別選用銅(Copper)、鋁(Aluminum)以及碳化矽(Silicon carbide)三種材料進行比對，各材料之性質列於表 4-6 中，由圖中之結果， k^* 愈大熱阻越小，其散熱效果也越好。

在圖 4-22 中探討在 $H_{ch} = 700 \mu\text{m}$ 、 $Re = 1500$ 以及各種 γ 值之三層微流道結構，固定入口流速之條件下，比對不同動黏滯係數之流體對散熱效果之影響，由圖中的結果呈現，動黏滯係數越小之流體，因為擁有較佳的動量，因此對流的效果越好，所以會有較佳的散熱效果。

綜合以上結果，從整體的變化來看，流體之黏滯性的改變，對散熱效能的影響遠不及，材料的熱傳導係數、以及微流道熱熱沉之結構優化所帶來之影響。

第五章 微流道中氣泡形成之實驗研究

在一般的微流道散熱系統，其入口端與出口端會有分流以及匯流之流道結構，此處是整體系統中，最易形成氣泡的部分，若氣泡流入散熱流道中，將導致熱阻大幅上升使得散熱效能下降；本章節將針對三種匯流角度之 Y 型流道，以實驗觀察其對氣泡包覆現象之影響；本實驗之流道材料以 PDMS(polydimethylsiloxane)製作，其製程方法可參照賴俞任學長之論文[20]

5-1 實驗方法



本實驗設備基本架構以及設備照片如圖 5-1 至 5-3 所示，液體經由注射幫浦(KD Scientific, Programmable Syringe Pump)加壓注入微流道中，我們利用變焦鏡筒接上顯微物鏡以及高速攝影系統(IDT, X-Stream High-Speed Camera, XS-4)，並以同軸光源進行攝影，將影像以圖像方式截取並藉由 USB2.0 光纖輸出且儲存於電腦硬碟中。

實驗中的 Y 型流道匯流角度分別為 120° 、 180° 以及 240° ，並以可程式控制注射幫浦設定流量 0.08 ml/min 、 0.16 ml/min 以及 0.32 ml/min ，以比較各種流道在不同流量之下對氣泡包覆程度之影響；高速攝影機以其控制程式設定適當之曝光時間以及擷取影像之解析度

512x512，並以可變焦鏡筒將影像範圍鎖定在微流道匯流處，以觀察流體匯流過程時氣泡包覆之現象。

5-2 匯流角度對氣泡包覆程度之影響

本實驗所使用之流體為去離子水，微流道尺寸分為匯流前以及匯流後，匯流前流道寬 50 μm 高 100 μm 寬高比為 1:2 之矩形流道，匯流後之寬高比為 1:1 之方形流道；圖 5-4 至 5-12 為三種匯流角度在各流量時之氣泡包覆過程，由各組實驗觀察結果， 120° 之匯流角度所包覆之氣泡體積最小，而在 240° 所產生的氣泡皆大於另外兩組流道，這是因為在相同的流體黏滯力以及壁面表面張力的條件下，其流體對流道壁面之接觸角皆相同，因此，當兩匯流流體之液面在接觸時，流道匯流角度與液面之間的空隙，便是決定氣泡體積大小之關鍵，而匯流角度 240° 的幾何形狀，其造成液面與流道壁面之間的空间比另外兩種角度都來的大，因此，能夠包覆體積較大之氣泡。

若是加大流量使得流體對壁面之動態接觸角增加，由圖中可以發現， 120° 以及 180° 匯流角度之流道，其包覆之氣泡大小幾乎沒有任何改變，然而， 240° 的情況下，氣泡的大小則有較為顯著的改變，因為匯流角度越大所能包覆氣泡的空間也越大，因此，流體對壁面的動態接觸角增加，將有機會包覆較大的氣泡，反之，匯流角度越小，

其包覆氣泡的空間也越小，即使增加流體對壁面的接觸角，依然沒有足夠的空間產生較大的氣泡，此一現象與上一段的結果相互呼應。

5-3 流體黏滯性對氣泡包覆程度之影響

在上一小節中提到增加流量改變流體對壁面的接觸角，在匯流處將有機會包覆更大的氣泡，本小節將針對增加流體黏滯性以改變靜態接觸角對氣泡包覆的影響，本試驗將以去離子水調製 10% 以及 50% 兩種濃度之蔗糖溶液，圖 5-13 即為三種試液對 PDMS 的靜態接觸角，去離子水對 PDMS 的靜態接觸角為 105.877° ，10% 以及 50% 蔗糖溶液對 PDMS 接觸角則分別為 114.906° 及 123.681° ；圖 5-14 至 5-19 分別為兩種濃度之蔗糖溶液在不同匯流角度微流道中，其氣泡包覆之過程，與上一小節的參考圖中比較，三種溶液在匯流角度 120° 以及 180° 的氣泡大小都沒有太大的變化，但是，在匯流角度 240° 的微流道中，兩種蔗糖溶液都比去離子水所包覆的氣泡要來得大，此一現象說明在流體液面交會時，若交匯處之流體液面與流道壁面間有足夠的空間，接觸角的增加將會在匯流過程中包覆較大的氣泡。

第六章 結論與未來展望

6-1 結論

本研究針對 IGBT 進行散熱設計，並藉以改變微流道熱沉的各種不同參數，以尋求其最佳的設計，詳細結果已於前幾章作過敘述與討論，在此歸納以下結論：

1. 在相同流量下，流道的傳導介面面積對散熱效能之影響將優於對流強度的影響。
2. 高寬比越大的流道擁有較佳的散熱效果。
3. 多層微流道結構之散熱效能優於單層微流道結構。
4. 三層結構之微流道在 $\gamma = 0.8$ 時，擁有較佳的散熱能力。
5. 晶片間距過近將導致熱源密度提高，使得散熱變得困難；晶片配置過於靠近結構邊緣將導致熱量的囤積。
6. 微流道熱沉材料之熱傳導係數越高，可獲得越好的散熱效果；降低冷卻流體的黏滯係數，將可增進散熱效能，但效果極為有限。
7. 在匯流流道氣泡包覆現象中，匯流角度越大將使流體液面與流道壁間有較多的空間，從而導致包覆較大的氣泡。
8. 當有足夠的氣泡包覆空間，流體對壁面的接觸角增加亦會使包

覆的氣泡體積增加。

6-2 未來展望

本研究因考慮整體散熱模組，因此，模組原件之間的尺寸比例相當的大，造成網格建構數量相當龐大，未來若能以平行運算系統，將整體模組切割進行運算，相信將能節省相當多的時間；此外，文中僅分析層流流場的散熱情況，未來若能考慮紊流以及雙相流的流場進行分析的話，將會使得本研究的應用範圍更為廣泛。



參考文獻

- [1] B. J. Baliga, “Power Semiconductor Devices,” PWS Publications, Boston, 1996.
- [2] L. T. Yeh, “Review of Heat Transfer Technologies in Electronic Equipment,” J. of Electronic Packaging, Vol.117, pp. 333-339, 1995.
- [3] C. Chapman, “The Basics of Package/Device Cooling,” Electronic Packaging and Production, Mc Graw-Hill, pp. 57-60, New York, May 1998.
- [4] R. R. Tummala, “Fundamentals of Microsystems Packing,” McGraw-Hill, New York, 2002.
- [5] D. B. Tuckerman, and R. F. W. Pease, ” High-Performance Heat Sinking for VLSI,” IEEE Electronic Device Letter, Vol.EDL-2(5), No. 4, pp. 126-129, 1981.
- [6] J. S. Harder, J. B. Dezord, C. Schaeffer, Y. Avenas, O. Puig, A. Rogg, K. Exel, and A. Utz-Kistner, “DBC (Direct Bond Copper) substrate with integrated flat heat pipe,” Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 2006 IEEE Twenty-Second Annual IEEE, pp.

152-156, Dallas, TX USA, March 2006.

- [7] J. S. Kima, W. H. Chab, K. N. Raineyc, S. Leed, and S. M. Youc,” Liquid cooling module using FC-72 for electronics cooling,” Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronics Systems, San Diego, California, USA, 2006.
- [8] R. Hocine, A. Boundghene Stambouli, and A. Saidane “A three-dimensional TLM simulation method for thermal effect in high power insulated gate bipolar transistors,” Microelectronic Engineering, Vol. 65, pp. 293-306, 2003.
- [9] L. Meysenc, L. Saludjian, A. Bricard, S. Ra“el, and C. Schaeffer,” A high heat flux IGBT micro exchanger setup,” IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology—Part A, Vol. 20, NO. 3, pp. 334-341 September 1997.
- [10] C. Gillot, L. Meysence, and C. Schaeffer, ” Integrated Single and Two-Phase Micro Heat Sink Under IGBT Chips,” IEEE Transactions on Components and Packaging, Vol. 22, pp. 384-389, 1999.
- [11] C. Gillot, C. Schaeffer, C. Massit, and L. Meysence,

“Double-Sided Cooling for High Power IGBT Modules Using Flip Chip Technology,” IEEE Transactions on Components and Packaging, Vol. 24, pp. 698-704, 2001.

[12] T. Steiner, and R. Sittig, “IGBT Module Setup with Integrated Micro-Heat Sinks,” IEEE The 12th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs, pp. 209-212, 2000.

[13] C. S. Yun, P. Malberti, M. Ciappa, and W. Fichtner, “Thermal Component Model for Electrothermal Analysis of IGBT Module Systems,” IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol. 24, NO. 3, pp. 401-406, August 2001.

[14] S. D. Leet, C. Hong, C. S. Yang, and K. S. Kim, “Development of Water-Cooled Heat Sink for High-Power IGBT Inverter,” IEEE The 7th International Conference on Power Electronics, Daegu, Korea, October 2007.

[15] K. Vafai and L. Zhu, “Analysis of two-layered micro-channel heat sink concept in electronic cooling,” Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 42, pp. 2287-2297, 1999.

- [16] J. Li, and G.P. “Bud” Peterson, “Geometric optimization of a micro heat sink with liquid flow,” IEEE Transactions on Components and Packaging, Vol. 229, pp. 145-154, 2006.
- [17] 鐘文仁, “IC 封裝製程與 CAE 應用,” 全華出版社(台灣), 2003。
- [18] 張智通, “水力直徑與不同形狀流道在強制對流下對微流道熱沈熱傳的影響,” 國立交通大學機械工程研究所碩士論文, 新竹, 2004.
- [19] W. Qu, and I. Mudawar, “Analysis of Three dimensional Heat Transfer in Micro-channel Heat Sinks,” Int. J. Heat and Mass Transfer, Vol. 45, pp. 3973-3985, 2002.
- [20] 賴俞任, “矽膠材料被動式微流體混合裝置之設計與性能分析,” 國立交通大學機械工程研究所碩士論文, 新竹, 2005.

表 2-1 IGBT 模組各部件尺寸

IGBT 模組各部件	尺寸(mm)
IGBT	9.8*9.8*0.5
Diode	7*5.5*0.7
Solder	0.05
copper	59*26*0.2
AlN	59*26*0.4

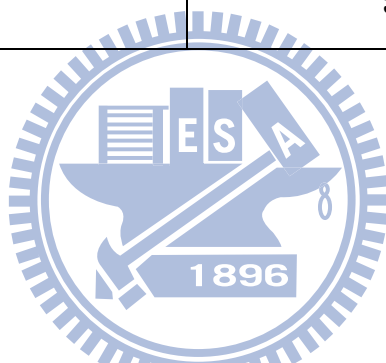
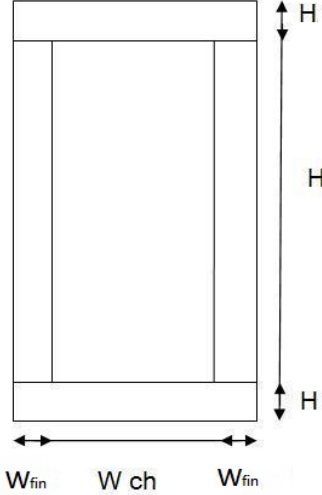


表 2-2 各材料性質

材料 \ 性質	密度 (kg/m ³)	比熱 (J/kg-K)	熱傳係數 (W/m-K)
Silicon	2330	700	148
AlN	3260	740	170
Copper	8933	385	400
solder			35

表 4-1 單層流道之幾何圖形與尺寸

	Hch (μm)	Wch (μm)	Wfin (μm)
	2000	300	300
	1500	300	300
	1000	300	300
	700	300	300
	500	300	300
	300	300	300

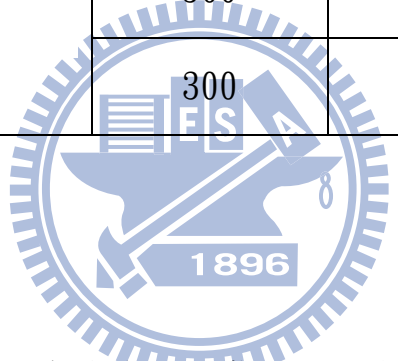


表 4-2 雙層流道之幾何圖形與尺寸

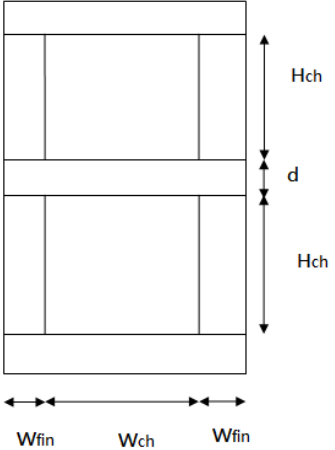
	Hch (μm)	Wch (μm)	Wfin (μm)	d (μm)
	700	300	300	300
	500	300	300	300
	300	300	300	300

表 4-3 三層流道之幾何圖形與尺寸

	Hch (μm)	Wch (μm)	Wfin(μm)	d (μm)
	700	300	300	300
	500	300	300	300
	300	300	300	300

表 4-4 網格測試

網格數	1, 163, 360	1, 573, 120	誤差(%)
物理量			
IGBT 表面最高 溫度(K)	360.114	358.684	0.398
微流道出口平 均速度(m/s)	0.83501	0.97170	14.06
微流道入出口 壓力差(kPa)	5.712	6.321	9.63

表 4-5 網格測試

網格數	1, 573, 120	1, 655, 072	誤差(%)
物理量			
IGBT 表面最高 溫度(K)	358. 684	358. 685	0. 000279
微流道出口平 均速度(m/s)	0. 97170	0. 97170	0
微流道入出口 壓力差(kPa)	6. 321	6. 322	0. 016

表 4-6 微流道熱沉材料性質

性質	密度	比熱	熱傳係數
材料	(kg/m ³)	(J/kg-K)	(W/m-K)
Aluminum	2707	903	237
Copper	8933	385	400
Silicon carbide	3160	675	490

