

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

高熱通量表面受調控噴霧冷卻實驗探討

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2212-E-002-038-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：國立臺灣大學應用力學研究所

計畫主持人：翁宗賢

計畫參與人員：賴文鴻，林宗穎

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 30 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

高熱通量表面受調控噴霧冷卻實驗探討

Mist Cooling of High Heat Flux Surface with Versatile Micro Jet Array

計畫編號: NSC 93-2212-E-002-038

執行期限: 93/8/1~94/7/31

主持人: 翁宗賢 臺灣大學應用力學研究所副教授

一、摘要(中文)

關鍵詞: 微熱管、微加熱器、現場測溫、微機電製程

本研究以半導體製程方式,在玻璃晶圓上以金製作高熱通量微型加熱器,同時在晶圓上配製白金感溫元件,以量測在地溫度。為散去加熱器所發出的熱量,本研究另行以微機電製程之體型及表面微加工技術,在矽晶圓上蝕刻截面為三角形的微通道,經對準接合後,再抽真空與填充工作流體,製成流道寬 150 μm 、長度 15mm 的微型熱管。

由於本計畫原先預計以 FPGA 調控噴射液珠數位電路,產生陣列霧狀液粒,在加熱面上形成高散熱量的霧珠冷卻。但在製作微型加熱器時,考慮到蒸發霧氣的散逸與冷卻液的補充,因此在計畫執行時,改變成微熱管的設計,並研製成功,具備沿熱管通道量測現場溫度的能力。實驗結果顯示:本離型微熱管工作正常,可散逸至 1W 的熱量。

(英文) (**Keyword:** micro heat pipe, micro heater, in-situ temperature measurement, MEMS fabrication)

In the present project, micro heat pipe chips were fabricated using surface machining and bulk machining of MEMS manufacturing. The channel of micro heat pipe is 150 μm in width, and 15mm in length. A micro heater was deposited on a glass wafer to simulate hot spot of the micro heat pipe, in associated with four platinum thin-film resistors for temperature detecting along the micro channel. Three micro heat-pipe chips were studied. Test data showed that the micro

heat pipes can work properly when 1W was applied to the heaters. The gravity-assistant fluid feedback and heat sink were used to improve the performance of the micro heat pipes. Both devices demonstrated workable prototype for minute heat dissipation.

二、計畫緣由與目的

近代資訊工業與半導體製程技術的突飛猛進,引領現今的電子產品設計朝向兩大目標發展:一是輕薄短小便於攜帶,二為更高的處理速度與更優異的性能;這樣演進的腳步中,晶片功能提升與操作頻率增高,單位面積與面積發熱量也隨著倍增,電子元件操作時的「散熱」問題越發顯得重要。這意味著晶片的操作溫度也變得更高,過高的操作溫度不但大幅的降低原有的效能,甚至會造成晶片的損毀;2004年六月 Intel 發表的 Pentium[®] IV 採用 0.13 微米製程微處理器,總發熱量高達 109.6W [1]。因此散熱的問題將是主導資訊工業未來發展進度的關鍵因素之一,如何將晶片的高發熱量由局部熱點(hot spot)處帶出,以減少過熱燒損的機會、提高運作的效能,已經變成現在資訊產業研究與發展的重點項目。

本計畫以微機電製程加工技術,製作微熱管,熱管的一端有微型加熱器,並沿微通道佈置微型感溫器,以量測熱管的溫度變化與性能。

三、研究方法

本研究以設計、製造、量測微熱管晶片的流道現地溫度為中心,在晶片上整合微熱管、溫度感測器及加熱器成為整體實驗系

統。本研究的微熱管晶片在設計上有下列獨特處：加熱器緊鄰流道內模擬發熱的微熱點，直接對流道內的工作流體加熱，能有效降低外部加熱片與微熱管晶片間的熱阻。位於流道壁上的系列溫度感測器可以直接量測現地溫度，溫度感測是白金電阻式，由溫度-阻值的關係方程式換算為溫度變化。

微熱管系統晶片製造可區分為矽晶片及玻璃晶片兩部分，本研究採用微機電製程方法分別進行加工，各元件的相對位置如圖 1 所示。製作於圖中灰色矽晶片上的元件為微熱管流道，晶片的尺寸為 20mm×24mm 的矩型，中間白色的部分表示在製程中將被蝕刻的區域；玻璃晶片上的元件則為加熱器、溫度感測單元陣列及訊號線，為 28mm×32mm 的矩型，圖中黃色部分代表沉積的金薄膜，並鑽有一小孔，便於後續的工作流體填充；最下方是加熱器，中間兩兩相對者為訊號線，訊號線中央是四個感溫器。

