

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

嵌入微孔洞矽微米線陣列之蒸發熱傳

Enhancing Evaporative Heat Transfer Using Si Micropillar
Array/Microcavities

研究生：李恆佑

指導教授：呂明璋 博士

中華民國一百零二年七月

嵌入微孔洞矽微米線陣列之蒸發熱傳

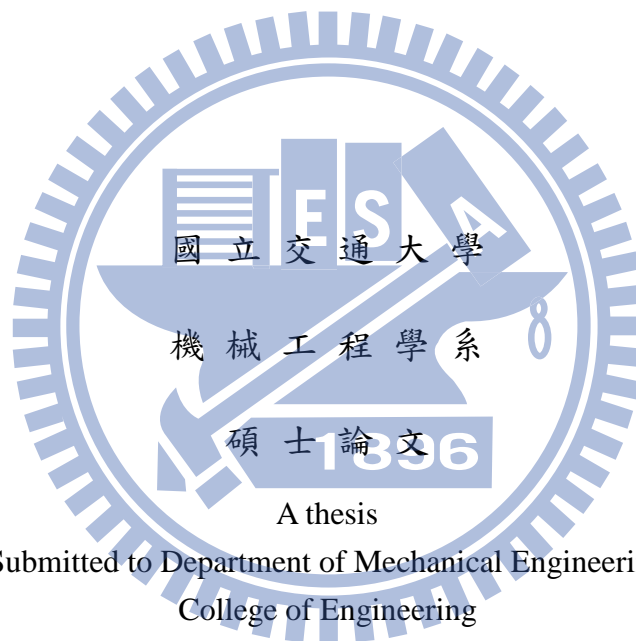
Enhancing Evaporative Heat Transfer Using Si Micropillar
Array/Microcavities

研究生：李恆佑

student : Heng-yo Lee

指導教授：呂明璋

advisor : Dr. Ming-Chang Lu



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 of Science

In

Mechanical Engineering

July 2013

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零二年七月

嵌入微孔洞矽微米線陣列之蒸發熱傳

學生：李恆佑

指導教授：呂明璋

國立交通大學機械工程學系碩士班

中文摘要

本研究提出一嶄新的嵌入微孔洞之矽微米線陣列之熱管蒸發段之毛細結構。此結構以微孔洞陣列在低過熱度時觸發沸騰以增強毛細結構之熱傳係數，同時此微孔洞陣列並不會影響矽微米線陣列之毛細力，故此嵌入微孔洞之矽微米線陣列可以提高毛細結構之熱傳係數並同時維持高的毛細限。實驗結果顯示以去離子水為工作流體，在一大氣壓與 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 時，在高度 $170\text{ }\mu\text{m}$ 之矽微米線陣列含寬度 $40\text{ }\mu\text{m}$ 、深度 $40\text{ }\mu\text{m}$ 之微孔洞之毛細結構內所得之熱傳係數可達 $6.43\text{ W/cm}^2\text{-K}$ ，與高度為 $170\text{ }\mu\text{m}$ 之全微米線陣列相比，其熱傳係數最多可提升約66%，同時其乾涸熱通量最高可維持在 100 W/cm^2 以上。此外，微孔洞可在低過熱度時即觸發沸騰，並且由實驗發現深度大於 $100\text{ }\mu\text{m}$ 之微孔洞較易誘發沸騰。

Enhancing Evaporative Heat Transfer Using Si Micropillar Array/Microcavities

Student :Heng-yo Lee

Advisor : Dr. Ming-Chang Lu

Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

A novel wick structure for the application in the evaporator section of heat pipes/vapor chambers is synthesized. The wick structure consists of a micropillar array embedded with microcavities. The microcavities in the wick structure can enhance heat transfer by triggering boiling at low wall superheat. At the same time, the micropillar array could provide a high dry-out heat flux. As a consequence, the heat transfer coefficient and dry-out heat flux of heat pipes/vapor chambers could be simultaneously enhanced using the proposed wick structure.

In this work, evaporation of saturated de-ionized water on micropillar array embedded with different sizes of cavities is studied. Experimental results show that the wick structure with a 170 μm high micropillar array embedded with cavities having width and depth of 40 μm has a heat transfer coefficient of 6.43 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$, which is 66 % higher than that of a wick structure consisting of only the micropillar array. Meanwhile, the dry-out heat flux of approximately 100 W/cm^2 can be achieved on the wick structure. It is also found that the microcavities in the wick structure could trigger boiling at a low wall superheat and the wicks with cavities deeper than 100 μm could trigger boiling more frequently than the wick with shallow cavities.

致謝

本論文能夠順利完成，首先要感謝我的指導教授呂明璋老師，在研究遇到瓶頸時，指出一條明確的路，並教導我們如何理性的思考與嚴謹的態度做事情，這對於將來一定會有很大的幫助；此外也感謝我的口試委員林清發教授與王啟川教授給予寶貴的意見。

接著感謝同實驗室之成員羅景文、簡東甫、林政佑，感謝學弟林建璋、陳郁其、吳沛修、黃種得、胡文樑、朱袁達，並感謝學長黃志弘、劉岳儒、黃建勳學長，感謝隔壁實驗室曲厚任同學，感謝大家的幫忙。

另外要感謝交大奈米中心、國家儀器科學中心、自強基金會、國家奈米中心、清大曾繁根實驗室，感謝各個實驗室的幫忙。

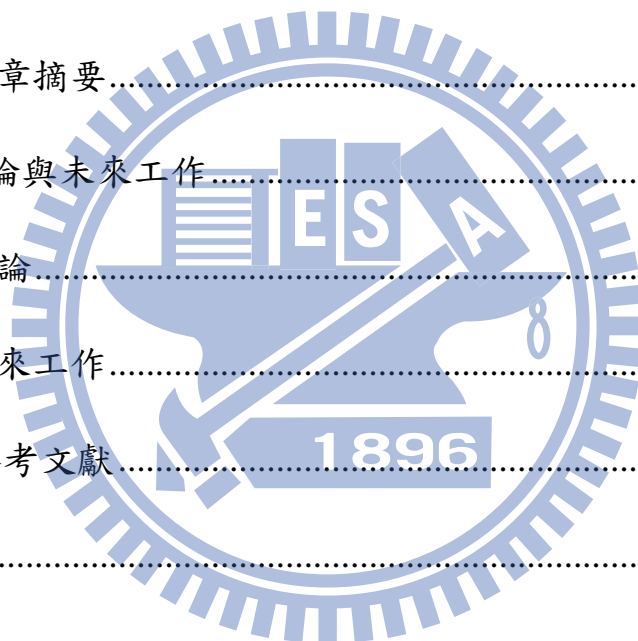
兩年下來非常充實與辛苦，讓我體認到每天工作 8 個小時、10 個小時、12 個小時、15 個小時是非常累人的，和簡東甫各胖了 10 公斤，戲稱奈米增肥實驗室。每天學製程、做製程、想製程、試製程、架設備、做實驗、去除實驗系統 Bug、看書、看 Paper、訓練學弟……，曾經有想簽博，差點被羅景文說服，但暫時放棄了。不過因為這紮實的訓練，學到了很多做事情的方法，感謝老師的栽培，跟二年前比我成長了很多，另外感謝黃志弘學長、羅景文與林建璋在實驗上的幫忙。

最後感謝家人的支持與鼓勵。

目錄

中文摘要	I
ABSTRACT	II
致謝	III
目錄	IV
圖目錄	VI
表目錄	IX
第一章 緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 文獻回顧	2
1.3 研究目的	5
第二章 熱管簡介與其運作限制	7
2.1 熱管簡介	7
2.2 熱管運作限制	8
2.3 熱管熱阻分析	12
2.4 毛細結構與相變	15
2.5 本章摘要	18
第三章 微元件製作於實驗系統	20
3.1 微元件製作方法	20

3.2 實驗系統與量測方法.....	32
3.2.1 實驗系統.....	32
3.2.2 量測方法.....	33
3.3 本章摘要.....	35
第四章 結果與討論.....	36
4.1 全微米線陣列之毛細結構之熱傳	36
4.2 嵌入微孔洞矽微米線陣列之毛細結構之熱傳結果	40
4.3 本章摘要.....	53
第五章 結論與未來工作.....	55
5.1 結論.....	55
5.2 未來工作.....	55
第六章、參考文獻.....	60
附錄.....	63



圖目錄

圖 2.1、熱管示意圖.....	8
圖 2.2、沸騰限制示意圖.....	10
圖 2.3、音速限制示意圖.....	11
圖 2.4、夾帶限制示意圖.....	12
圖 2.5、熱管熱阻示意圖：(a)熱管熱傳示意圖(b)熱管熱阻網路圖	14
圖 2.6、蒸發液薄膜示意圖.....	17
圖 3.1、矽微米線陣列製程示意圖.....	21
圖 3.2、矽微米線陣列之電子顯微鏡圖：(a)高度 100 μm 之矽微米 線陣列上視圖；(b)為(a)側視圖。.....	22
圖 3.3、矽微米線陣列製程示意圖.....	23
圖 3.4、矽微米線陣列之電子顯微鏡圖：(a)高度 170 μm 之矽微米 線陣列上視圖；(b)為(a)側視圖。.....	24
圖 3.5、嵌入微孔洞矽微米線陣列製程示意圖.....	25
圖 3.6、嵌入微孔洞矽微米線陣列之電子顯微鏡圖：(a)高度 100 μm 矽微米線陣列嵌入寬度 30 μm 深度 110 μm 微孔洞之毛細結 構之上視圖；(b)為(a)側視圖；(c)高度 100 μm 矽微米線陣列	

嵌入寬度 60 μm 深度 130 μm 微孔洞之毛細結構之上視圖;(d) 為(c)之側視圖。	26
圖 3.7、嵌入微孔洞矽微米線陣列製程二示意圖.....	28
圖 3.8、製程二所得之結構電子顯微鏡圖：(a)高度 170 μm 矽微米 線陣列嵌入寬度 30 μm 深度 30 μm 微孔洞之毛細結構之上視 圖；(b)為(a)側視圖；(c)高度 160 μm 矽微米線陣列嵌入寬度 40 μm 深度 40 μm 微孔洞之毛細結構之上視圖；(d)為(c)之側 視圖；(e)高度 170 μm 矽微米線陣列嵌入寬度 70 μm 深度 50 μm 微孔洞之毛細結構之上視圖；(f)為(e)之側視圖。	30
圖 3.9、微加熱器製程示意圖.....	31
圖 3.10、測試端元件之(a)示意圖與(b)實際圖	32
圖 3.11、密閉式蒸發實驗系統示意圖.....	33
圖 3.12、測試端之示意圖:(a)上視圖與(b)側視圖	34
圖 4.1、高度 100 μm 之矽微米線陣列熱傳曲線圖	37
圖 4.2、比較高度為 100 μm 、170 μm 、56 μm 、145 μm 之矽微米 線陣列之毛細結構之熱傳。	39
圖 4.3、高度 170 μm 之矽微米線陣列在熱通量為 51 W時所拍攝之 影像.....	40

圖 4.4、比較高度 100 μm 之矽微米線陣列與此陣列內嵌入二種尺寸微孔洞之熱傳圖.....	42
圖 4.5、為高度 100 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度 30 μm 深度 110 μm 之微孔洞，在熱通量為 26 W時在不同時間所得之影像	44
圖 4.6、為高度 100 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度 60 μm 深度 130 μm 之微孔洞，在熱通量為 15 W時在不同時間所得之影像	45
圖 4.7、比較高度 170 μm 之矽微米線陣列毛細結構及在此結構內嵌入二種微孔洞與高度 160 μm 之矽微米線陣列嵌入微孔洞之毛細結構之熱傳.....	47
圖 4.8、高度 160 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度 40 μm 深度 40 μm 之微孔洞之毛細結構，在熱通量為 82 W時(為圖 4.7 中黑色空心星形之熱傳曲線)所拍攝之影像.....	48
圖 4.9、高度 160 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度 40 μm 深度 40 μm 之微孔洞之毛細結構，在熱通量為 72 W時(為圖 4.7 中紅色空心星形之熱傳曲線)在不同時間所得之影像.....	50
圖 4.10 比較本實驗所製作之七種毛細結構之熱傳.....	52
圖 5.1、新型嵌入高牆微孔洞微米線陣列SEM圖.....	56

圖 5.2、三種微孔洞密度之嵌入微孔洞微米線陣列示意圖:(a)目前
 之微孔洞密度密度，(b)2 倍微孔洞密度密度與(c)4 倍微孔洞
 密度密度。57

圖 5.3、嵌入微孔洞矽微米線陣列製程三示意圖.....58

表目錄

表一 熱管各部分元件之熱阻數量級.....15

表二、實驗樣本之表面結構之幾何對應表.....36

表三、本研究所實驗之樣本與其數據對應表.....54



第一章 緒論

1.1 研究動機

根據摩爾定律，積體電路上可容納的電晶體數目，約每 18 個月便會翻倍 [1]。這使得電子產品效能大幅增加，且其能量密度也越來越高，同時造成熱點(Hot spot)的產生。此熱點的熱通量可高達 300 W/cm^2 [2]，因此如何解決電子元件散熱問題，是目前非常重要的議題 [2, 3]。

大熱通量微電子元件之散熱目前主要的方向有熱電致冷器 (Thermoelectric Cooler) [4-6]、微隙致冷器(Microgap Cooler) [6, 7]和熱管 (Heat pipe) [8]。熱電致冷器應用 Peltier 效應，利用電流移動將熱帶走，達到致冷的效果。熱電致冷器擁有高可靠性與方便製作的優點 [5]。但是由於目前的熱電材料效率偏低，造成熱電致冷器所能帶走的熱通量並不高，故熱電致冷器並不能夠用於解決目前高能量密度的電子產品之散熱 [4]。微隙致冷器則利用泵浦推動微流道內的液體流動而帶走熱量。雖然微隙致冷器之散熱與均溫效果都不錯，但其需額外動件供給能量以驅動泵浦使液體運動 [6, 7]。而熱管則藉由相變化之潛熱帶走大量的熱而達到優異的散熱效果。熱管主要優點是被動式元件 [8, 9]，然而熱電致冷器和微隙致冷器都需要額外動件去驅動。因此，熱管目前被廣泛應用於電子元件散熱。

熱管的效能主要取決於兩個參數：熱傳係數與乾涸熱通量(Dryout Heat Flux)。這兩個參數主要都是被熱管的蒸發段的表現所決定。熱管蒸發段內之毛細結構會決定熱管乾涸熱通量，同時毛細結構也是熱管的主要熱阻，因此毛細結構為熱管中最重要的元件。

1.2 文獻回顧

熱管的毛細結構主要分成槽道型(Axial Groove)、篩網型(Screen Mesh)、超細纖維型(Fine Fiber)、燒結型(Sintering)。在這中，燒結型毛細結構擁有較優異的毛細力、與高熱傳導率與可靠性 [10]。所以文獻回顧將專注於燒結型毛細結構 [11-19]與本團隊之前所開發之規則型毛細結構 [20]。

Hanlon和Ma在 2003 年 [11]發現用改變毛細結構高度的方法，不能同時增強此熱管之毛細力與熱傳係數。此乃因於結構底部充滿著飽和液體，而蒸發只發生在液氣表面(結構頂端)。所以增加結構高度雖然可以增加毛細力，但是同時也會增加熱阻，導致熱傳係數下降。同年Prasher [12]亦指出在採用同一種燒結粒子大小之毛細結構，會在一特定之結構厚度產生最大熱傳表現。此乃因於熱傳輸限制會隨結構厚度增加而減少，而毛細限制會隨結構厚度增加而上升，故二者會在特定結構厚度讓熱傳達到極值。Byon和Kim在 2012 年 [13]研究顆粒大小對熱管性能的影響。他們發現對單孔隙之毛細結構(顆粒大小在 50~275 μm 之間)，顆粒越大毛細力所能吸收的液體越多。這是因為當顆粒變小時，毛細力雖然會上升，但是結構孔

隙變小導致液體流阻也會跟著上升，使結構所能吸收的液體變少。但當顆粒超過 600 μm 時，則因為顆粒太大，液體流經顆粒的慣性力太大，以致於液體不能完全的充滿毛細結構。Semenic等人於 2008 年 [14, 15]研究雙孔隙率毛細結構對熱管性能的影響。他們發現雙孔隙率的結構比單孔隙的結構毛細表現還要更好，此乃因於小孔隙提供較大的毛細力，而大的孔隙提供比較小的流阻，故造成雙孔隙率結構毛細表現比較好。不過Byon和Kim在 2012 年 [13]更進一步發現雙孔隙毛細結構之兩種孔隙之曲率半徑最好的比例約為 0.29。此乃由於當兩種孔隙的曲率半徑比例太小，其表現會像單孔隙結構。反之，當兩種孔隙的曲率半徑比例太大，則會導致大孔隙與小孔隙的毛細力相距過大，造成流體皆由小孔吸收，因此沒控制好兩種孔隙的比例反而會降低毛細表現。Weibel等人於 2010 年 [16]的實驗看到當燒結結構有沸騰發生時可以有效降低熱阻，該次乾涸熱通量約為 600 W/cm^2 ，而熱傳係數約為 20 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。Weibel等人於 2012 年 [17, 18]更進一步設計特別形狀的燒結結構讓沸騰的氣泡迅速離開毛細結構，因此能夠增強熱傳係數。此外，Weibel等人 [17-19]在銅粉燒結結構上加入了薄薄的奈米碳管，使表面超疏水，此超疏水的表面會比較容易沸騰，且降低沸騰之過熱溫度，以提升較低過熱溫度的熱傳，其乾涸熱通量約為 457 W/cm^2 ，而熱傳係數約為 30 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。

關於顆粒型的毛細結構已經被廣泛的研究了 [11-19]，但是規則型結構如矽微米線陣列，則尚未被完全了解。況且利用微機電製程技術，可以清楚定義並製作微結構的長、寬、高與間隔。如此可以精準地掌控結構形狀，並可以有系統的分析結構對熱管性能的影響，且微機電製程可製作出比銅粉燒結方法所得較小之微結構，故可深入有系統地探討毛細結構對熱傳的影響，並能以此規則型結構提升熱管之熱傳係數與毛細限。此外，規則型結構也可以製作出較簡單且氣泡容易離開的表面，如此可以避免氣泡卡在毛細結構裡面，且利用沸騰帶走熱量，以提升熱傳係數。

先前之研究探討矽微米線陣列的蒸發現象 [20]，並發現在矽微米線陣列上，當柱子間距在 $8.5\sim 16.8\ \mu\text{m}$ 之間時，熱傳係數有最大值。這是因為間距太大時，柱子的數目變少，所以柱子與液體接觸面積變小，導致三相區的面積變小，故影響整個結構的熱傳係數。但是間距太窄的時候，則需要供給較大的過熱溫度去引發蒸發，導致熱阻上升。故熱傳係數在一特定柱子與柱子間距時有一最大值。此外，用改變結構高度的方法，可以增加最大質量流率，同時在柱子高度較大之微結構表面上，於高熱通量時可看到沸騰產生，且沸騰並不會造成此規則型結構之沸騰限，此乃因為此規則型結構較簡單且氣泡易離開結構表面，故不會有氣泡卡在通道。這代表在高熱通量時，可以利用高熱傳係數之沸騰帶走熱量，其乾涸熱通量可以達到 $277.0 (\pm 9.7)\ \text{W}/\text{cm}^2$ ，而熱傳係數 $19.6 (\pm 0.8)\ \text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 另外當毛細結構面積

遠大於加熱面積時，因為散熱面積遠大於加熱面積，其乾涸熱通量可以達到 $733.1 (\pm 103.4) \text{ W/cm}^2$ 。

由前面之文獻回顧可以知道規則型毛細結構可以利用沸騰現象增強熱傳，故本研究提出一嵌入微孔洞之矽微米陣列毛細結構來提高毛細結構之最大熱傳量與熱傳係數。此微孔洞可在低熱通量時觸發沸騰，以達到熱傳增強的效果，同時矽微米陣列可以提供高的毛細限，本研究將同時探討不同大小的微孔洞之熱傳增強效果。