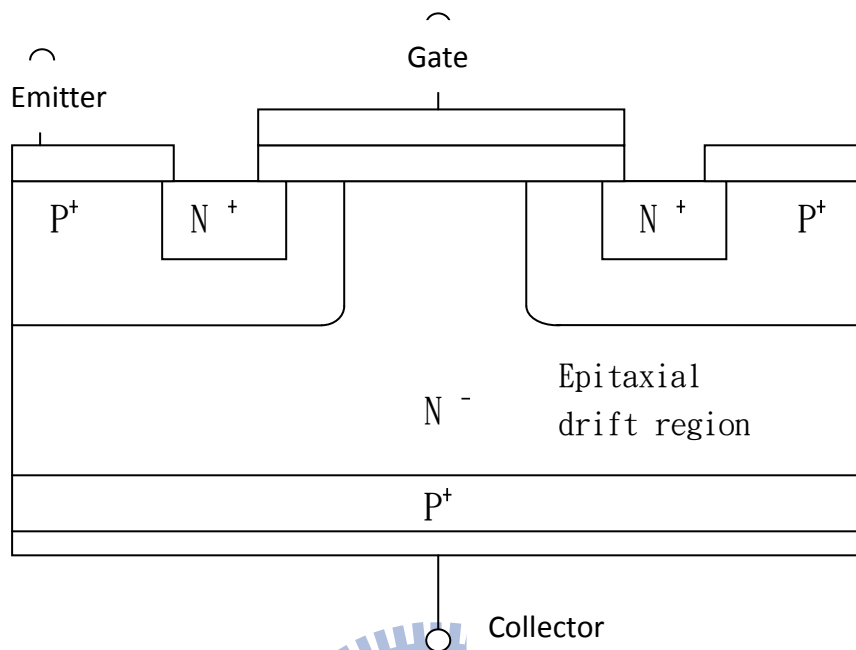


圖 1-1 IGBT 基本結構

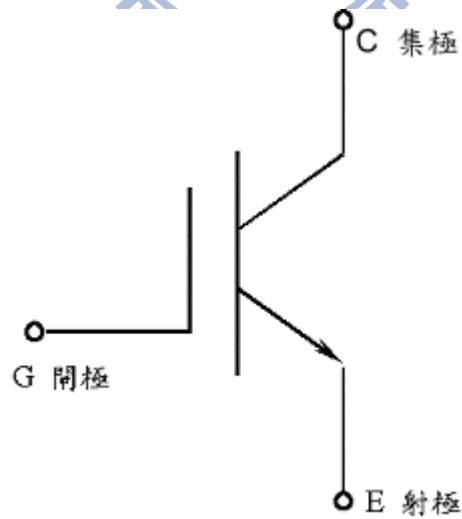


圖 1-2 IGBT 等效電路圖

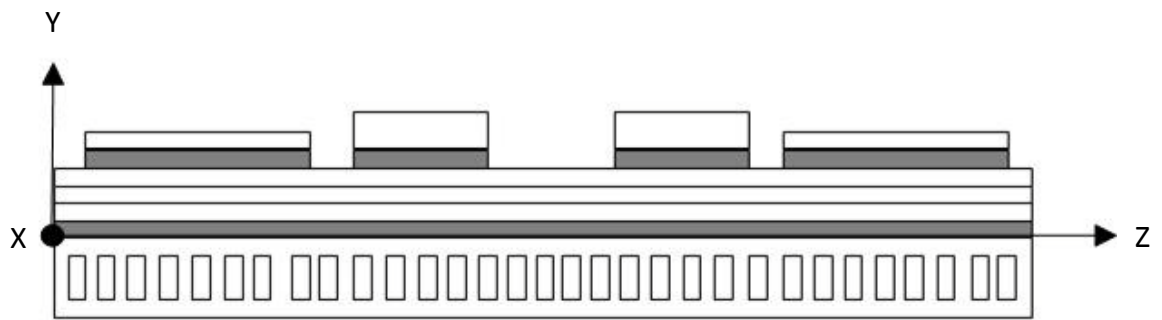


圖 2-1 IGBT 微流道熱沉之結構剖面示意圖

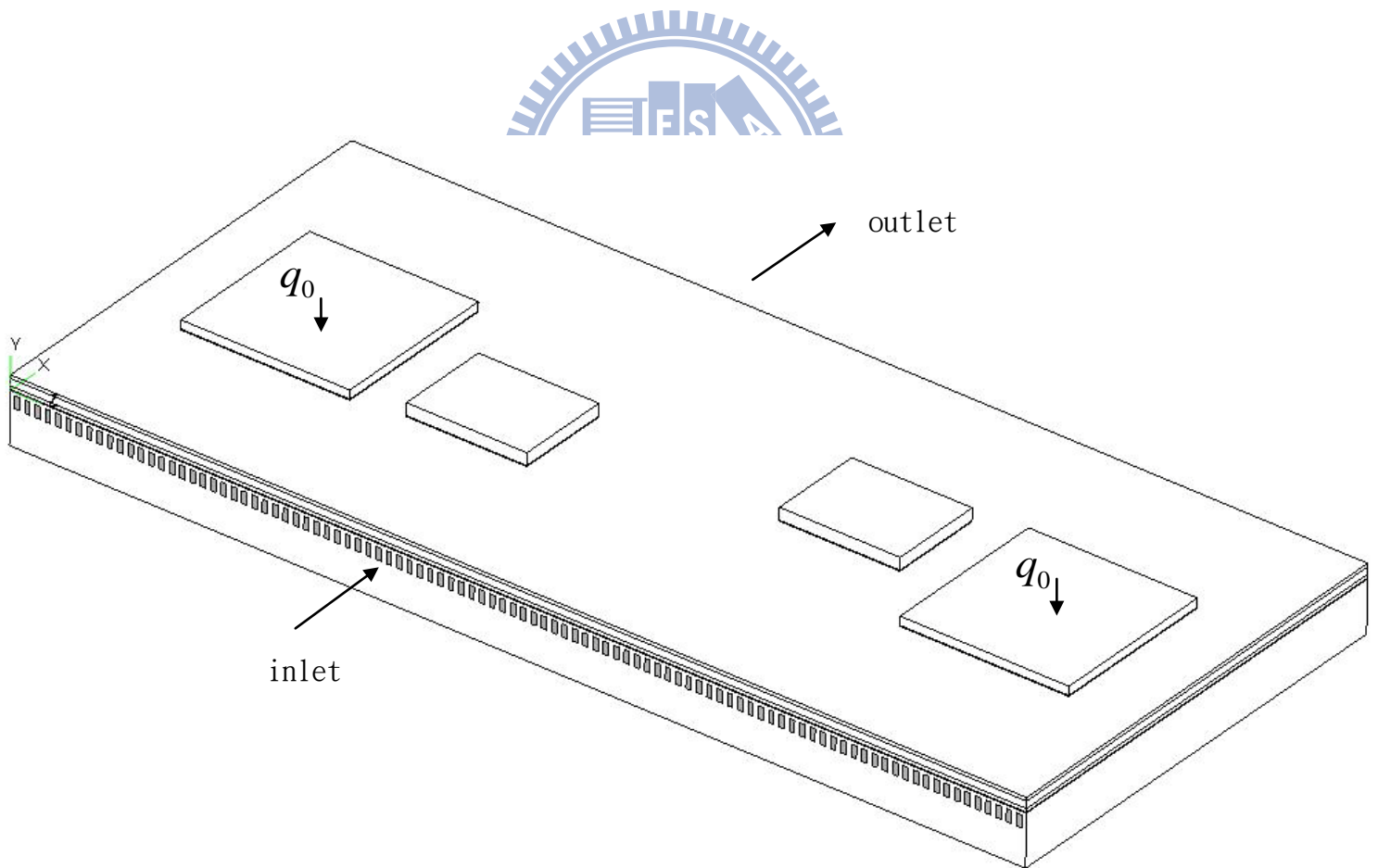


圖 2-2 模擬結構圖

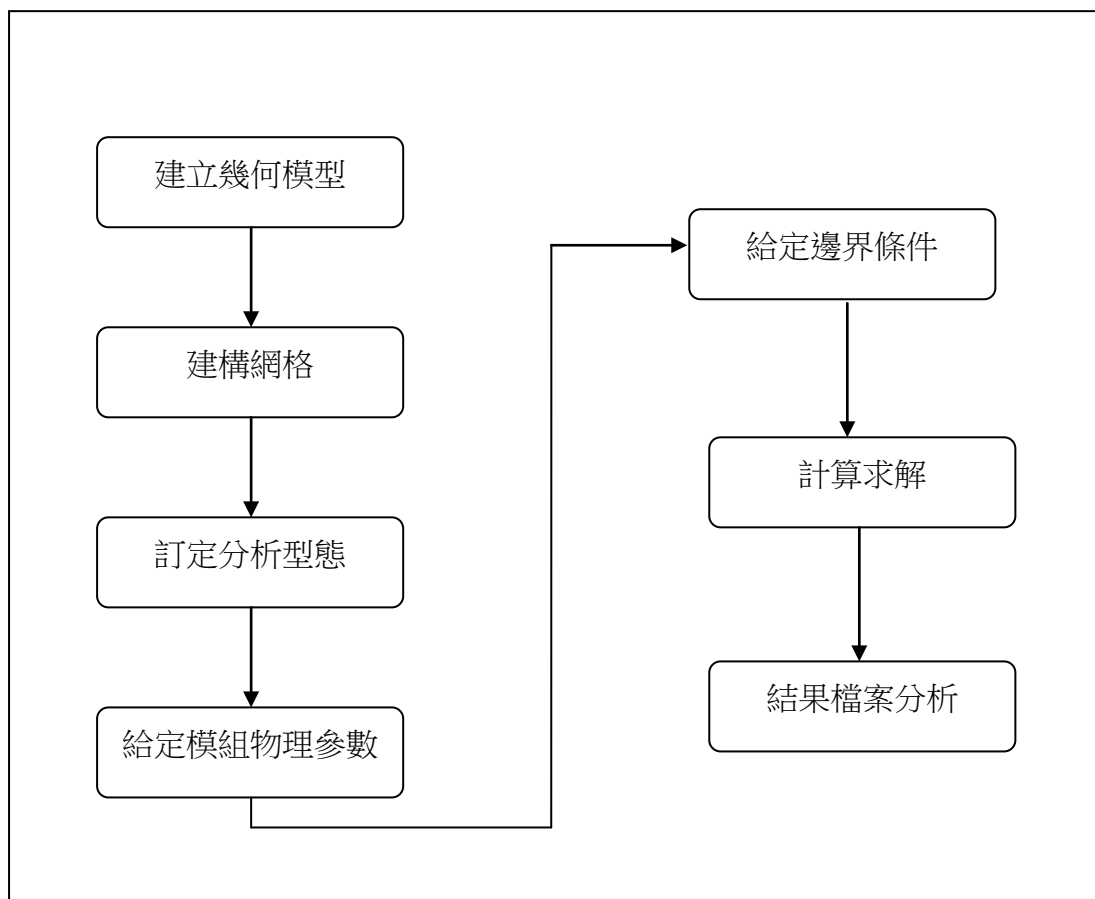


圖 3-1 模擬分析流程

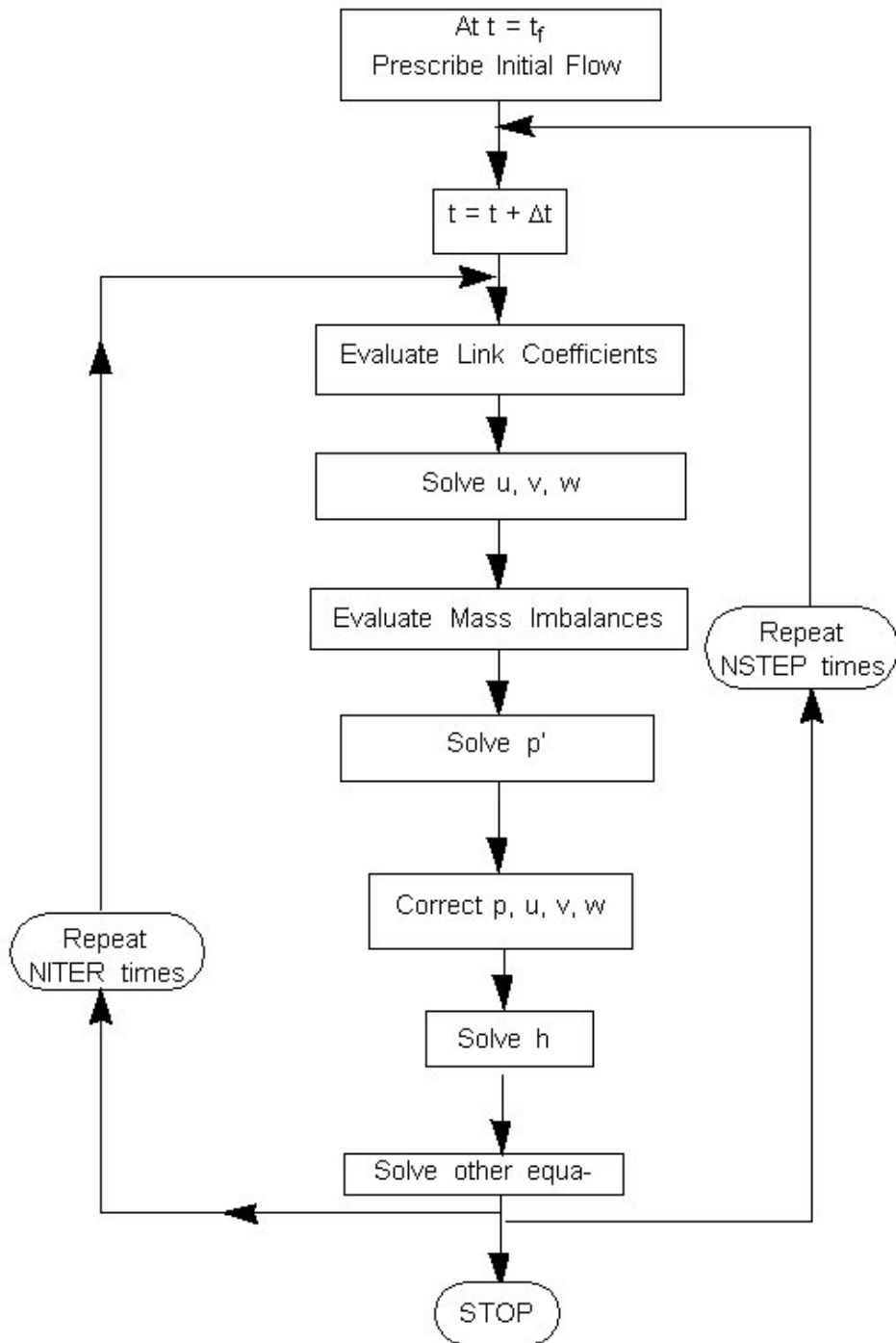
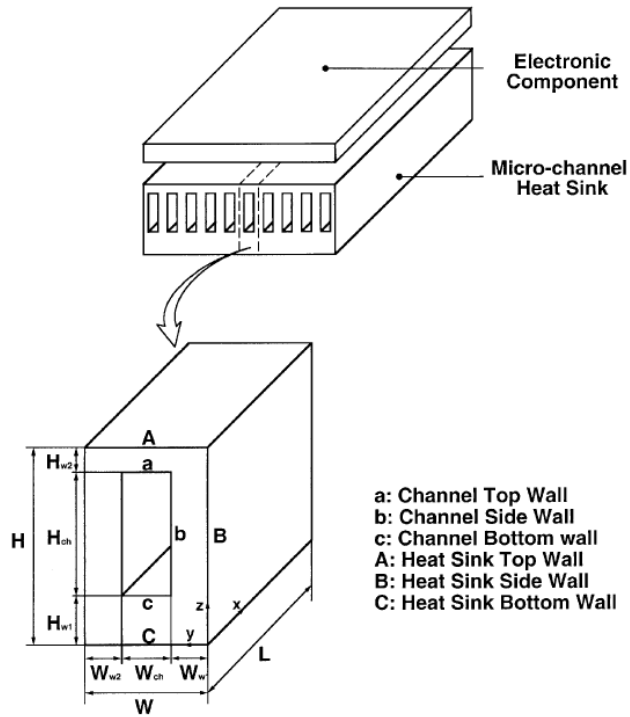


