

第一章 緒論

1.1 前言

隨著 IC 製程技術的成長，電子設備朝向高速率、多功能發展之時，晶片的發熱功率也不斷增加，然而尺寸卻越來越小，導致單位面積的發熱量持續增加，對於晶片來說，過高的溫度將使其壽命及效能大幅降低。以 P4 CPU 為例，其發熱量已超過 100 瓦，表面溫度則限制在 70°C 以下以保證其效能及壽命。未來要在有限的空間下帶走更多的熱，冷卻技術必須不斷的突破以提高散熱能力。

傳統的電子冷卻方式是以均熱片、鰭片搭配風扇而成的散熱模組以強制對流的方式將熱帶到環境熱沉，然而在空間及噪音限制下，其散熱能力已達極限[1]。為處理散熱問題，Webb[2]提出未來電子冷卻技術的趨勢，其中的間接熱移除(indirect heat removal)為一可行之方式，其方法利用流體將熱由熱源表面傳輸至遠端的鰭片或是其他的熱交換裝置而達到散熱的效果。液體冷卻亦屬間接熱移除的冷卻方式，然而此冷卻方式需要一外加幫浦提供流體循環所需之功，而且循環管路會有破損導致流體外洩的危機，價格普遍較高，因此尚無法普遍應用在現今的電子設備冷卻。

熱管(Heat pipe)亦為重要的散熱技術之一，其結構主要為一根空心管子，內壁連接一毛細結構，管內充填工作流體；受熱時蒸發段藉由工作流體相變化所需之潛熱將熱吸收並透過工作流體之傳輸而帶至另一端即冷凝段，在冷凝段和環境作熱交換後再次凝結為液體透過毛細結構或重力將工作流體拉回蒸發區，蒸發區和冷凝區中間則稱為絕熱區。由於熱管利用工作流體的相變化來傳遞熱量，因此在相當

小的溫度差之下便可傳輸大量的熱，亦即其熱阻極小。

由於熱管之形狀為圓管形，其應用再電子設備冷卻上有接觸面積的問題，熱管和表面間的接觸面形成一條線以至於接觸面積過小而將散熱果的效能大打折扣，因此許多不同的平板熱管（或稱作「蒸汽室」（vapor chamber））便被設計出來。本研究亦提出一種新型的平板熱管，並進行性能測試。以下針對平板熱管的相關文獻作回顧。

1.2 文獻回顧

1.2.1 平板熱管之優點與性能關鍵

平板熱管具有以下優點：(1)熱傳量極限大；(2)均溫表面和大的散熱面；(3)鰭片可直接與平板熱管接觸，可減少接觸熱阻和增加鰭片性能；(4)容許任意位置有多個加熱源而仍維持一等溫面[3, 4]。Boukhanouf [4]進一步比較平板熱管在擴散熱阻(R_s)上的優點。其中擴散熱阻定義為蒸發面平均溫度和加熱面的溫差除上輸入熱量，採用的平板熱管尺寸為 250mm*200mm*5mm，利用燒結銅粉作為毛細結構，加熱面積為 100*50mm，熱通量為 4-40W/cm²，將平板熱管蒸發面除熱源接觸面以外部份皆以絕熱棉包覆，利用紅外線攝影技術，得到蒸發面的溫度，溫差在 3°C 以內，此外在熱源面積與熱管面積相差 10 倍下，計算得擴散熱阻 R_s 為 0.0007°C/W，大約是同尺寸紅銅板的 1/40。Chang et al. [5]及 Xu et al. [6]則皆指出點熱源對平板熱管本身熱阻影響不大，說明平板熱管有處理點熱源的能力。

雖然平板熱管的均溫性遠優於紅銅板，但其總熱阻中包括紅銅板所沒有的蒸發與冷凝熱阻，其中又以蒸發熱阻為主，若未能將平板熱

管的蒸發熱阻充分降低，其熱阻值常大於紅銅板者。換言之，如何充分降低平板熱管的蒸發熱阻乃為提升其散熱性能的關鍵所在。

1.2.2 蒸發/沸騰特性

熱管是利用工作流體的相變化來傳遞熱量，蒸發區的相變化機制為液膜蒸發或核沸騰，而冷凝區的相變化則為凝結，發生核沸騰時，為了克服氣泡產生時所受的表面張力，壁面必須額外提供一過熱度，所需過熱度與環境狀況及壁面特性有關，因此熱管之蒸發器毛細結構中的蒸發/沸騰特性研究與熱管效能的提升具關鍵影響。

Kurihari and Myers [7]之研究指出利用砂紙研磨之沸騰表面能增強沸騰熱傳係數，原因是因為研磨表面能提供一些沸騰成核址 (nucleation sites)，可以降低沸騰的起始過熱度。而 Chaudri and McDougall [8]則指出，經過數百小時的測試後，利用研磨而得的強化沸騰表面其效能將與一般光滑面相同。江沅晉[9]則比較燒結板、蝕刻板、切削溝槽板及光滑板等 4 種沸騰表面的沸騰現象，其沸騰容易程度為燒結板>蝕刻板>切削溝槽板>光滑板。

