

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中報告

微冷卻器之整合研究(1/3)—子計劃三：微冷卻器之封裝測試研究

The Research on the Packaging and Testing of Micro Coolers

計劃編號：NSC-89-2218-E-032-003

(第一年)執行期間：88年08月01日至89年07月31日

主持人：康尚文 執行機構：淡江大學機械工程學系

E-mail: david1@mail.tku.edu.tw

一、中文摘要

隨著半導體製程技術的精進與人們對電子元件性能的期待，使得電子元件積集化的程度與構裝單位體積或面積的發熱量都越來越高，使得如何散熱成為重要的問題。本子計畫為淡江大學88年度起，三年期微機電技術整合研究計畫之第三子計畫，負責開發同時具有「微流道熱散」與「微熱管均熱片」的微型冷卻器所需之封裝測試技術。

矩形微流道熱散為半導體製程中，利用異向性蝕刻技術(anisotropic etch)於(110)矽晶圓上，以不同的蝕刻條件，在 1cm^2 及 23cm^2 的面積上，製造出一系列不同幾何尺寸的微小流道，配合Pyrex #7740玻璃陽極接合法，疊合而成的立體微結構。本文探討流道尺寸在微米(μm)範圍內，工作流體(DI water)以強制對流的方式，伴隨幾何條件：水力直徑(D_h) $66.7\sim 343\mu\text{m}$ 及深寬比(aspect ratio) $0.25\sim 6$ ，流過矩形微流道的流況與熱傳機制。

使用(100)4吋矽晶片，在長寬25.4mm區域內，以KOH蝕刻 54.7° 等腰三角形溝槽，溝槽寬 $115\mu\text{m}$ 長25.4mm共127條，再與7740玻璃以靜電接合(Anodic bonding)技術，與矽晶片封合而完成微熱管結構。本報告另提出星形流道微熱管之製程，利用較多的銳角提供較佳的毛細作用力。

在性能測試上，將針對工作液體充填量、加熱量與工作角度等因素做測試。於微熱管之蒸發段黏貼加熱電阻，凝結段以方形銅管通冷水冷卻，並在微熱管上黏貼多條熱電偶線，熱電偶線再與數據擷取系統連接，將所得之溫差數據，代入Fourier's Law計算出微熱管實際熱傳導係數，作為其性能評價。

關鍵詞：微流道熱散、微熱管、靜電接合

Abstract

With the development of miniaturized and high power electronic devices in recent years, electronic heat dissipating apparatus have become important. This project is the third part of the Integrated three years

project of MEMS group in the Tamkang University. The objective of this sub-project is to develop the packaging and testing technologies of the micro coolers composed of micro channel heat sink and micro heat pipe spreader.

Rectangular micro channel heat sink made of (110) orientated silicon wafer is produced by anisotropic etch that is compatible with semiconductor producing processes. By using different etching rules to obtain a series of distinct geometric configurations with micro-scale rectangular channels on 1cm^2 and 23cm^2 areas, which combined with Pyrex # 7740 glass by anode bonding to fabricate a cubic micro structure. Experiments were conducted to investigate the flow and heat transfer phenomena of single-phase forced convection of coolant (DI water) flowing through micro-channels involved micro-scale with hydraulic diameter $D_h=66.7\sim 343\mu\text{m}$ and $As=0.25\sim 6$.

We use KOH etchant to etch 54.7° lumbo-equal triangle ditch, $115\mu\text{m}$ in width, 24.5mm in length, and 127 in number, in square area 25.4mm on (100) 4-inch silicon wafer, and bond it with 7740 glass by anodic-bonding to complete the structure of micro heat pipe. This report also present a fabrication process of a star channel micro heat pipe. The star channel have six acute angles which can provide better capillary force.

Testing have been conducted to evaluate the performance over a range of fluid volume, heat fluxes and working angle. We glue heater on the evaporator section of the heat pipe, infuse cold water through a copper pipe in the condenser section, and paste a K-type thermocouple on the micro heat pipe in the direction of the length. Then we join the thermocouple to a data acquisition system and adopt Fourier's Law to calculate effective heat conductivity as capacity evaluation.