圖 3-2 CFD-RC 求解流程



Dimensions of unit cell of micro-channel heat sink

W_{w1} (μm)	W_{ch} (μm)	W_{w2} (μm)	H_{w1} (μm)	H_{ch} (μm)	H_{w2} (μm)	L (mm)
21.5	57	21.5	270	180	450	10

圖 4-1 文獻[19]比對之幾何圖形與尺寸

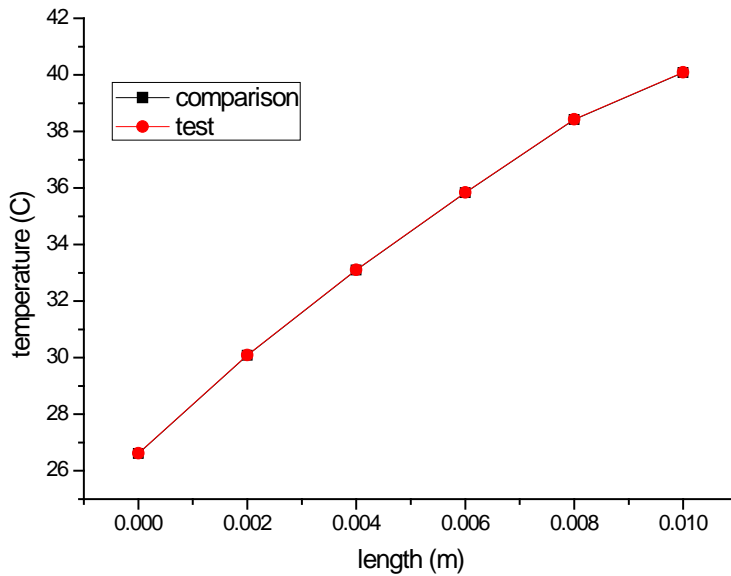


圖 4-2 文獻[19]Wa11 A 與 CFD-RC 之溫度比較

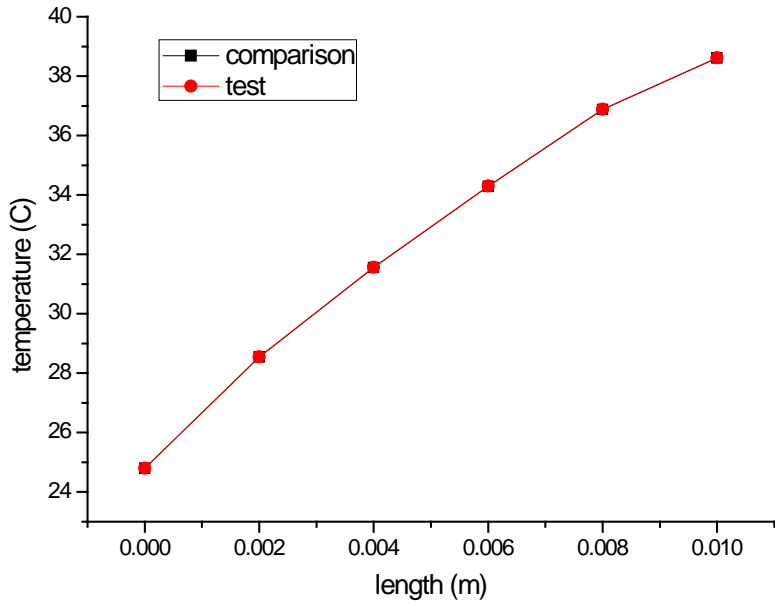


圖 4-3 文獻[19]Wall a 與 CFD-RC 之溫度比較

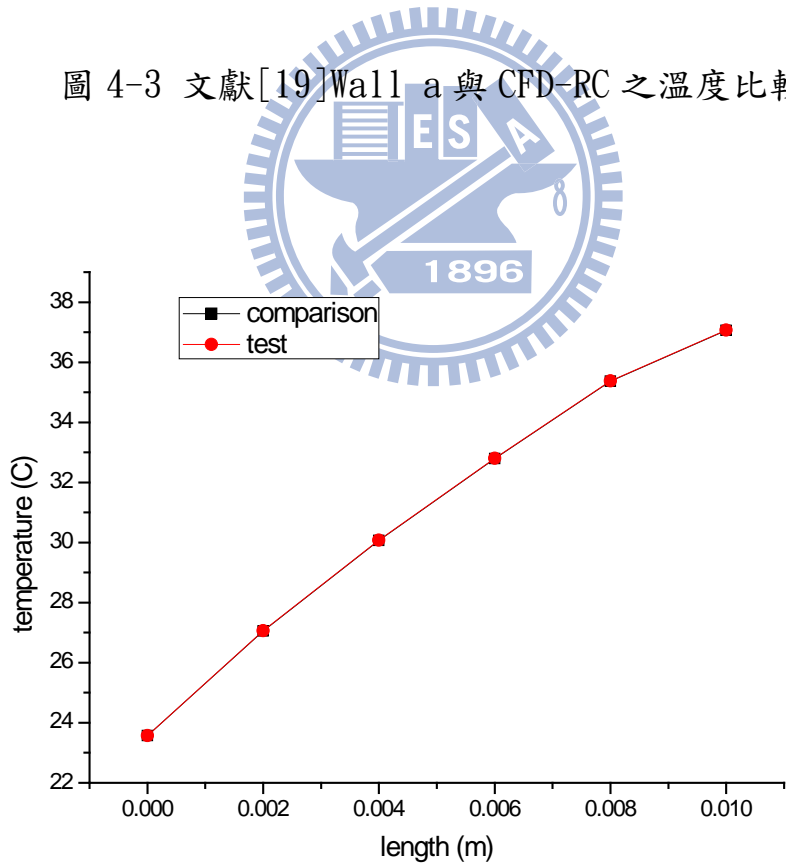


圖 4-4 文獻[19]Wall c 與 CFD-RC 之溫度比較

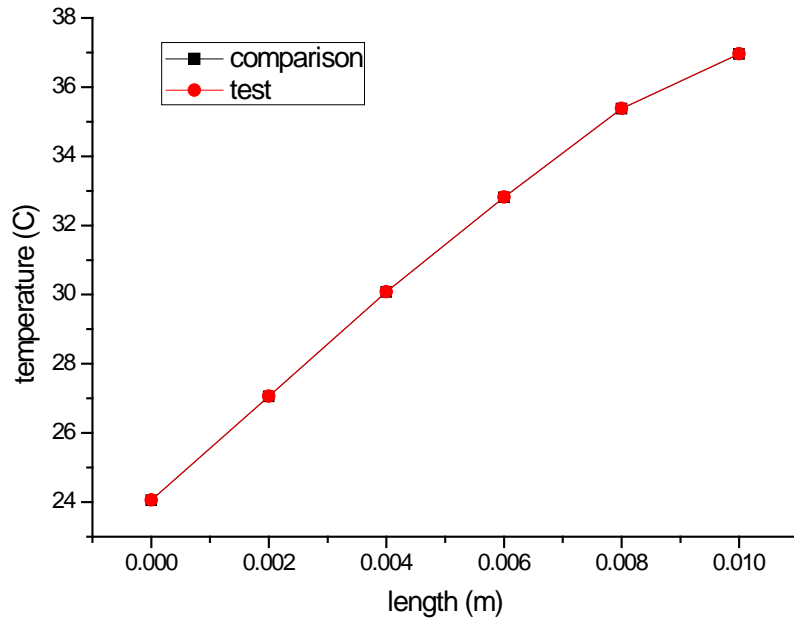


圖 4-5 文獻[19]Wall C 與 CFD-RC 之溫度比較

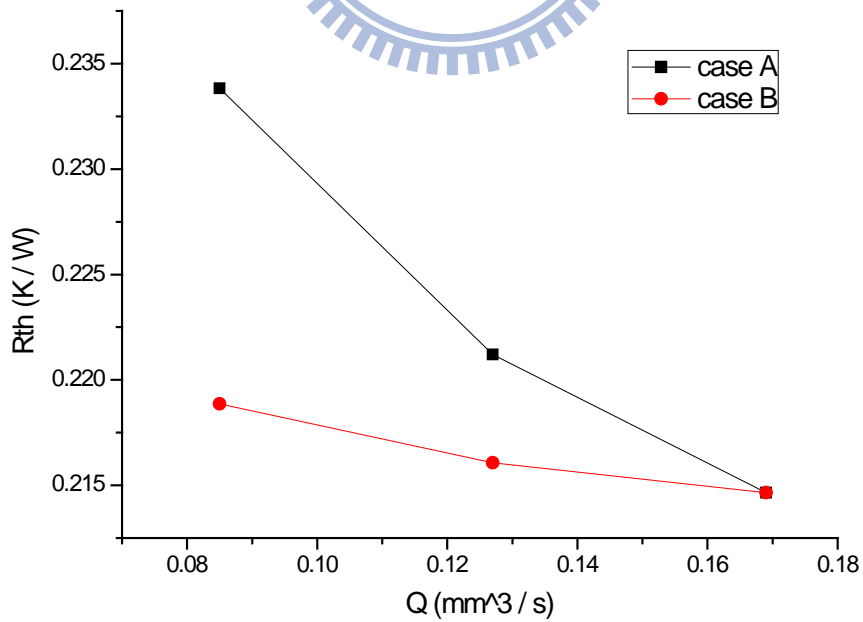


圖 4-6 相同流量下不同流道高度與不同流速對散熱效能影響之比較