上述文獻利用強化沸騰的表面來降低過熱度，增強沸騰程度以提高平板熱管的效能。而決定平板熱管效能另一重要參數為毛細結構，其本身多半為多孔性材質，對於沸騰現象影響亦甚大。Wang and Vafai [10]文中分析熱管內各部份所造成的溫差，包含壁面、蒸發及冷凝區毛細結構及蒸氣區域，並明確指出蒸發區毛細結構部份所造成的溫差最大，因此改善蒸發區毛細結構對於平板熱管整體效能有最大的效益。而 Mochizuki et al. [3]中指出，影響平板熱管運作的關鍵在於毛細結構，其粉末尺寸及孔隙度將影響毛細力，進而影響工作流體

的擴散性，而毛細的厚度及均勻性則影響熱管的穩定性及好壞。

毛細結構有許多種類，主要有燒結金屬粉末、金屬網目、溝槽及蝕刻板等，其中金屬網目式的毛細結構的毛細能力雖低於燒結金屬粉末，但是工作流體循環的流阻也小的多，對於抵抗重力效應上則比溝槽來的佳，而且來源容易取得，燒結的技術要求也較燒結粉末來的容易。因此下述文獻多半針對網目式的毛細結構來作探討。

Wang and Peterson [11]在 2005 發表的研究中設計一平板熱管，利用水作為工作流體並以燒結銅網作為毛細結構。其平板熱管結構如圖 1.1，上下毛細結構中利用支撐物來支撐結構，透過使用不同厚度的支撐結構可改變熱管的厚度進而改變平板熱管的腔體體積。實驗中以不同層數及目數的燒結銅網作為毛細結構，主要比較 4 層 100 目的燒結銅網及 6 層 150 目的燒結網，測試結果後者熱傳極限略優於前者。研究中並建立一套理論分析模式，經過與實驗結果相互驗證無誤後，針對毛細結構的層數及目數作一系列的分析，其得到結論為平板熱管的整體效能受到銅網目數、銅網層數所影響。他們認為在一定範圍的操作條件中，具有銅網目數的最佳值；而其結果發現銅網層數越多確實降低了流阻而使得熱傳極限增加，但未必具有較好的熱傳效果，可能受限於其內部沸騰的機制。此外文中利用改變支撐結構厚度來增加腔體空間可使熱傳極限上升，這是因為支撐結構越厚增加了蒸氣通道而降低流阻。

Peterson 等人[12, 13]強調毛細及壁面的接觸情形是影響毛細及壁面間總熱阻的主要參數，此外也和蒸發或沸騰的熱傳效能及熱傳極限有關，實驗中設定一燒結過程以有效降低毛細結構與壁面的接觸熱阻，燒結條件為 1030°C ，通入 75% N_2 及 25% H_2 保護毛細持續 2 小

時。其文中並且明確指出毛細結構之功能有：(1)透過液膜效應而降低壁面的熱通量，(2)毛細結構及壁面的接觸可以阻止蒸氣膜的成長，(3)增加成核址及蒸發面積，(4)透過毛細力增加流體回到受熱區的流量。

其研究目的在觀察不同孔隙度、尺寸、與厚度的燒結銅網對於沸騰現象的影響，並透過量取之溫度得到不同燒結銅網的沸騰熱傳係數與熱通量之關係及熱傳極限 (critical heat flux, CHF)，其中熱傳係數達到 $245.5 \text{ kW/m}^2\text{K}$ ，而熱傳極限為 367.9 W/cm^2 。其實驗配置如圖 1.2，加熱面積為 $8\text{mm} \times 8\text{mm}$ ，實驗中利用進水口及出水口來控制液面使其和毛細面相同高度，玻璃面上之加熱器用來除去玻璃上凝結之水汽後來觀察毛細結構內的沸騰現象。量取加熱塊上 TC1~TC3 後透過一維熱傳導的公式可以得到加熱塊的輸入熱量及熱通量。文中認為水在銅面上發生核沸騰的典型氣泡脫離半徑在 1mm 左右，而其研究的毛細厚度設定在 $0.21 \sim 0.82\text{mm}$ ，因此假設不會發生氣泡自表面脫離的現象而且毛細結構中也不會有氣泡流產生。

針對毛細結構與壁面的接觸條件，其實驗結果示於圖 1.3(a)、(b)，實驗中比較 (1) 平面池沸騰、(2) 燒結在加熱面上的毛細結構，與 (3) 壓在加熱面上的未燒結毛細結構三者。其結果顯示三者在同一熱通量下，壁面過熱度為 $(3) > (1) > (2)$ ，此結果說明應用在熱管上，燒結於加熱面上的毛細結構將有較低的熱阻表現。此外，其結果顯示熱傳係數及熱傳極限也都較高。因此壁面與毛細結構間良好的燒結狀況確實是一各關鍵參數，而且可以明顯增加毛細結構裡的蒸發/沸騰的熱傳能力及熱傳極限。若毛細結構沒有直接貼著加熱面或是燒結在加熱面上，加熱面表面可能會存在一層厚液膜，而此液膜將會增加毛

細結構與壁面間的熱阻。

圖 1.4(a)、(b)為文獻[13]針對相同目數而不同層數的燒結銅網的實驗結果，指出毛細厚度增加熱傳極限也隨之上升，但與沸騰熱傳係數的關聯並不明顯，其推論為當層數增加時毛細總表面積雖然隨著層數增加時，但是液汽接觸面積卻保持不變。此外實驗中當毛細厚度大於 0.37mm 之毛細結構，其最大熱傳係數皆發生在熱傳極限之前，這說明了即使發生局部乾化的現象，毛細作用仍不斷將工作流體往部分乾化外的區域輸送。