Keywords: micro channel heat sink、micro heat pipe、anodic bonding

二、緣由與目的

微冷卻技術的發展主要是希望用以解決現今許多高頻、高密度電子元件在製造與操作過程中熱控制的問題。因應產品微小化的需求，冷卻系統的設計也必須具備有高性能、高密緻性(compactness, 熱傳面積/單位體積)等優點。為能達到以上要求，則必須對傳統的散熱型式與冷卻機制做許多重大的變革，故而引進包含微流道熱散、及微熱管等技術的開發。

隨著 IC 晶片在高科技產業的廣泛應用，電腦 CPU 的運作頻率越來越高，硬碟轉速越來越快，3D 繪圖加速卡越趨流行，系統中各個精密零組件所產生的高熱量及熱點(hot point)的散熱問題便顯得非常重要，直接影響了系統的穩定度。

目前電子構裝元件之熱源主要來自於晶片的本體，其途徑以熱傳導(Conduction)與熱對流(Convection)為主。在整個散熱設計中，散熱效益之高低將佔重要角色(因其生產速度快、單價低、更換及取得容易)。一般而言，電子裝備若通電使用，則將因電流而產生焦耳熱，各電子元件的溫度勢必上昇，若超過零件的溫度界限值，則造成絕緣不良、性能劣化及壽命降低等問題，進而使電子機器的可靠度、安全性受到考驗。

由於 IC 封裝不斷朝向小型化與高密度設計的趨勢發展，因而散熱設計越顯得重要。電子元件的散熱一般是依循兩條路徑進行，一是由晶片向封裝表面向外散熱，因此如何降低晶片與封裝表面的熱阻(Thermal Resistance)以提高封裝表面溫度是主要的課題，但由於封裝不斷的小型化，散熱面積越來越小，因此只能靠一些輔助性的散熱裝置，例如熱散(Heat Sink)及均熱片(Heat Spreader)來降低此路徑的熱阻。

由(110)矽晶片蝕刻後封裝而成的矩形微流道熱散，在熱傳、抗腐蝕方面均有優良的性質，並可在高功率電子晶片的散熱面直接加工成形，實際的應用包含高密度電子元件的熱控制，生物工程設備與小型熱交換器，尤其對電子元件的散熱、熱機零件的熱交換具有前瞻性的效益，不僅可以將溫度降於安全工作溫度之下，亦可提高系統工作效率。

而微流道內微摩擦熱流的探討是包含微機械製造、精密量測、封裝等多項學科之研究領域，目前，新的應用仍在不停的發展，隨著系統的複雜化，在基礎物理與化學現象，需藉由理論與實驗的分析來釐清，獲得實際的驗證。

在許多不同類型的傳熱系統中，熱管是目前所知最有效率的裝置之一。相較於其他傳統的方式，熱管具有下列的優勢，它可以在小的截面積與溫度差下，將大量的熱傳送一段可觀的距離，並且不須輸入外加功，此外，在不同範圍的溫度中，均可傳送高熱量的能力，更是熱管的獨特優點。因此，利用最進步的微熱管(Micro Heat Pipe, MHP)均熱片將晶片熱源均勻地擴散至表面，再經由外加的熱散(Heat Sink)等散熱裝置使熱量散逸的方式，是現今最為期待的解決方式之一。熱管利用管內工作流體的相變化(Phase Change)而能傳輸極高的熱量，其熱傳效能是一般強制空冷的 50 倍，因此可以大幅地提昇熱傳導性能，而達到將晶片均溫的目的。

目前在矽質微熱管領域研究中，幾乎均為三角

形流道構型配合 7740 玻璃接合的製作測試與相關理論分析推導，但此種構型能提供毛細作用的銳角數僅有三個，在工作流體的傳輸能力上仍然不足，加上 7740 玻璃的熱傳性能不良，因而導致微熱管與小型傳統熱管的效能仍差距甚遠，於是本文另提出新的設計與製程，在 4 吋(100)矽晶片上製作 1 平方英寸大小，具六角形星形流道之微熱管陣列，整組微熱管均由矽組成，利用較多的銳角數來增加毛細作用力，並去除 7740 玻璃的影響，以謀求提高微熱管熱傳效能。

三、微流道熱散

(1)製程

微流道熱散加工技術主要是由薄膜沈積、光蝕刻、濕蝕及微結構封裝等技術所組成。製程包括：選擇適當矽晶片、清洗、薄膜成長、光罩製作、上光阻、曝光、顯影、烘烤、檢測、開洞、蝕刻、及量測，蝕刻完成後，如圖 1，可使用諸多的方式進行微結構物的量測，本實驗採粗度儀(Kosaka Surface SE-2300)量測表面粗造度，以電子顯微鏡(SEM)量測微流道之幾何形狀。

(2)封裝

由於以壓克力的封裝方法，會遇到洩漏與不易觀察等問題，故在封裝的設計上我們改採#7740 玻璃與矽的陽極接合，可產生高密合度且易觀察等優點之測試元件。此外，在選用 Pyrex 玻璃時，也同樣要考量其熱膨脹係數是否與矽基板接近，而在加工後 Pyrex 的厚度及面積對熱膨脹係數的改變亦有重大的影響。而後安裝壓克力板與管接頭，並檢測其是否有洩漏發生。