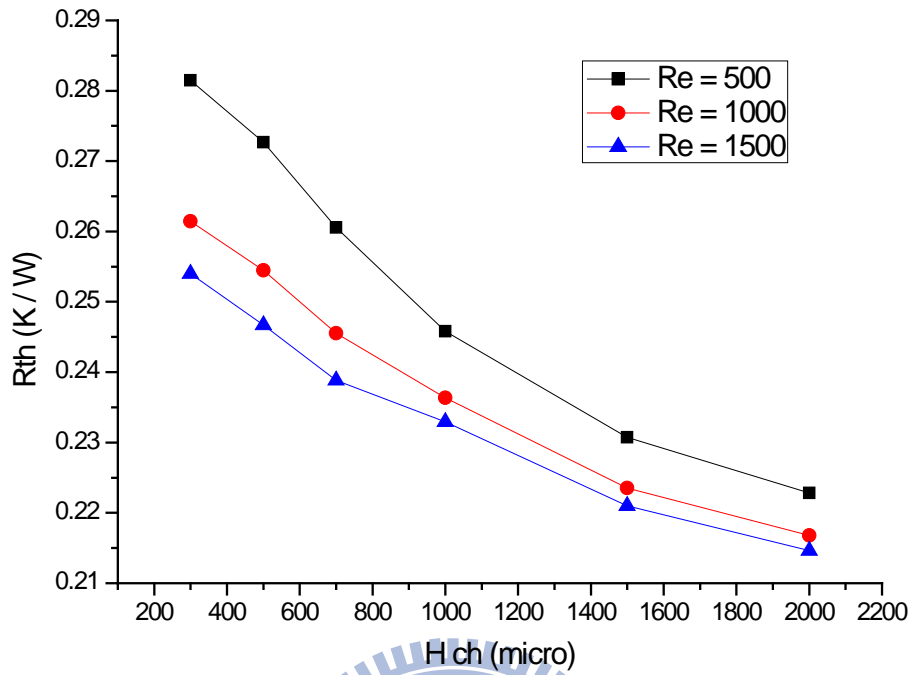


圖 4-7 改變微流道高度對熱傳之影響

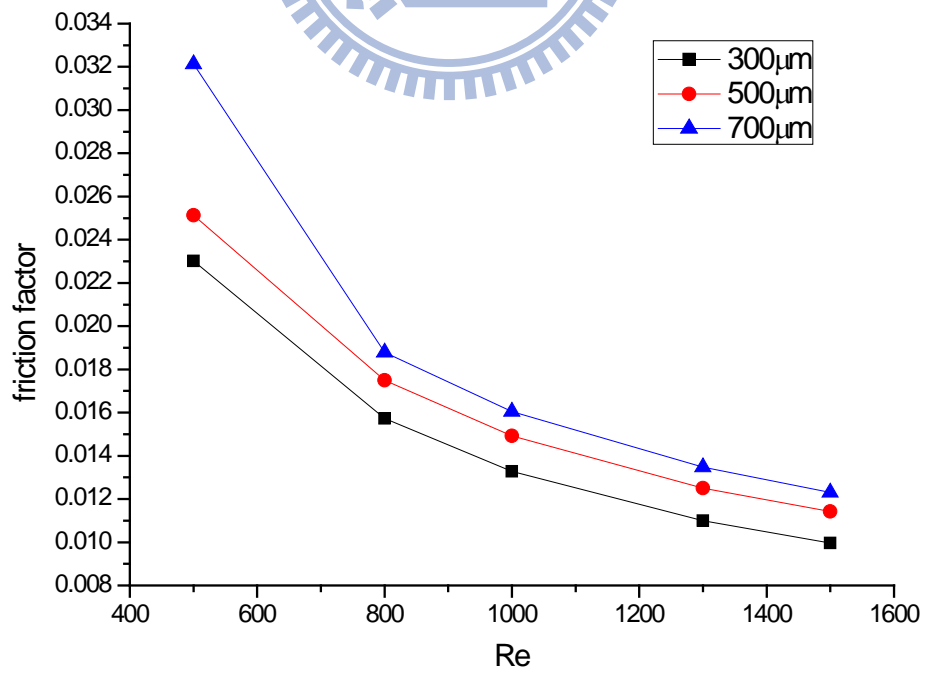


圖 4-8 個尺寸微流道之雷諾數與摩擦因子變化關係

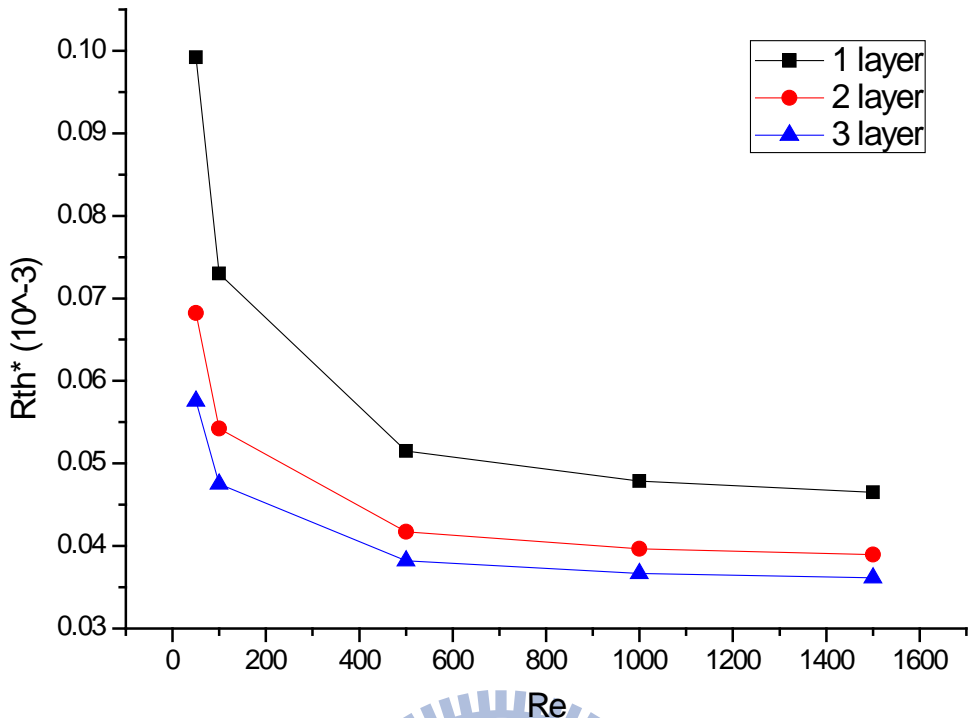


圖 4-9 比較單層與雙層及三層流道在不同雷諾數下之熱阻變化

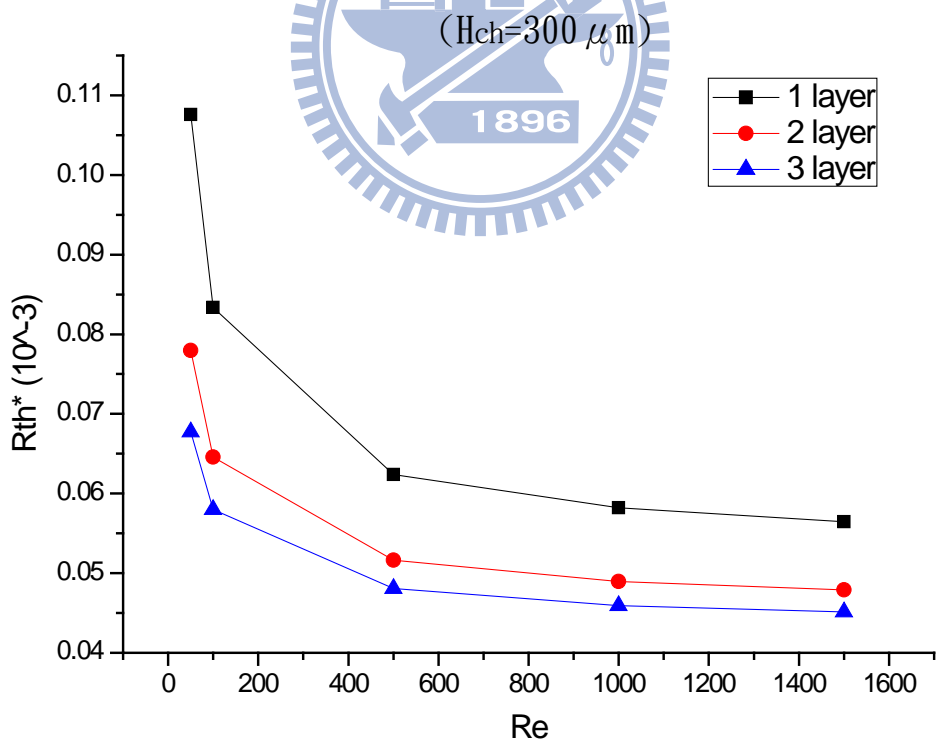


圖 4-10 比較單層與雙層及三層流道在不同雷諾數下之熱阻變化

(H_{ch}=300 μm)

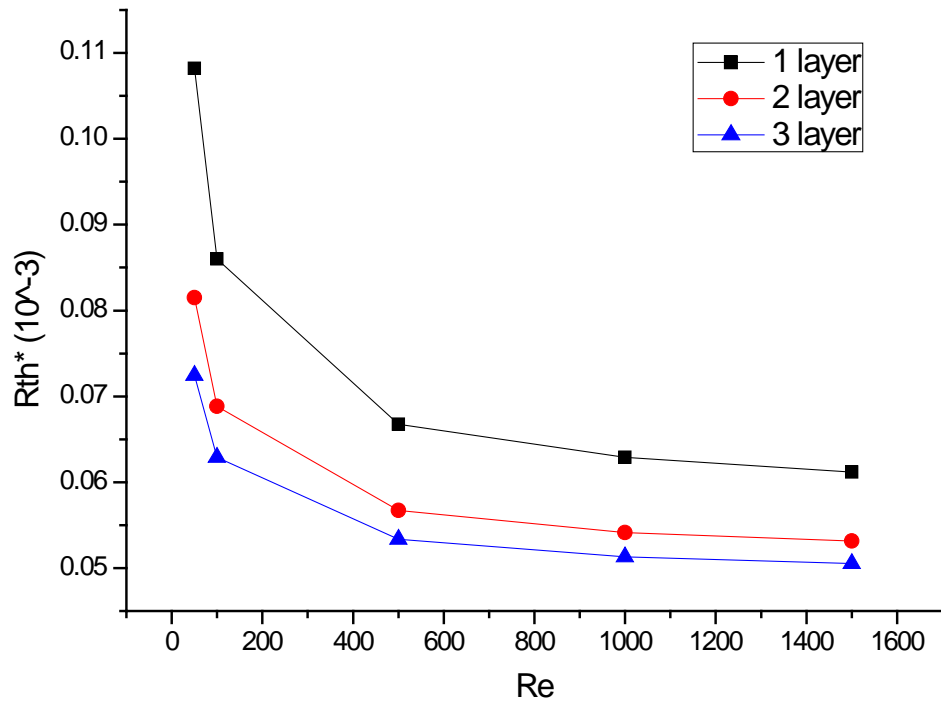


圖 4-11 比較單層與雙層及三層流道在不同雷諾數下之熱阻變化

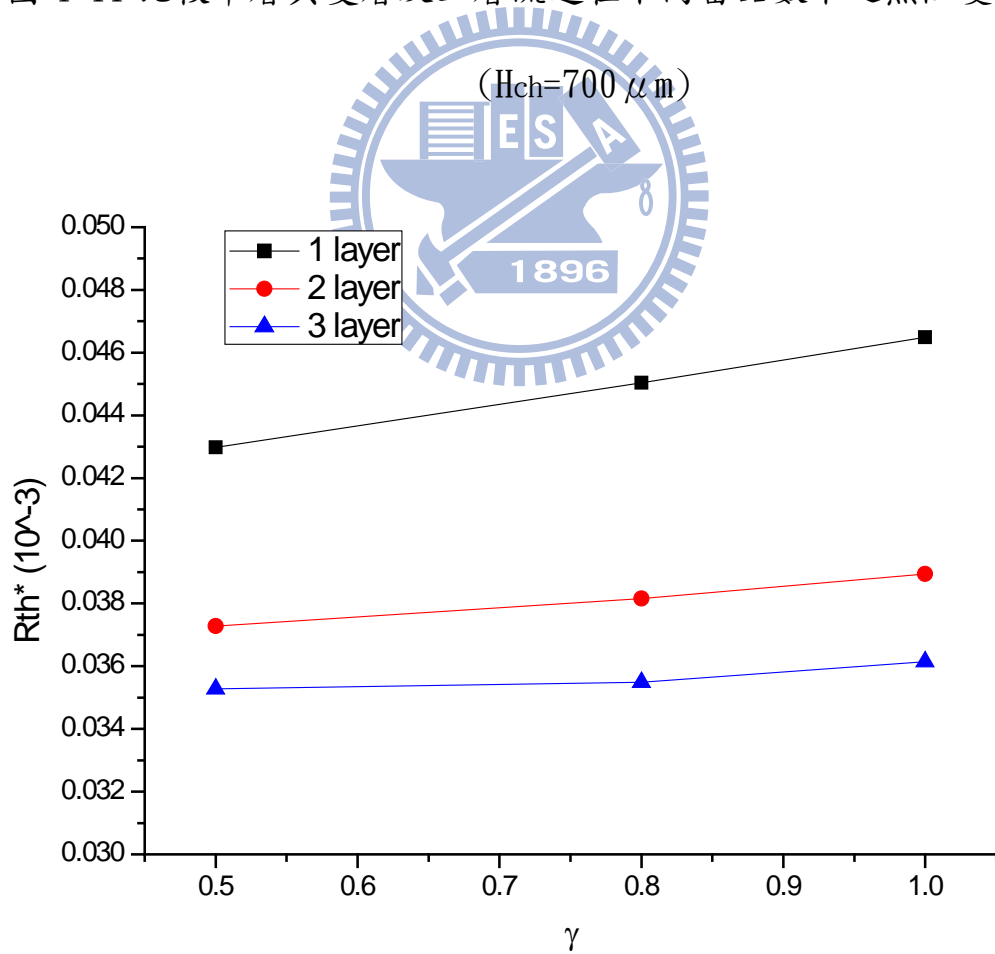


圖 4-12 不同 γ 對熱阻影響之比較(Hch=300 μm)

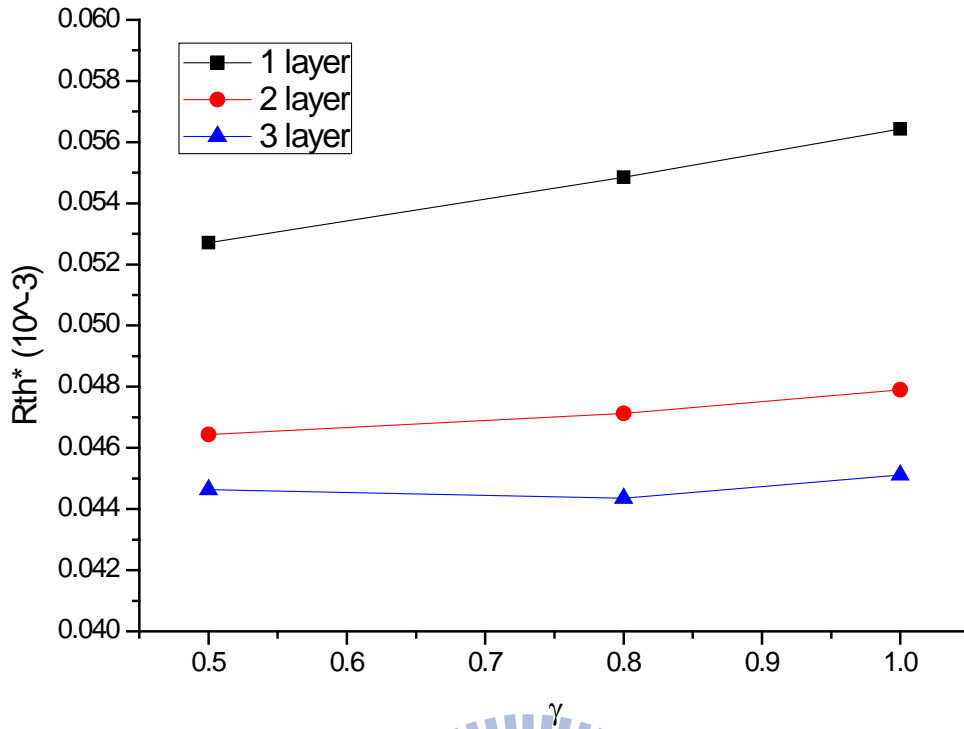


圖 4-13 不同 γ 對熱阻影響之比較 ($H_{ch}=500 \mu m$)

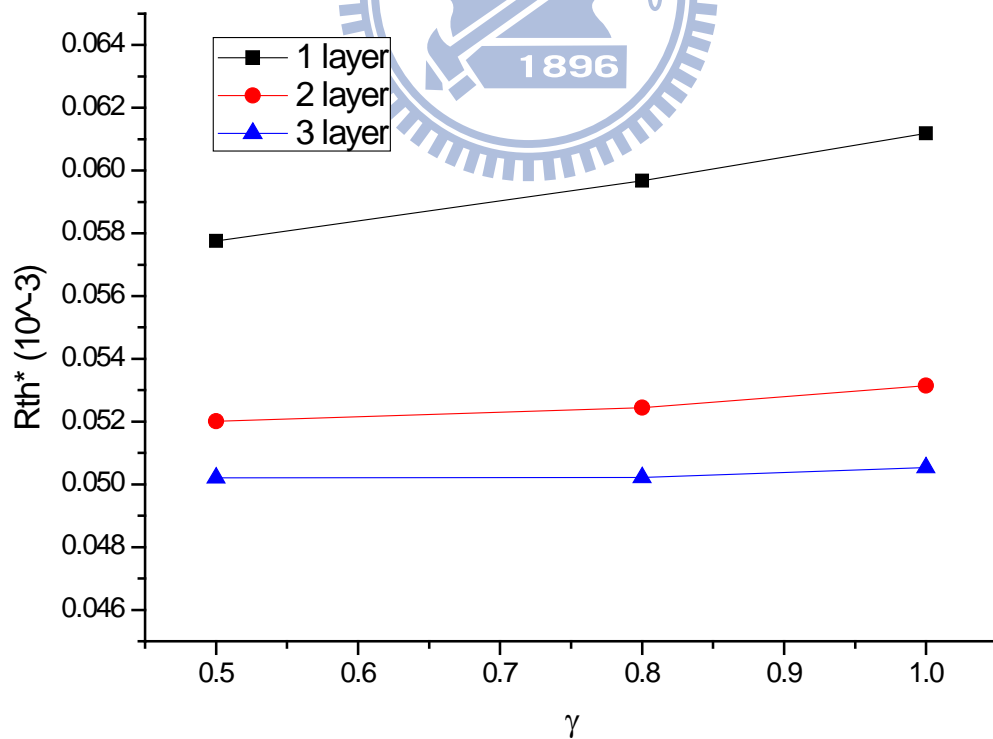


圖 4-14 不同 γ 對熱阻影響之比較 ($H_{ch}=700 \mu m$)