圖 1.5 為文獻[13]在毛細厚度差異不大的情況下，比較不同尺寸（目數）的銅網的實驗結果，顯示：

1. 相同熱通量：網格越細（目數越大），其所需過熱度越小，對應的熱傳係數越大，其值皆遠小於平板。
2. 熱傳極限：網格越大（目數越小），其對應的熱傳極限越大，且其值皆遠大於平板。

這部份說明越細的網子具有越強的毛細力，能提供較多的成核址以提早核沸騰的發生，但也產生較大的流阻，對液體回流至蒸發器造成較大的阻礙。

Hanlon and Ma[14]使用數層 100 目銅網燒結而成的毛細結構，研究毛細結構是否有利於表面薄膜蒸發(thin film evaporation)的發生，並對整體熱傳能力作一個分析。其實驗透過液體槽來控制毛細結構表面的水量並控制系統壓力為一大氣壓。實驗結果指出，在相同熱通量下，較厚的毛細結構擁有較大的溫差（應用在熱管中代表較大的蒸發熱阻），在熱通量大於 200kW/m^2 之後由於氣泡阻絕液體與加熱壁的接觸，導致熱傳係數大大降低，由於熱主要都藉由覆蓋在加熱面

的蒸氣作傳導，所以熱傳係數比具有相變化時低的很多。其研究中理論分析部份所得到之熱傳係數數據明顯高於實驗所得，這是由於理論分析是假設相變化只發生於毛細結構之表面，但實際上會有氣泡產生而降低了熱傳係數，而其理論模式並無法預測氣泡是否產生或何時產生。

1.2.3 各種形式之平板熱管

Take et al. [15]利用軌壓技術將數根熱管及兩塊平板壓製而成RBHP (roll bond heat pipe)，如圖 1.6，熱管與鰭片間接觸狀況由線變成面，以此方法降低熱管及鰭片間的接觸熱阻，而熱管內部的角落則提供毛細力將工作流體拉回蒸發區。

Agata et al. [16]的平板熱管為銅搭配水，使用毛細為燒結粉末，厚度約 0.5mm、粉末粒徑為 100-150 μ m，孔隙度 40-60%，使用之加熱面 20mm * 20mm，測試加熱量上限為 100 瓦。其實驗結果在熱通量為 20W/cm² 蒸發區熱阻約在 0.15 °C/W，針對傾斜測試則若將平板熱管傾斜 30 度會使熱阻由 0.1 增至 0.14°C/W，顯示重力因素影響亦不小。最後其提出構想如圖 1.7，在下板增加垂直溝槽後，並在溝槽內在燒上燒結粉末，預期可以使效能提升至 0.1°C/W。

Go [17]以鋁作為容器，內部毛細結構利用蝕刻技術而來，材質為不銹鋼，尺寸為 46mm * 46mm * 0.11mm，工作流體為丙酮。鰭片尺寸 83mm * 69mm，鰭片底厚 1mm 同時也是金屬容器的上板，如此便無鰭片與平板熱管間的接觸熱阻，下板厚度 3.5mm，腔體中心深 2mm，長寬為 46mm，內有數根金屬柱子作為支撐物。其研究結果利用紅外線攝影，說明上板均溫，並認為上板溫度即可代表腔體內蒸氣溫度。當加

熱面積為 1cm^2 時，其平板熱管熱阻為 $0.5^\circ\text{C}/\text{W}$ ；加熱面積為 4cm^2 時，平板熱管熱阻則降至 $0.25^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

Imura and Koito [18]之平板熱管尺寸 $88.9\text{mm} * 76.2\text{mm} * 4.6\text{mm}$ ，材質為銅，搭配水作為工作流體，毛細結構為燒結粉末，厚 0.5mm ，內部有支撐結構。在加熱面積為 3cm^2 時比較均熱片銅及鋁，實驗結果平板熱管和銅板相近，優於鋁板或無均熱片。其結論為(1)隨著加熱面積減少：溫差會增加、熱傳極限下降，最大熱通量上升，(2)隨著熱通量上升，平板熱管熱阻會下降，(3)在低加熱量時，冷凝能力越強，平板熱管熱阻較大。此外其平板熱管熱阻在 $0.1^\circ\text{C}/\text{W}$ 左右。

Cao and Gao [19] 提出不含毛細的平板熱管之設計，其上板利用放電加工或是蝕刻的方式刻出一些流道，而流道和下板間留有不足 1mm 的間距。其實驗結果指出，利用放電加工的交錯溝槽流道，其熱傳極限超過 393W ；但熱阻的部份因其溫度點設計的問題並不具參考價值。文中最後提出以下板交錯的溝槽流道，搭配在蒸發區設置一些毛細結構，預期可有效降低平板熱管之熱阻。