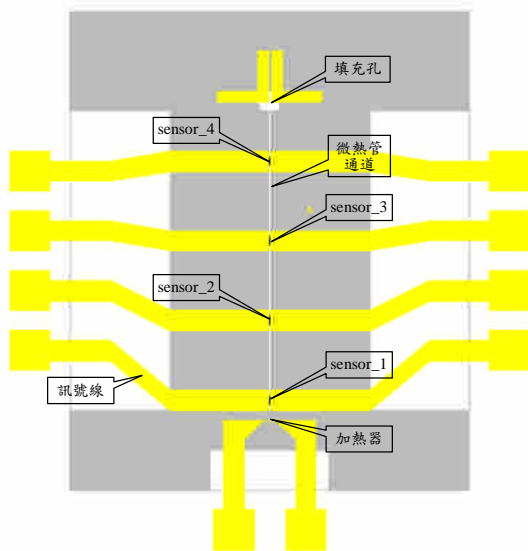


圖 1 微熱管各元件相對位置示意圖

在矽晶圓上的微通道加工，首先使用 RCA 法清潔晶圓[2]，用濕氧法成長 1.1 μm 的氧化層；接著用黃光製程將光罩圖案轉移至光阻上；將曝光完成的光阻硬烤作為蝕刻罩幕，圖案即轉移至氧化層；最後用氧化層作為蝕刻罩幕，對 p-type<100>的矽晶圓進行非等向性蝕刻，並移除剩餘的氧化層。對矽晶圓加工的光罩上，配置有注入口與流道的圖案，製程上使用 KOH 溶液對 p-type<100>矽晶圓進行非等向性蝕刻，得到截面

呈三角形的微熱管流道，注入口的截面則呈梯型，其中流道長度為 15mm，寬度 150 μm ；注入口為 1mm×1mm 的方形開口。

每一個微熱管晶片上包含有 4 個白金溫度感測器，以 4mm 為間隔依序排列在微熱管流道的軸向正上方，可以與工作流體直接接觸，進行現地溫度量測；每一個溫度感測器以金導線接至兩個墊片(pad)，總計有八條訊號線從微熱管流道的兩端延伸向晶片的邊緣，在晶片的邊緣處也有墊片可連接外部的線路。

感溫器是製作在 Pyrex #7740 玻璃晶圓上，製程步驟包含晶圓清潔、黃光製程、薄膜製程及去光阻(掀舉法)。首先將玻璃晶圓表面加以清潔[3]，接著同樣將光罩的圖案以黃光製程轉移至光阻上；用電子束蒸鍍機沉積鈦(Ti)、鉑(Pt)，厚度分別為 10nm、50nm；最後用丙酮去除光阻，完成掀舉法。完成的溫度感測器如圖 2 所示，感溫器的圖案外觀是根據流道的寬度設計，涵蓋範圍為 155 × 400 μm^2 ，線寬為 5 μm 。

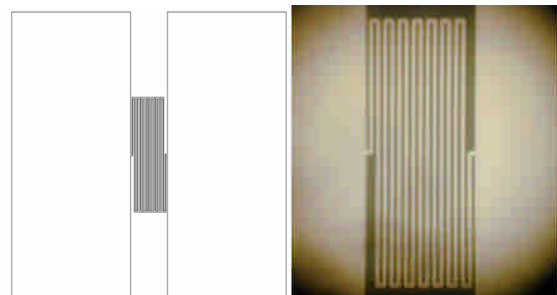


圖 2 感溫器(左)示意圖；(右)成品

第三道光罩同樣對 Pyrex #7740 玻璃晶圓加工，製程流程依序如圖 3 所示，同樣採用掀舉法沉積金屬。本道製程用熱蒸鍍機沉積鉻(Cr)、金(Au)，厚度分別為 10nm、100 nm，完成微加熱器與訊號導線，加熱器的線寬為 30 μm 。

經過微機電製程處理的晶圓在裁切後再加以鑽孔、清潔，並且進行封裝接合以利於後續填充工作流體，在此採用環氧樹脂(epoxy)膠黏接合矽晶片與玻璃晶片，可以改善陽極接合的短路問題[3]。