接合上，我們利用陽極接合(Anodic bonding)是將一內部含有可動之 Na^+ 和 H^+ 離子的玻璃與矽重疊，在加熱的狀態下，將一高電壓加在矽與玻璃之間且以矽為正極。經過一小段時間，玻璃中的離子就會移動，在與矽的介面產生一電荷層，而產生一很大的吸引力而形成化學結合。陽極結合的結合強度可達數 kg/cm^2 ，而其結合強度與結合物的表面平整度有關，所以接合物的表面凹凸程度須控制在 $1\mu\text{m}$ 以下。因為不使用接著劑，所以接合精度很高，可做緊密的接合，已被廣泛的應用在微感測器和致動器上，而此方法的另一項重要優點在於可作視流的觀察。

(3)測試

為了研究關於流體通過微流道的流況以及散熱效果，我們設計一組封閉的量測系統，如恆溫槽、加熱器、流量計、壓力感測器等，而封裝部份包括欲測試之 1cm^2 及 23cm^2 微流道，為防止封裝時，施力所造成的撓度使晶片破裂，故使用 2 個矽膠管的接頭，同時為了增加整個測試晶片結構強度，以壓克力製成大部份的封裝外殼，2 個溫度及壓力感測器安裝於進出口處，用以量測進出口溫度及壓力值，並在封裝接合之外部塗上矽膠防上洩漏。利用高壓幫浦將工作流體去離子水，以強制對流方式流入不同幾何尺寸($D_h=66.7\sim 343\mu\text{m}$ 、 $A_s=0.25\sim 6$)之微流道內，用以進行摩擦因子與熱傳特性的試驗。在通道進出口的形狀與尺寸則利用 SEM 來量測，而長度、寬度使用光學顯微鏡量測。

(4) 熱流實驗分析

由扭賽數與雷諾數畫出的圖可以分別出三個區域：層流、過渡區及紊流區，層流在接近 $Re = 500$ 時流況有些許改變，紊流的跡象在 Re 約為 1000 時顯現，這些測試晶片的過渡區範圍約在 $Re = 500\sim 900$ ，從層流轉換到過渡區及過渡區轉換到紊流區分別發生在比一般正常管路還小的雷諾數，且過渡區的範圍較窄，也就是說微流道的過渡區比大型對流尺寸管路的過渡區範圍較窄。

強制對流熱傳量測的數據說明，在這三個區域，各有其獨特的熱傳機制，此外，熱傳的體制在流路模式轉換發生的那一點有顯著的改變。

微流道的水力直徑 D_h 為一個重要的參數，其變化可以造成流路明顯的改變，在特定的值與發生在較大流道的正常流況有很大的偏離值。從數據可以很明顯看到流路模式及熱傳機制轉換發生在較低的 Re ，當 D_h 減少，過渡區的範圍也減小，當實驗事先推算之深寬比應該為這些轉換模式的影響之一，實驗中，在 $As = 0.5$ 時，呈現比較優異的特性，有較小的熱阻而有較高的熱傳特性。與文獻[1]有相同的結論，而有更高的散熱效率。

由於在本實驗中，受到管道特性以及結構強度的影響，在微流道內流體大都是維持層流的狀態，只有在深寬比及水力直徑較大之微流道可以達到紊流的條件，即隨著流量增加提高雷諾數。

由圖 2 自製之 Moody 圖可以看出流路體制變化，在與圖 3 雷諾數所對應的形狀因子 C 做比對整理，顯示尺寸較大 ($D_h = 343\mu m$) 的微流道，隨著雷諾數增加，則微流道的幾何外型 ($C = f * Re$)，對流的影響會逐漸減少，流路容易趨於完全展開紊流，也就是漸趨大型管路的流況，但是其雷諾數小於一般大型管路，意即雷諾數很小時，任何由微流道表面粗糙度所引起的擾動，都可以立即且快速的影響整個流路。

在設計矩形微流道熱散時，需以實際應用為考量，以輸入功率（泵功）為首要因素，由圖 4 可知，避免因為壓降過大，而降低散熱晶片的實際效益。幾何尺寸越小的微流道，其壓力降比上雷諾數的斜率，大於尺寸較大的微流道許多，同時增加流量，則大幅的提升壓力降，雷諾數也無法有效增加，不僅耗損泵功，也使得散熱晶片之結構毀損（在壓力 $P = 2bar$ 時）。

圖 5 可以發現微流道熱對流係數隨著雷諾數的增加，相對來說紊流的熱對流係數明顯高出層流之熱對流係數許多 (50%)，由於實驗使用等熱傳加熱，於是，當流量快速增加時，微流道熱散所吸收的熱量，立即被冷卻流體帶走，換言之，若在相同的流力條件下，幾何尺寸較大的微流道熱散將會有最大之熱對流係數 h_{max} 產生，因其通過之流量較大，同時雷諾數也大幅提升。而一般來說，盡量避免過大的溫度差，以免影響工作流體物理性質（密度、黏滯係數、等壓比容等）的改變。