Chang et al. [5] 針對筆記型電腦的平板熱管散熱模組作測試，散熱模組來源為Thermacore, Inc.。實驗之加熱面區分為均勻加熱面及非均勻加熱面。在均勻加熱面的實驗中，在環境溫度 45°C 及 70°C 中，普遍 70°C 的效能略差於 45°C ，但影響的權重遠不如加熱面積。而在加熱面積 $10\text{mm} * 10\text{mm}$ ，其蒸發熱阻最低為 $0.05^\circ\text{C}/\text{W}$ ，但是由其測試數據，圖 1.8，發現熱阻分布範圍差異不小，可能良率上有一些問題存在。在非均勻加熱面的測試條件下，利用均勻加熱面加上熱通量為 $690\text{W}/\text{cm}^2$ ，熱量為 $0.37\text{--}1$ 瓦的點熱源(hot spot)，實驗結果顯示於圖 1.9，平板熱管本身的熱阻幾乎不受影響，但矽晶圓到

熱管間熱阻仍深受影響，顯示以平板熱管處理點熱源時，其效果僅與平板熱管本身熱阻大小有密切關係。

Xu et al. [6]以熱力學第二定律的觀點來決定鰭片尺寸及空氣流量，並以數值方法預測氣冷的極限。研究並指出點熱源對平板熱管本身的熱阻影響不大，此外毛細結構本身的熱傳導係數若由 20 增至 80 會使平板熱管的熱阻由 $0.196^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 降至 $0.150^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

Grubb [20]提出 Thermacore 之蒸汽室平板熱管產品的測試數據以及理論分析的結果。其加熱面積為 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ ，蒸汽室尺寸 $92.7\text{mm} \times 67.3\text{mm} \times 5\text{mm}$ ，壁厚 1mm ，毛細厚 1mm ，蒸氣空間為 2mm 厚。容器材料為銅，工作流體為水，毛細結構為燒結金屬粉末。鰭片部份使用風道以側吹的方式進行熱交換，測試結果如圖 1.10，結果顯示風量大小對蒸汽室的熱阻影響很小，只對系統總熱阻有影響。當加熱量由 100 瓦提昇至 300 瓦時，其蒸汽室熱阻則由 $0.06^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 降至 $0.035^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。此文中的 CFD 理論模式假設蒸發器毛細結構中的熱傳為熱傳導，且假設飽含水之毛細結構的熱傳導係數為銅的 $1/10$ 即 $40\text{W}/\text{m}\cdot\text{k}$ ，但其計算結果和實驗數據隨輸入熱量的變化趨勢間有明顯差異。其原因應是蒸發器毛細結構隨輸入熱量增加時，其熱傳機制會加入熱對流甚至發生核沸騰熱傳，使熱阻值逐漸降低，並不能使用單值的熱傳導係數來涵蓋。

Lee et al. [21]研究之蒸汽室平板熱管是利用銅搭配水，鋁鰭片直接焊在銅板上降低兩者間的接觸熱阻，成品如圖 1.11，鰭片尺寸為 $90\text{mm} \times 88\text{mm} \times 50\text{mm}$ ，平板熱管尺寸並未告知，但應與鰭片底面差異不大，毛細結構分三種：(Type-1) 溝槽，(Type-2) 沸騰強化毛細，(Type-3) 沸騰強化之多重毛細結構。其實驗配置如圖 1.12，

加熱面積為 $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ ，加熱塊上設有數各溫度量測點用以量得實際加熱量，利用風扇搭配流道以側吹的方式散熱，此外測試了四種角度來說明重力對該熱管效能之影響。實驗結果如圖 1.13，其中(a)為熱管熱阻與不同傾斜條件之關係圖，(b)為熱管熱阻與輸入熱量之關係圖，值得注意的是其 Type-3 之熱管有最佳的熱阻表現，其熱管熱阻在測試加熱量為 $100\text{W} \sim 330\text{W}$ 時由 $0.04^\circ\text{C}/\text{W}$ 降至 $0.03^\circ\text{C}/\text{W}$ 。如考慮加熱面積的不同，此性能約與文獻[20]中 Thermacore 之蒸汽室者相近，同為現有文獻中最佳者，但因其毛細結構並未公開，無法判斷其產品製程的難易度與成本。

1.3 研究動機及目的

文獻中熱管效能以文獻[20]所得到的測試效能為最佳之一，在加熱面積 $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 下，輸入熱量 100W 時的平板熱管熱阻僅 $0.6^\circ\text{C}/\text{W}$ ， 300W 之熱阻更低到 $0.03\text{--}0.04^\circ\text{C}/\text{W}$ 。然而文獻中[5]以十支 Thermacore 的平板熱管作效能測試時，卻顯示個別平板熱管之熱阻值間有很大差異，顯是其產品的良率可能有些問題。

熱管技術發展至今，應用在電子設備冷卻上其效能是無庸置疑，然而在一些產品的測試上顯示，製程的良率有待改善。平板熱管結構主要為外部的密閉容器及內部的毛細結構，上下毛細結構間多會放置一些圓柱或條狀物作為支撐物(放置支撐物主要是因為加工程序上必須經過燒結，將使金屬容器軟化而容易變形)。在組裝過程及容器在進行焊接密封時，毛細結構的連續性及清潔往往受到考驗，工作流體的循環可能因此受到阻礙，而支撐物的置放也使製程更複雜。

因此本研究提供一種構造簡單且成本較低的設計，以平行流道取

代上板部分的毛細結構，因此在密封時毛細結構的連續性不會因此中斷，此外流道可以取代支撐結構及提供給工作流體額外的路徑以回到蒸發區，強化了工作流體的循環，並降低工作流體的流阻，預期可以提升熱管的熱傳極限。毛細結構使用成本較低的網目式毛細結構。本研究將以實驗方法決定不同毛細網目、燒結狀況、與毛細厚度在不同注水量下的散熱性能。