1.3 研究目的

由於電子產品的蓬勃發展，電子元件與微元件的散熱問題是目前的關鍵問題。熱管因為其利用相變化帶走大量的潛熱，且為被動式元件，為有效解決目前微元件散熱的一種方法。熱管的性能取決於毛細結構，故本研究架設一密閉式蒸發實驗系統，並使用去離子水為工作流體，希望創造與熱管內部相似之環境，以探討規則型毛細結構來完整探討結構幾何形狀對熱管性能的影響，此外本研究同時提出以一嶄新的嵌入微孔洞之矽微米陣列毛細結構來同時提升熱管之毛細限與熱傳係數。此嵌入微孔洞之矽微米陣列毛細結構可以利用微孔洞觸發沸騰以增加熱傳係數並同時以矽微米陣列提高毛細限。本研究的成果研究可以做為改良熱管毛細結構的方法，使增強熱管散熱，以解決大功率電子元件的散熱。

本論文結構如下：第二章將介紹熱管運作原理及其操作限制；第三章

將介紹微結構之製作方法、實驗系統與實驗方式；第四章將介紹實驗結果與討論；第五章為結論與未來工作。



第二章 熱管簡介與其運作限制

2.1 熱管簡介

熱管最早在 1964 年被 Grover 的研究團隊發表 [8]。當時發現此種結構可藉由相變化帶走大量潛熱，以達到優異的熱傳效果。此外，Cotter 在 1984 年提出微熱管(Micro heat pipe) [21]可做為微元件散熱裝置。目前，熱管因其高均溫、高熱傳導率與為被動式元件的特性，被廣泛運用在各元件之散熱上，例如：太空裝置、發電廠與電腦之散熱。熱管的組成如圖 2.1 所示。熱管可分為管壁、毛細結構與蒸氣核心三部分。管壁保護熱管裡的流體不會流失，毛細結構利用毛細壓差輸送液體，而液體相變化之蒸氣則藉由蒸氣核心傳輸至熱管支另一端。

熱管的工作區段可分為蒸發段、恆溫段與冷凝段。施加外在熱源於蒸發段，會使蒸發段的液體過熱而產生相變形成氣體，且因為在此位置不斷產生氣體，所以蒸發段的氣體壓力比較高。所產生之高壓氣體會經過恆溫段往低壓的冷凝段移動，達到熱傳輸的效果。恆溫段因為處於液氣飽和的兩相區，所以擁有著恆溫的特性。冷凝段在冷端負責把熱排除，當熱從冷凝段排出的時候，會使冷凝段的氣體過冷因而產生相變化形成液體。因為冷凝段氣體不斷減少，所以冷凝段的氣體壓力比較低。熱管藉由氣體由高壓往低壓移動帶走相變所產生之潛熱而達到高熱傳效果。此外，冷凝段不

斷增加的液體會造成冷凝段的毛細力比較低，而蒸發段不斷減少的液體會造成蒸發段的毛細力上升，最後液體利用此毛細壓力差由冷凝段傳輸到蒸發段而完成循環。熱管的性能取決於兩個參數：熱傳係數與乾涸熱通量 (Dryout Heat Flux)，這兩個參數主要都是被熱管的蒸發段的表現所決定。

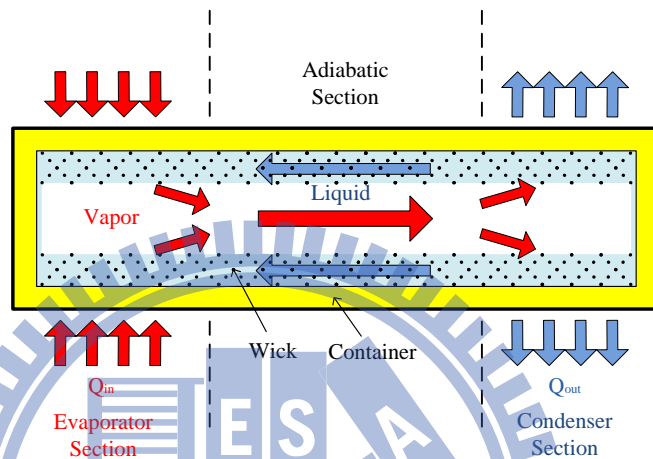


圖 2.1、熱管示意圖

2.2 熱管運作限制

熱管在實際運作上受到四個現象限制，此四個限制分別為：毛細限制、沸騰限制、音速限制與夾帶限制。其中毛細限制是因毛細力為熱管內液體流動之主要驅動力，故毛細壓力要克服流體的壓降才能驅動液體，此毛細限之方程式如下所示：

$$\Delta P_{capillary} \geq \Delta P_{liquid} + \Delta P_{vapor} + \Delta P_{gravity} \quad (2-1)$$

其中 $\Delta P_{capillary}$ 是毛細壓降、 ΔP_{liquid} 是液體壓降、 ΔP_{vapor} 是氣體壓降而 $\Delta P_{gravity}$ 是重力壓降。當用楊-勒普勒斯公式(Young-Laplace equation)表示毛細壓降，且以達西公式(Darcy's law)表示液體壓，另外將氣體壓降以管流的層流公式計算，而重力壓降以用重力造成的壓降公式表示之，則式(2-1)可改寫成下式：

$$\frac{\sigma}{r_c} \geq \frac{\mu_l L \dot{m}_{in}}{\kappa \rho_l A_w} + \frac{64}{Re_v} \left(\frac{L}{D_v} \right) \frac{\rho_v u_v^2}{2} + \rho_l g h \quad (2-2)$$

其中 σ 是流體表面張力、 r_c 是此毛細結構最小的曲率半徑、 μ_l 是液體黏滯係數、 L 是液體移動的距離(假設液體與氣體移動的距離一樣)、 \dot{m}_{in} 是被毛細力所吸收的質量流率、 κ 是毛細結構的滲透性、 ρ_l 是液體密度、 A_w 是流體移動的橫截面、 Re_v 是氣體在熱管裡的雷諾數、 D_v 是蒸氣核心直徑、 ρ_v 是氣體密度、 u_v 是氣體移動速度、 g 是重力常數、 h 是冷凝段與蒸氣段的高度差。由式(2-2)可知，熱管的毛細力決定可吸收液體的最大質量流率(\dot{m}_{in})。當熱管被加熱時，假設所施的熱全由相變化所吸收，則熱管所散的热量可由下式表示：

$$Q = \dot{m}_{out} h_{lv} \quad (2-3)$$

其中 Q 是所施的熱、 \dot{m}_{out} 是相變所消耗的質量流率、 h_{lv} 是液氣相變的焓差。當持續增加熱通量直到相變化消耗的液體質量流率大於此毛細結構

所能吸收的最大液體質量流率時，液體會來不及補充至蒸發段，最後會變成毛細結構損毀，此現象稱為毛細限制。

沸騰限制是因為管壁表面溫度過高時，導致氣泡卡住毛細結構，故阻礙液體補充而造成結構燒毀，其示意圖如圖 2.2 所示：

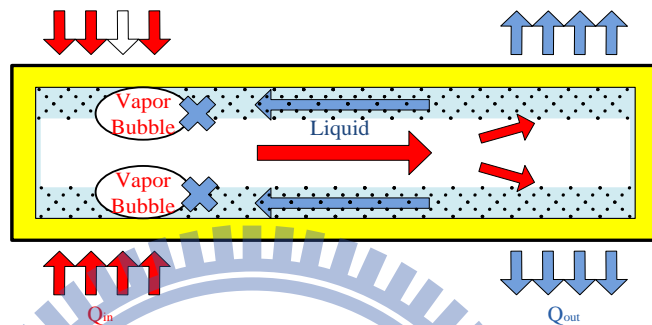


圖 2.2、沸騰限制示意圖

當相持續增加熱通量時，蒸發段與冷凝段的壓力差會越來越大，此造成氣體流動的速度增加，當氣體流動速度等於音速時，會有阻塞(Choked)現象。此現象導致壓力增加時，速度還是維持在音速，故限制熱管之蒸氣最大速度，此即是音速限制(如圖 2.3 所示)。若已知熱通量，那氣體速度可以用下式得知：

$$u_v = \frac{Q}{\rho_v h_{lv} \left(\frac{\pi D_v^2}{4} \right)} \quad (2-4)$$

假設供給的熱是 100 W，環境條件為一大氣壓與 100°C 飽和水，且熱管中空部分的直徑 1 cm，則由式(2-4)可得到的氣體移動速度為 0.95 m/s。由於此值遠小於該溫度及壓力下的音速，因此本實驗不考慮音速限制。

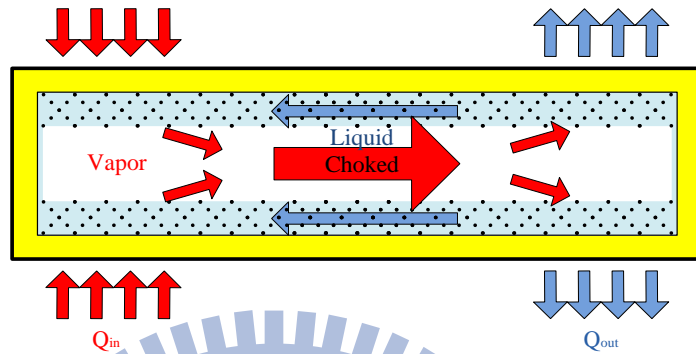


圖 2.3、音速限制示意圖

夾帶限制如圖 2.4 所示，夾帶限制是因為當持續增加熱通量時，導致氣體流動的速度太快、動能太大，這使得結構裡上層的液體被蒸氣夾帶回冷凝區，造成蒸發段液體不足的狀況故造成結構損毀。假若流體是水，因為潛熱值大，通常不會發生此情況。夾帶限制可由韋伯數(We)決定：

$$We = \frac{\rho_v u_v^2}{(\sigma/d)} \quad (2-5)$$

其中 d 是表面張力的特徵長度。韋伯數為慣性力與表面張力的比值，當慣性力影響越明顯的時候，夾帶現象就越明顯。假設韋伯數為 1 時會有夾帶限制，則根據式(2-5)可得到一臨界蒸氣速度：

$$u_{vc} = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_v d}} \quad (2-6)$$

其中 u_{vc} 是臨界蒸氣速度。當假設特徵長度是 $10 \mu\text{m}$ ，環境條件在一大氣壓及 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 飽和水的條件，可由式(2-6)得到一臨界蒸氣速度，再將此速度代入式可得熱通量(q''):

$$q'' = \rho_v h_{lv} u_{vc} \quad (2-7)$$

由式(2-7)可得夾帶限制之熱通量約為 13000 W/cm^2 。目前熱管所應用之環境其熱通量約在 100 W/cm^2 這個數量級，因此夾帶限制在本實驗不考慮。由以上分析可知毛細限與沸騰限是目前熱管運作常遇到的限制。

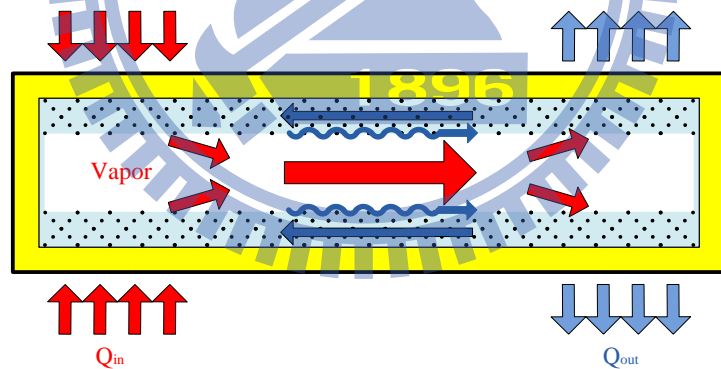


圖 2.4、夾帶限制示意圖

2.3 熱管熱阻分析

熱管的運作限制決定熱管乾涸熱通量，而熱管的熱阻則決定熱管熱傳係數。熱管熱阻如圖 2.5 所示，其中圖 2.5(a)為熱管熱傳示意圖，而圖 2.5(b)

為熱管熱組網路圖。熱管內各部分元件熱阻由管壁熱阻、管壁恆溫段熱阻、毛細結構熱阻、毛細結構恆溫段熱阻、液氣表面熱阻與蒸氣核心熱阻所組成，這些熱阻可用以下公式估算：

$$R_{wall} = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi L_e k_{wall}} \quad (2-8a)$$

$$R_{wall,a} = \frac{L_a}{\pi(D_o^2 - D_i^2)k_{wall}} \quad (2-8b)$$

$$R_{wick} = \frac{\ln(D_i/D_v)}{2\pi L_e k_{wick}} \quad (2-9a)$$

$$R_{wick,a} = \frac{L_a}{\pi(D_i^2 - D_v^2)k_{wick}} \quad (2-9b)$$

$$R_i = \frac{1}{\left[h_v \frac{2\alpha}{2-\alpha} \left(\frac{1}{2\pi RT_v} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{h_v P_v}{RT_v^2} \right) \right] [\pi D_v (L_e + L_a + L_c)]} \quad (2-10)$$

$$R_{vc} = \frac{8RT_v^2 \mu_v L_a}{\pi \rho_v P_v h_v^2 r_v^4} \quad (2-11)$$

其中式(2-8a)為管壁熱阻、式(2-8b)管壁面恆溫段熱阻、式(2-9a)為毛細結構熱阻、式(2-9b)為毛細結構恆溫段熱阻、式(2-10)為液氣表面熱阻而式(2-11)為蒸氣核心熱阻。式(2-8a)中之 R_{wall} 是管壁熱阻、 D_o 是熱管外徑、 D_i 是熱管內徑、 L_e 是蒸發段長度、 k_{wall} 是管壁熱傳導率，式(2-8b)中之 $R_{wall,a}$ 是管壁恆溫段熱阻、 L_a 是恆溫段長度。而式(2-9a)中之 R_{wick} 是毛細結構熱

阻、 D_v 是蒸氣核心直徑、 k_{wick} 是毛細結構熱傳導率，而式(2-9b)中之 $R_{wick,a}$ 是毛細結構恆溫段熱阻。式(2-10)中之 R_i 是液氣表面熱阻、 α 是熱擴散系數、 R 是氣體常數、 T_v 是蒸氣溫度、 P_v 是蒸氣壓力、 L_c 是冷凝段長度。式(2-11)中之 R_{vc} 是蒸氣核心熱阻、 μ_v 是氣體黏滯系數、 r_v 是熱管裡中空部分的半徑。熱管各部分熱阻估算結果如表一所示，計算所使用之參數為： $D_o = 1\text{ cm}$ ， $D_i = 9\text{ mm}$ ， $D_v = 8\text{ mm}$ ， $L_e = 2\text{ cm}$ ， $L_a = 6\text{ cm}$ ， $L_c = 2\text{ cm}$ ， $k_{wall} = 300\text{ W/m-K}$ ， $k_{wick} = 60\text{ W/m-K}$ ， $T_v = 373\text{ K}$ ， $P_v = 101.4\text{ kPa}$ ， $h_{fv} = 2234\text{ kJ/kg}$ 以及 $\alpha = 1$ 。因熱管內部蒸氣熱阻遠小於熱管內其他熱阻，所以如圖 2.5(b)所示，大部分的熱都從蒸氣核心傳遞，而此路徑上之主要熱阻由表一可看出為毛細結構熱阻。由以上分析可得毛細結構為熱管最大熱阻來源，並且毛細結構直接關係著毛細限制與沸騰限制，因此毛細結構為熱管中最重要之元件。

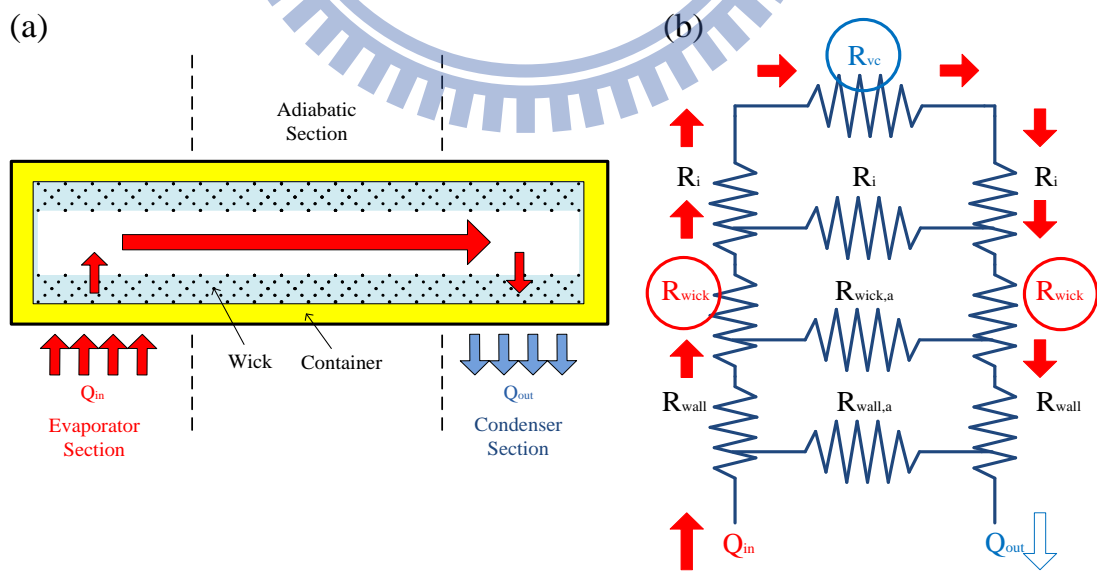


圖 2.5、熱管熱阻示意圖：(a)熱管熱傳示意圖(b)熱管熱阻網路圖

表一 熱管各部分元件之熱阻數量級

Thermal Resistance	R_{wall}	$R_{wall,a}$	R_{wick}	$R_{wick,a}$	R_i	R_{vc}
(°C/W)	10^{-3}	10	10^{-2}	10	10^{-5}	10^{-6}

2.4 毛細結構與相變

由前二節可知毛細結構為熱管最大熱阻，由於大部分的熱都累積在毛細結構，造成毛細結構為熱管相變最劇烈之位置，且毛細結構決定熱管之毛細限與沸騰限，故若能掌握液氣相變化與毛細結構之關係，定能增強熱管之熱傳特性。

液氣相變發生於液氣表面稱之為蒸發，許多研究指出蒸發主要發生在於結構頂端之三相區 [22-26]。亦即當結構受熱讓液體蒸發時，會優先在結構頂端產生蒸發，進而產生液薄膜，此現象如圖 2.6 所示。此液薄膜大致可分為三區段：不蒸發薄膜區(Non-evaporating thin film)、蒸發過渡區(Transition region)與本質半月形區(Intrinsic meniscus)。液體在不蒸發薄膜區不易蒸發是因為在此區液薄膜太薄，所以固體表面上之液體被固體與液體間的作用力給牢牢抓住，導致液體氣化相較困難，故不蒸發薄膜區之熱傳效果比不上蒸發過渡區。液體在蒸發過渡區之液薄膜厚度相對適中，所

以此區之液膜的熱阻比本質半月形區小，且液體又可輕鬆脫離固體的束縛，所以蒸發過渡區之液膜熱阻最小，這使得蒸發過渡區為液薄膜蒸發散熱最佳區。最後本質半月形區因其液膜甚厚，導致熱阻比蒸發過渡區大，以致於散熱效果並無蒸發過渡區好。故在此液膜內，蒸發過渡區有最小之熱阻。

此外，實驗亦發現若增加毛細結構高度，雖會增加乾涸熱通量，但會同時降低熱傳係數 [20, 26]。此乃因於蒸發只發生在結構頂端，而增加結構高度雖可使毛細限上升，但會造成熱阻的上升，導致熱傳係數降低。本團隊進一步探討在單位面積下結構間距對熱傳之影響，發現當柱子間距在 $8.5\sim 16.8\ \mu\text{m}$ 之間時，熱傳係數會有個極大值 [20]。此乃因為間距太大時，由於柱子的數目變少，所以柱子與液體接觸面積變小，導致三相區的面積變小，造成熱傳係數變小。但間距太窄之時需供給較大的過熱溫度去引發相變，導致蒸發不易且熱阻上升。此可由以下推導得出。首先克式公式 (Clausius-Clapeyron Equation) 決定相變化時壓力溫度曲線之斜率：

$$\left(\frac{dP}{dT}\right)_{sat} = \frac{h_{lv}}{T_{sat}(P_l)v_{lv}} \quad (2-12)$$

上式中 dP 是壓差， dT 是溫度差， h_{lv} 是液氣焓差， $T_{sat}(P_l)$ 是該液體壓力下飽和溫度， v_{lv} 是液氣比容差。把蒸發段的壓差代入上式可得下式：

$$\frac{P_{ve} - \sigma/r - P_{sat}(T_l)}{T_{sat}(P_l) - T_l} = \frac{h_{lv}}{T_{sat}(P_l) v_{lv}} \quad (2-13)$$