從圖 6 可以發現，由於矽質微流道熱散具有極佳的熱量傳遞能力，因此，在同為層流狀態下，較大水力直徑 ($D_h = 267\mu m$ 、 $As = 0.5$)、高雷諾數的微流道其熱傳特性越好，層流熱傳的實驗結果明顯的低於預估的結果，這個比較指出微流道的熱傳成無規律的，不同於通常的情況，並且不包括以一個精確的估算技

巧，如圖所示，只有在測試截面靠近層流轉換區的極少數數據，有一點點大於預測值。

圖 7 表示幾何尺寸越小的微流道，熱阻越大，受限於晶片結構強度，使其流量無法提升，進而將工作晶片的溫度提高，造成較高的熱阻，在等熱傳加熱的環境下，配合輸入功率以及結構強度，有效的增加冷卻流體的流量，即可提高散熱效率以及降低熱阻，可以同時由圖 6 與圖 7 獲得驗證。

實驗結果可以看出，微流道內的流量從 $0.05L/min$ 到 $0.3L/min$ ，流況大部分處於層流的狀態下 ($Re = 12\sim 500$)，在 $1cm^2$ 的面積上，可以有效帶走 $100W$ 以上的熱量，並將發熱源之溫度控制在電子元件的安全工作溫度之下 ($T = 85$)，若在考量輸入功率的範圍內，選用適當之幫浦增加流量，將流路模式轉換為紊流 ($Re > 900$)，更可以顯現微流道熱散優越的散熱性能。

四、微熱管

(1) 製程

(a) 三角形微熱管：本實驗之微熱管陣列，利用半導體製程配合靜電接合而完成。我們使用 100 單面拋光，直徑 $100mm$ ，阻值 $100\sim 150 ohm-cm$ 、厚度 $500\sim 550\mu m$ 、 n -type 之矽晶片。利用非等向性蝕刻術 (An-isotropic etching)，以 KOH 為蝕刻液，根據 (100) 矽晶片非等向性蝕刻特性，蝕刻會停止在 111 面上，而 100 與 111 面夾角為 54.7° 。最後再以靜電接合技術將 7740 玻璃與矽晶片封合，而得一 54.7° 之等腰三角型微熱管剖面結構如圖 8。

(b) 星形微熱管：本研究之矽質星形微熱管陣列，是採用半導體中之光微影 (Photolithography) 與濕式體蝕刻 (Wet Bulk Micromachining) 製程，製作出矽質微流道後，再配合上晶片接合技術，將矽晶片接合成一體而成。整體製程如圖 9 所示，詳細內容將於下面說明。星形微熱管是由三片矽晶片所組成，由於目前市面上可獲得厚度最薄之雙拋 (100) 矽晶片，其厚度為 $325\mu m$ ，因此流道寬度設計為 $200\mu m$ ，見圖 10，其中上下兩片可使用同一片光罩以節省成本，光罩上除繪製有流道外，並附有抽真空與充填入之充填口與充填流道，以及接合對準所需之凹槽四條；中央部份之流道，由於是利用雙面曝光機進行雙面曝光，因此需使用兩片光罩，光罩上除了流道與接合對準所需凹槽外，尚有曝光對準用之對準記號 (Align Key)，其與微熱管結構無關。

在經黃光微影製程後，使用重量百分比 40% 之氫氧化鉀水溶液進行蝕刻，此狀態下可兼顧蝕刻速率與粗糙度，其中中央部份之晶片，需雙面同時蝕刻，並將晶片蝕穿。以往由玻璃與矽晶片結合而成之微熱管，其工作液體之充填大多自玻璃處開孔，而本文之微熱管，由於均由矽晶片組成，因此利用可撓性軸研磨機 (Flexible Shaft Grinder)，於矽晶片上之充填口位置鑽一直徑約 $1mm$ 之小孔，此即為微熱管之充填口。

(2) 封裝

當蝕刻製程完成後，需將三片晶片接合為一體，

本文計畫採用共晶接合[2][3]作為接合之方式，共晶接合是半導體製程中，矽晶片間常用的接合方式之一，除了應用於感測器、致動器外，亦使用於微型結構的接合上。其是利用矽與金共晶反應的原理，在高於共晶溫度（363 °C）之溫度，施予一小負載，即可將兩矽晶片接合成一體。接合時之對準，是利用先前光罩繪製時，於熱管流道本體之四邊，均設計有長條狀之接合對準窗，而此部份於曝光顯影及蝕刻後，可於三片晶片上相對應之位置，各得到四個三角形凹槽，於對準時將光纖放入三角形凹槽中作為卡榫，如圖 11、圖 12 所示，即可達到對準之目的[4]。