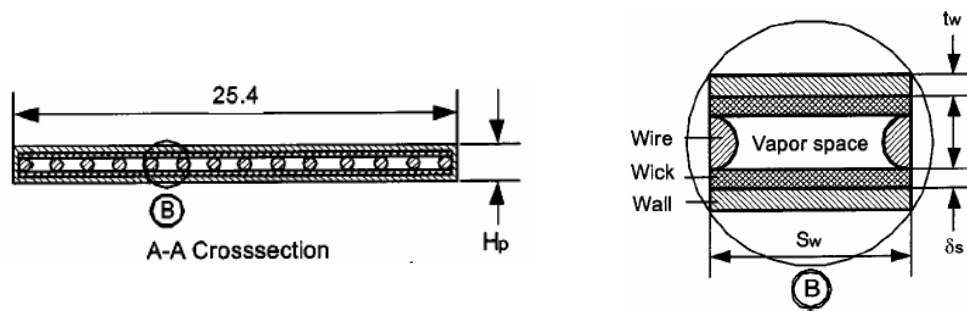


圖 1.1 平板熱管截面示意圖[11]

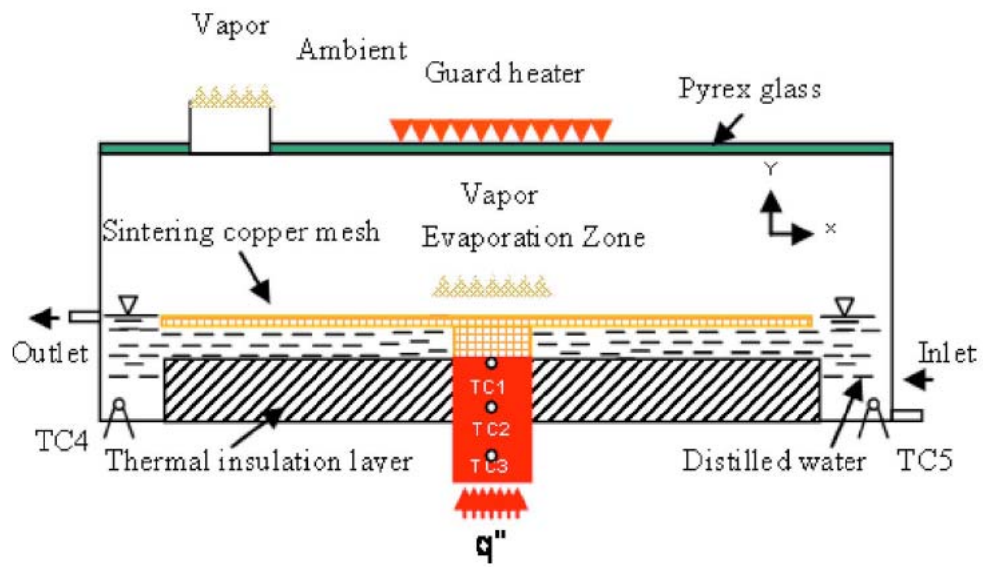


圖 1.2 實驗配置示意圖[12]

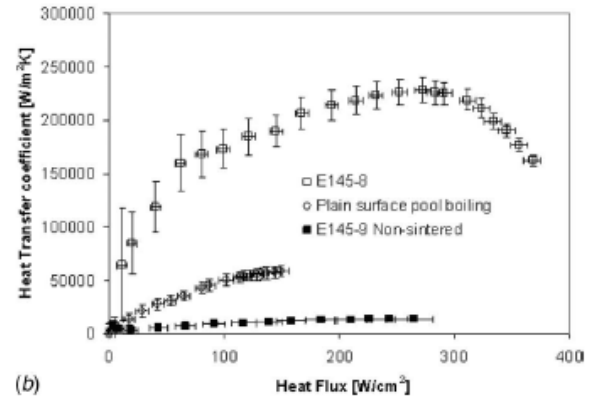
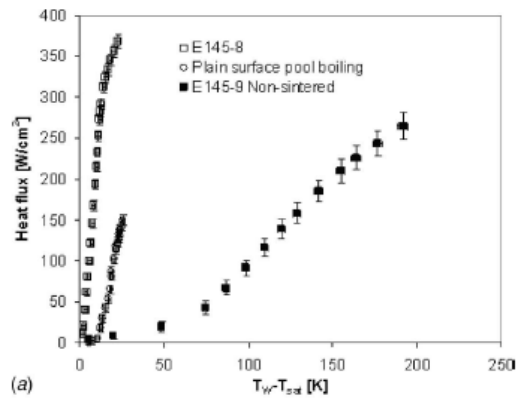


圖 1.3 針對燒結在加熱面上與否比較(a)熱通量與壁過熱度關係圖(b)

熱傳係數與熱通量關係圖[12]