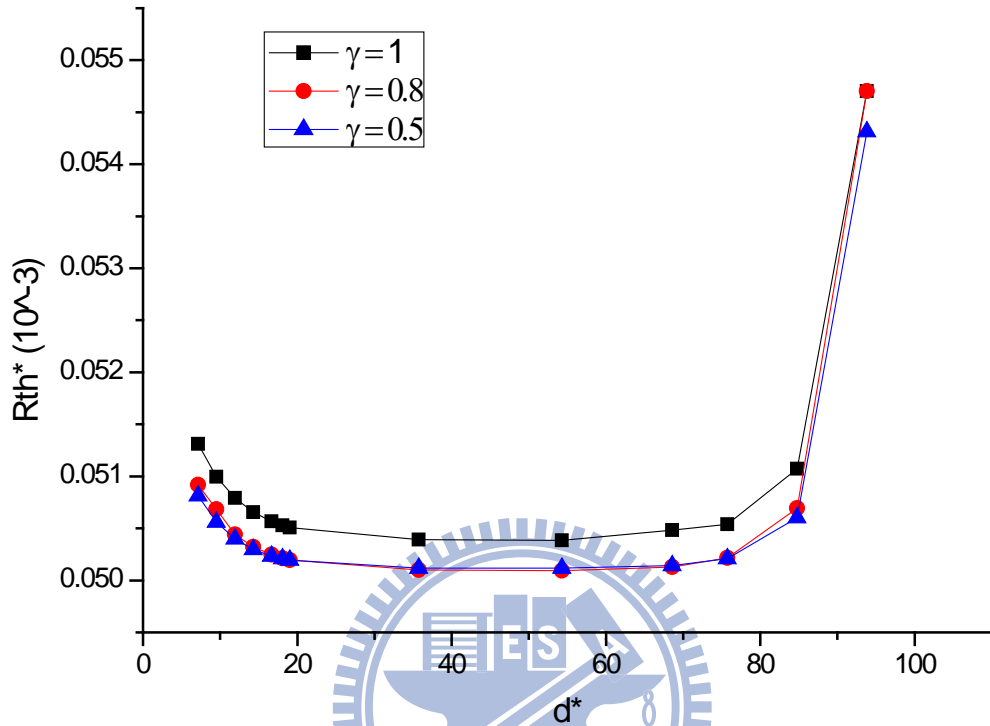


圖 4-15 IGBT 晶片間距對熱阻之影響

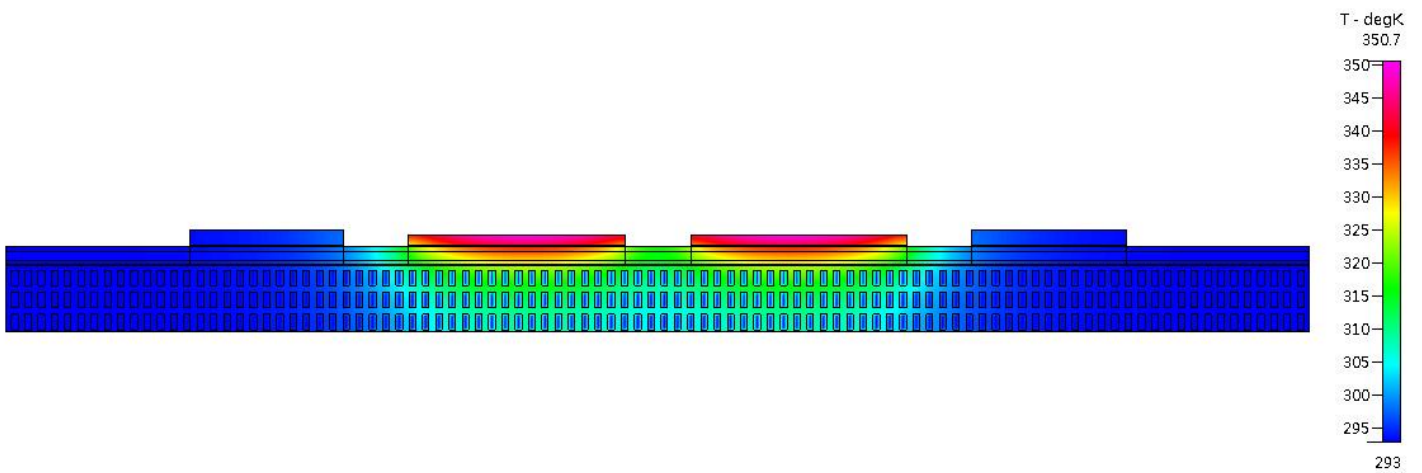


圖 4-16 IGBT 晶片三層流道之溫度分佈($d^* = 7.14$, $H_{ch}=700 \mu m$)

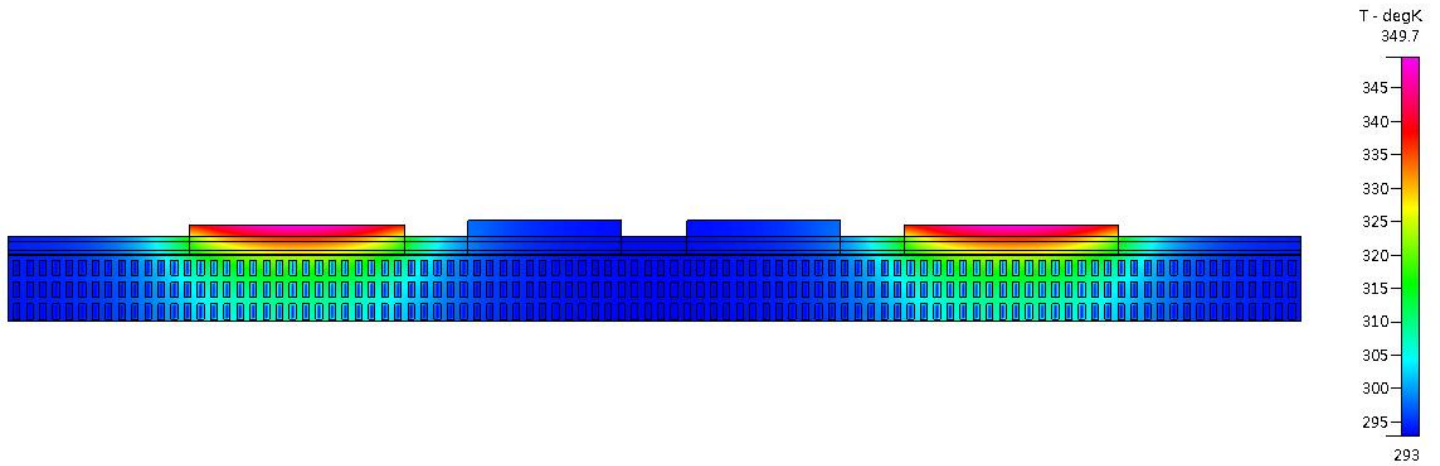


圖 4-17 IGBT 晶片三層流道之溫度分佈($d^* = 54.2$, $H_{ch}=700 \mu m$)

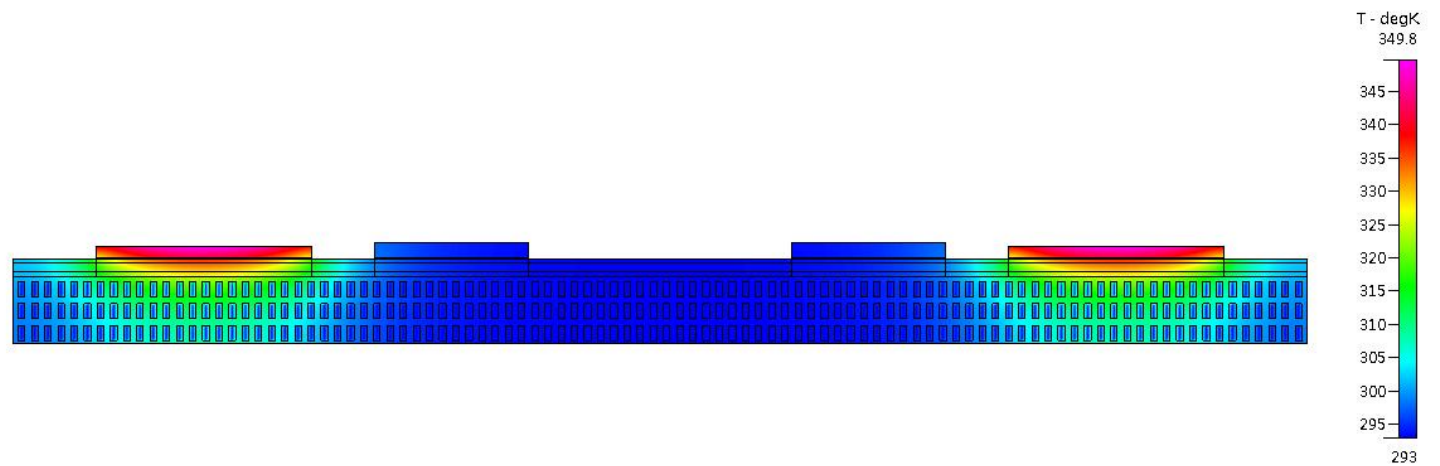


圖 4-18 IGBT 晶片三層流道之溫度分佈($d^* = 75.7$, $H_{ch}=700 \mu m$)

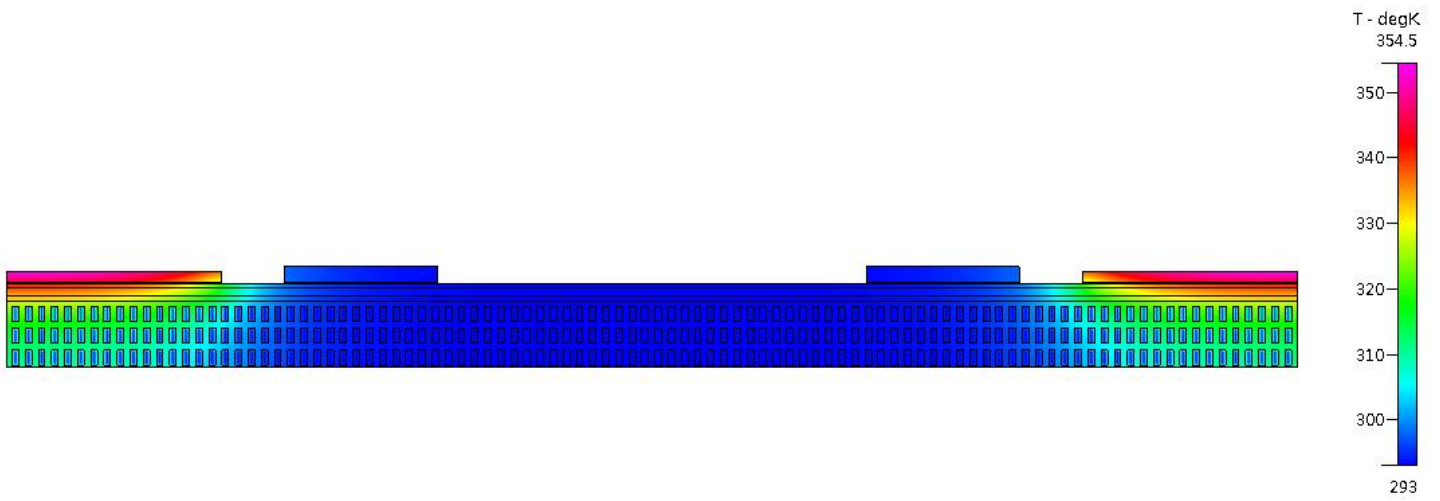


圖 4-19 IGBT 晶片三層流道之溫度分佈($d^* = 93.8$, $H_{ch}=700 \mu m$)