微熱管之脫氣封裝，在真空管路設計上，接近真空幫浦之管路使用較大的管路(直徑 25mm)，產生較高的抽真空效率，而其餘管路則使用較小的管路，管路末端靠近微熱管部份，其直徑僅有 1mm。抽氣時，以 4mm 厚之矽質墊片(Silicon Packaging)與微熱管緊貼，矽質墊片有一通路通往直徑 1mm 真空管路，並於墊片與微熱管間塗覆一層高真空度之潤滑油脂 (High Vacuum Grease)，以避免抽真空與充填時發生洩漏。注入工作液體時，將凝結區(具儲存槽端)放置下端，待真空度達 4.0×10^{-3} torr 以下時，移動矽質墊片，切斷微熱管與真空管間通路，將注入器插入矽質墊片與微熱管充填口交會處，並注入工作液體。

本文中是採用 EFD 1500XL-C 氣壓式點膠機 (1500XL-C Dispenser) 作為工作液體注入器，其利用壓力大小控制液體充填速率，並配合微電腦自動控制充填時間，兩者相搭配便可獲得所需之充填量。由於微熱管中流道容積約為 0.1623 cm^3 ，而本文微熱管所用之工作液體為水及甲醇，其常溫下之比重分別為 $0.9971 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 與 $0.656 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ，因此可利用電子天平量測每單位時間充填液體之重量，並以調整充填速率，使其不致過大，再由比重換算體積，如此便可依所需充填量加以設定充填時間。

(3) 性能評價與測試

熱管被稱為「熱的超導體」，這是由於熱管的熱傳導係數 (K_{eff}) 極高 (亦即代表熱管之熱阻值極低)，在溫差很小的情況下，即可輸送大量的熱量，因而熱傳導係數的高低，自然成為評判熱管性能優劣的標準。

承上所言，為了解微熱管之熱傳性能，本文中使用了 Fourier's Law 與實驗測試相互配合，以計算微熱管之熱傳導係數，其式如下所示：

$$Q_{in} = K_{\text{eff}} A_{\text{eff}} \frac{\Delta T_{\text{measured}}}{L_{\text{eff}}} \quad (1)$$

$$K_{\text{eff}} = \frac{Q_{in}}{A_{\text{eff}}} \frac{L_{\text{eff}}}{\Delta T_{\text{measured}}} \quad (2)$$

式 (2) 中 Q_{in} 為輸入之熱量， A_{eff} 為微熱管之截面積， $\Delta T_{\text{measured}}$ 為蒸發段與凝結段兩者間量測溫度之平均溫差， L_{eff} 為蒸發段中點至凝結段中點之距離。

由式 (2) 中可得知，實驗量測之重點在於蒸發

段與凝結段兩者之溫度測量，並藉以獲得計算時所需之溫差 ($\Delta T_{\text{measured}}$)，因此，測試時將微熱管陣列放置於測試平台上，於蒸發段下方放置一 $6 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm}$ 之加熱電阻，以直流電源供應器控制加熱功率大小，而凝結段下方則利用一 $6 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm}$ 之方形銅管，以抽水幫浦將恆溫槽中之冷卻水輸入管內，使用流量計控制冷卻水流量。為降低空氣對流對整體測試準確度的影響，利用一透明鐘罩 (Bell Jar) 將測試平台與微熱管罩覆於其內，並將鐘罩內抽真空至 1.0×10^{-2} torr 以下。

在溫度量測上，利用 OMB-1100 數據擷取系統與 T-type Thermocouple 擷取微熱管上各量測點溫度，在微熱管長度方向黏貼 8 個熱電偶線，而蒸發段與凝結段底部則各黏貼 3 個熱電偶線，熱電偶線黏貼時，利用高熱傳導係數之 Silicon Paste (Omega Omegatherm 201) 加以固定，以增進量測溫度真實度。熱電偶線量測所得之溫度，經由數據擷取系統與 RS-232 傳輸至個人電腦，藉以觀察及記錄微熱管各位置之溫度變化情況。

五、總結與未來進度及改進方向

(1) 以實驗方式研究水力直徑 (D_h) $66.7 \sim 343 \mu\text{m}$ 及深寬比 (aspect ratio) $0.25 \sim 6$ ，水以強制對流方式流過矩形微流道的流路摩擦，被量測來分析熱傳變化特徵和探討對流熱傳的物理觀點，兩者流路摩擦及熱傳的實驗量測指出各組測試晶片層流熱傳在 $Re < 500 \sim 900$ 的範圍內，完全紊流對流熱傳達到 $Re \sim 900 \sim 1200$ 的值，轉換 Re 隨著微流道尺寸的減少而減少，同時觀察流道的過渡區範圍也變的比較小。

幾何參數，特別是水力直徑與深寬比 (H/W) 為重要的變數，對於流路及熱傳有著顯著的影響，這些實驗證明層流對流熱傳當深寬比 $As \cong 0.5$ 時有最大值，在水力直徑 D_h 尺寸的小改變，隨即造成熱傳遞的顯著改變，在紊流對流狀況，在深寬比 $As \cong 0.5 \sim 0.75$ 熱傳接近最佳值。