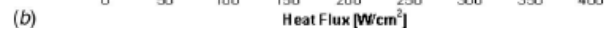
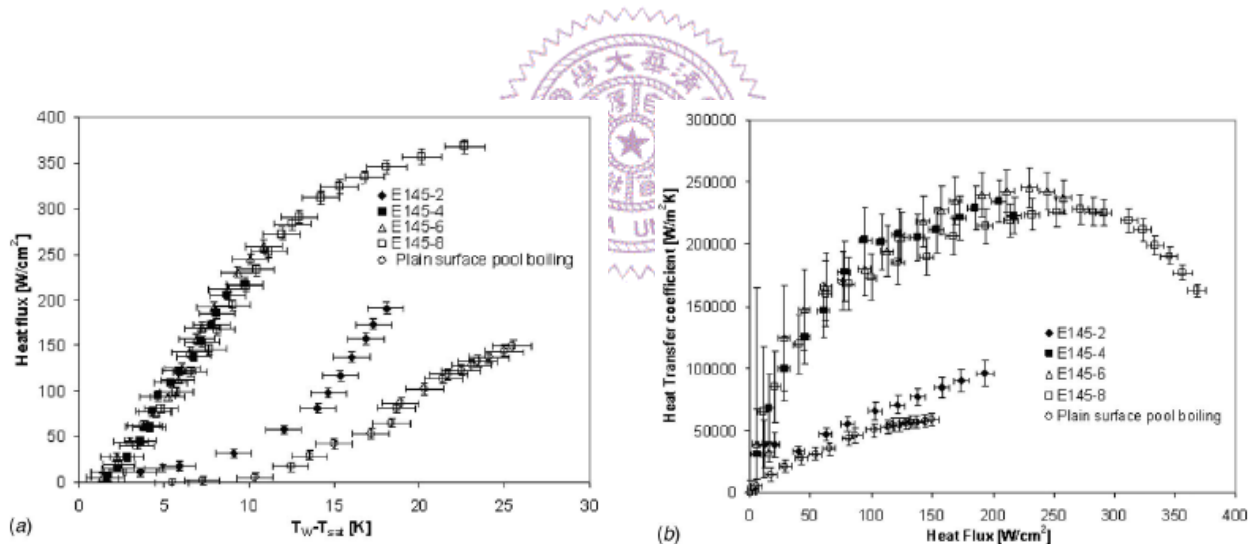


圖 1.4 針對相同尺寸毛細但不同厚度下比較(a)熱通量與壁過熱度關

係圖(b)熱傳係數與熱通下關係圖[12]

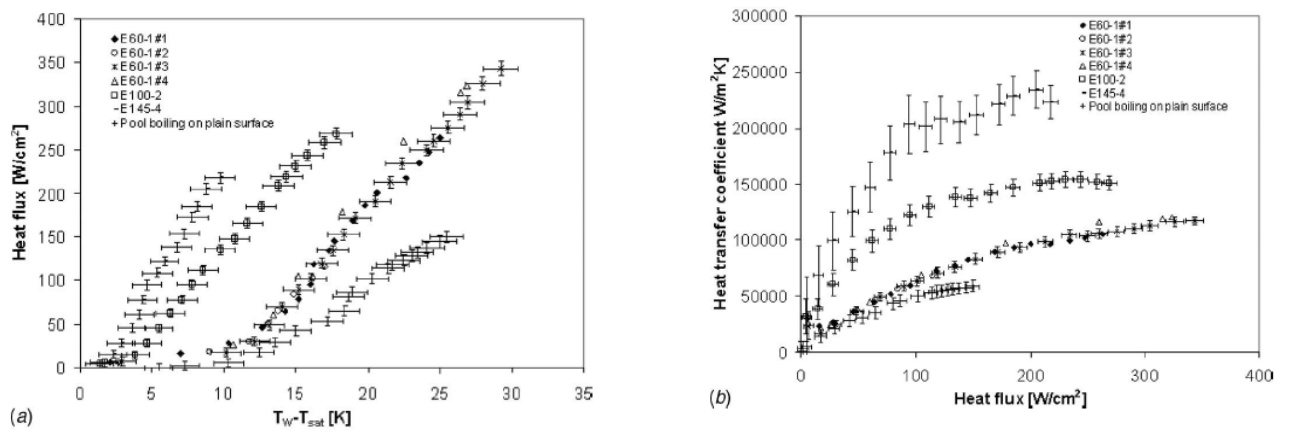


圖 1.5 針對相同厚度毛細但不同尺寸下比較(a)熱通量與壁過熱度關係圖(b)熱傳係數與熱通下關係圖[13]

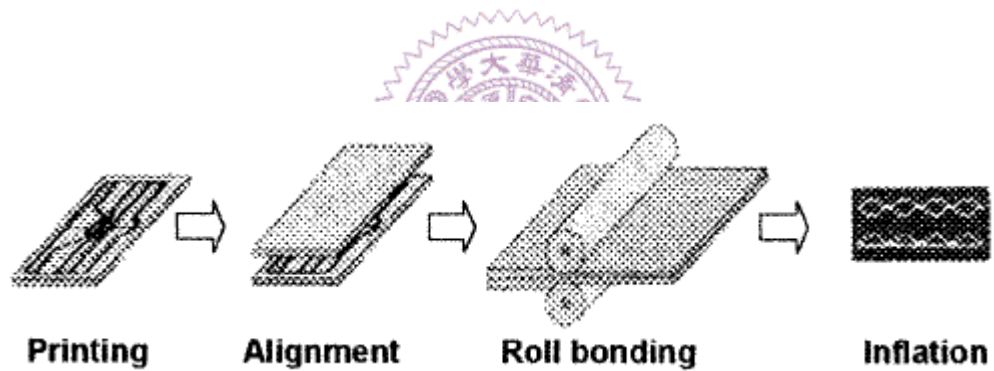


圖 1.6RBHB 製程示意圖[15]