矽與玻璃晶片封裝接合完成後，再黏合連接注入口與真空系統間的管路。待管路連接完成後，即填充微熱管的工作流體：抽真

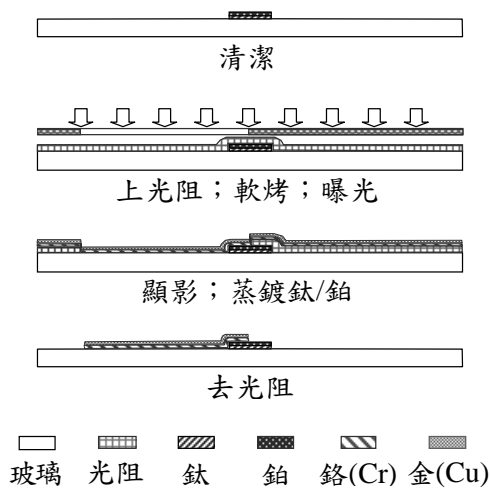


圖 3 第三道光罩製程流程

空、注入工作流體及密封[3]。填充時的真空度低於 5×10^{-5} Torr，工作流體為經過加熱排氣的去離子水。製作完成的微熱管如圖 4 所示。

本研究所使用的鉑溫度感測器是屬於正溫度係數熱阻式溫度計。鉑在室溫範圍下電阻與溫度符合一次線性關係，可以將電阻值與溫度的關係表示如下：

$$R_t = R_0 \alpha (T - T_0)$$

其中 α 為感溫器的電阻-溫度係數， R_t 為溫度 T 時的電阻值， R_0 為參考溫度 T_0 時的電阻值。實驗前，先進行感溫器的校準，因此微熱管上的每一感溫器均有其校準曲線，據以換算出溫度的變化。

四、結果與討論

實驗量測的晶片共計有三片：沒有填充

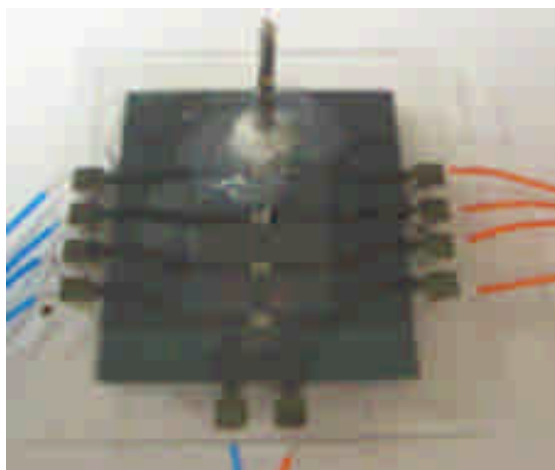


圖 4 完成的微熱管晶片

工作流體以作為參考用的 Chip_0、填充工作流體的 Chip_1 與 Chip_2；其中 Chip_1 的工作流體填充量較高。

實驗量測時，微熱管晶片是在三種不同操作模式，分別是：晶片平放、晶片直立以及加上熱沉；平放屬於一般使用的狀態，直立能以重力加強工作流體回流的能力，加上熱沉則能增加冷凝的效率。

首先針對各微熱管晶片分別施以 0、100mW、200mW、...、1W 等外加功率進行量測。在熱平衡狀態下沿熱管軸向的溫度分佈分別繪製於圖 5 至圖 7；其中 Chip_0 在施加 800mW 時，因為溫度過高致使加熱器燒毀，因此僅有八組實驗數據；而 Chip_2 的 Sensor_2 在焊接訊號線時即已損毀，所以僅有三條溫度曲線。

比較三者的 Q-T 圖發現：Chip_0 的升溫最為劇烈，因為本晶片的通道內沒有充填工作流體，純粹作為參考的基準。圖 5 顯示 Sensor_1 以近乎直線的方式升溫，到 50°C 以後，溫升明顯地較其餘感溫器迅速，表示僅由玻璃傳導熱量，已經無法有效地散熱；輸入的熱量不斷的被累積在加熱器附近，因