其中 P_{ve} 是平衡氣壓， σ 是液體表面張力， r 是曲率半徑， $P_{sat}(T_l)$ 是該溫度下的液體飽和壓力， T_l 是液體溫度。將最小曲率半徑定義為柱與柱間距(d)之一半，可將式(2-13)改寫成下式：

$$T_l - T_{sat} = \frac{\sigma v_{lv} T_{sat}}{\left(\frac{d}{2}\right) h_{lv}} \quad (2-14)$$

由式(2-14)可看出若柱與柱間距縮小時，需供給較大的過熱溫度去引發相變，導致蒸發不易且熱阻上升。故熱傳係數在一特定柱子與柱子間距時有一最大值。

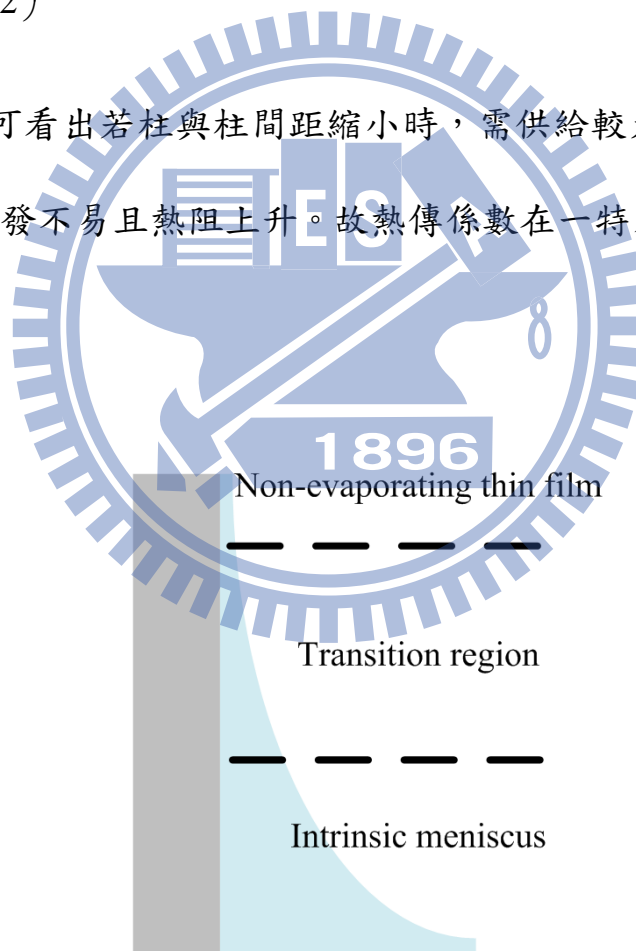


圖 2.6、蒸發液薄膜示意圖

另外，液氣相變發生在於固液界面則稱之為沸騰，目前有許多研究指出當毛細結構發生沸騰時，因沸騰產生之氣泡離開表面時能帶走大量熱能，故造成沸騰的熱傳係數往往大於蒸發的熱傳係數 [17, 18, 27, 28]。但若沸騰太過劇烈，液體來不及補充，沸騰現象反而會降低毛細結構之熱傳效能 [18]。此外，先前的研究亦發現在毛細結構鍍上一層疏水性的材料，可在較低溫時就能達到沸騰 [17, 18]，此乃因為疏水性材料排斥液體，故液體在其上比較容易變成氣體。以上沸騰現象與池沸騰所得之現象類似 [29, 30]，且之前的研究也顯示微孔洞可增加池沸騰之熱傳 [30]，故我們認為嵌入微孔洞之微米線陣列也能達到類似池沸騰所發現之沸騰增強熱傳之效果。此微孔洞在液體流經毛細結構時容易留住氣體於孔洞內，這使得微孔洞易成為沸騰之成核點，故只需少量過熱溫度即可達到沸騰，如此應可使嵌入微孔洞之表面比平滑表面有更高的熱傳係數，所以本研究提出此嵌入微孔洞之微米線陣列來增加熱傳係數，此外，此毛細結構之微米線陣列亦可同時維持住高的毛細限。

2.5 本章摘要

熱管藉由相變化帶走大量潛熱而達到優異的熱傳效果，故被廣泛運用在電子元件之散熱。熱管由管壁、毛細結構與蒸氣核心三部分所組成，而熱管的工作區段可分為蒸發段、恆溫段與冷凝段，此三段之功能分別為吸

熱、傳熱與放熱。此外，熱管的性能取決於兩個參數：熱傳係數與乾涸熱通量，而這兩個參數主要都是被熱管的蒸發段的表現所決定。在熱管運作上會受到毛細限制與沸騰限制。由於毛細結構之熱阻為熱管內最大熱阻，且毛細結構直接關係著毛細限制與沸騰限制，所以毛細結構為熱管中最重要原件。此外，由於蒸發主要發生在毛細結構頂端之三相區，故改變毛細結構厚度不能同時增加乾涸熱通量與熱傳係數。本研究提出一嶄新的嵌入微孔洞矽微米線陣列之毛細結構來同時增強乾涸熱通量與熱傳係數。本結構可藉由微孔洞觸發沸騰來增強熱傳係數，同時微米線陣列可提供大的毛細力來增強乾涸熱通量。



第三章 微元件製作於實驗系統

本研究首先以微機電技術製作出矽微米線陣列之毛細結構、嵌入微孔洞之矽微米線陣列之毛細結構。本研究並架設一密閉式蒸發實驗系統模擬熱管蒸發段之環境。以下分別介紹微元件製作方式及實驗系統與量測方法。

3.1 微元件製作方法

矽微米線陣列之製程如圖3.1所示。其製程步驟詳述如下：(a)以光阻(PR)在矽晶圓上定義出矽微米線陣列的圖形；(b)使用反應式離子深蝕刻儀器蝕刻出矽微米線陣列；(c)去除光阻後則得到所需結構。

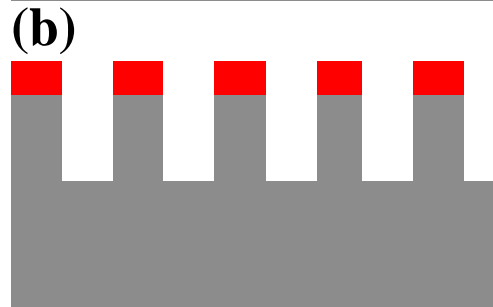
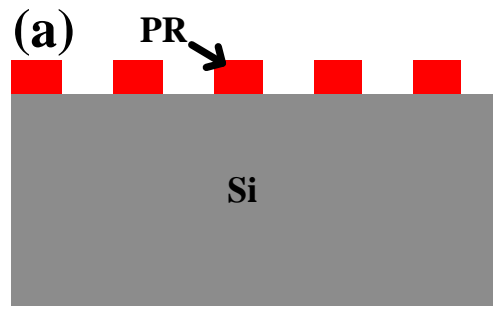


圖 3.1、矽微米線陣列製程示意圖：(a)以光阻在矽晶圓上定義出矽微米線陣列的圖形；(b)使用反應式離子深蝕刻儀器蝕刻出矽微米線陣列；(c)去除光阻後則得到所需結構。

所得結構之高解析度場發射掃描電子顯微鏡(SEM)圖如圖3.2所示。圖

3.2(a)-(b)分別為高度 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列上視圖與側視圖。

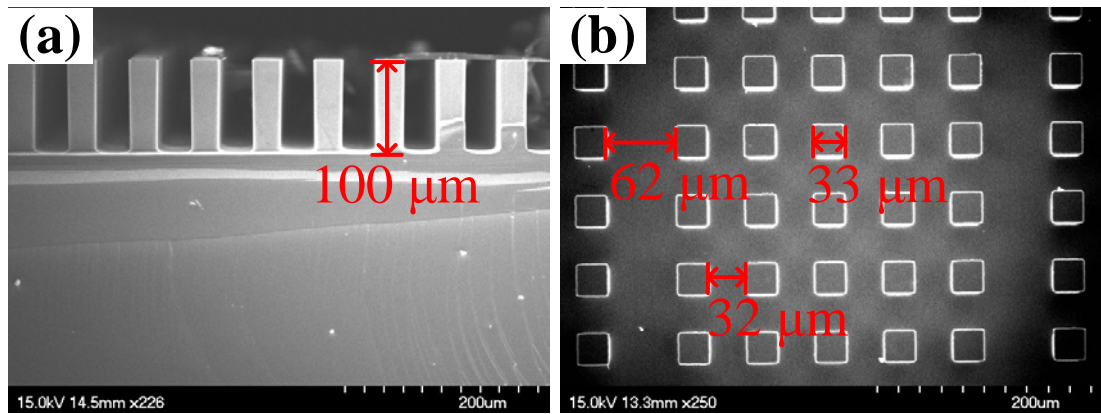


圖 3.2、矽微米線陣列之電子顯微鏡圖：(a)高度 100 μm 之矽微米線陣列上視圖；(b)為(a)側視圖。

為增強矽微米線陣列之親水性，本研究於矽微米線陣列表面上成長一層二氧化矽薄膜。圖3.3為成長二氧化矽薄膜之矽微米線陣列製程示意圖所示：(a)以光阻在矽晶圓上定義出矽微米線陣列的圖形；(b)使用反應式離子深蝕刻儀器蝕刻出矽微米線陣列；(c)去除光阻後則得到所需結構。(d)以爐管成長一層二氧化矽薄膜即完成製程。

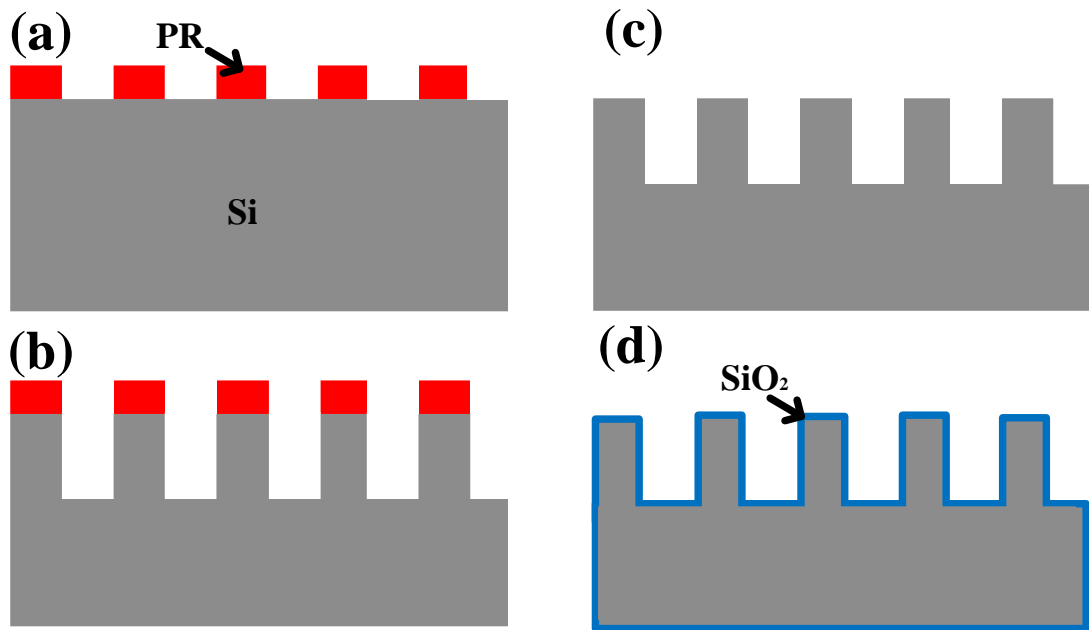


圖 3.3、矽微米線陣列製程示意圖：(a)以光阻在矽晶圓上定義出矽微米線陣列的圖形；(b)使用反應式離子深蝕刻儀器蝕刻出矽微米線陣列；(c)去除光阻後則得到所需結構；(d)以爐管成長一層二氧化矽薄膜。

所得結構之高解析度場發射掃描電子顯微鏡圖如圖3.4所示。圖3.4(a)-(b)分別為高度 $170\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列上視圖與側視圖。

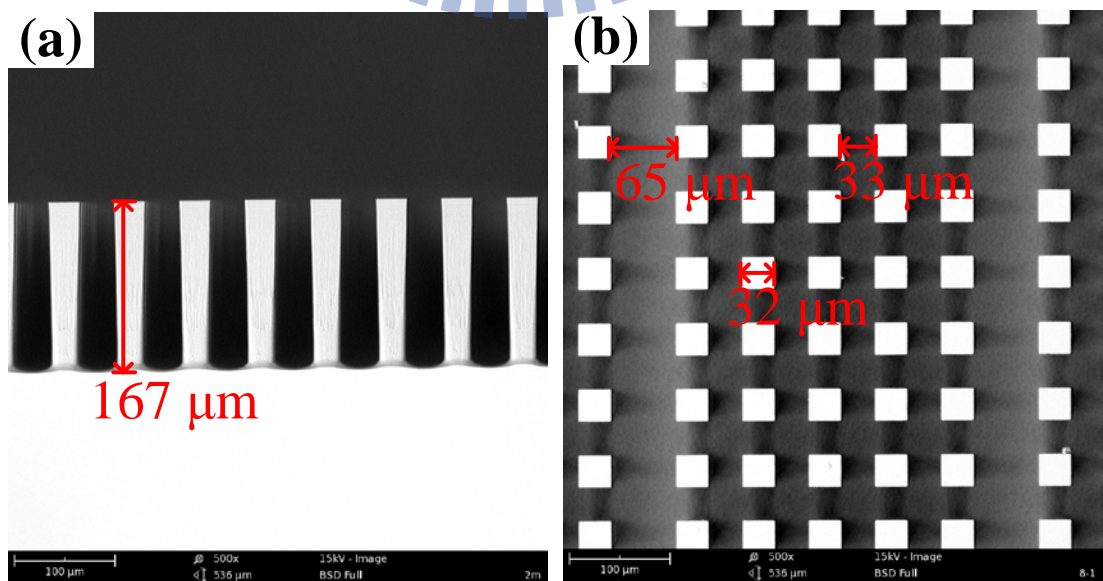


圖 3.4、矽微米線陣列之電子顯微鏡圖：(a)高度 $170\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列上視圖；(b)為(a)側視圖。

嵌入微孔洞矽微米線陣列之製程如圖3.5所示。其製程步驟詳述如下：
(a)以光阻在矽晶圓上定義出矽微孔洞的圖形；(b)使用反應式離子深蝕刻儀器蝕刻出矽微孔洞；(c)去除光阻後，再以光阻在矽晶圓上定義出矽微米線陣列的圖形；(d)使用反應式離子深蝕刻儀器蝕刻出矽微米線陣列；(e)去除光阻後則得到所需結構。

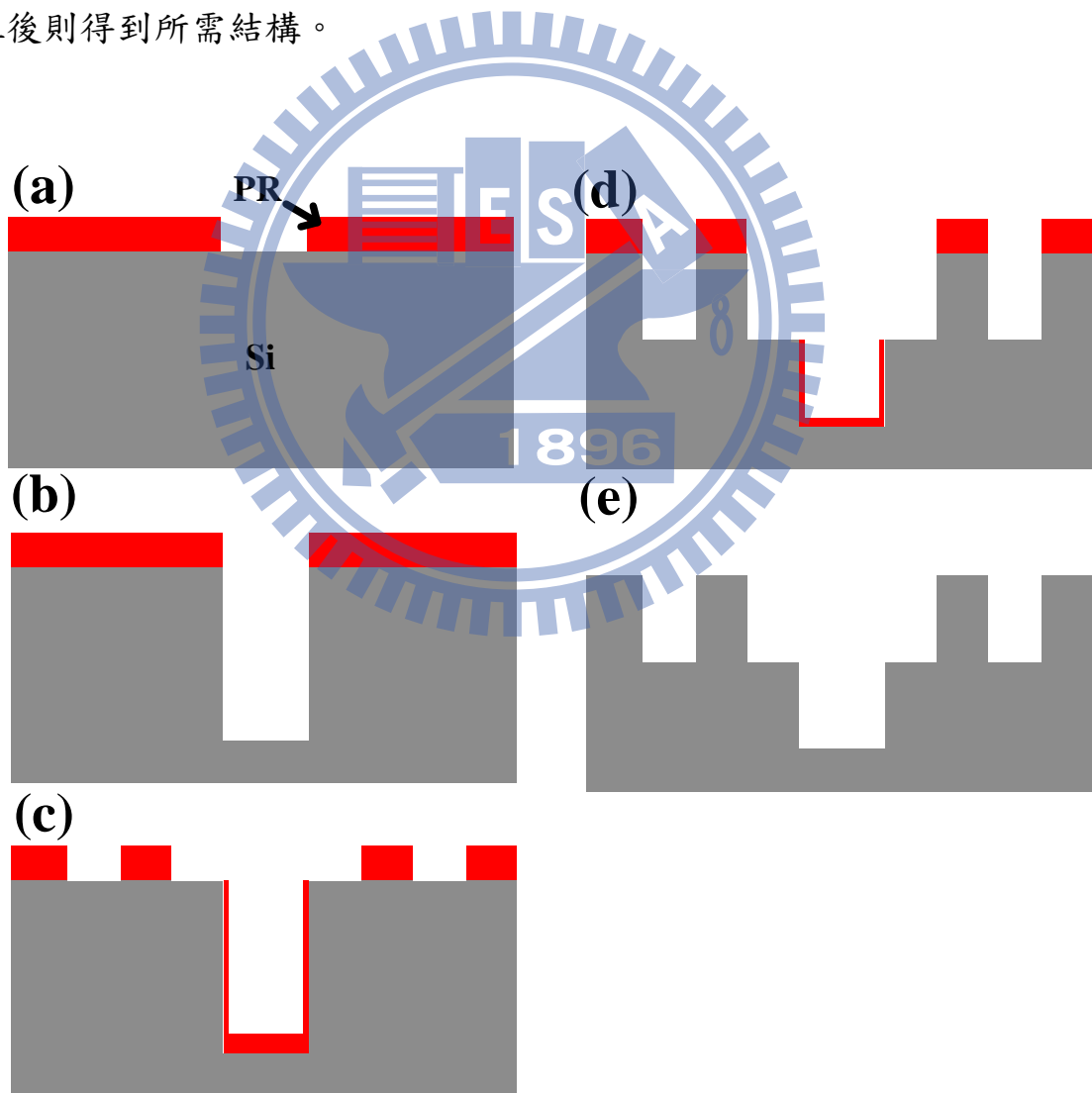


圖 3.5、嵌入微孔洞矽微米線陣列製程示意圖：(a)以光阻在矽晶圓上定義出矽微孔洞的圖形；(b)使用反應式離子深蝕刻儀器蝕刻出矽微孔洞；(c)去除光阻後，再以光阻在矽晶圓上定義出矽微米線陣列的圖形；(d)使用反應式離子深蝕刻儀器蝕刻出矽微米線陣列；(e)去除光阻後則得到所需結構。

所得結構之高解析度場發射掃描電子顯微鏡圖如圖3.6所示。圖3.6 (a)高度100 μm 矽微米線陣列嵌入寬度30 μm 深度110 μm 微孔洞之毛細結構之上視圖；圖3.6 (b)為圖3.6 (a)側視圖；圖3.6 (c)高度100 μm 矽微米線陣列嵌入寬度60 μm 深度130 μm 微孔洞之毛細結構之上視圖；圖3.6 (d)為圖3.6 (c)之側視圖。