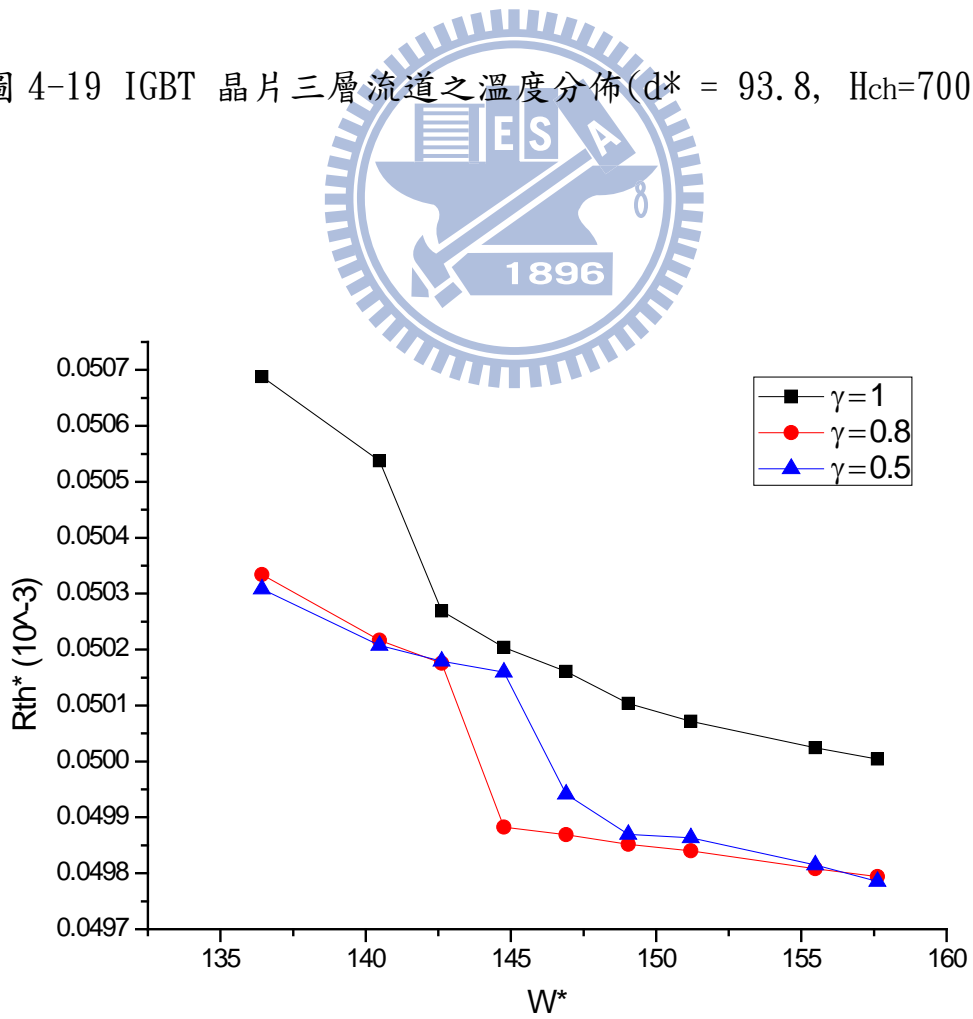


圖 4-20 微流道熱沉結構寬度對熱阻變化之影響

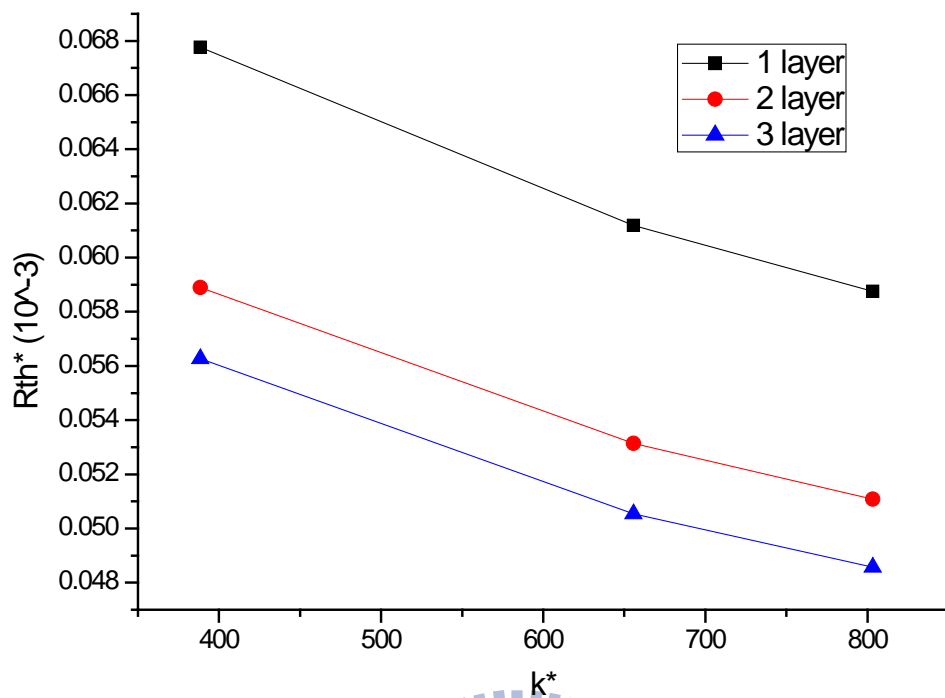


圖 4-21 各種微流道熱沉材料對熱阻變化之影響

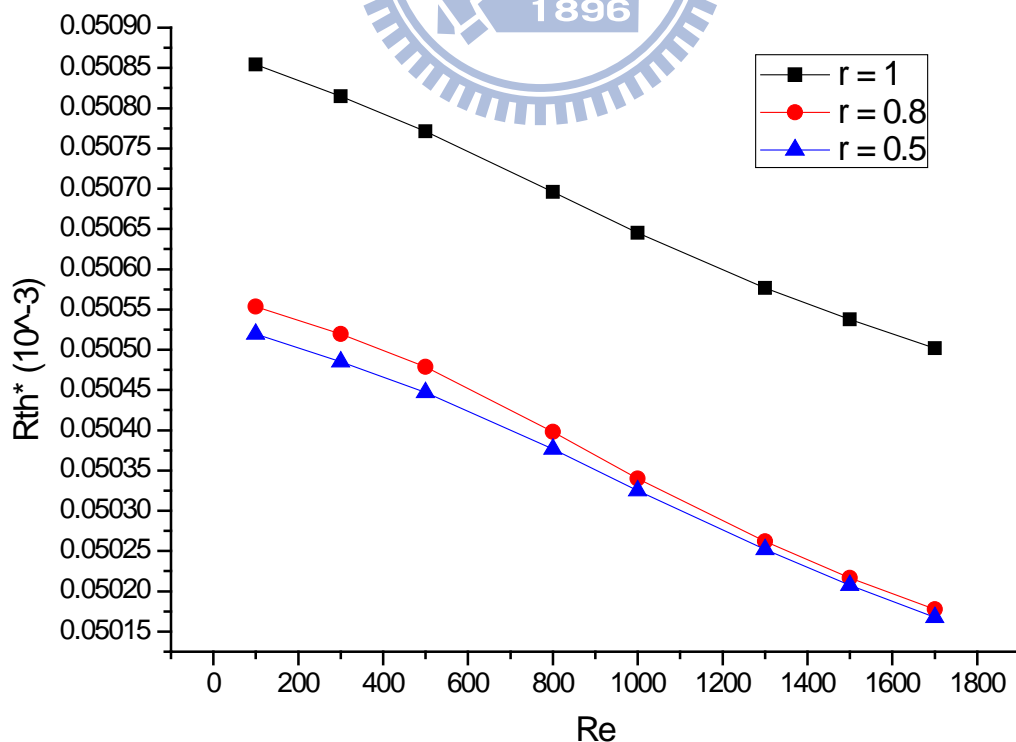


圖 4-22 不同黏度之流體對熱阻變化之影響

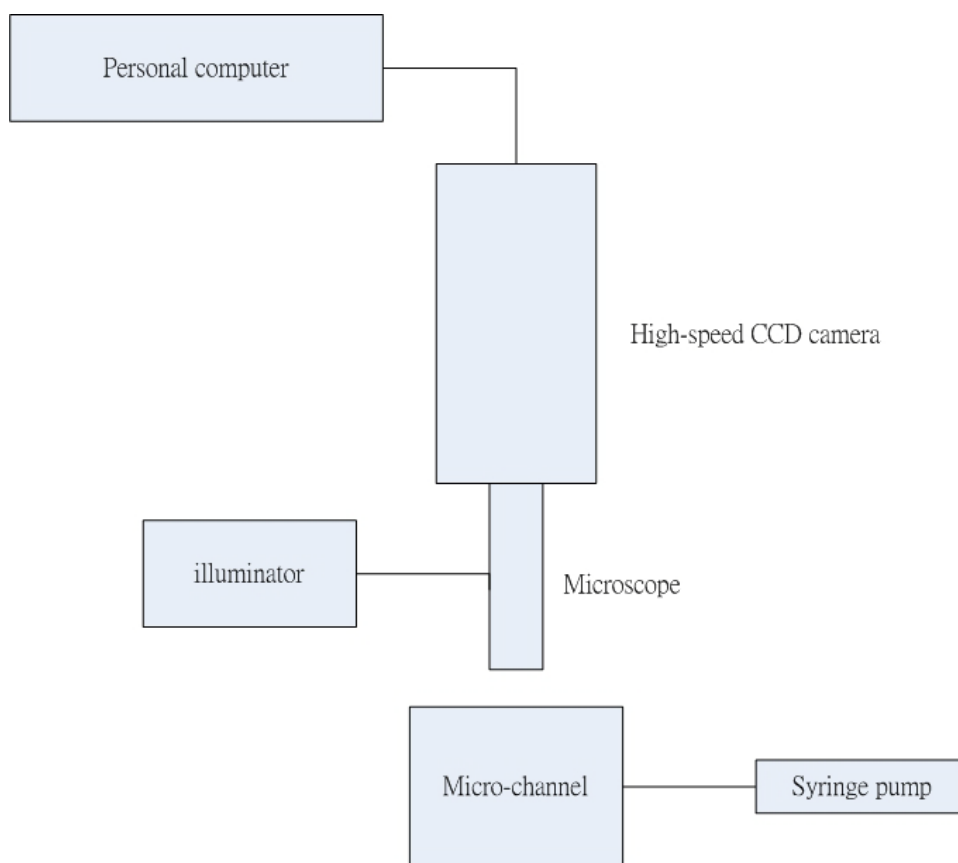


圖 5-1 實驗架構示意圖



圖 5-2 可程式控制注射幫浦



圖 5-3 顯微實驗平台及高速攝影機

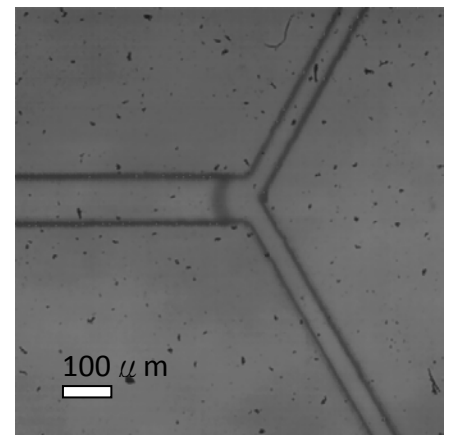
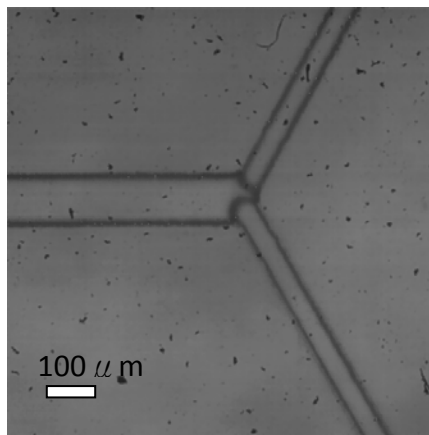
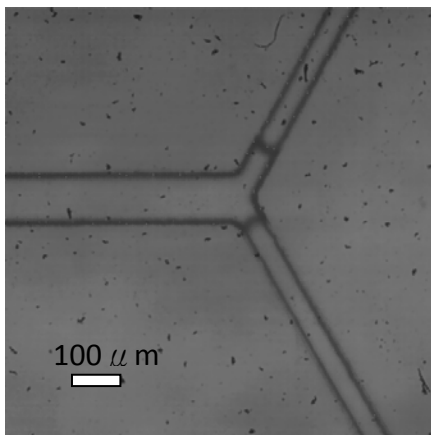
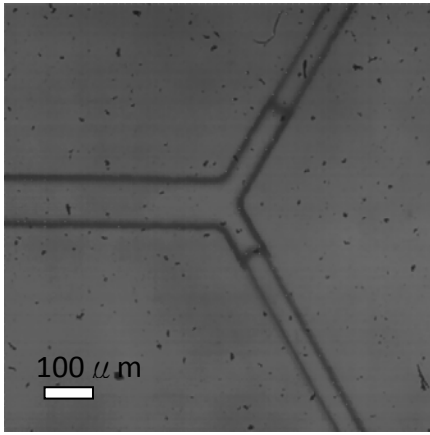
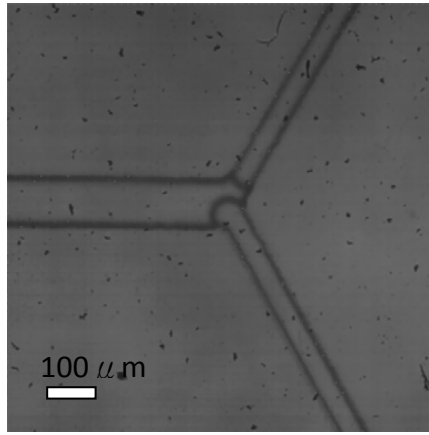


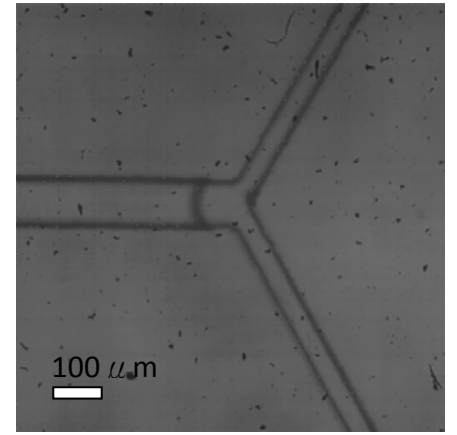
圖 5-4 流量 0.08 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 120°)



10.5 ms

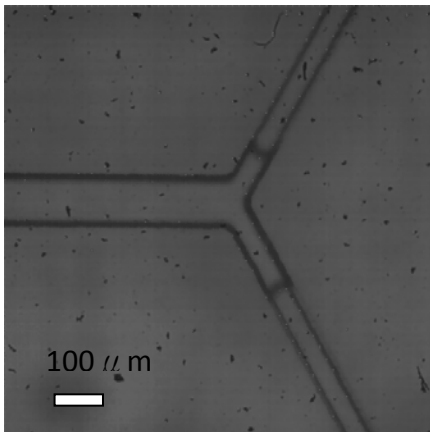
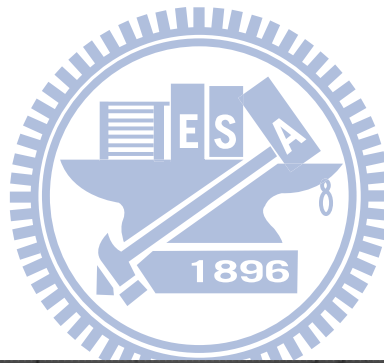


15.5 ms

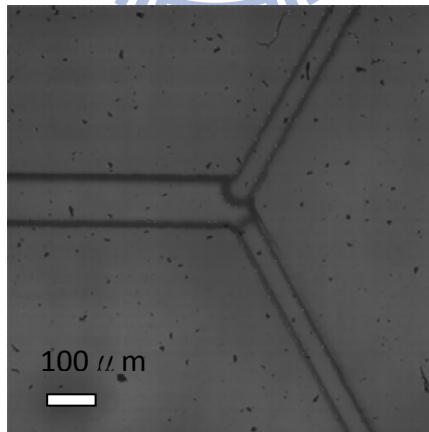


17.5 ms

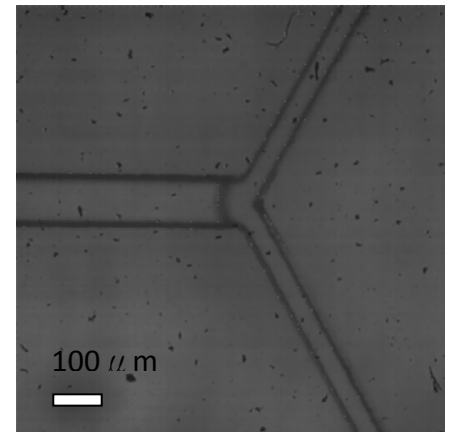
圖 5-5 流量 0.16 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 120°)