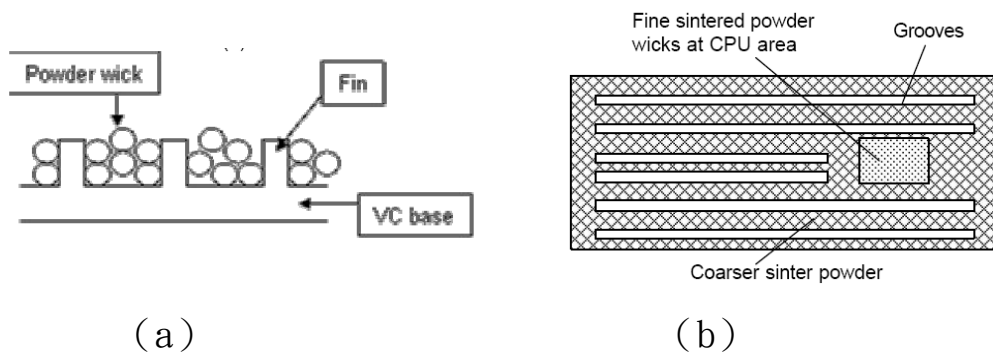


圖 1.7(a)在底板增加垂直溝槽，並在溝槽內燒結上粉末，(b)底板之俯視圖[16]

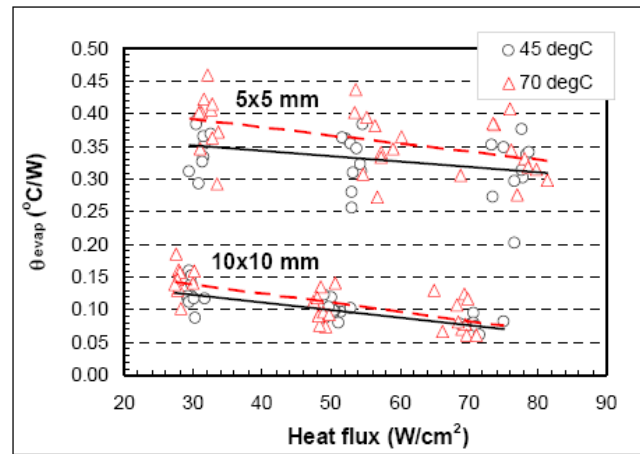
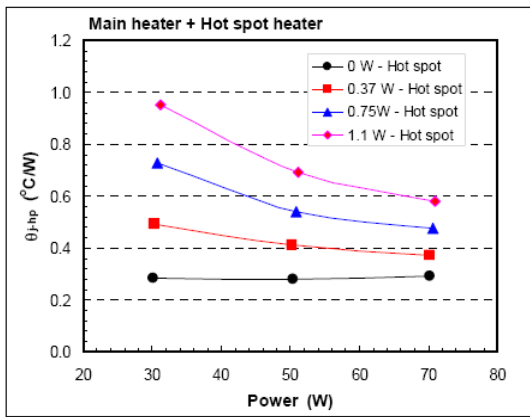
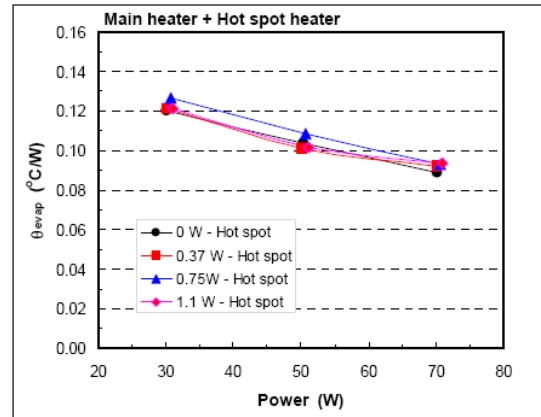


圖 1.8 均勻加熱面下，平板熱管蒸發熱阻與熱通量圖[5]



(a) Junction-to-heat pipe resistance



(b) Evaporative resistance

圖 1.9(a)矽晶圓到熱管間熱阻，(b)平板熱管蒸發熱阻[5]

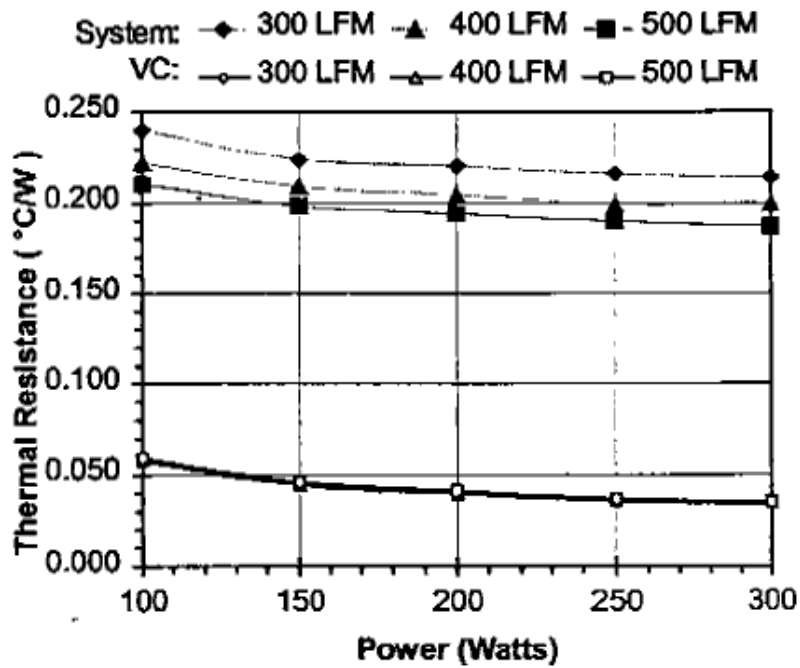


圖 1.10 熱阻與輸入熱量關係圖[20]