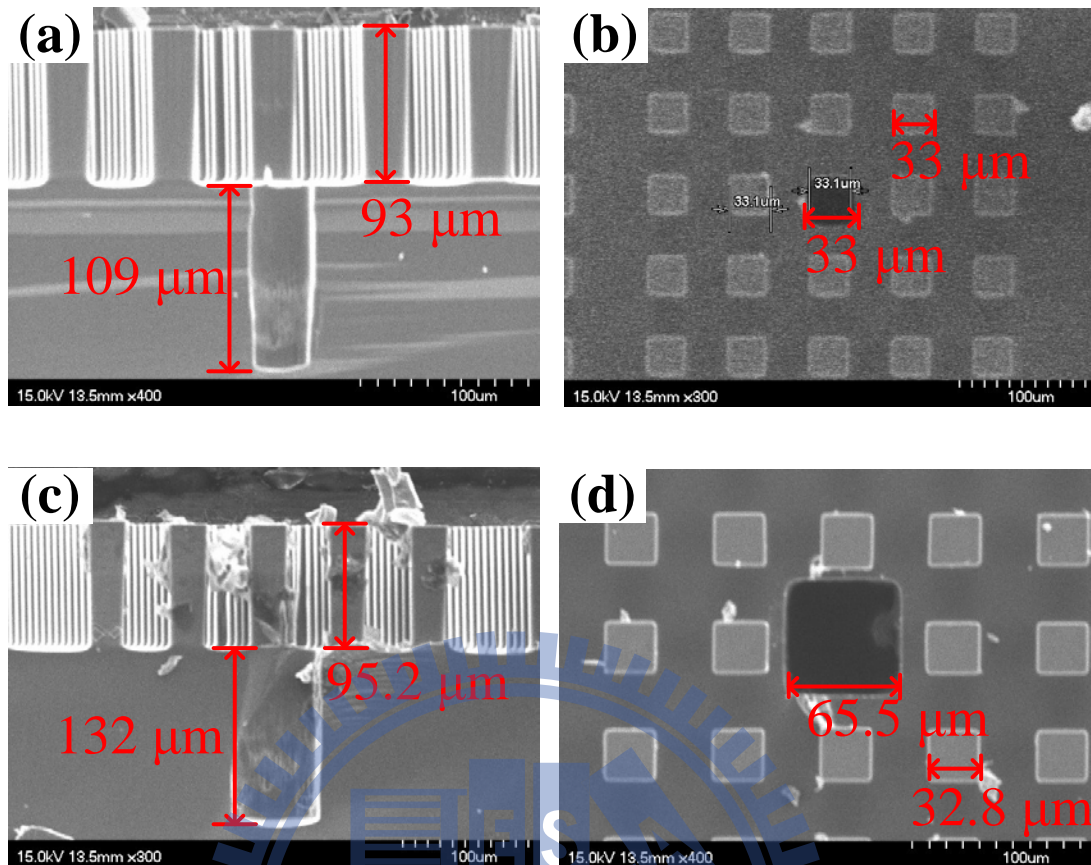


圖 3.6、嵌入微孔洞矽微米線陣列之電子顯微鏡圖：(a)高度 $100\ \mu\text{m}$ 矽微米線陣列嵌入寬度 $30\ \mu\text{m}$ 深度 $110\ \mu\text{m}$ 微孔洞之毛細結構之上視圖；(b)為(a)側視圖；(c)高度 $100\ \mu\text{m}$ 矽微米線陣列嵌入寬度 $60\ \mu\text{m}$ 深度 $130\ \mu\text{m}$ 微孔洞之毛細結構之上視圖；(d)為(c)之側視圖。

由於此製程無法精確控制孔洞深度，故設計第二種製程，製程二之步驟如圖3.7所示。其步驟敘述如下：(a)利用電漿輔助化學氣相沉積濺鍍二氧化矽(SiO_2)；(b)以光阻在矽晶圓上定義出矽微米線陣列之圖形；(c)使用反應式離子深蝕刻儀器將多餘的二氧化矽去除；(d)去除光阻後，再以光阻在矽晶圓上定義矽微孔洞之圖形；(e)使用反應式離子深蝕刻儀器蝕刻矽微孔

洞；(f)去掉光阻後，再次利用反應式離子深蝕刻儀器蝕刻，做出矽微米線陣列；(g)最後為增強親水性，洗淨結構再送入爐管長二氧化矽薄膜即完成製程。

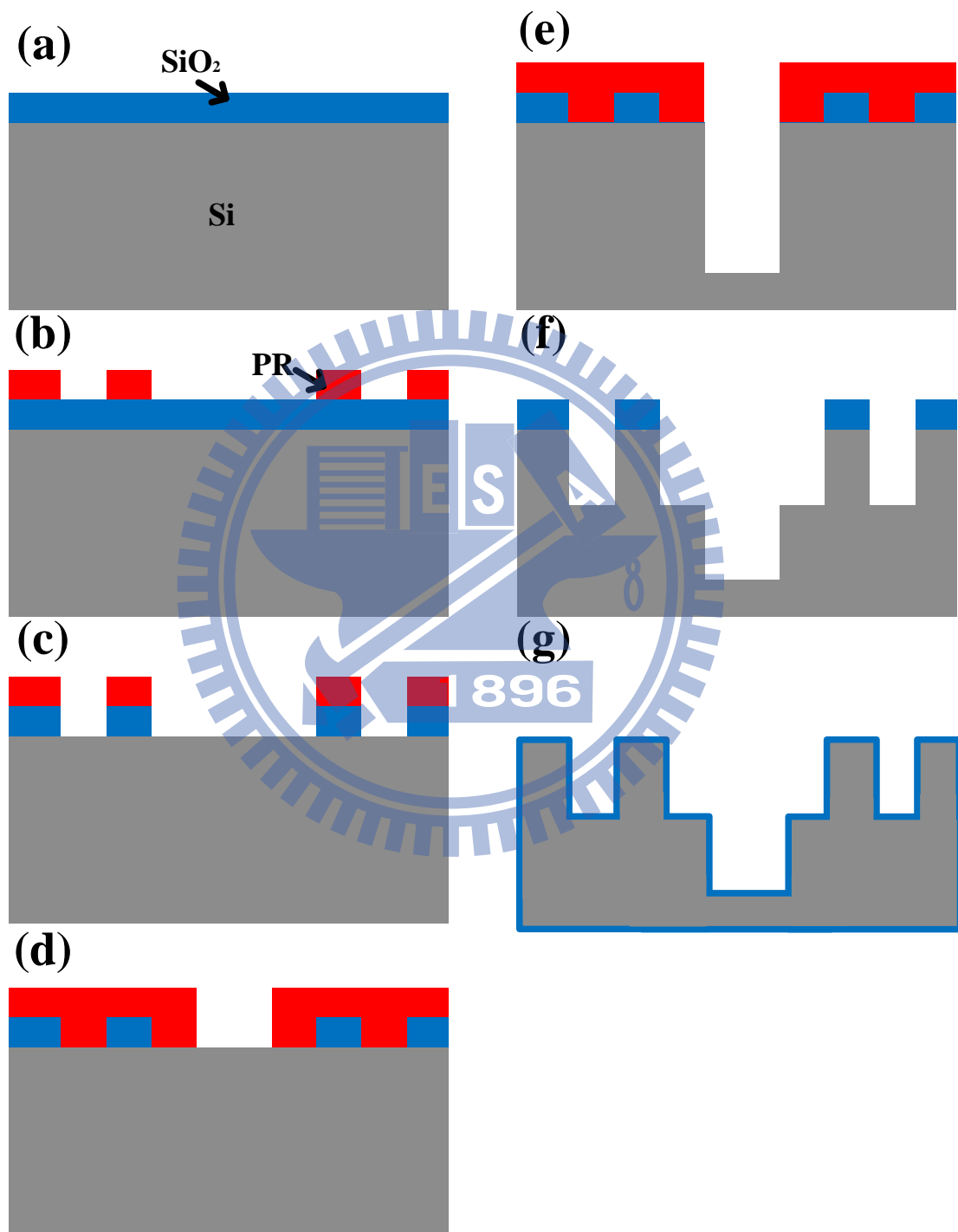


圖 3.7、嵌入微孔洞矽微米線陣列製程二示意圖：(a)利用電漿輔助化學氣相沉積濺鍍二氧化矽(SiO_2)；(b)以光阻在矽晶圓上定義出矽微米線陣列之圖形；(c)使用反應式離子深蝕刻儀器將多餘的二氧化矽去除；(d)去除光阻後，再以光阻在矽晶圓上定義矽微孔洞之圖形；(e)使用反應式離子深蝕刻儀器蝕刻矽微孔洞；(f)去掉光阻後，再次利用反應式離子深蝕刻儀器蝕刻，做出矽微米線陣列；(g)最後為增強親水性，洗淨結構再送入爐管長二氧化矽薄膜即完成製程。

所得結構之高解析度場發射掃描電子顯微鏡圖如圖3.8所示。圖3.8 (a)高度 $170\ \mu\text{m}$ 矽微米線陣列嵌入寬度 $30\ \mu\text{m}$ 深度 $30\ \mu\text{m}$ 微孔洞之毛細結構之上視圖；圖3.8 (b)為圖3.8 (a)側視圖；圖3.8 (c)高度 $160\ \mu\text{m}$ 矽微米線陣列嵌入寬度 $40\ \mu\text{m}$ 深度 $40\ \mu\text{m}$ 微孔洞之毛細結構之上視圖；圖3.8 (d)為圖3.8 (c)之側視圖；圖3.8 (e)高度 $170\ \mu\text{m}$ 矽微米線陣列嵌入寬度 $70\ \mu\text{m}$ 深度 $50\ \mu\text{m}$ 微孔洞之毛細結構之上視圖；圖3.8 (f)為圖3.8 (e)之側視圖。

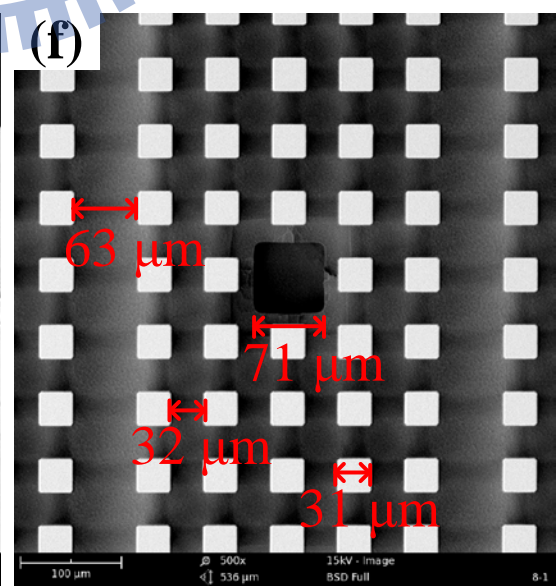
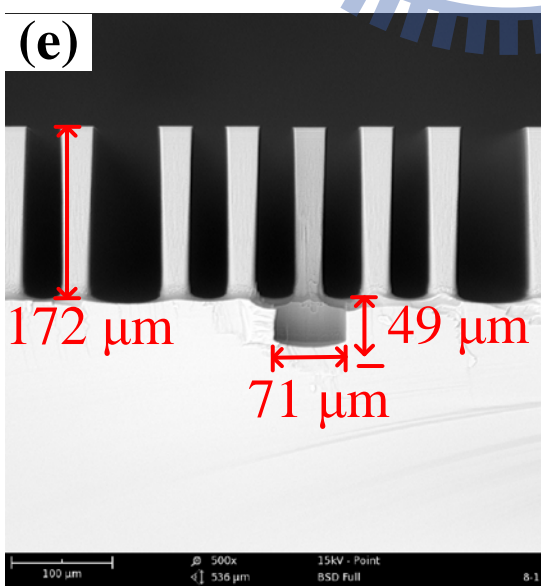
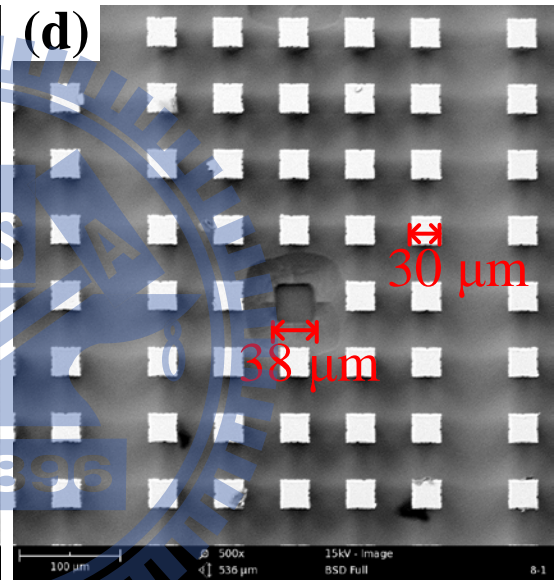
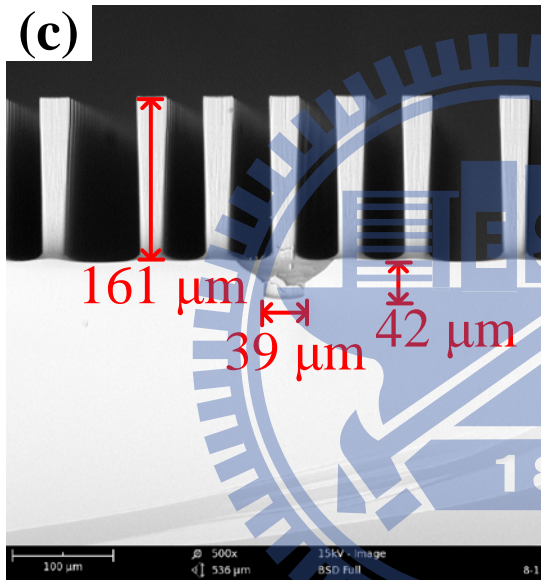
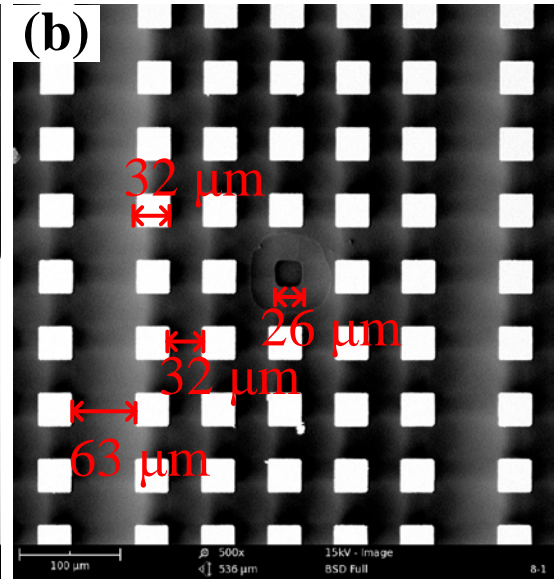
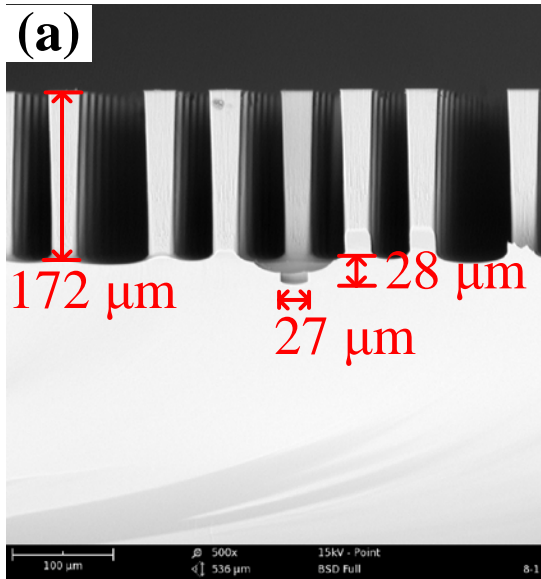


圖 3.8、製程二所得之結構電子顯微鏡圖：(a)高度 170 μm 矽微米線陣列嵌入寬度 30 μm 深度 30 μm 微孔洞之毛細結構之上視圖；(b)為(a)側視圖；(c)高度 160 μm 矽微米線陣列嵌入寬度 40 μm 深度 40 μm 微孔洞之毛細結構之上視圖；(d)為(c)之側視圖；(e)高度 170 μm 矽微米線陣列嵌入寬度 70 μm 深度 50 μm 微孔洞之毛細結構之上視圖；(f)為(e)之側視圖。

完成微孔洞矽微米線陣列之毛細結構後，因為實驗需要控制熱源，因此需要在結構背面製作加熱器。圖3.9為加熱器製程示意圖。製程步驟敘述如下：(a)以光阻在嵌入微孔洞矽微米線陣列背面定義出加熱器圖形；(b)濺鍍銦錫氧化物(ITO)作為加熱器，利用舉離製程，將多餘之銦錫氧化物去除；(c)以光阻在嵌入微孔洞矽微米線陣列背面定義加熱器之電極圖形；(d)濺鍍銅(Cu)做為電極，之後使用舉離製程，將多餘之銅去除，即可得到結構與加熱器。

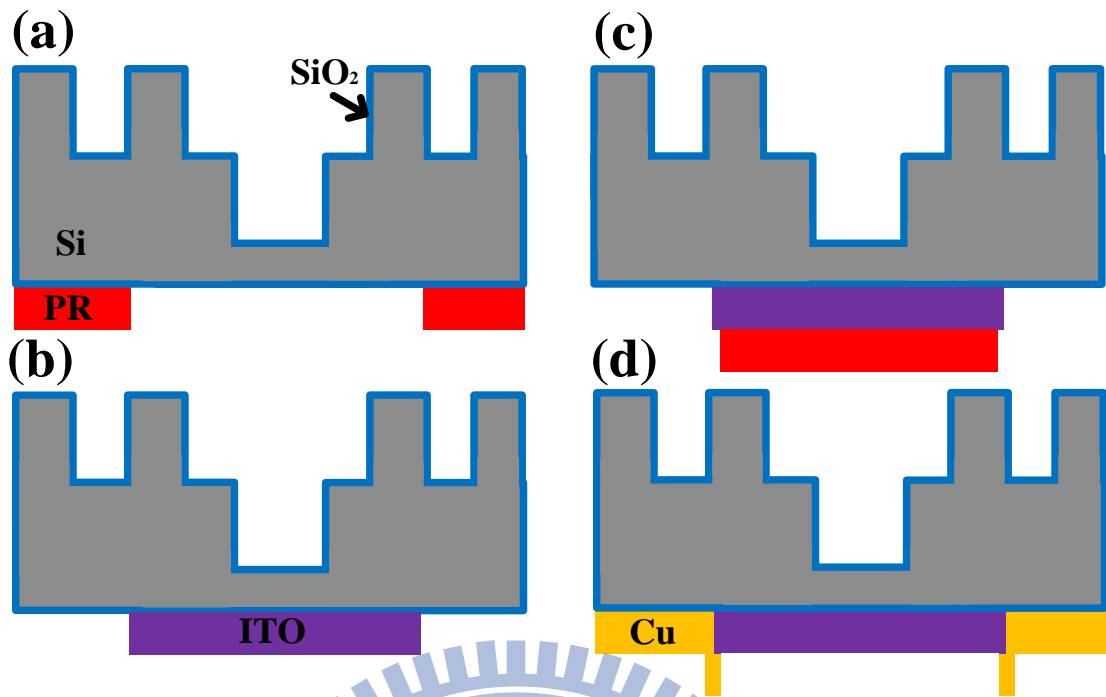


圖 3.9、微加熱器製程示意圖：(a)以光阻在嵌入微孔洞矽微米線陣列背面定義出加熱器圖形；(b)濺鍍銦錫氧化物(ITO)作為加熱器，利用舉離製程，將多餘之銦錫氧化物去除；(c)以光阻在嵌入微孔洞矽微米線陣列背面定義加熱器之電極圖形；(d)濺鍍銅(Cu)做為電極，之後使用舉離製程，將多餘之銅去除，即可得到結構與加熱器。

圖3.10為本實驗的測試端元件完成圖。圖3.10(a)-(b)分別為其示意圖與實際圖。測試端元件之製作方法如下：首先以導熱環氧樹脂(KT1000, FLYING DRA-GONS Engineering)將熱電偶線(T Type, OMEGA Engineering Inc.)固定於微結構背面之加熱器上，再使用導電銀膠(16034, ED PELLA INC.)將電線黏於微結構背面之銅電極上，最後再利用矽膠將黏好的電線、熱電耦線及矽晶圓固定以完成測試端元件。