(2) 由研究中得知，僅有三個銳角提供毛細作用力的三角形流道微熱管，其效能可將矽晶片之熱傳導係數，由原本的 153 W/mK 提高至 208 W/mK ，具有更高毛細管作用力之星形流道微熱管，應可獲得更優良之熱傳效果。

目前，在微熱管的製程上，已將蝕刻製程全部完成，而在接合製程上，由於「金」屬於污染性材料，因此在尋求蒸鍍機台上遭遇問題，目前正接洽處理廠的機台鍍金，並且同時利用光學膠黏合作為接合方式替代之考量。

目前進行之微熱管尺寸為 $200 \mu\text{m}$ ，若要縮小流道尺寸，即需利用晶片磨拋設備，以獲得更薄之雙拋晶片，例如當流道尺寸縮為 $100 \mu\text{m}$ 時，其中央部份之雙拋晶片厚度為 $163.2 \mu\text{m}$ ，此外，當晶片厚度縮至上述尺寸後，在氧化層的薄膜成長時，可能會發生熱應力破裂的情形，因此需要更改製程，使用蒸鍍方式鍍上氧化層，或是直接使用接合時所需之銻、金作為蝕刻時之保護層。

在未來，除了加緊接合製程與測試的步伐外，另外亦將針對矽質微熱管的流道構型做不同的嘗試，利用星形流道微熱管之製程經驗，製作平板式微熱管及多管式微熱管，並且將其與星形流道微熱管一同測試，藉以比較了解不同流道構型所造成之效能影響。

六、參考文獻

- [1] X. F. Peng, G. P. Peterson and B. X. Wang, "Heat transfer Characteristics of Water Flowing Through Microchannels", Int. J. Heat Mass Transfer, vol.38, no.1, 1994, pp.265-283.
- [2] S. E. Shoaf, A. D. Feinerman, "Aligned Au-Si Eutectic Bonding of Silicon Structures", J. Vac. Sci. Technol. A 12(1), 1994, pp. 19-22.
- [3] Anders Hanneborg, "Silicon Wafer Bonding Techniques for Assembly of Micromechanical Elements", Proceedings. IEEE Micro Electro Mechanical Systems Proceedings of the 1991 IEEE Micro Electro Mechanical Systems - MEMS '91, 1991, pp. 92-98.
- [4] A. -L. Tiensuu, J. - Å. Schweitz, S. Johansson, "In Situ Investigation of Precise High Strength Micro Assembly Using Au-Si Eutectic Bonding", The 8th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, and Eurosensors IX, 1995, pp. 236-239.