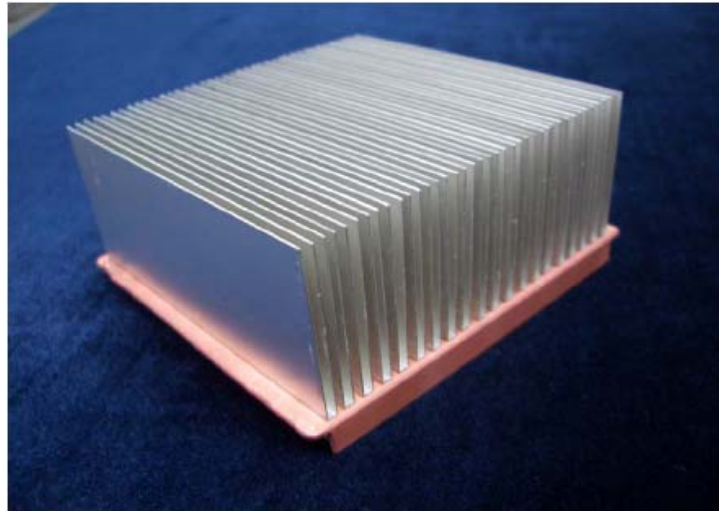


圖 1.11 平板熱管與鰭片[21]

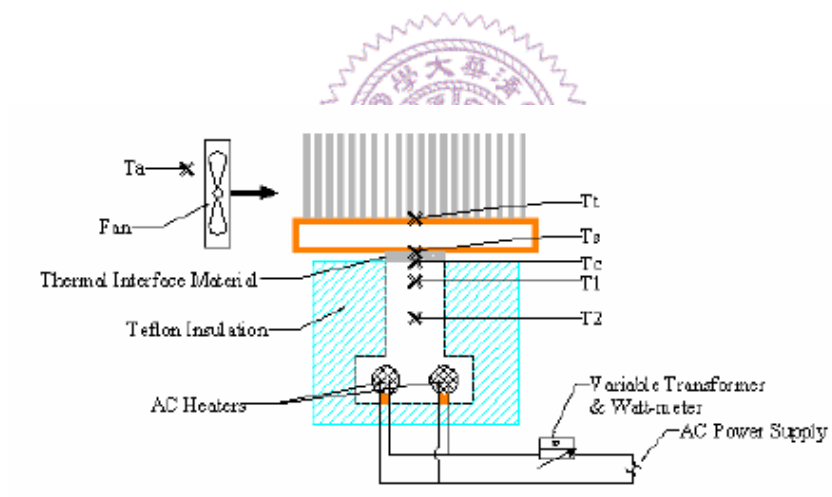
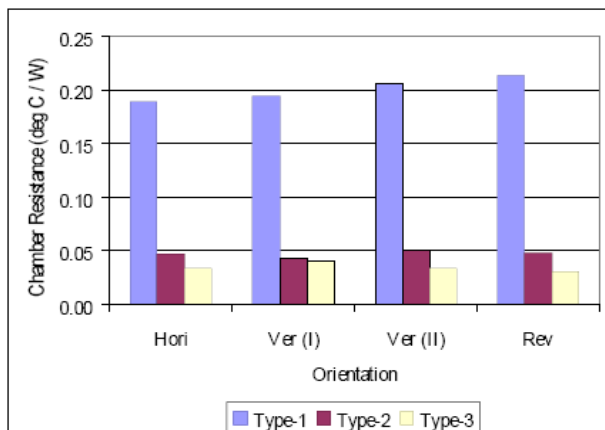
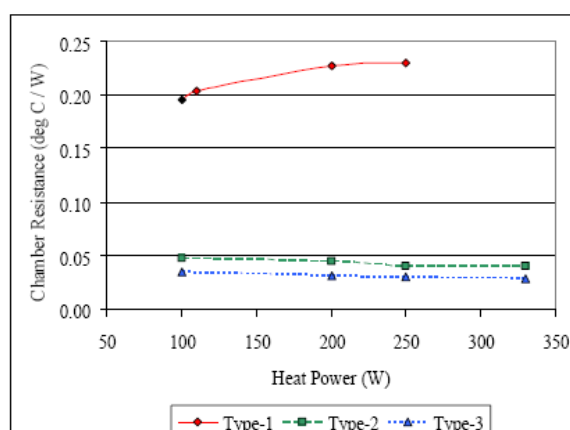


圖 1.12 實驗配置示意圖[21]



(a)



(b)

圖 1.13(a)熱管熱阻與不同傾斜條件之關係圖，(b)熱管熱阻與輸入

熱量之關係圖[21]