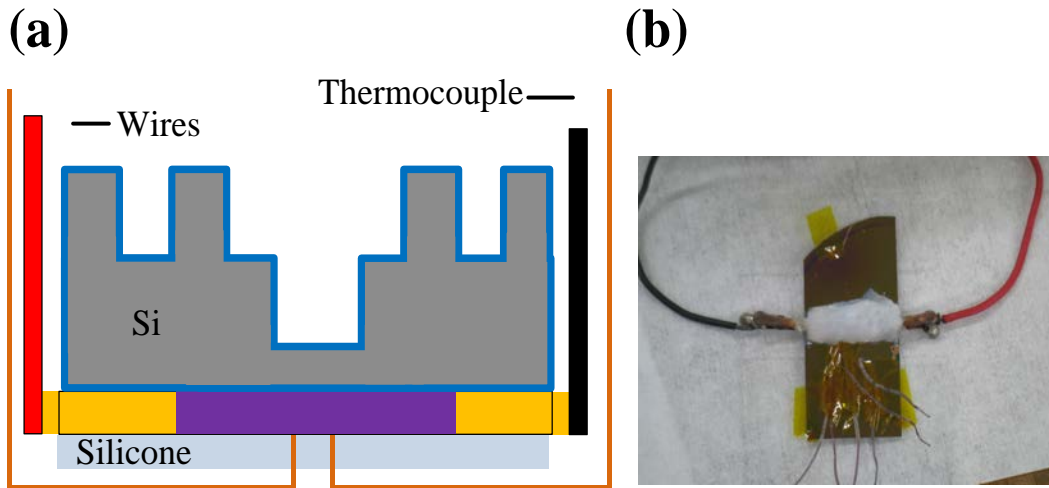


圖 3.10、測試端元件之(a)示意圖與(b)實際圖

3.2 實驗系統與量測方法

3.2.1 實驗系統

為了要模擬熱管蒸發段之環境，本研究架設一密閉式蒸發實驗系統以量測毛細結構之熱傳性能。此密閉系統如圖3.11所示。此系統包含：(1)主腔體(Chamber)。主腔體之用途在於提供一密閉實驗環境；(2)兩個副腔體(Chamber A and Chamber B)。其中腔體A之用途在於讓去離子水去氣(Degas)，而腔體B之用途在於存放此去氣之去離子水並利用閥門(Valve)控制去離子水進入主腔體；(3)自耦式變壓器(Auto-transformer)。此變壓器之用途在於控制加熱棒(Heater)以改變密閉系統內之環境溫度；(4)真空幫浦(Pump)。真空幫浦之用途在於把空氣由密閉系統抽出；(5)電源供應器(Power supply, Agilent, N5750A)。其目的在於提供毛細結構熱量；(6)數據

擷取器(Data logger,Agilent 34970A)。用於紀錄實驗數據；(7)高速攝影機(High speed camera,Mega Speed, HHC X2)。用於紀錄結構表面之相變化影像。

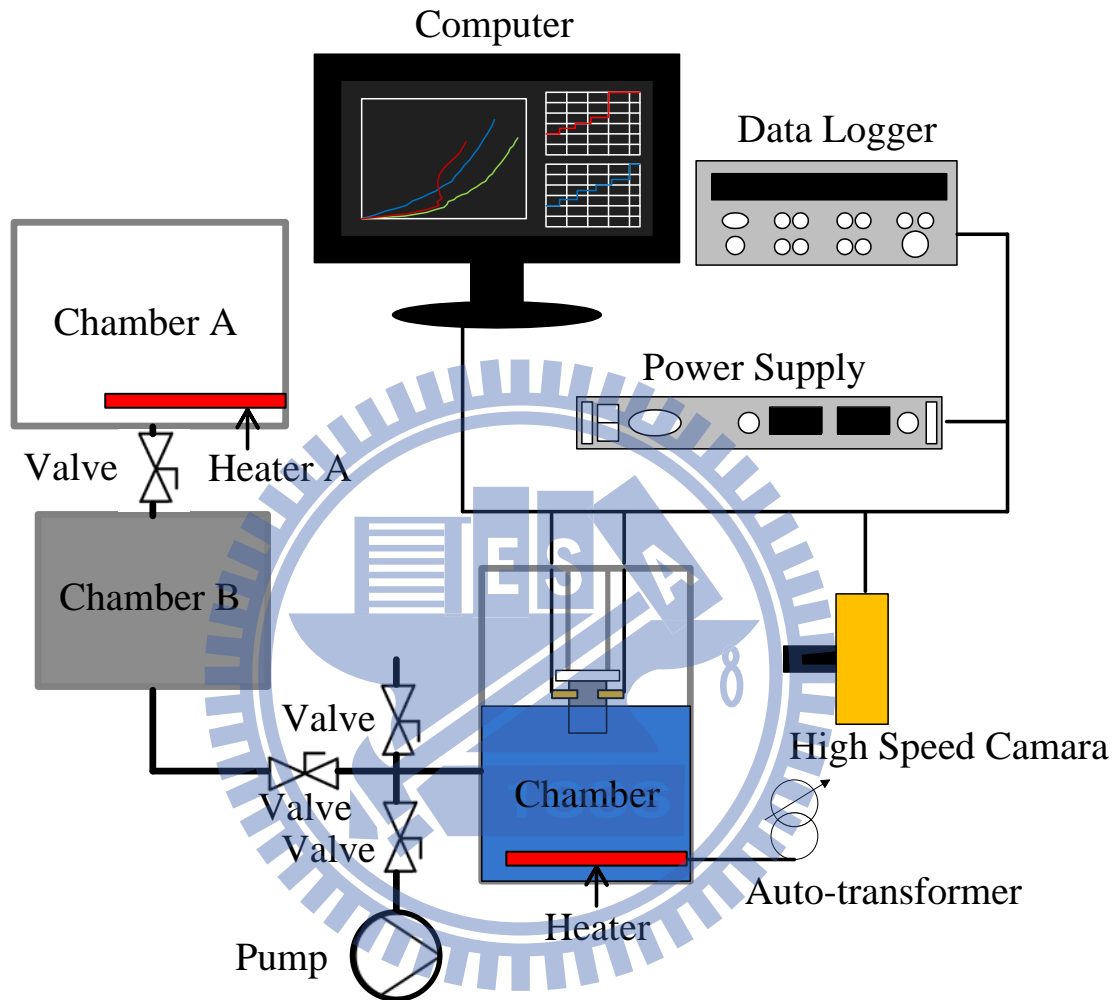


圖 3.11、密閉式蒸發實驗系統示意圖

3.2.2 量測方法

本研究之蒸發熱傳量測方式如圖3.12所示。圖3.12(a)-(b)分別為測試端之正視圖與側視圖。熱傳量測方法為：將測試端以與水面垂直的方向置入密

閉式蒸發實驗系統，此時水受到毛細力影響而覆蓋整個毛細結構，之後將電流輸入到加熱器，產生焦耳熱，並以熱電偶線量測溫度。實驗中持續改變所輸入之電流，並記錄溫度穩定後加熱器表面溫度，直到加熱器因表面溫度持續上升而損毀，此時定義加熱器損毀前之熱通量為乾涸熱通量。由加熱器表面溫度與飽和水溫相減，可得過熱溫度。之後藉由過熱溫度與熱通量的梯度，求得熱傳系數。

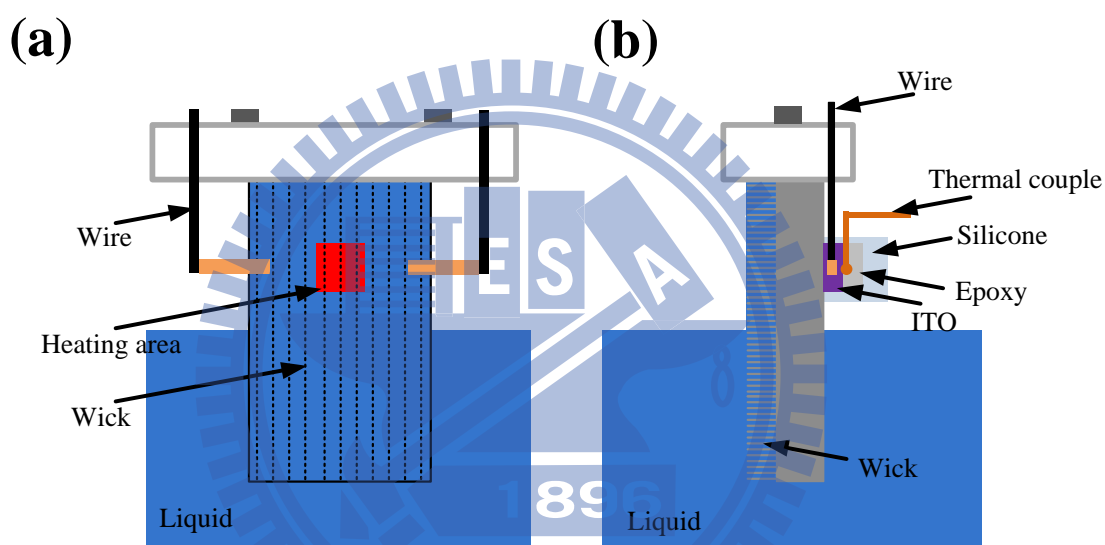


圖 3.12、測試端之示意圖:(a)上視圖與(b)側視圖

實驗詳細步驟敘述如下：(1)使用加熱棒與自耦式變壓器加熱去離子水使其到達操作壓力(一大氣壓)與溫度(100°C)；(2)將測試端以與水面垂直的方向置入密閉式蒸發實驗系統；(3)啟動電源供應器以提供加熱器電源產生焦耳熱，並讀取熱電耦所得之溫度，並同時使用高速攝影機拍攝蒸發畫面；(4)持續增加熱通量，並量測每一熱通量下之溫度並拍攝其對應之蒸發畫面；

(5)重複步驟(4)，直到試片燒毀。

3.3 本章摘要

本章介紹矽微米線陣列與嵌入微孔洞之微米柱陣列之毛細結構之製程，並拍攝所得之結構之高解析度場發射掃描電子顯微鏡圖。此外介紹結構背面所需之可控熱源之加熱器之製程，並將所得之元件製作成實驗之測試端元件。最後介紹本實驗所使用之密閉式蒸發實驗系統與本實驗之量測方法。



第四章 結果與討論

本章將分別探討微米柱高度與微孔洞對毛細結構之熱傳影響。本研究共製作了 13 個毛細結構，其幾何摘要如表一所式。以下將分別討論全微米柱毛細結構與嵌入微孔洞矽微米線陣列毛細結構之熱傳表現。

表二、實驗樣本之表面結構之幾何對應表

	微米柱長度 P (μm)	微孔洞寬度 W (μm)	微孔洞深度 H (μm)
Sample 1	100	-	-
Sample 2			
Sample 3			
Sample 4	170	-	-
Sample 5			
Sample 6	100	30	110
Sample 7	100	60	130
Sample 8			
Sample 9	170	30	30
Sample 10			
Sample 11	160	40	40
Sample 12			
Sample 13	170	70	50

4.1 全微米線陣列之毛細結構之熱傳

圖 4.1 為高度為 $100 \mu\text{m}$ 矽微米線陣列之熱傳曲線。圖中之黑、紅、藍符號分別代表三個具相同結構之不同樣本之實驗之結果。此黑、紅、藍三

個樣本所得之乾涸熱通量分別為 94.9 W/cm^2 、 94.3 W/cm^2 與 96.6 W/cm^2 ，而其熱傳係數分別為 $4.25 \text{ W/cm}^2\text{-K}$ 、 $4.25 \text{ W/cm}^2\text{-K}$ 與 $4.22 \text{ W/cm}^2\text{-K}$ 。由以上之結果可證明本研究之實驗可重複性。

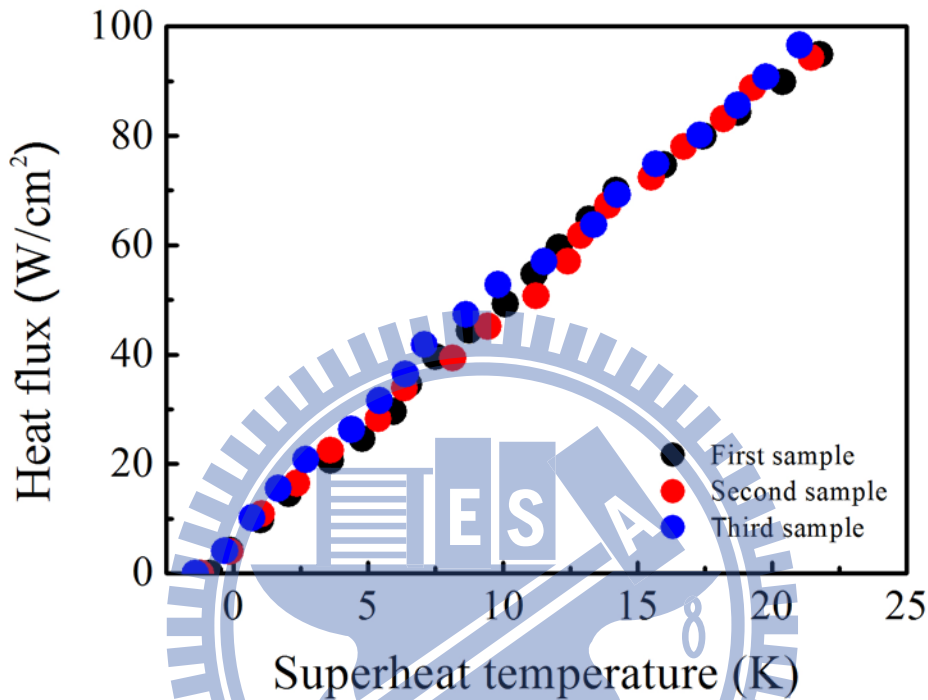


圖 4.1、高度 $100 \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列熱傳曲線圖。圖中之黑、紅、藍符號分別代表三個具相同結構之不同樣本之實驗之結果。

圖 4.2 比較高度為 $100 \mu\text{m}$ 、 $170 \mu\text{m}$ 、 $56 \mu\text{m}$ 、 $145 \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列之毛細結構之熱傳。圖中實心圓形符號代表高度 $100 \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列之熱傳曲線，實心正方形符號代表高度為 $170 \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列之熱傳曲線，其二次不同實驗分別用橘色與深綠色代表，實心三角形符號代表高度 $56 \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列之熱傳曲線，實心六角形符號代表高度 $145 \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列之熱傳曲線，其中實心三角形與實心六角形為Ćoso等人的實

驗數據 [20]。高度為 100 μm 之矽微米線陣列所得之乾涸熱通量與熱傳係數分別為 94.9 W/cm^2 、4.25 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。高度為 170 μm 之矽微米線陣列橘色與深綠色兩個不同樣本所得之乾涸熱通量分別為 117.7 W/cm^2 與 123.3 W/cm^2 ，而所得之熱傳係數分別為 4.71 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 與 3.87 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。高度為 56 μm 之矽微米線陣列所得之乾涸熱通量與熱傳係數分別為 24.3 W/cm^2 、8.26 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。高度為 145 μm 之矽微米線陣列所得之乾涸熱通量與熱傳係數分別為 124 W/cm^2 、9.7 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。比較 100 μm 與 170 μm 之矽微米線陣列可發現乾涸熱通量會隨微米柱高度增加而上升，此與先前的研究結果 [20]相符合，而蒸發熱傳係數不隨微米柱高度改變。此外，170 μm 之矽微米線陣列在高熱通量時會產生沸騰，沸騰時使熱傳係數分別上升至 12.34 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 、11.57 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ ，此高熱通量之沸騰現象也與先前的研究 [20]一致。最後因Ćoso等人的實驗結構之微米柱間距較小(16.5 μm) [20]，三相區面積大於本研究結構之三相區面積，因此Ćoso等人的結構 [20]，蒸發時熱傳係數大於本研究的結果。

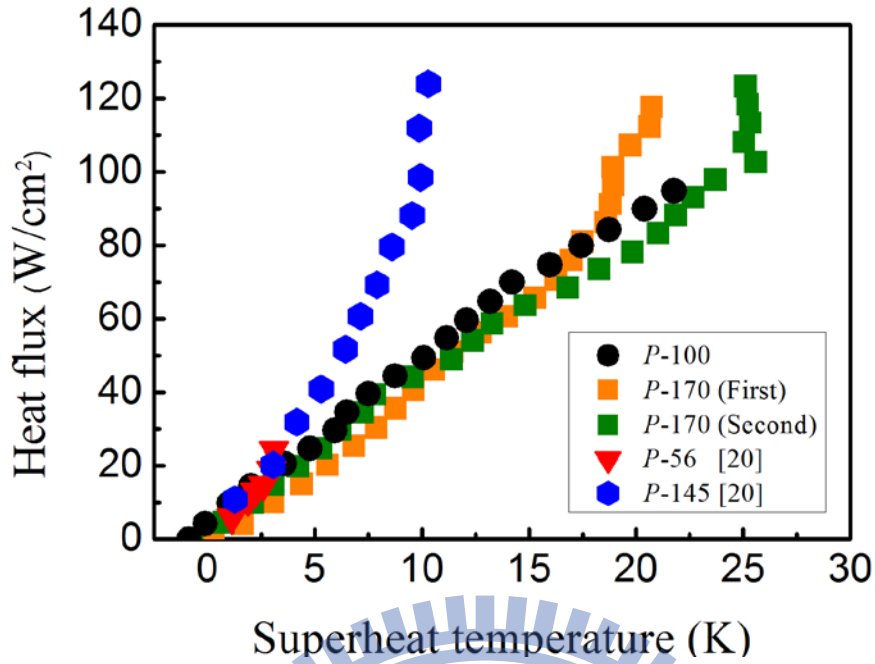


圖 4.2、比較高度為 100 μm 、170 μm 、56 μm 、145 μm 之矽微米線陣列之毛細結構之熱傳。其中圖上 P 代表微米柱陣列之高度，實心圓形符號代表高度為 100 μm 之矽微米線陣列之熱傳曲線，實心正方形符號代表高度為 170 μm 之矽微米線陣列之熱傳曲線，其二次不同實驗結果分別用橘色與深綠色代表，實心三角形符號代表高度 56 μm 之矽微米線陣列之熱傳曲線，實心六角形符號代表高度 145 μm 之矽微米線陣列之熱傳曲線。

圖 4.3 是高度 170 μm 之矽微米線陣列在熱通量為 51 W 時所拍攝之影像。其中圖 4.3(a) 為所截取之最初影像，時間以此為基準(0 秒)；圖 4.3(b) 為圖 4.3(a) 經過 0.2 秒所得之影像；圖 4.3(c) 為圖 4.3(a) 經過 0.4 秒所得之影像；圖 4.3(d) 為圖 4.3(a) 經過 0.6 秒所得之影像。由此影像可發現液面幾

乎沒有任何變化。此影像配合圖 4.2 之熱傳曲線，可證明在該熱通量下，矽微米線陣列為蒸發狀態。

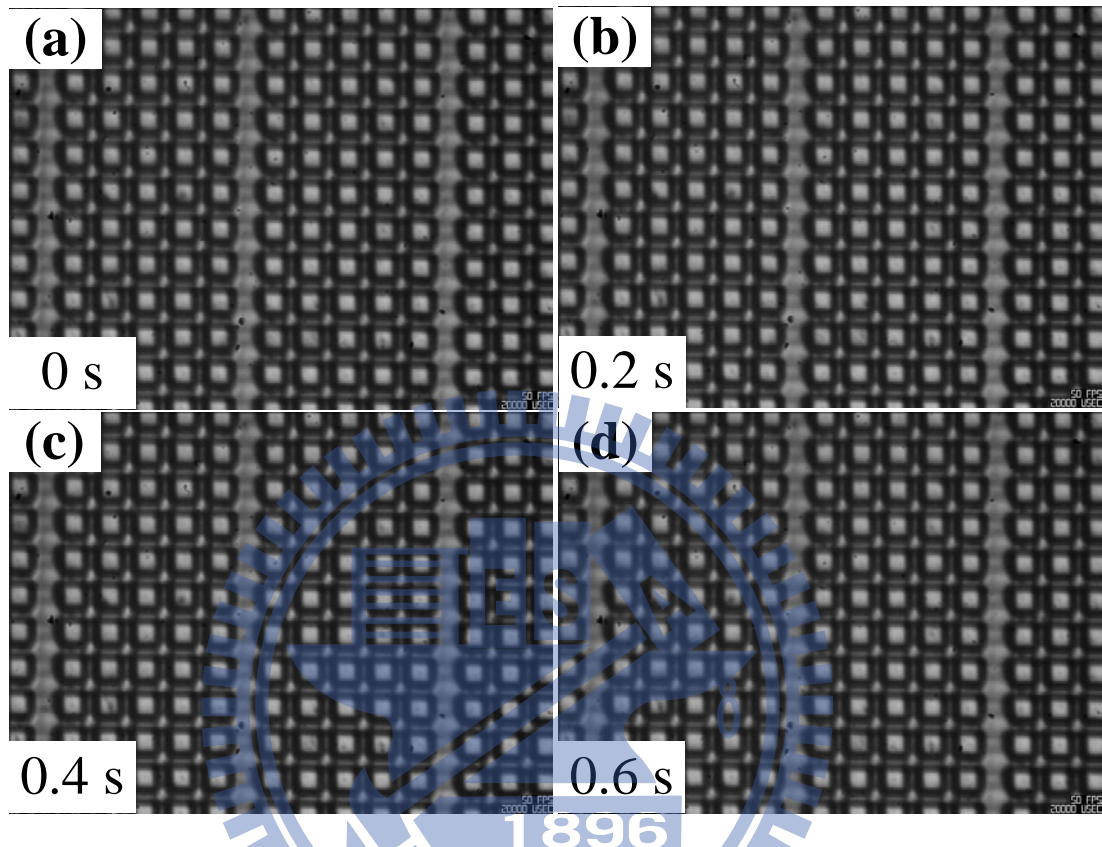


圖 4.3、高度 $170\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列在熱通量為 $51\ \text{W}$ 時所拍攝之影像。(a) 截取之第一影像，時間以此為基準(0 秒)；(b) 為(a)經過 0.2 秒所得之影像；(c) 為(a)經過 0.4 秒所得之影像；(d) 為(a)經過 0.6 秒所得之影像。