七、圖表彙整

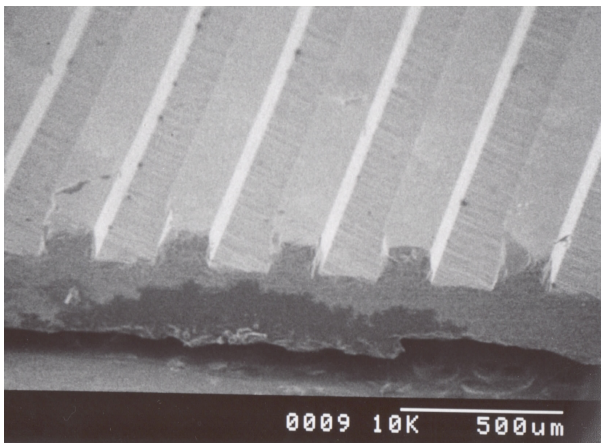


圖 1 微流道之顯微剖面圖

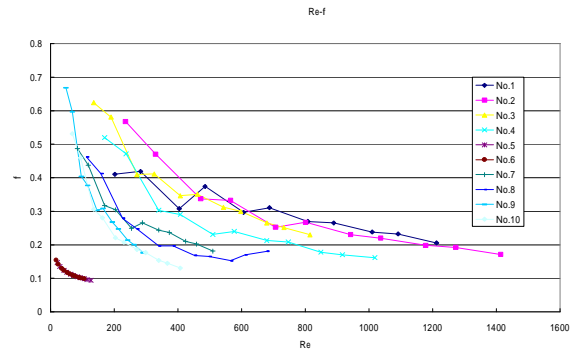


圖 2 摩擦因子與雷諾數關係圖

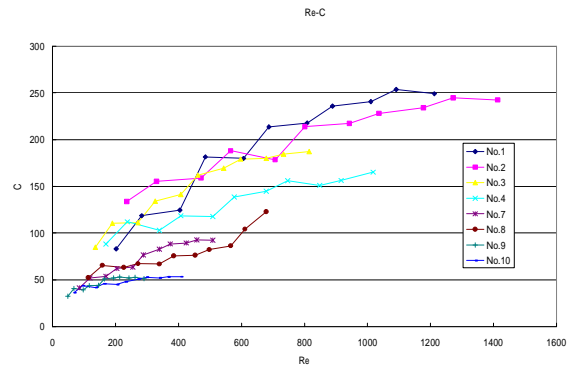


圖 3 形狀因子與雷諾數關係圖

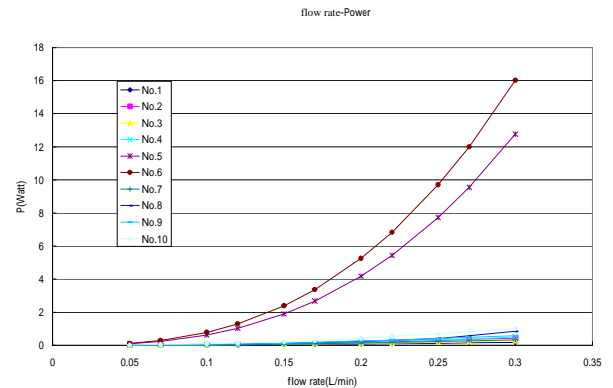


圖 4 泵功消耗與流量關係圖

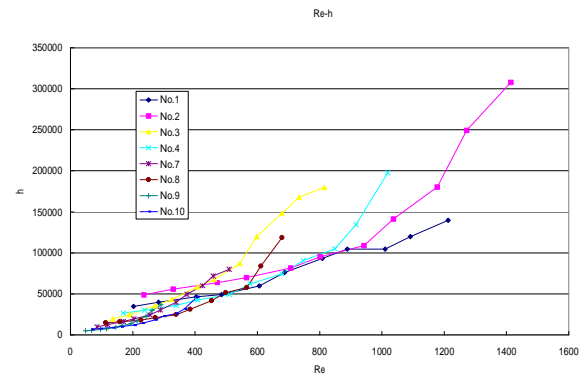


圖 5 熱對流係數與雷諾數關係圖

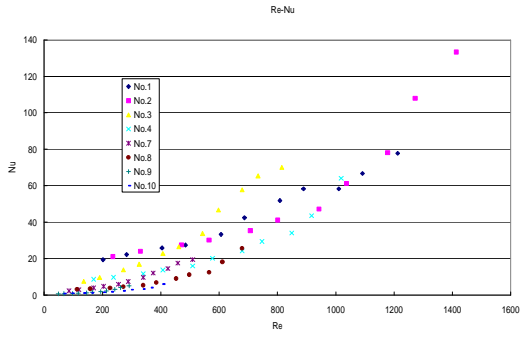


圖 6 扭賽數 Nu 與雷諾數關係圖