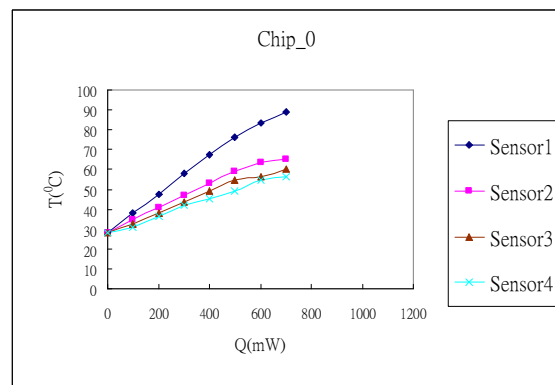


圖 5 Chip_0 的 Q-T 關係圖

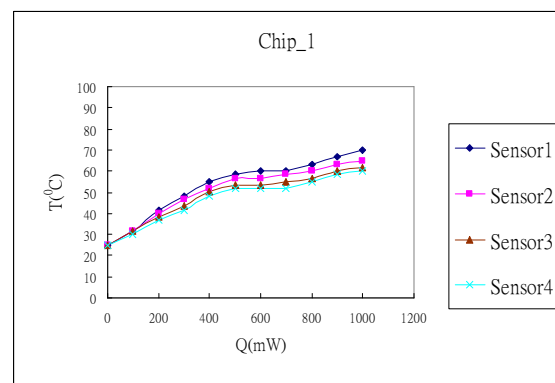


圖 6 Chip_1 的 Q-T 關係圖

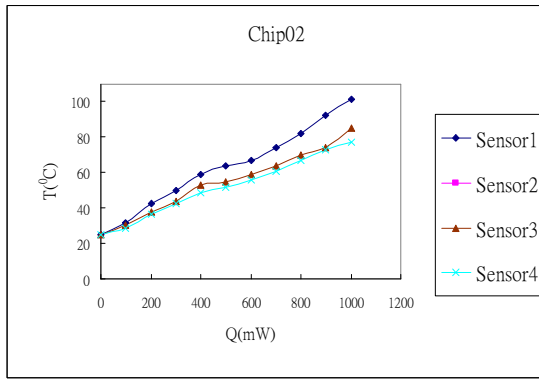


圖 7 Chip_2 的 Q-T 關係圖

此施加 800mW 時，加熱器的溫度已超過 90°C 而過熱燒毀。

Chip_1 在施加功率小於 400mW 之前，圖 6 顯示微熱管順利的作動，感溫器的溫差都不大，每個輸入功率對應的溫度都有明顯的下降；在 500mW 至 700mW 時，所有的感溫器都沒有或者僅有微小的溫度變化，對於這種增加輸入功率卻沒有溫度上升的現象，研判是微熱管的工作情況良好，即使增加熱量也能有效地傳輸，而不會增加溫差，故能保持加熱端與冷卻端於恆溫狀態。Sensor_1 在功率大於 700mW 後，較其他感測單元有明顯的溫升，造成軸向溫度變化增大，可以視為發生毛細限制。

圖 7 顯示 Chip_2 在施加功率小於 400 mW 時，微熱管在正常作動的範圍內；在輸入功率為 500mW 至 600mW 時，亦發生增加輸入功率，但溫度沒有明顯上升的情形；若輸入超過 600mW 的功率時，軸向溫度差異相當地顯著，同樣也發生毛細限制的情況。由於 Chip_2 晶片的工作流體填充量比 Chip_1 為低，故微熱管作動良好的範圍也縮小為 500mW 至 600mW；超過這個加熱範圍，軸向溫度增量益發顯著，尤其以位置靠近加熱器的 Sensor_1 溫升最為迅速；到施加功率為 1W 時，Sensor_3 也有溫度明顯上升的現象，推測是該位置也發生毛細限制，蒸汽流已經完全填滿該區域，毛細回流無法補充工作流體。

當熱管以直立方向操作時，重力可影響工作流體的回流。圖 8 是 Chip_1 的加熱器在下方的溫度分佈，顯示在施加功率小於 600mW 時，微熱管都能順利運作；在輸入