4.2 嵌入微孔洞矽微米線陣列之毛細結構之熱傳結果

圖 4.4 比較高度 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列與此陣列內嵌入二種尺寸微孔洞之熱傳。圖中實心圓形符號代表高度 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列之熱傳曲線，空心圓形代表高度為 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度 $30\ \mu\text{m}$ 深度 110

μm 之微孔洞，空心三角形符號代表高度為 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度為 $60\ \mu\text{m}$ 深度為 $130\ \mu\text{m}$ 之微孔洞，其二次不同實驗分別用紅色與深綠色代表。圖中之符號 P 代表微米柱陣列之高度、 W 代表微孔洞之寬度、 H 代表微孔洞之深度，而數字之單位都為微米。高度 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列所得之乾涸熱通量與熱傳係數分別為 $94.9\ \text{W}/\text{cm}^2$ 、 $4.25\ \text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。高度為 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度為 $30\ \mu\text{m}$ 深度為 $110\ \mu\text{m}$ 之微孔洞所得之乾涸熱通量與熱傳係數為 $96.0\ \text{W}/\text{cm}^2$ 、 $4.86\ \text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。高度為 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度為 $60\ \mu\text{m}$ 深度為 $130\ \mu\text{m}$ 之微孔洞之紅色與深綠色兩個不同樣本所得之乾涸熱通量分別為 $96.2\ \text{W}/\text{cm}^2$ 與 $94.5\ \text{W}/\text{cm}^2$ ，而所得之熱傳係數分別為 $5.03\ \text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 與 $5.77\ \text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。比較矽微米線陣列與此陣列內嵌入二種尺寸微孔洞之毛細結構之熱傳曲線，可發現嵌入微孔洞之毛細結構最多能使熱傳係數增加 35.8% 熱傳係數，且乾涸熱通量並不會因嵌入微孔洞而下降。

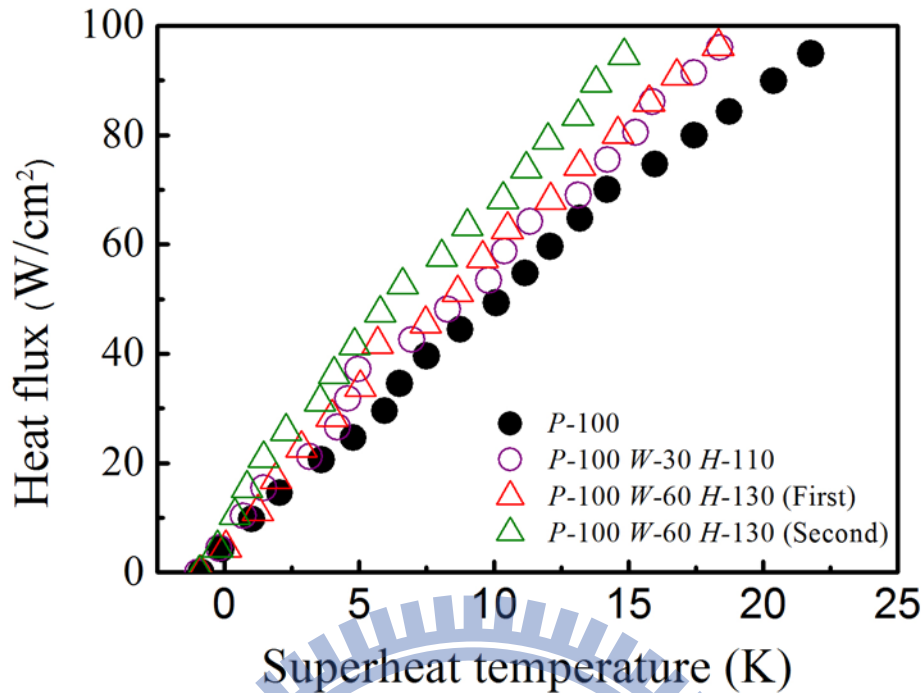


圖 4.4、比較高度 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列與此陣列內嵌入二種尺寸微孔洞之熱傳圖：其中 P 代表微米柱陣列之高度、 W 代表微孔洞之寬度、 H 代表微孔洞之深度，而數字之單位都為微米。實心圓形符號代表高度 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列之熱傳曲線、空心圓形代表高度為 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度為 $30\ \mu\text{m}$ 深度為 $110\ \mu\text{m}$ 之微孔洞之熱傳曲線、空心三角形符號代表高度為 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度為 $60\ \mu\text{m}$ 深度為 $130\ \mu\text{m}$ 之微孔洞之熱傳曲線，其二次不同實驗分別用紅色與深綠色代表。

圖 4.5 為高度 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度 $30\ \mu\text{m}$ 深度 $110\ \mu\text{m}$ 之微孔洞，在熱通量為 $26\ \text{W}$ 時在不同時間所得之影像。圖 4.5(a) 可看到一開始右上方之微孔洞是充滿液體的狀態(紅色圓圈內區域)，而在經過 0.1282 秒與 0.2564 秒時微孔洞呈現噴發狀態(見圖 4.5(b)-(c))，在經過 0.4102 秒

時微孔洞又充滿液體(圖 4.5(d))。由以上結果估計完成一次噴發動作所需時間為 0.4102 秒。

圖 4.6 為高度 100 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度 60 μm 深度 130 μm 之微孔洞在 15 W 時之影像。圖 4.6(a)可看到一開始右上方之微孔洞是充滿液體的狀態(紅色圓圈區域)，在 0.08 秒時微孔洞有呈現噴發狀態(見圖 4.6(b))，在 0.16 秒時又充滿液體(見圖 4.6(c))，最後在 0.4102 秒時又再次噴發(見圖 4.6(d))。故估計完成一次噴發動作需時 0.16 秒。比較圖 4.5 與 4.6 可發現寬度為 60 μm 之微孔洞可更快速地作動，這可能是造成寬度 60 μm 之微孔洞熱傳係數較高的原因。且圖 4.5 與圖 4.6 分別是在熱通量為 26 W 及 15 W 時所得之影像，故由此兩圖可證明微孔洞在低熱通量時就有觸發沸騰之效果。



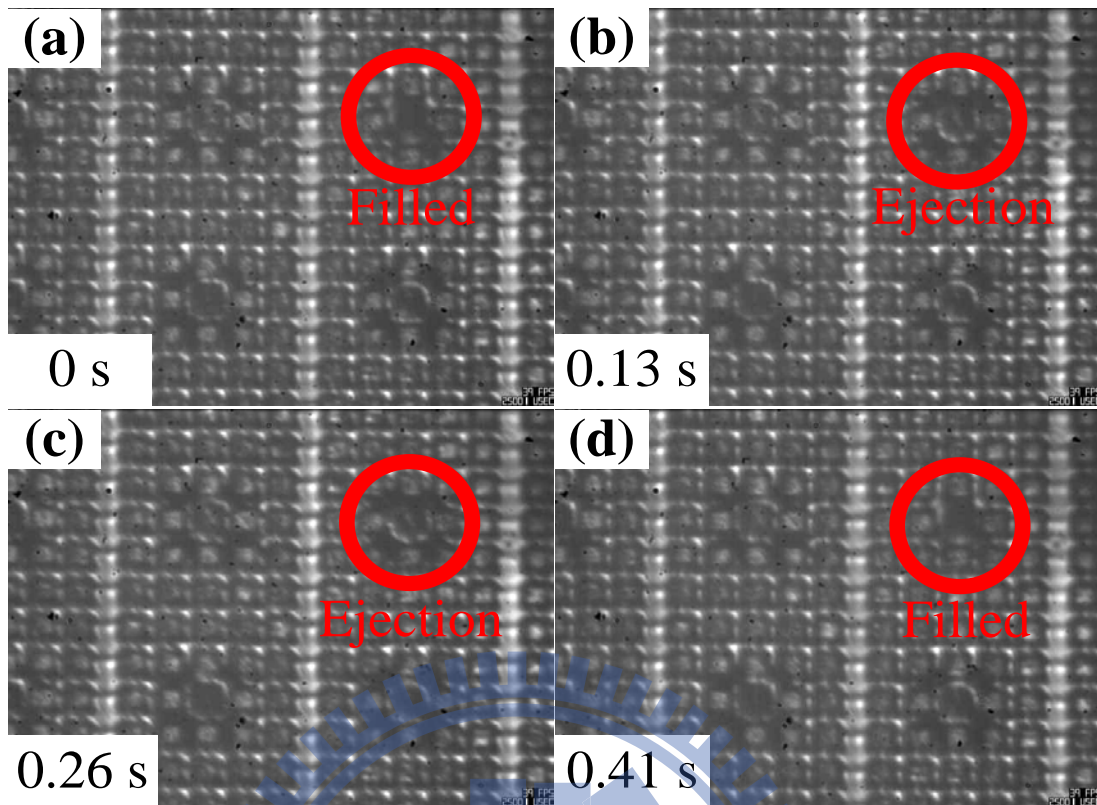


圖 4.5、為高度 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度 $30\ \mu\text{m}$ 深度 $110\ \mu\text{m}$ 之微孔洞，在熱通量為 $26\ \text{W}$ 時在不同時間所得之影像：(a)一開始右上方之微孔洞是充滿液體的狀態(紅色圓圈區域)；(b)過 0.1282 秒時微孔洞呈現成噴發狀態；(c)過 0.2564 秒時微孔洞呈現成噴發狀態；(d)在 0.4102 秒時又充滿液體。故估計完成一次噴發動作所需時間為 0.4102 秒。

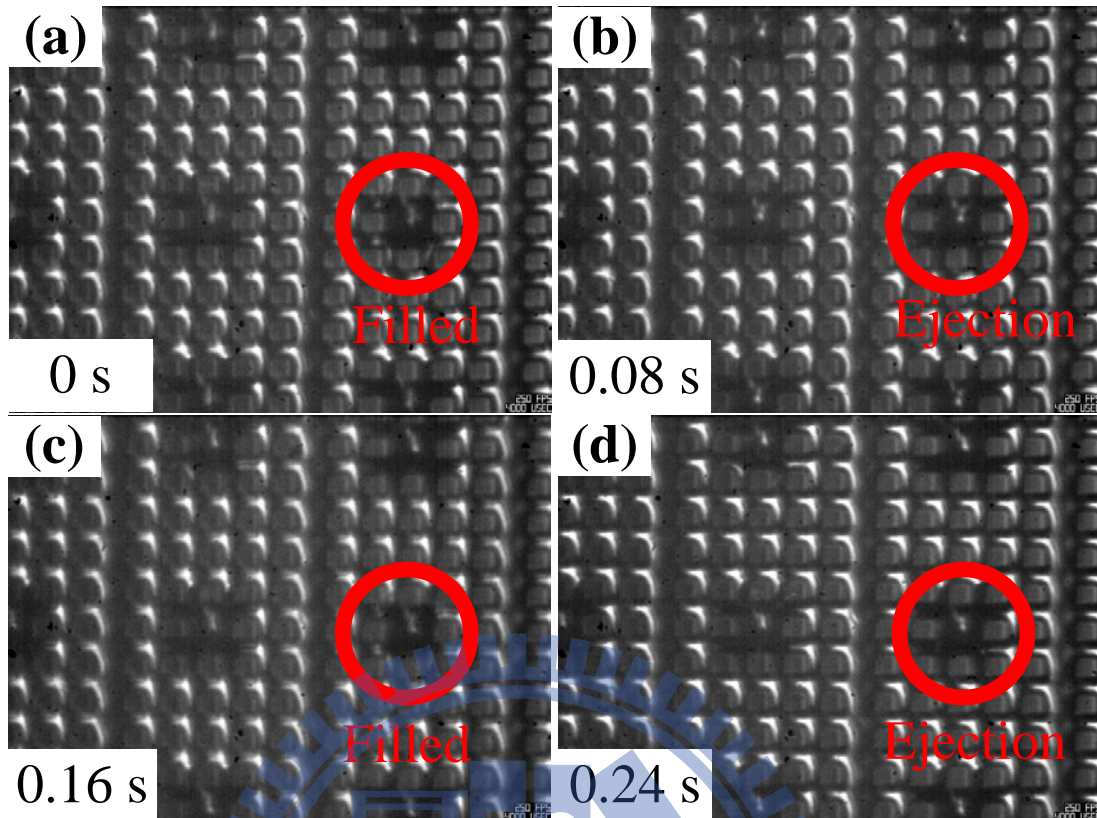


圖 4.6、為高度 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度 $60\ \mu\text{m}$ 深度 $130\ \mu\text{m}$ 之微孔洞，在熱通量為 $15\ \text{W}$ 時在不同時間所得之影像：(a)一開始右上方之微孔洞是充滿液體的狀態(紅色圓圈區域)；(b)過 0.08 秒時微孔洞呈現成噴發狀態；(c)過 0.16 秒時微孔洞又充滿液體；(d)在 0.24 秒時再次噴發。故估計完成一次噴發動作所需時間為 0.16 秒。

圖4.7比較高度 $170\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列毛細結構及在此結構內嵌入二種微孔洞與高度 $160\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入微孔洞之毛細結構之熱傳。圖中實心正方形符號代表高度為 $170\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列之毛細結構之熱傳曲線，其二次不同實驗結果分別用橘色與深綠色代表。圖中空心正方形代表高度為 $170\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度 $30\ \mu\text{m}$ 深度 $30\ \mu\text{m}$ 之微孔洞之毛

細結構之熱傳曲線，其二次不同實驗結果分別用藍色與紅色代表。圖中空心星形代表高度為160 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度40 μm 深度40 μm 之微孔洞之毛細結構之熱傳曲線，其二次不同實驗結果分別用黑色與紅色代表。圖中空心五邊形代表高度為170 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度70 μm 深度50 μm 之微孔洞之毛細結構之熱傳曲線。高度為170 μm 之矽微米線陣列橘色與深綠色兩個不同樣本所得之乾涸熱通量分別為117.7 W/cm^2 與123.3 W/cm^2 ，而所得之熱傳係數分別為4.71 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 與3.87 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。高度為170 μm 之矽微米線陣列橘色與深綠色兩個不同樣本所得之乾涸熱通量分別為117.7 W/cm^2 與123.3 W/cm^2 ，而所得之熱傳係數分別為4.71 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 與3.87 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。高度為170 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度為30 μm 深度為30 μm 之微孔洞用藍色與紅色兩個不同樣本所得之乾涸熱通量分別為117.8 W/cm^2 與119.2 W/cm^2 ，而所得之熱傳係數分別為4.40 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 與4.22 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。高度為160 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度為40 μm 深度為40 μm 之微孔洞用黑色與紅色兩個不同樣本所得之乾涸熱通量分別為118.2 W/cm^2 與106.4 W/cm^2 ，而所得之熱傳係數分別為4.16 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 與6.43 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。高度為170 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度為70 μm 深度為50 μm 之微孔洞所得之乾涸熱通量與熱傳係數為121.0 W/cm^2 、4.83 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。而以上結構沸騰時的熱傳係數皆位在11~16 $\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 之間。如圖4.7所示除了紅色空心星形符號那組實驗有提升之外(與藍色實心正方形實驗相比熱傳係數提升

66.1%)，其餘實驗結果與單純微米線陣列之結構結果相差甚小。

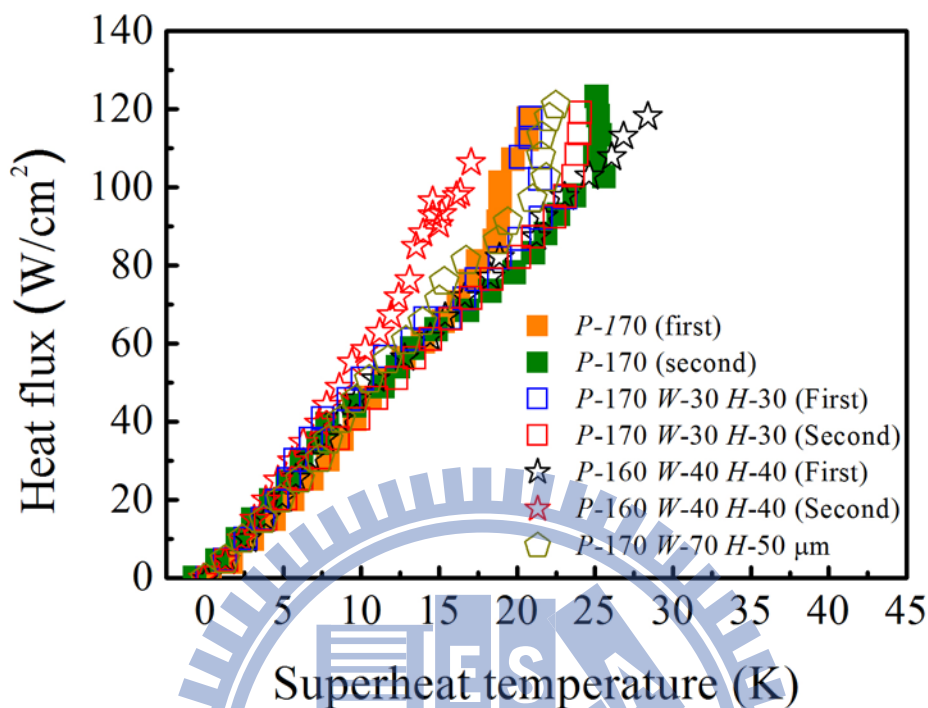


圖 4.7、比較高度 170 μm 之矽微米線陣列毛細結構及在此結構內嵌入二種微孔洞與高度 160 μm 之矽微米線陣列嵌入微孔洞之毛細結構之熱傳：圖中實心正方形符號代表高度為 170 μm 之矽微米線陣列之熱傳曲線，其二次不同實驗結果分別用橘色與深綠色代表；空心正方形符號代表高度為 170 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度為 30 μm 深度為 30 μm 之微孔洞，其二次不同實驗分別用藍色與紅色代表；空心星形符號代表高度為 160 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度為 40 μm 深度為 40 μm 之微孔洞，其二次不同實驗分別用黑色與紅色代表；空心五邊形符號代表高度為 170 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度為 70 μm 深度為 50 μm 之微孔洞之毛細結構之熱傳曲線。

圖 4.8 是高度 $160\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度 $40\ \mu\text{m}$ 深度 $40\ \mu\text{m}$ 之微孔洞之毛細結構(圖 4.7 中黑色空心星形)在熱通量為 $82\ \text{W}$ 時所拍攝之影像。其中圖 4.8(a)為截取之最初影像，時間以此為基準(0 秒)；圖 4.8(b)為圖 4.8(a)經過 0.13 秒所得之影像；圖 4.8(c)為圖 4.8(a)經過 0.26 秒所得之影像；圖 4.8(d)為圖 4.8(a)經過 0.4 秒所得之影像。由此影像可發現微孔洞幾乎沒有任何變化。此影像配合圖 4.7 黑色空心星形之熱傳曲線發現與實心正方形之熱傳曲線相似。因此，推測微孔洞並無噴發。