8 ms

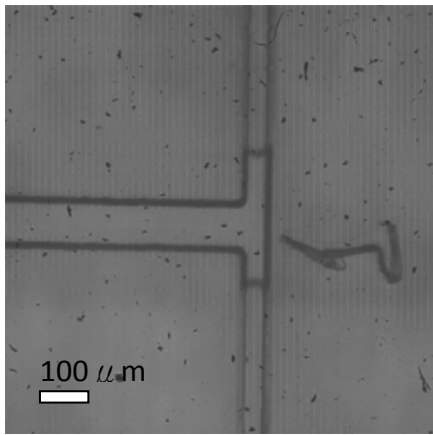


11.5 ms

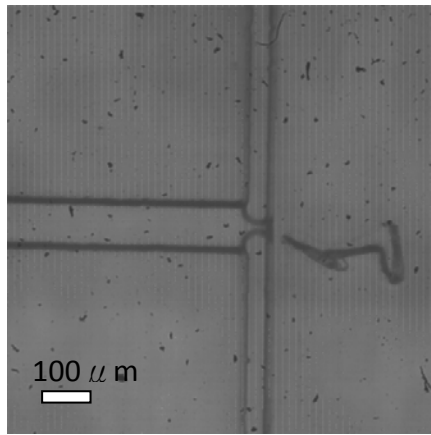


12.5 ms

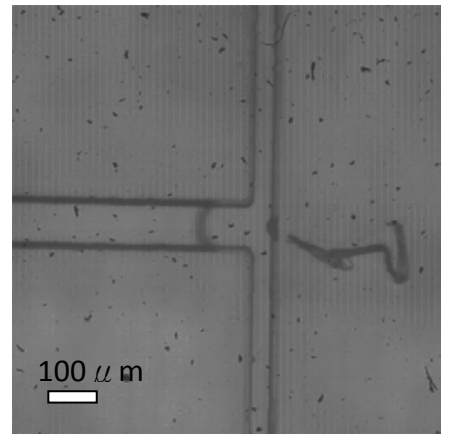
圖 5-6 流量 0.32 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 120°)



23 ms

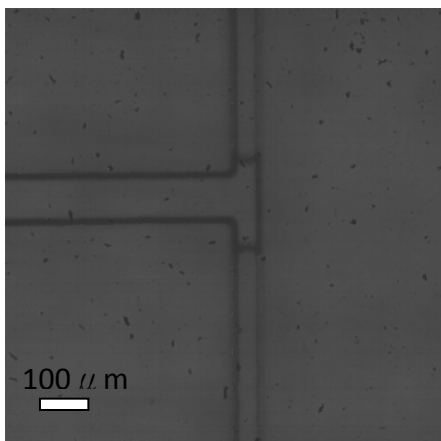
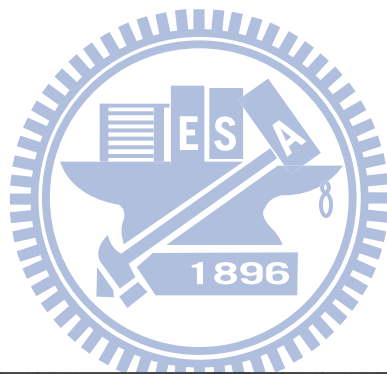


33 ms

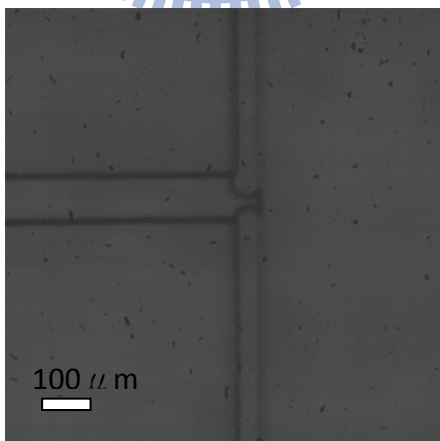


37 ms

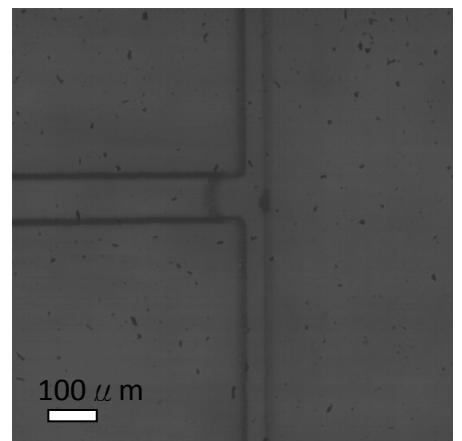
圖 5-7 流量 0.08 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 180°)



16 ms

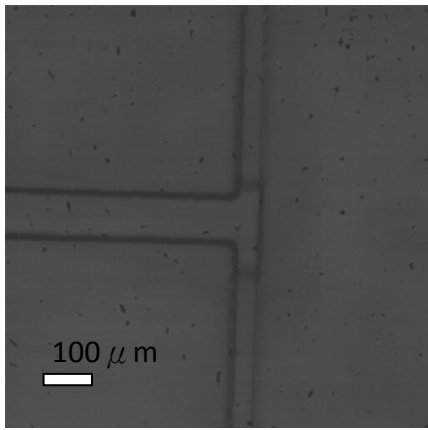


20 ms

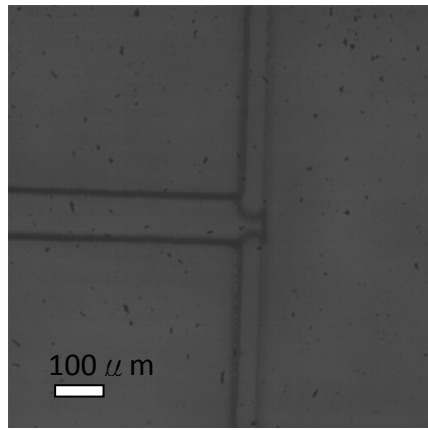


22 ms

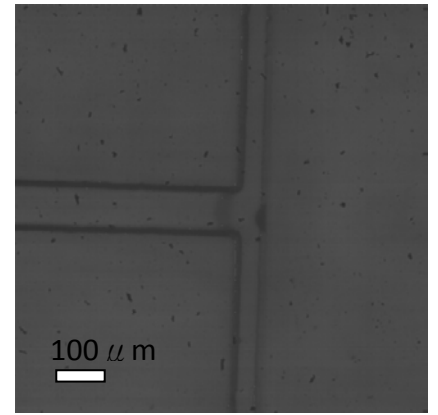
圖 5-8 流量 0.16 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 180°)



8 ms

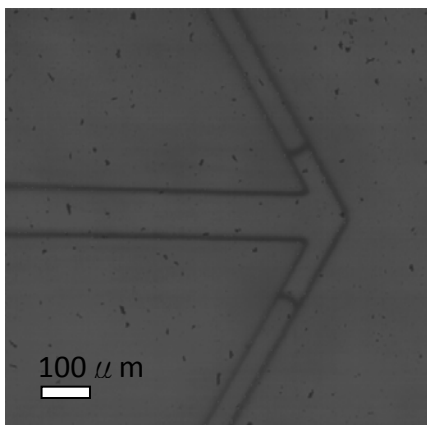
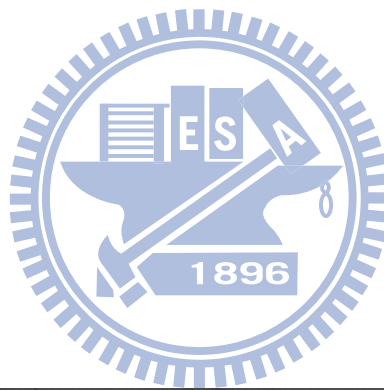


10 ms

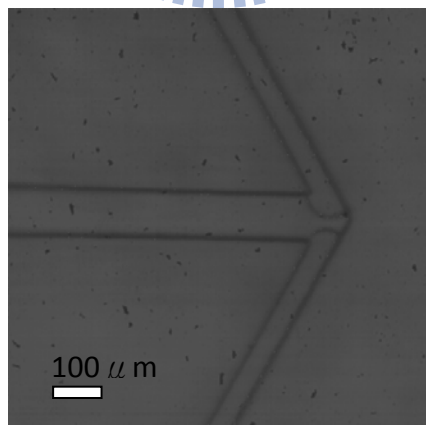


11 ms

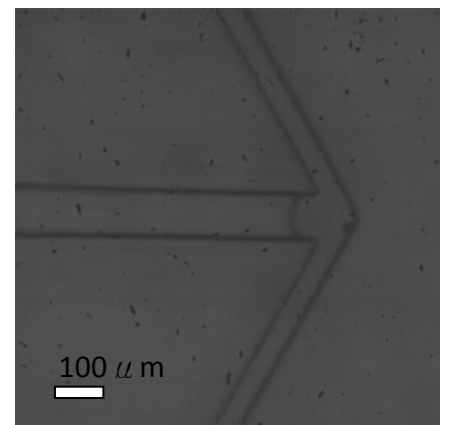
圖 5-9 流量 0.32 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 180°)



21 ms



31 ms



34 ms

圖 5-10 流量 0.08 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 240°)

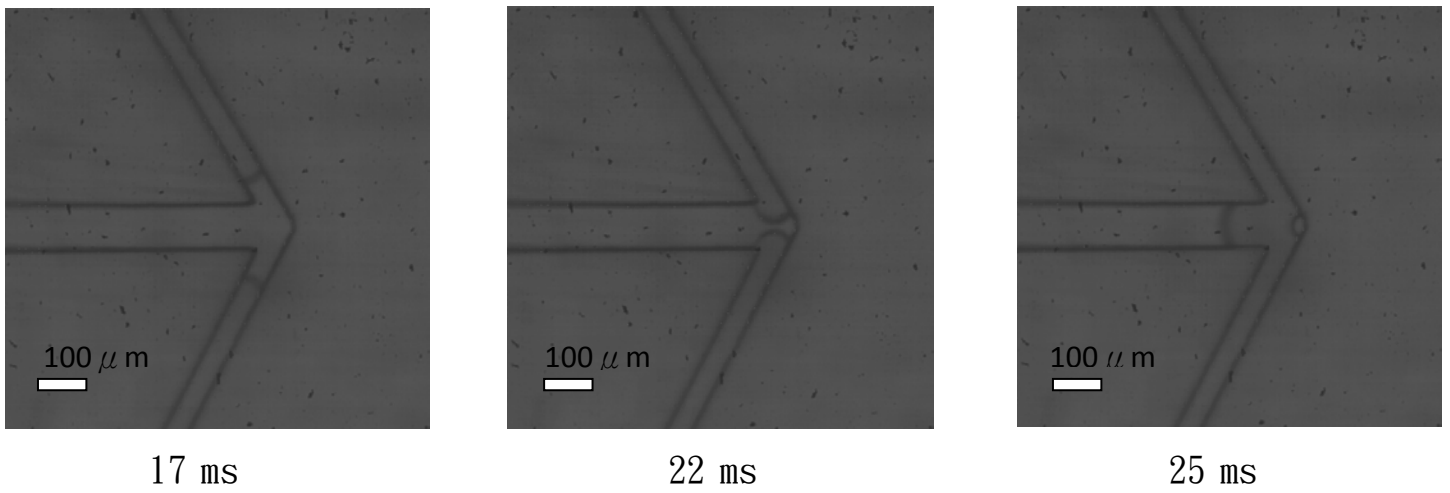


圖 5-11 流量 0.16 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 240°)

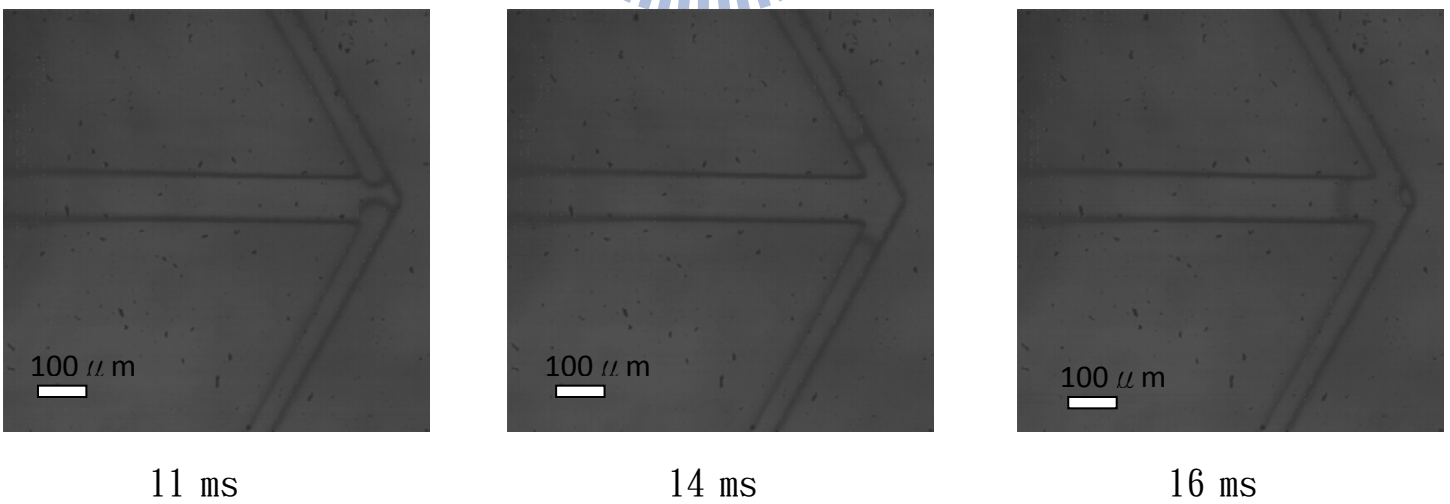
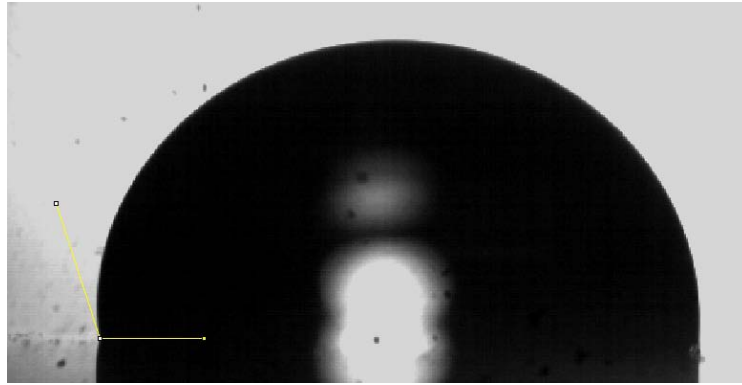
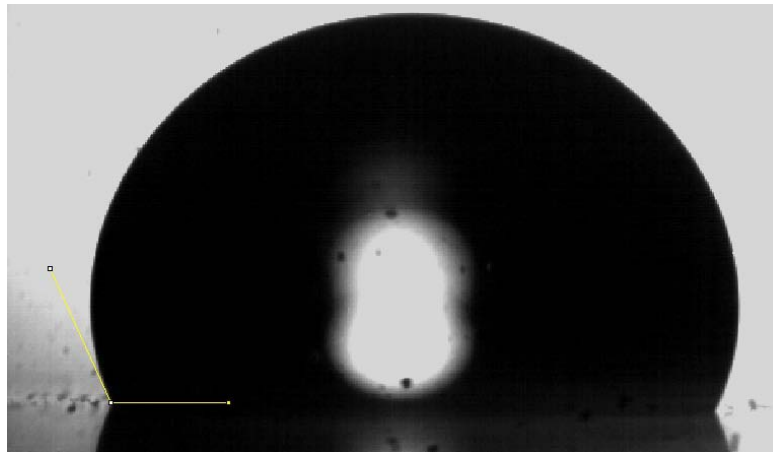