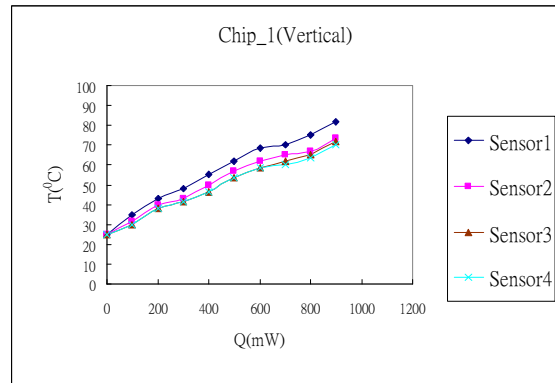


圖 8 重力輔助下 Chip_1 的 Q-T 關係圖

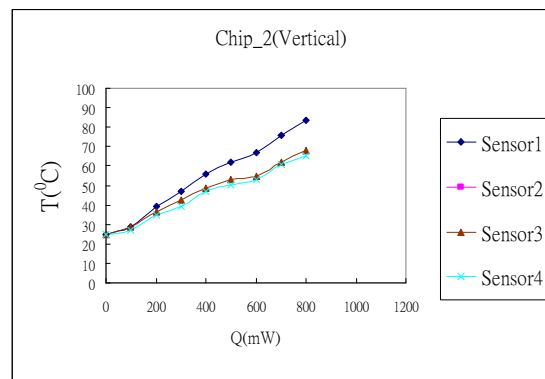


圖 9 重力輔助下 Chip_2 的 Q-T 關係圖

功率為 600mW 至 800mW 時，才到達微熱管良好作動的區間，表示微熱管作動的情形有所改善。當功率大於 800mW 之後毛細限制再度限制微熱管的效能，功率為 900mW 時，Sensor_1 溫度達到 82°C，然後於施加功率 1W 時加熱器即被燒毀。

圖 9 的 Chip_2 溫度分佈與 Chip_1 相若，讓晶片作動良好的最高施加功率由 400 mW 增加到 500mW，作動的情況也受到改善。與微熱管水平放置的情形相似的是：由於工作流體填充量較少，作動良好的施加功率區間比 Chip_1 為小。

值得一提的是：以重力輔助回流的微熱管溫度比平放時為高，這個現象以 Chip_1 特別明顯，推斷與工作流體填充量有關：由於重力造成的工作流體回流量過大，且微熱管的絕熱效果不佳，使得蒸汽流向上流動的距離受到侷限，發生微熱管作動的區域僅限於加熱器附近，微熱管的熱傳效果受到限制，當施加功率增加時，蒸汽流的流速上升，晶片各點溫度較平放時為高。

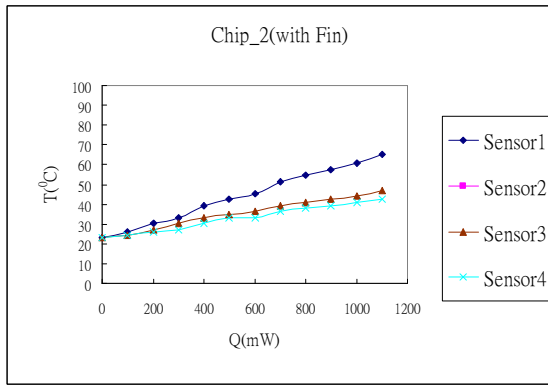


圖 10 加上熱沉後 Chip_2 的 Q-T 關係圖

接著在熱管的冷凝端改善散熱效能，先在裸露在外的晶片塗上超導散熱膏，再用金屬片作為熱沉輔助散熱。Chip_1 在進行前一項量測時已損毀，本項實驗僅有 Chip_2 可以進行測試。圖 10 顯示冷凝端加上熱沉之後晶片整體溫度大幅下降，在施加功率小於 600mW 時微熱管保持正常作動，但是大於 600mW 以後 Sensor_1 量測的溫度急遽上升，推測是冷凝端散熱效果太好，以致大量的工作流體以液態堆積在冷凝端，使得在施加功率大於 600mW 的時候發生類似前述蒸汽流發展的距離受到限制，僅在靠近加熱器位置進行微熱管作動。

加上熱沉後，圖 10 的溫度大幅下降，所以嘗試以更高的功率驅動微熱管，當施加功率為 1.1W 時 Sensor_1 達到 65°C，這個溫度與平放時量測到的最高溫度明顯低上許

多，但是在施加功率繼續提升至 1.2W 時，卻造成加熱器的損毀，此時加熱器的電流通量為 78.79mA/μm²，亦即通過加熱器的單位面積功率通量為 1692W/cm²。

綜合言之，本計畫於研製高熱通量微加熱器時，為縮減散熱裝置體積，減化噴霧驅動裝置，即改變原定構思，將散熱系統朝向微型熱管設計，應用微機電製程之體形加工製作為微通道，並整合白金溫度感測器，現地量測微熱管的溫度變化，其技術困難度較原計畫增加甚多。實驗結果顯示微熱管的動作如預期的正常，雖然散熱量僅有 1W，但微熱管的寬度僅有 150μm，如果能繼續研究改進，其性能尚有大幅提增的空間。另一個值得改進的方向是工作流體的填充技術，並準確地控制填充量，因而可以調控操作溫度。

3、參考文獻

1. <http://www.intel.com>.
2. 邱宏昇，金屬薄膜點火晶片設計模擬，國立台灣大學應用力學研究所碩士論文(2004)。
3. 林宗穎，整合加熱器與現地溫度感測器之微熱管系統晶片研製，國立台灣大學應用力學研究所碩士論文(2005)。