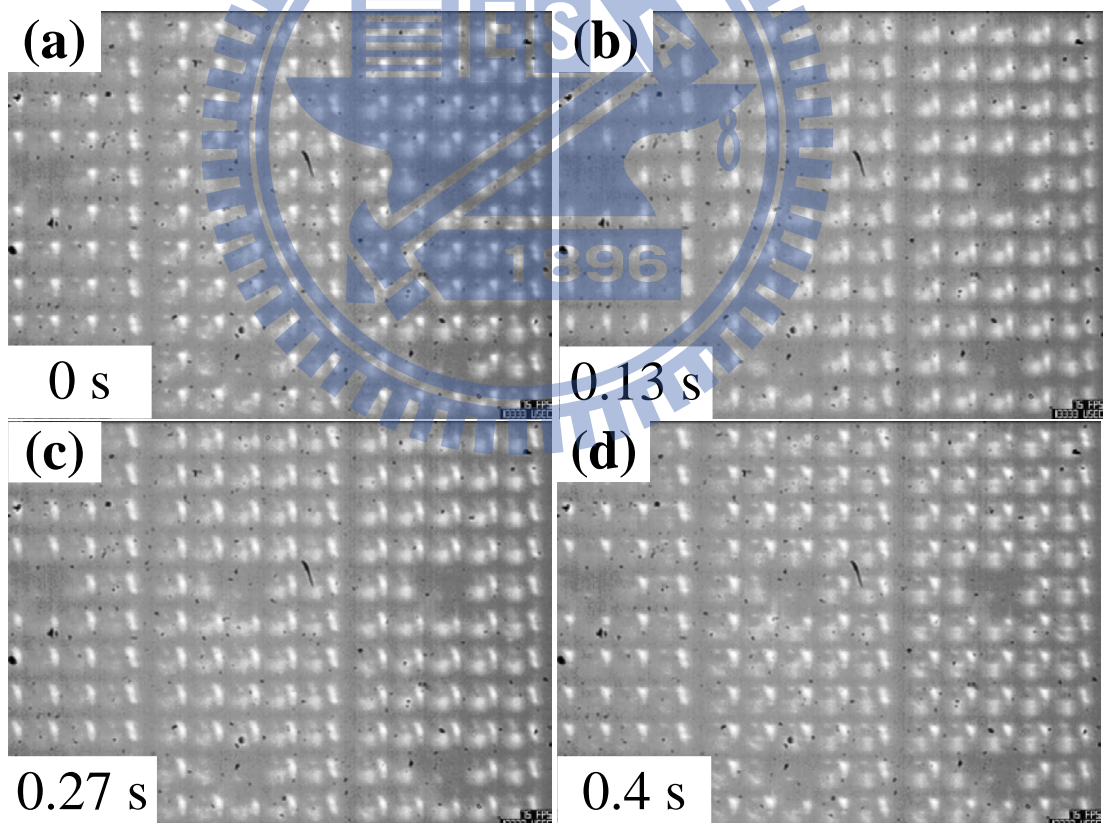


圖 4.8、高度 $160\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度 $40\ \mu\text{m}$ 深度 $40\ \mu\text{m}$ 之微孔洞之毛細結構，在熱通量為 $82\ \text{W}$ 時(為圖 4.7 中黑色空心星形之熱傳曲線)

所拍攝之影像圖：(a)截取之第一影像，時間以此為基準(0 秒)；(b)為(a)經過 0.13 秒所得之影像；(c)為(a)經過 0.27 秒所得之影像；(d)為(a)經過 0.4 秒所得之影像。

圖 4.9 是高度 $160\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度 $40\ \mu\text{m}$ 深度 $40\ \mu\text{m}$ 之微孔洞之毛細結構(圖 4.7 中紅色空心星形)在熱通量為 $72\ \text{W}$ 下於不同時間所得之影像。圖 4.9(a)可看到一開始中間下方之微孔洞是充滿液體的狀態(紅色圓圈內區域)，而在經過 0.013 秒與 0.027 秒時微孔洞呈現噴發狀態(見圖 4.9(b)-(c))，在經過 0.04 秒時微孔洞又充滿液體(圖 4.9(d))。由以上結果估計完成一次噴發動作所需時間為 0.04 秒。此影像配合圖 4.7 紅色空心星形之熱傳曲線可推測其熱傳增強(66.1%)乃由於沸騰造成。

由圖 4.7~圖 4.9 可知，就算是相似的微米線嵌入微孔洞之毛細結構，當微孔洞無噴發時，其熱傳曲線與純微米柱陣列相似，而當微孔洞噴發時，熱傳係數將會提升。

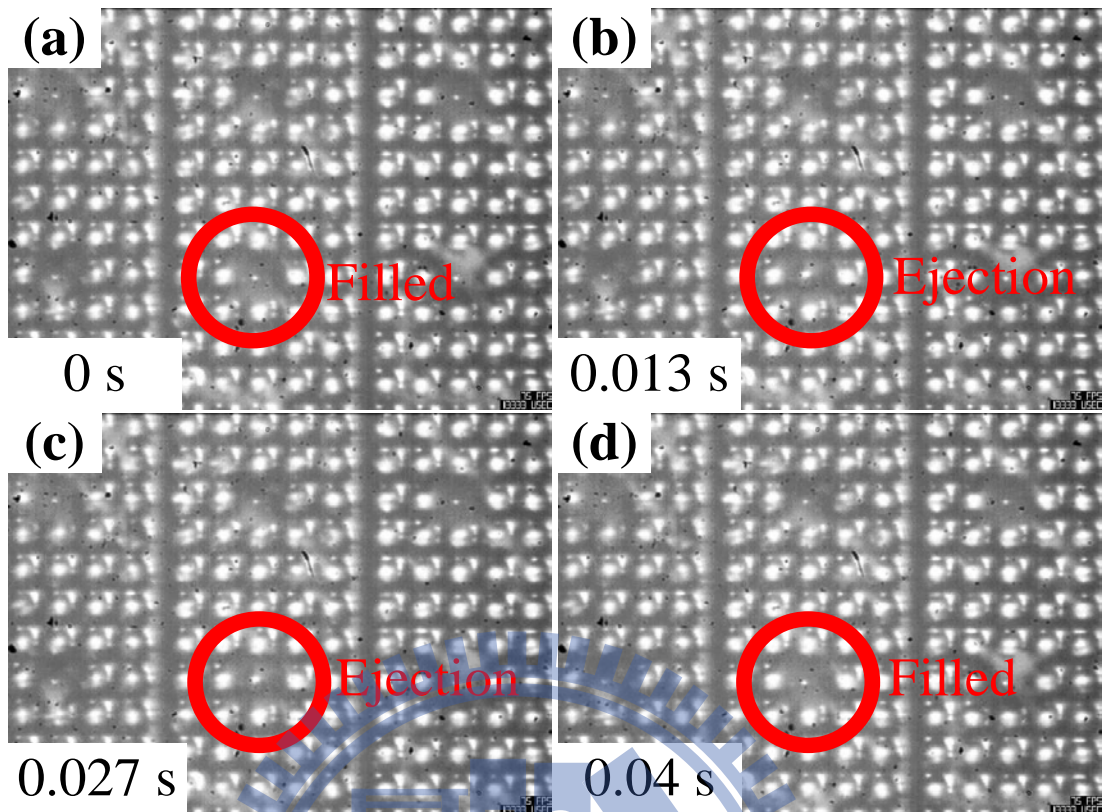


圖 4.9、高度 $160\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度 $40\ \mu\text{m}$ 深度 $40\ \mu\text{m}$ 之微孔洞之毛細結構，在熱通量為 $72\ \text{W}$ 時(為圖 4.7 中紅色空心星形之熱傳曲線)在不同時間所得之影像：(a)一開始右上方之微孔洞是充滿液體的狀態(紅色圓圈區域)；(b)過 0.013 秒時微孔洞呈現成噴發狀態；(c)過 0.027 秒時微孔洞呈現成噴發狀態；(d)在 0.04 秒時又充滿液體。故估計完成一次噴發動作所需時間為 0.04 秒。

圖4.10比較本實驗所製作之七種毛細結構之熱傳。圖中實心圓形符號代表高度 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列之熱傳曲線、空心圓形代表高度為 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度 $30\ \mu\text{m}$ 深度 $110\ \mu\text{m}$ 之微孔洞之毛細結構之熱傳曲線、空心三角形代表高度為 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度 $60\ \mu\text{m}$ 深度 130

μm 之微孔洞之毛細結構之熱傳曲線、實心正方形符號代表高度 $170\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列之熱傳曲線、空心正方形代表高度為 $170\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度 $30\ \mu\text{m}$ 深度 $30\ \mu\text{m}$ 之微孔洞之毛細結構之熱傳曲線、空心星形代表高度為 $160\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度 $40\ \mu\text{m}$ 深度 $40\ \mu\text{m}$ 之微孔洞之毛細結構之熱傳曲線、空心五邊形代表高度為 $170\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度 $70\ \mu\text{m}$ 深度 $50\ \mu\text{m}$ 之微孔洞之毛細結構之熱傳曲線。高度為 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列所得之乾涸熱通量與熱傳係數分別為 $94.9\ \text{W}/\text{cm}^2$ 、 $4.25\ \text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。高度為 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度為 $30\ \mu\text{m}$ 深度為 $110\ \mu\text{m}$ 之微孔洞所得之乾涸熱通量與熱傳係數為 $96.0\ \text{W}/\text{cm}^2$ 、 $4.86\ \text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。高度為 $100\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度為 $60\ \mu\text{m}$ 深度為 $130\ \mu\text{m}$ 之微孔洞所得之乾涸熱通量與熱傳係數為 $94.5\ \text{W}/\text{cm}^2$ 、 $5.77\ \text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。高度為 $170\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列所得之乾涸熱通量與熱傳係數分別為 $123.3\ \text{W}/\text{cm}^2$ 、 $3.87\ \text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。高度為 $170\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度為 $30\ \mu\text{m}$ 深度為 $30\ \mu\text{m}$ 之微孔洞所得之乾涸熱通量與熱傳係數為 $117.8\ \text{W}/\text{cm}^2$ 、 $4.40\ \text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。高度為 $160\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度為 $40\ \mu\text{m}$ 深度為 $40\ \mu\text{m}$ 之微孔洞所得之乾涸熱通量與熱傳係數為 $106.4\ \text{W}/\text{cm}^2$ 、 $6.43\ \text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。高度為 $170\ \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度為 $70\ \mu\text{m}$ 深度為 $50\ \mu\text{m}$ 之微孔洞所得之乾涸熱通量與熱傳係數為 $121.0\ \text{W}/\text{cm}^2$ 、 $4.83\ \text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$ 。由圖4.10可發現，乾涸熱通量隨高度增加而提高。此外當微孔洞噴發時，熱傳係數較同高度下之全微米線陣列結構上

升14.4~66.1%，但若微孔洞無作動時，則其熱傳曲線與全微米線陣列相似。

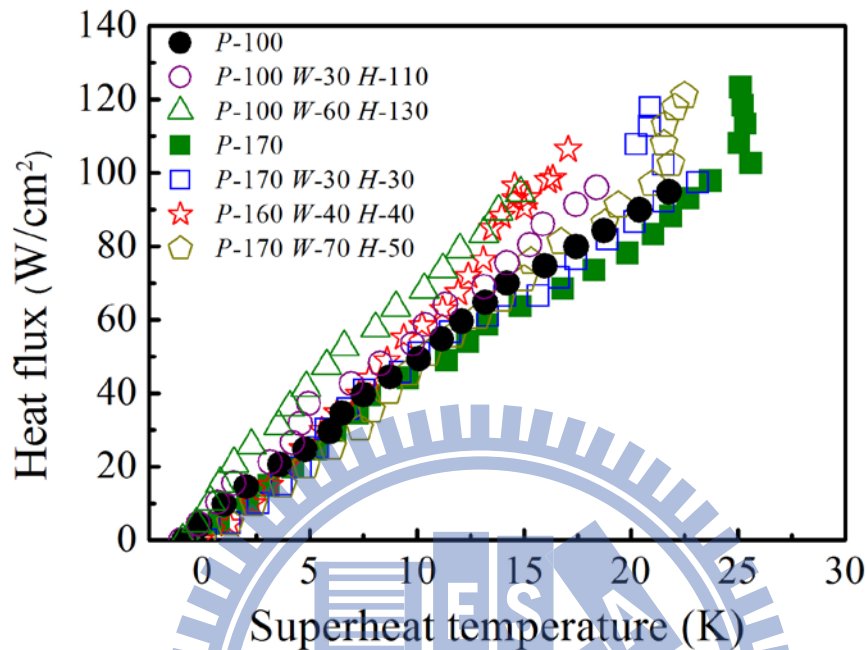


圖 4.10 比較本實驗所製作之七種毛細結構之熱傳：圖中實心圓形符號代表高度 100 μm 之矽微米線陣列之熱傳曲線、空心圓形代表高度為 100 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度 30 μm 深度 110 μm 之微孔洞之毛細結構之熱傳曲線、空心三角形代表高度為 100 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度 60 μm 深度 130 μm 之微孔洞之毛細結構之熱傳曲線、實心正方形符號代表高度 170 μm 之矽微米線陣列之熱傳曲線、空心正方形代表高度為 170 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度 30 μm 深度 30 μm 之微孔洞之毛細結構之熱傳曲線、空心星形代表高度為 160 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度 40 μm 深度 40 μm 之微孔洞之毛細結構之熱傳曲線、空心五邊形代表高度為 170 μm 之矽微米線陣列嵌入寬度 70 μm 深度 50 μm 之微孔洞之毛細結構之熱傳曲線。

4.3 本章摘要

本章分別討論全微米線陣列毛細結構與嵌入微孔洞矽微米線陣列毛細結構之熱傳表現，其幾何結構與對應數據之如表二所示。本研究發現全微米線陣列毛細結構之乾涸熱通量會隨微米柱高度增加而上升，而蒸發熱傳係數不隨微米柱高度改變。此外，在 170 μm 之矽微米線陣列在高熱通量時會產生沸騰，而熱傳係數因沸騰上升。比較嵌入微孔洞矽微米線陣列毛細與矽微米線陣列之熱傳發現，當微米線陣列嵌入之微孔洞噴發時，其熱傳係數與同高度之微米線陣列相比提升 14.4~66.1 %，證明在微米線陣列嵌入微孔洞之方法可增強熱傳係數。但當微米線陣列嵌入之微孔洞無噴發時，其熱傳係數與乾涸熱通量與同高度之微米線陣列相近。



表三、本研究所實驗之樣本與其數據對應表

	微米柱 長度 P (μm)	微孔洞 寬度 W (μm)	微孔洞 深度 H (μm)	乾涸熱通量 (W/cm^2)	熱傳係數 ($\text{W}/\text{cm}^2\text{-K}$)
Sample 1	100	-	-	94.9	4.25
Sample 2				94.3	4.5
Sample 3				96.6	4.22
Sample 4	170	-	-	117.7	4.71
Sample 5				123.3	3.87
Sample 6	100	30	110	96.0	4.86
Sample 7	100	60	130	96.2	5.03
Sample 8				94.5	5.77
Sample 9	170	30	30	117.8	4.40
Sample 10				119.2	4.22
Sample 11	160	40	40	118.2	4.16
Sample 12				106.4	6.43
Sample 13	170	70	50	121.0	4.83

第五章 結論與未來工作

5.1 結論

本研究提出一嶄新的嵌入微孔洞之矽微米線陣列之熱管毛細結構。此結構以微孔洞陣列在低過熱度時觸發沸騰以增強毛細結構之熱傳係數，同時此微孔洞陣列並不會影響矽微米線陣列之毛細力，故此嵌入微孔洞之矽微米線陣列可以提高毛細結構之熱傳係數並同時維持高的毛細限。實驗結果顯示，嵌入微孔洞之矽微米線陣列與全微米線陣列相比最多可提升約66%之熱傳係數，同時不會影響乾涸熱通量，其乾涸熱通量最高可達約120 W/cm²。此外，由高速攝影機之影像可發現，在低熱通量時，微孔洞就可誘發沸騰現象產生，且該現象在深度大於100 μm之微孔洞較明顯。但若微孔洞無作動時，則其熱傳曲線近似於微米線陣列。

5.2 未來工作

目前得到嵌入微孔洞之矽微米線陣列可以利用微孔洞陣列觸發沸騰以增強熱傳，但目前發現並非所有微孔洞都有誘發沸騰效果，所以未來工作將深入探討微孔洞之誘發沸騰之機制。

實驗發現深度大於100 μm之微孔洞誘發沸騰之現象較明顯，推測其原因為液體不易充滿此相對深的微孔洞，故此微孔洞內殘存的氣體可成為

沸騰之成核點，因此，當給予一定大小之熱通量時，沸騰可藉由此深的微孔洞觸發。故未來研究將探討微孔洞之深度對誘發沸騰之影響。

此外先前的研究發現矽微米線陣列嵌入有高牆之微孔洞之毛細結構，其熱傳係數到達 $9 \text{ W/cm}^2\text{-K}$ [31]，此有高牆之微孔洞之毛細結構如圖 5.1 所示，其中圖 5.1(a)為高牆微孔洞微米線陣列之側視圖，而圖 5.1 (b)為(a)之上視圖，由圖 5.1(a)可看到微孔洞上方之高牆(紅色圈內)。此嵌入高牆之微孔洞毛細結構所得熱傳係數比本次實驗之結構所得之熱傳係數 $6.43 \text{ W/cm}^2\text{-K}$ 還高。推測其原因，可能是高牆讓液體更不易補充進微孔洞，導致微孔洞誘發沸騰之效果更強。

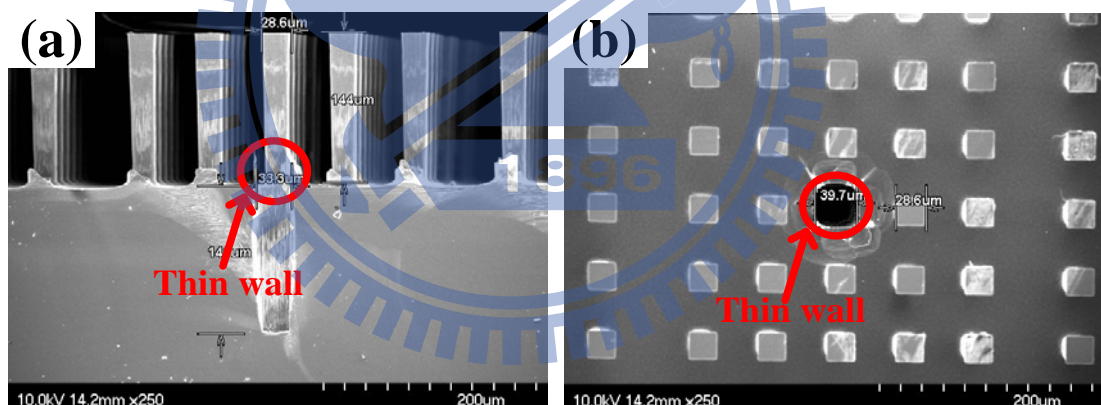


圖 5.1、新型嵌入高牆微孔洞微米線陣列 SEM 圖：(a)為嵌入高牆微孔洞微米線陣列之側視圖，可以看到微孔洞上方之高牆(紅色圈內)；(b)為(a)之上視圖

最後本實驗微孔洞陣列之面積與整體結構面積的比例約為 1~4%，即可提升熱傳係數最多達 66 %。目前推測增加微孔洞陣列應可在進而增加

熱傳，故未來工作將探討微孔洞密度對熱傳增強的影響。圖 5.2 為三種微孔洞密度之嵌入微孔洞微米線陣列示意圖。其中圖 5.2 (a)為目前所採用之微孔洞密度、(b)為 2 倍微孔洞密度、而(c)為 4 倍微孔洞密度。本研究將進行此三種微孔洞密度之熱傳實驗以釐清微孔洞密度對熱傳增強之影響。

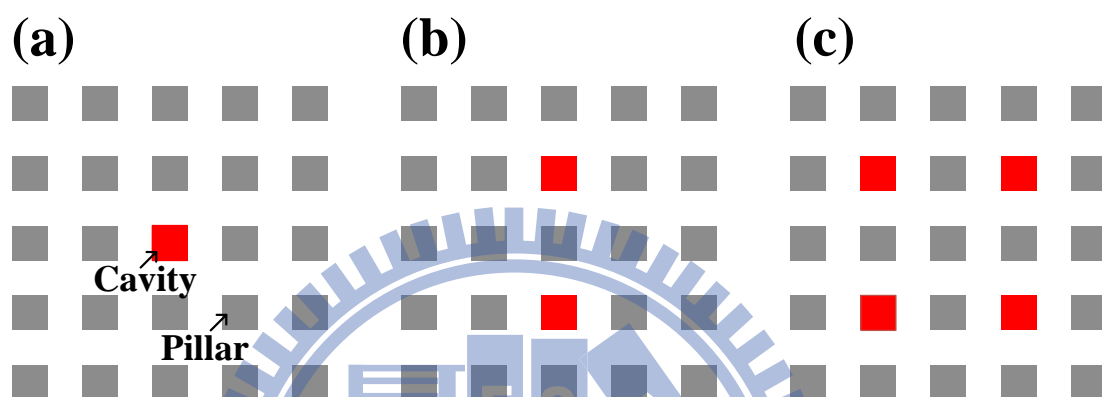


圖 5.2、三種微孔洞密度之嵌入微孔洞微米線陣列示意圖:(a)目前之微孔洞密度密度，(b)2 倍微孔洞密度密度與(c)4 倍微孔洞密度密度。

目前規劃進一步增強此毛細結構之方法為：(1)應用高深寬比的微孔洞觸發沸騰；(2)以高牆阻隔液體提升微孔洞沸騰機率；(3)增加微孔洞密度以提升熱傳。

此外，為精準控制嵌入微孔洞之矽微米線陣列之幾何形狀，我們又開發新一製程，令為製程三，步驟如圖 5.3 所示。其步驟敘述如下：(a)以光阻在矽晶圓上定義出矽微孔洞的圖形；(b)使用反應式離子深蝕刻儀器蝕刻出矽微孔洞；(c)利用電子鎗蒸鍍二氧化矽薄膜；(d) 使用舉離製程，將多餘之二氧化矽去除；(e) 以光阻在矽晶圓上定義出矽微米線陣列圖形；(f)