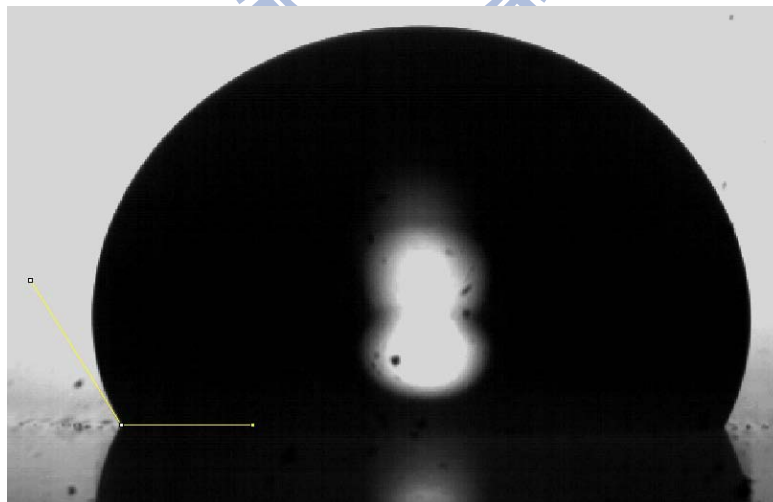
圖 5-12 流量 0.32 ml/min 之氣泡包覆過程(匯流角度 240°)



(a) 去離子水:接觸角 105.877°

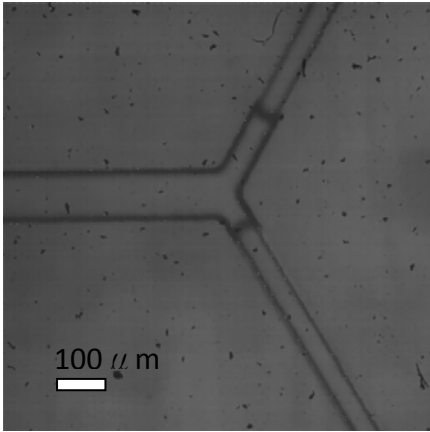


(b) 10%蔗糖溶液:接觸角 114.906°

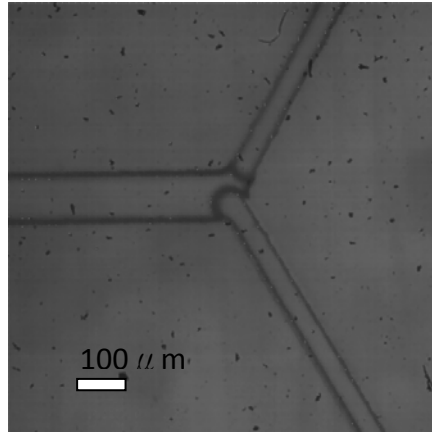


(c) 50%蔗糖溶液:接觸角 123.681°

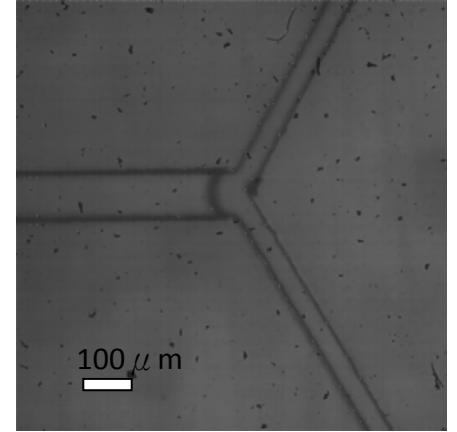
圖 5-13 三種濃度蔗糖溶液對 PDMS 之靜態接觸角



17.5 ms



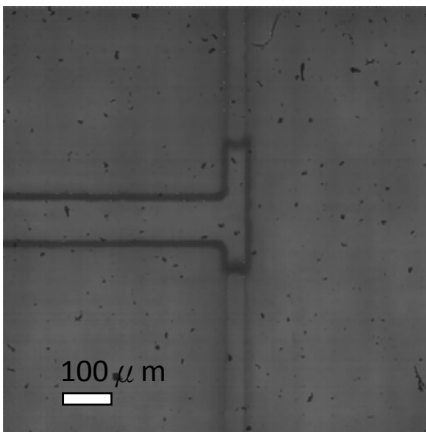
21.5 ms



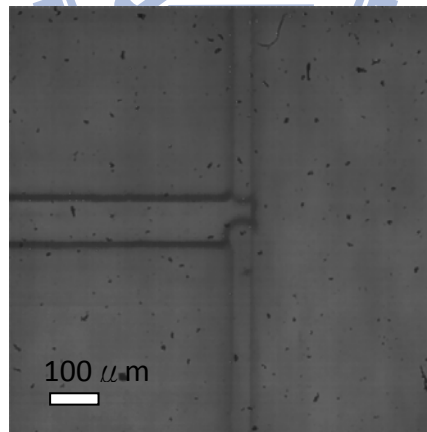
22.5 ms

圖 5-14 流體之蔗糖濃度 10% 在匯流角度 120° 之氣泡包覆過程

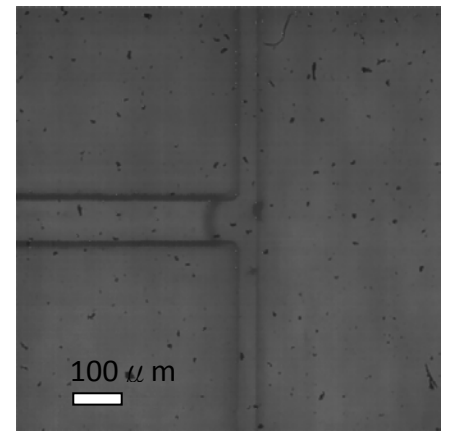
(流量 0.32 ml/min)



8.5 ms



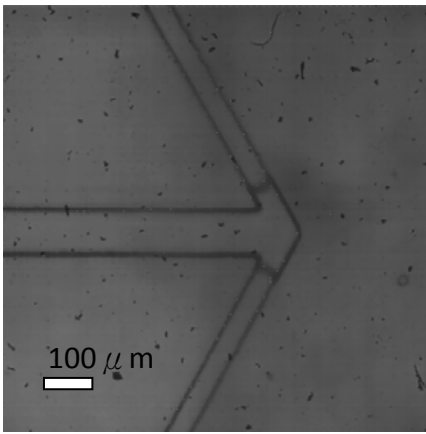
11.5 ms



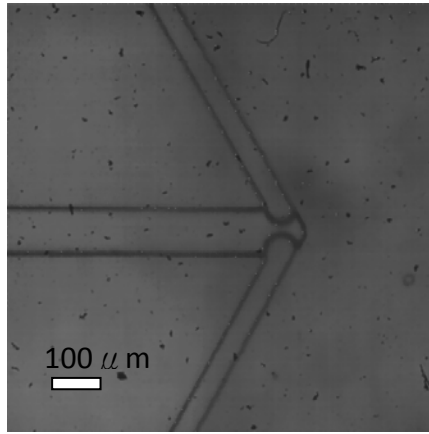
13 ms

圖 5-15 流體之蔗糖濃度 10% 在匯流角度 180° 之氣泡包覆過程

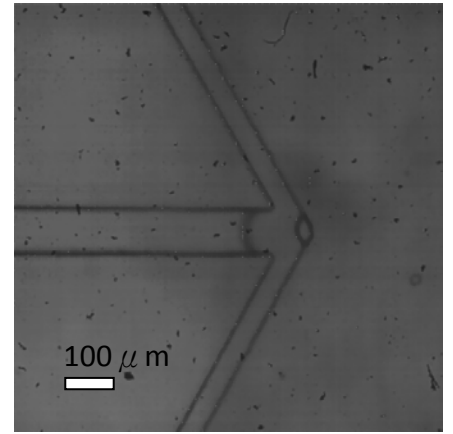
(流量 0.32 ml/min)



11.5 ms



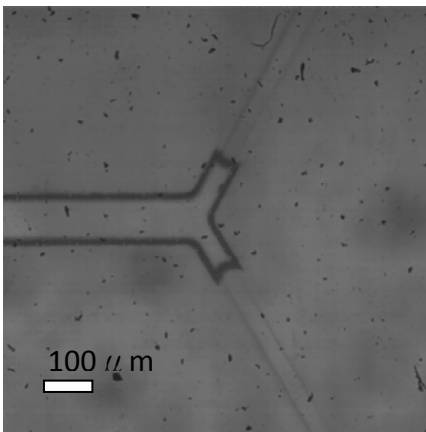
14 ms



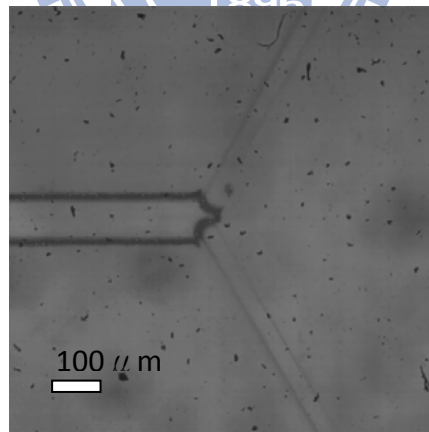
15.5 ms

圖 5-16 流體之蔗糖濃度 10% 在匯流角度 240° 之氣泡包覆過程

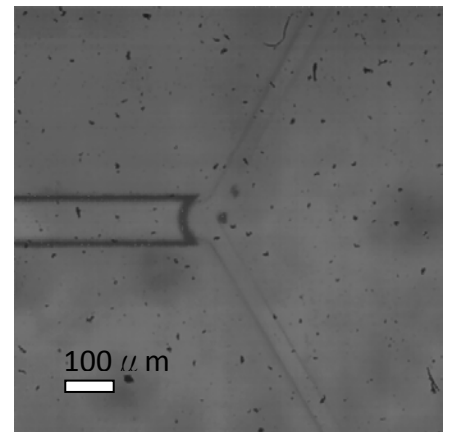
(流量 0.32 ml/min)



23 ms



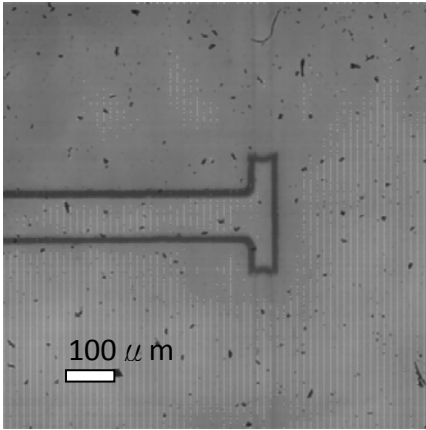
29.5 ms



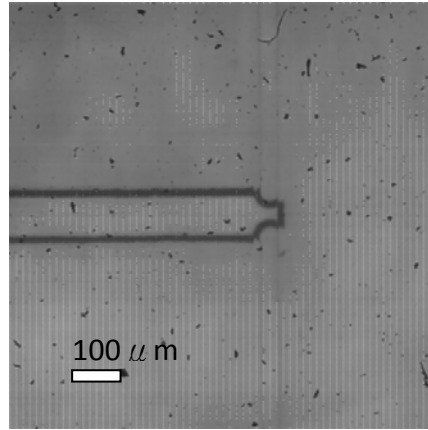
32 ms

圖 5-17 流體之蔗糖濃度 50% 在匯流角度 120° 之氣泡包覆過程

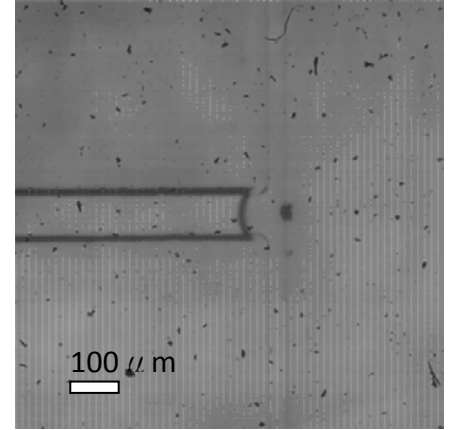
(流量 0.32 ml/min)



17 ms



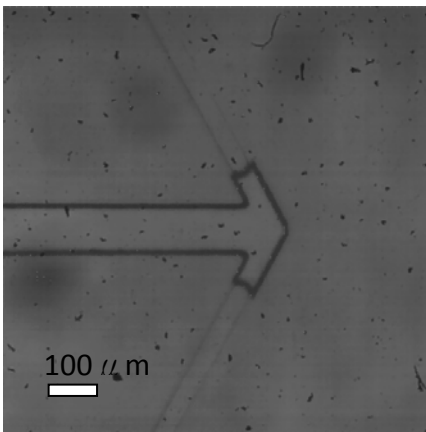
22.5 ms



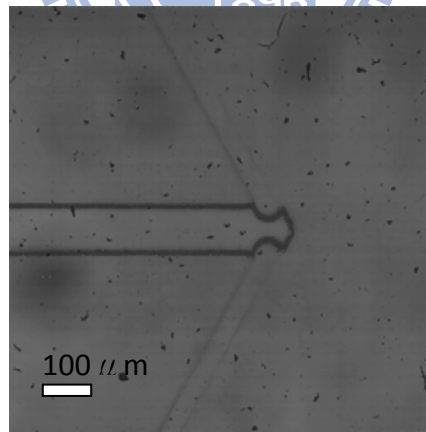
25.5 ms

圖 5-18 流體之蔗糖濃度 50% 在匯流角度 180° 之氣泡包覆過程

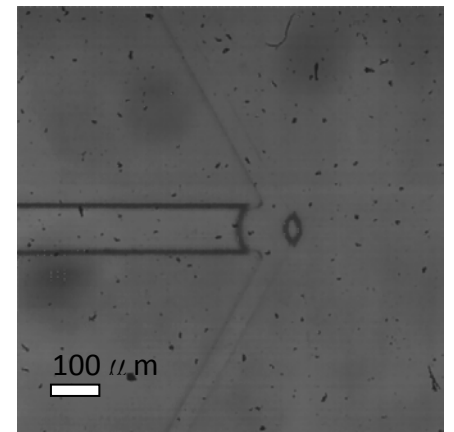
(流量 0.32 ml/min)



20 ms



26 ms



29.5 ms

圖 5-19 流體之蔗糖濃度 50% 在匯流角度 240° 之氣泡包覆過程

(流量 0.32 ml/min)