使用反應式離子深蝕刻儀器蝕刻出矽微米線陣列；(g)去除光阻；(h)去除多餘之二氧化矽則得到所需結構。此製程利用二氧化矽作為保護層，使微孔洞免於多次深蝕刻製程，達到精準控制幾何形狀。

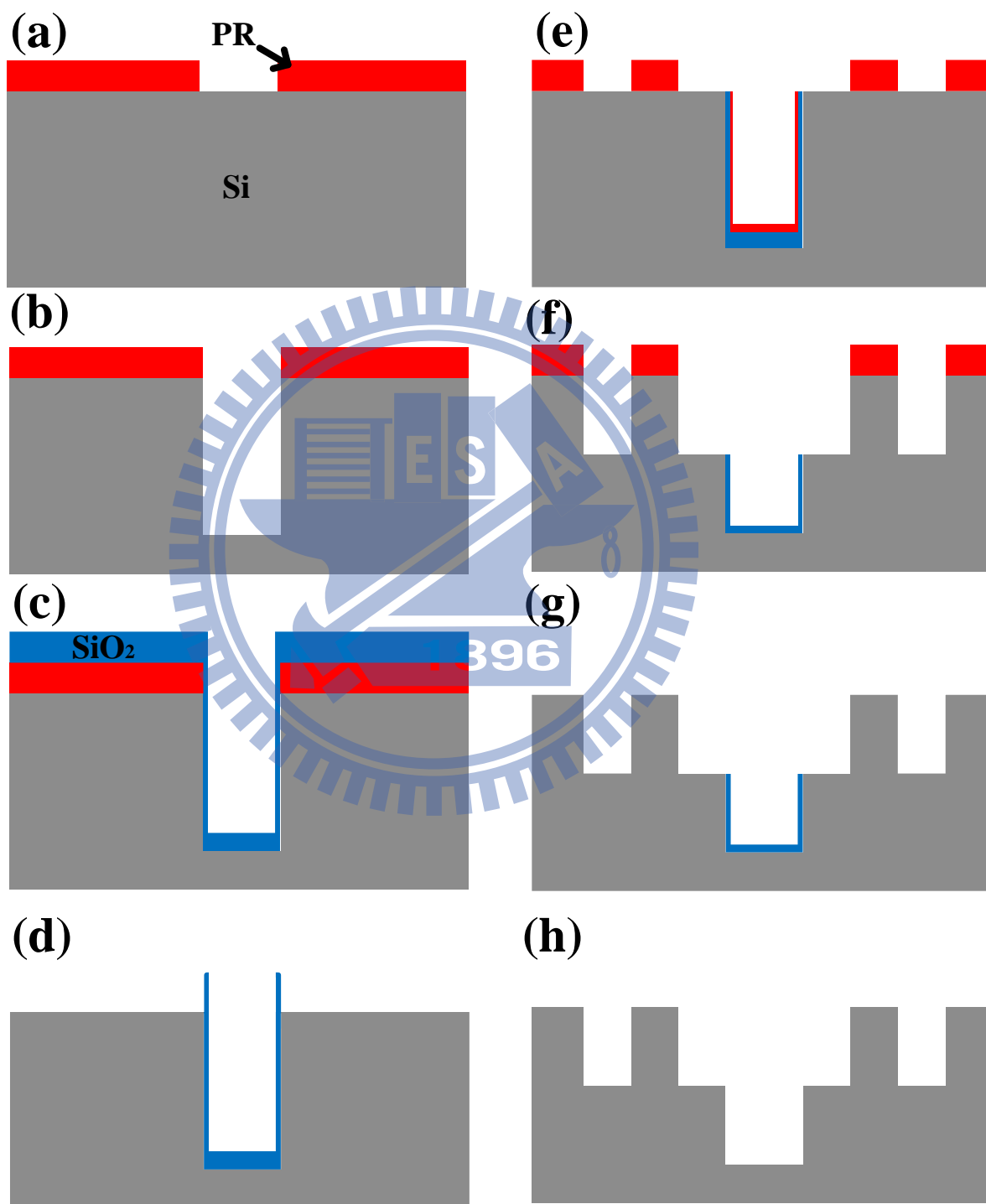
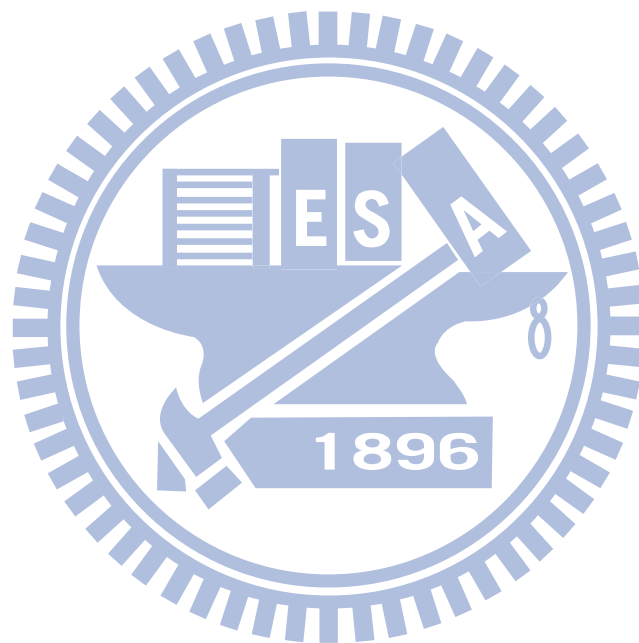


圖 5.3、嵌入微孔洞矽微米線陣列製程三示意圖：(a)以光阻在矽晶圓上定義出矽微孔洞的圖形；(b)使用反應式離子深蝕刻儀器蝕刻出矽微孔洞；(c)利用電子鎗蒸鍍二氧化矽薄膜；(d) 使用舉離製程，將多餘之二氧化矽去除；(e) 以光阻在矽晶圓上定義出矽微米線陣列圖形；(f)使用反應式離子深蝕刻儀器蝕刻出矽微米線陣列；(g)去除光阻；(h)去除多餘之二氧化矽則得到所需結構。



第六章、参考文献

- [1] G.E. MOORE, Cramming More Components onto Integrated Circuits, PROCEEDINGS OF THE IEEE, 86 (1998).
- [2] R. Mahajan, C.P. Chiu, G. Chrysler, Cooling a microprocessor chip, IEEE, 94 (2006).
- [3] A. Majumdar, Thermoelectric devices Helping Chips to Keep Their Cool, nature nanotechnology, 4 (2009).
- [4] A. Shakouri, Y. Zhang, On-Chip Solid-State Cooling for Integrated Circuits Using Thin-Film Microrefrigerators, IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES,, 28 (2005).
- [5] P. Wang, A. Bar-Cohen, On-chip hot spot cooling using silicon thermoelectric microcoolers, Journal of Applied Physics, 102(3) (2007) 034503.
- [6] A. Bar-Cohen, P. Wang, Thermal Management of On-Chip Hot Spot, Journal of Heat Transfer, 134(5) (2012) 051017.
- [7] D.-W. Kim, E. Rahim, Bar-Cohen A., B. Han, Direct Submount Cooling of High-Power LEDs, IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENTS AND PACKAGING TECHNOLOGIES,, 33 (2010).
- [8] G.M. Grover, T.P. Cotter, G.F. Erickson, Structures of Very High Thermal Conductance, Journal of Applied Physics, 35(6) (1964) 1990.
- [9] C.B. Sobhan, R.L. Rag, G.P. Peterson, A review and comparative study of the investigations on micro heat pipes, International Journal of Energy Research, 31(6-7) (2007) 664-688.
- [10] A.S. Futane , S.R. Karale , U.S. Wankhede, A Review On Free Cooling Through Heat Pipe by Using Phase Change Materials, International Journal of Engineering Science and Technology, 3 (2011).
- [11] M.A. Hanlon, H.B. Ma, Evaporation Heat Transfer in Sintered Porous Media, Journal of Heat Transfer, 125(4) (2003) 644.
- [12] R.S. Prasher, A Simplified Conduction Based Modeling Scheme for Design Sensitivity Study of Thermal Solution Utilizing Heat Pipe and Vapor Chamber Technology, Journal of Electronic Packaging, 125(3) (2003) 378.
- [13] C. Byon, S.J. Kim, Capillary performance of bi-porous sintered metal wicks, International Journal of Heat and Mass Transfer, 55(15-16) (2012) 4096-4103.

- [14] T. Semenic, Y.-Y. Lin, I. Catton, Thermophysical Properties of Biporous Heat Pipe Evaporators, *Journal of Heat Transfer*, 130(2) (2008) 022602.
- [15] T. Semenic, Y.Y. Lin, I. Catton, D.B. Sarraf, Use of biporous wicks to remove high heat fluxes, *Applied Thermal Engineering*, 28(4) (2008) 278-283.
- [16] J.A. Weibel, S.V. Garimella, M.T. North, Characterization of evaporation and boiling from sintered powder wicks fed by capillary action, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(19-20) (2010) 4204-4215.
- [17] J.A. Weibel, S.S. Kim, T.S. Fisher, S.V. Garimella, Carbon Nanotube Coatings for Enhanced Capillary-Fed Boiling from Porous Microstructures, *Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering*, 16(1) (2012) 1-17.
- [18] J.A. Weibel, A.S. Kousalya, T.S. Fisher, S.V. Garimella, Characterization and Nanostructured Enhancement of Boiling Incipience in Capillary-Fed, Ultra-Thin Sintered Powder Wicks, *IEEE ITherm Conference*, (2012).
- [19] A.S. Kousalya, J.A. Weibel, S.V. Garimella, T.S. Fisher, Metal functionalization of carbon nanotubes for enhanced sintered powder wicks, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 59 (2013) 372-383.
- [20] D.a. C'oso, V. Srinivasan, M.-C. Lu, J.-Y. Chang, A. Majumdar, Enhanced Heat Transfer in Biporous Wicks in the Thin Liquid Film Evaporation and Boiling Regimes, *Journal of Heat Transfer*, 134(10) (2012) 101501.
- [21] T.P. Cotter, *PRINCIPLES AND PROSPECTS FOR MICROHEAT PTPES*, (1984).
- [22] D. Khristalev, Faghri A., Heat Transfer During Evaporation on Capillary- Grooved Structures of Heat Pipes, *J. Heat Transfer*, (1995).
- [23] S.J.S. Morris, The evaporating meniscus in a channel, *Journal of Fluid Mechanics*, 494 (2003) 297-317.
- [24] H. Wang, S.V. Garimella, J.Y. Murthy, Characteristics of an evaporating thin film in a microchannel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(19-20) (2007) 3933-3942.
- [25] J.L. Plawsky, M. Ojha, A. Chatterjee, P.C. Wayner, Review of the Effects of Surface Topography, Surface Chemistry, and Fluid Physics on Evaporation at the Contact Line, *Chemical Engineering Communications*, 196(5) (2008) 658-696.
- [26] H.K. Dhavaleswarapu, S.V. Garimella, J.Y. Murthy, Microscale Temperature Measurements Near the Triple Line of an Evaporating Thin Liquid Film, *Journal of Heat Transfer*, 131(6) (2009) 061501.

[27] C. Li, G.P. Peterson, Y. Wang, Evaporation/Boiling in Thin Capillary Wicks (I)—Wick Thickness Effects, Journal of Heat Transfer, 128(12) (2006) 1312.

[28] C. Li, G.P. Peterson, Evaporation/Boiling in Thin Capillary Wicks (II)—Effects of Volumetric Porosity and Mesh Size, J. Heat Transfer, (2006).

[29] H.M. Kurihara, J.E. Myers, The Effects of Superheat and surface roughness on boiling coefficients, A.I.Ch.E. Journal, 6 (1960).

[30] V.P. Carey, Liquid-vapor phase-change phenomena, 1992.

[31] M.-C. Lu, Exploring the Limits of Boiling and Evaporative Heat Transfer Using Micro/Nano Structures, 2010.



附錄

附錄 1 熱損分析

熱傳實驗定有熱損失，而藉由熱損分析可得知熱散失的多寡。若實驗熱損極小，表大部份的熱皆傳遞到實驗元件，則實驗可信度就越高。

熱損失經由加熱器傳到導熱膏、矽膠與熱對流之途徑，如圖A.1本次熱損分析運用熱阻分析，用式(A.1)來計算熱損失：

$$q_{loss} = (R_{epoxy} + R_{silicone} + R_{convection}) \Delta T \quad (A.1)$$

其中 q_{loss} 為熱損失、 ΔT 為加熱器與環境溫差、 R_{epoxy} 為導熱膏的熱阻、 $R_{silicone}$ 為矽膠的熱阻、 $R_{convection}$ 為熱對流的熱阻。 R_{epoxy} 與 $R_{silicone}$ 分別用熱傳導熱阻公式(式(A.2)與式(A.3))， $R_{convection}$ 用熱對流熱阻公式(式(A.4))。

$$R_{epoxy} = \frac{L_{epoxy}}{k_{epoxy} A} \quad (A.2)$$

$$R_{silicone} = \frac{L_{silicone}}{k_{silicone} A} \quad (A.3)$$

$$R_{convection} = \frac{1}{h_{convection} A} \quad (A.4)$$

其中 L_{epoxy} 為導熱環氧樹脂厚度、 k_{epoxy} 為導熱環氧樹脂熱傳導率、 A 為熱傳面積、 $L_{silicone}$ 為矽膠厚度、 $k_{silicone}$ 為矽膠熱傳導率、 $h_{convection}$ 為對流熱傳

係數。而所使用之參數為： $k_{epoxy} = 1.5 \text{ W/m-K}$ (KT1000, FLYING DRAGONS Engineering)， $k_{silicone} = 0.21 \text{ W/m-K}$ (K045T, Shin-Etsu)， $A = 1 \text{ cm}^2$ ，並估計 $L_{epoxy} = 3 \text{ mm}$ ， $L_{silicone} = 7 \text{ mm}$ ， $h_{convection} = 100 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ，再帶入實驗熱通量 118.2 W/cm^2 與過熱溫度 $\Delta T = 32.60 \text{ }^\circ\text{C}$ ，得出熱損失為 0.0694 W ，由此途徑之熱損失占全部供應的熱量約為 0.06% 。

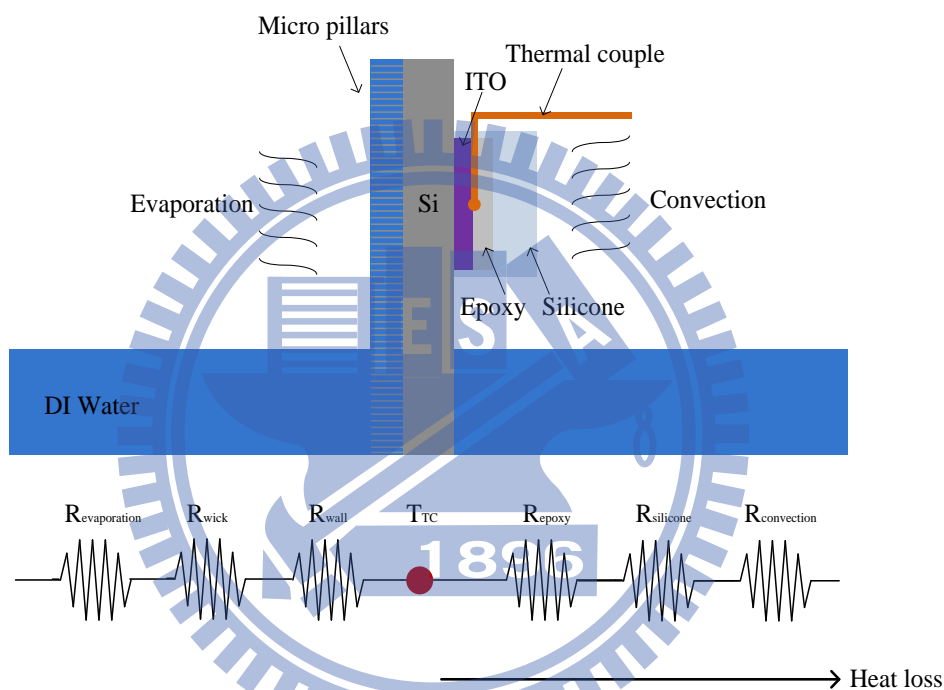


圖 A.1 熱損分析熱阻圖

由先前之研究探討矽微米線陣列的蒸發現象 [20]，可得知主要之熱損失藉由熱傳導進入下方之飽和去離子水，其熱損估算小於 3% 。而該研究與本研究實驗條件相似，估計二者熱損應相似。

附錄 2 不準度分析

因實驗定有不準確之處，故需分析實驗之不準度，以便驗證該實驗之可信度。而不準度的公式為式(A.5)：

若 $F = F(A, B, C)$

$$\text{則 } \delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial A} \delta A\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial B} \delta B\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial C} \delta C\right)^2} \quad (\text{A.5})$$

本實驗熱通量利用 $q'' = \frac{VI}{A}$ 求得，因此熱通量之不準度公式為式(A.6)：

$$\frac{\delta q''}{q''} = \sqrt{\left(\frac{\delta V}{V}\right)^2 + \left(\frac{\delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A}\right)^2} \quad (\text{A.6})$$

電壓與電流的量測誤差是由電源供應器(Agilent, N5750A)所決定的，而其電壓誤差為 $0.1\% \pm 150 \text{ mV}$ ，電流誤差為 $0.1\% \pm 15 \text{ mA}$ ，而加熱器是利用黃光微影技術製作，該機台光學誤差為 $2\mu\text{m}$ 。以高度為 $160 \mu\text{m}$ 之矽微米線陣列嵌入寬度 $40 \mu\text{m}$ 深度 $40 \mu\text{m}$ 之微孔洞該組數據為例，熱通量 118.2 W/cm^2 ，其中量測到電壓 50.3 V 、電流 2.349 A ，加熱器面積 1cm^2 ，所以熱通量誤差約為 0.84% 。

而壁面溫度可由 $T_w = T_{TC} - \frac{q'' d_{si}}{k_{si}}$ 求得，故壁面溫度之不準度公式為式(A.7)：

$$\frac{\delta T_w}{T_w} = \sqrt{\left(\frac{\delta q''}{q''}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{TC}}{T_{TC}}\right)^2} \quad (\text{A.7})$$

壁面溫度的誤差是由數據擷取器(Agilent 34970A)所擁有的熱電偶溫度量測誤差、熱通量誤差與導熱環氧樹脂厚度誤差造成的。熱電偶量測誤差約0.5 °C，而數據擷取器(Agilent 34970A)的讀取誤差約1 °C，並假設導熱環氧樹脂厚度的不準度為5 μm，熱損失造成的溫度誤差為0.002 °C，所以壁面溫度誤差約為1.43%。

最後熱傳係數由 $h = \frac{q''}{T_w - T_{sat}}$ 算得，因此熱傳係數之不準度公式為式 (A.8)：

$$\frac{\delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\delta q''}{q''}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_w}{T_w}\right)^2 + \left(\frac{\delta T_{sat}}{T_{sat}}\right)^2} \quad (\text{A.8})$$

熱傳係數是由熱通量誤差與壁面溫度誤差與飽和溫度誤差所造成，而飽和溫度量測為100.48°C，熱電偶量測誤差約0.5 °C，而數據擷取器(Agilent 34970A)的讀取誤差約1 °C，所以飽和溫度誤差約為1.49%，熱傳係數誤差約為2.23%。