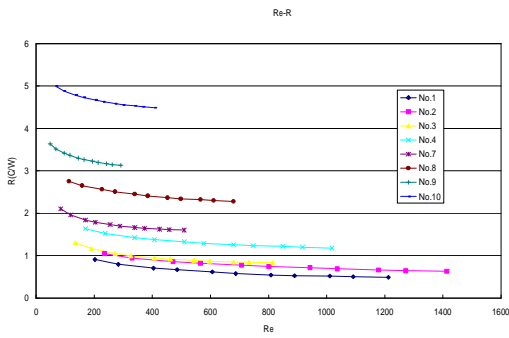


圖 7 熱阻與雷諾數關係圖

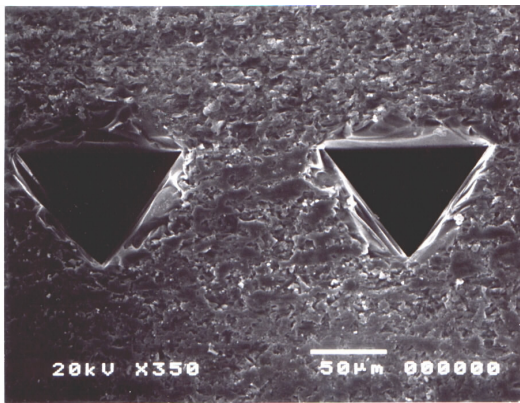


圖 8. 靜電接合後之三角形微熱管斷面

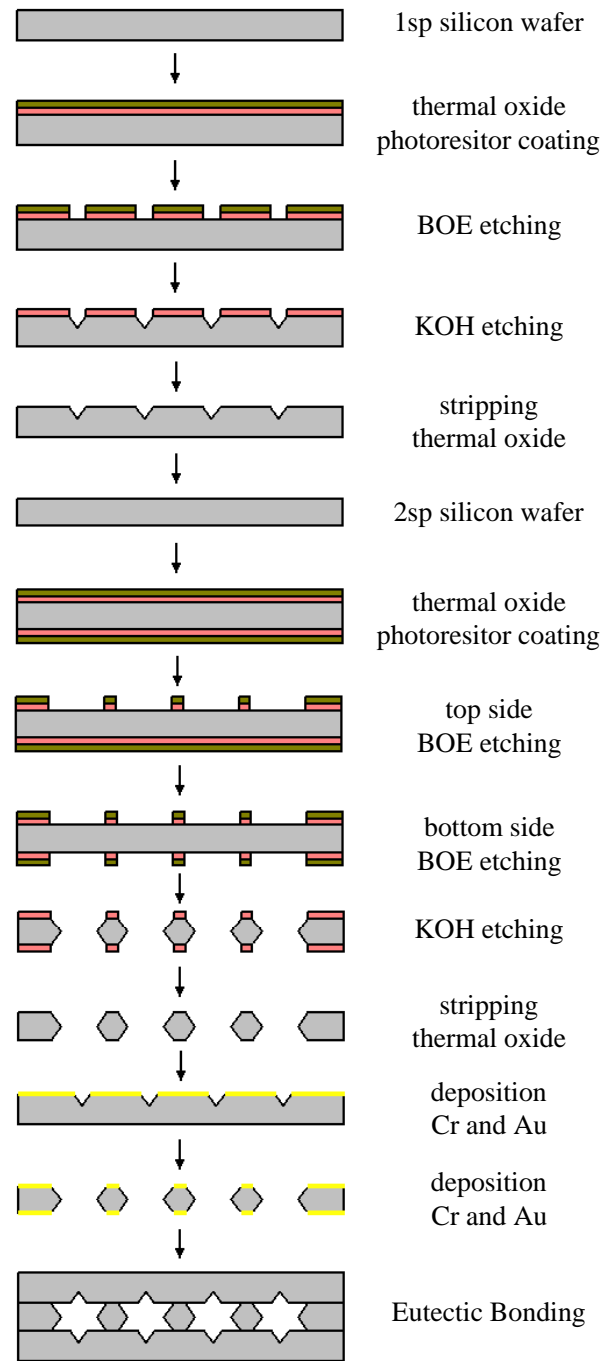


圖 9 星形微熱管製程流程圖

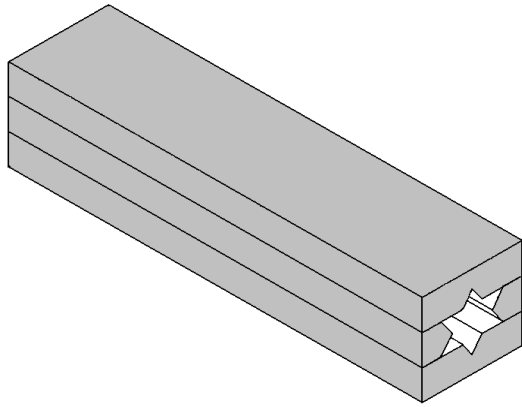


圖 10 六角星狀流道微熱管示意圖

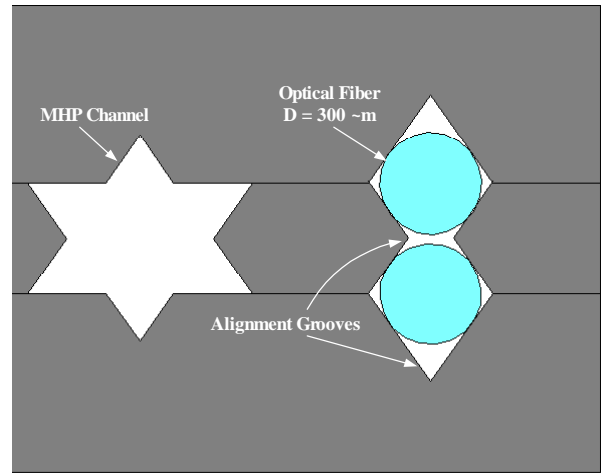


圖 13 光纖對準與微熱管流道關係圖

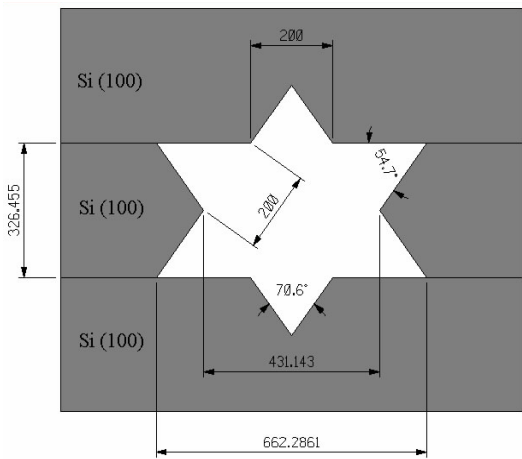


圖 11 微熱管細部尺寸與構成圖

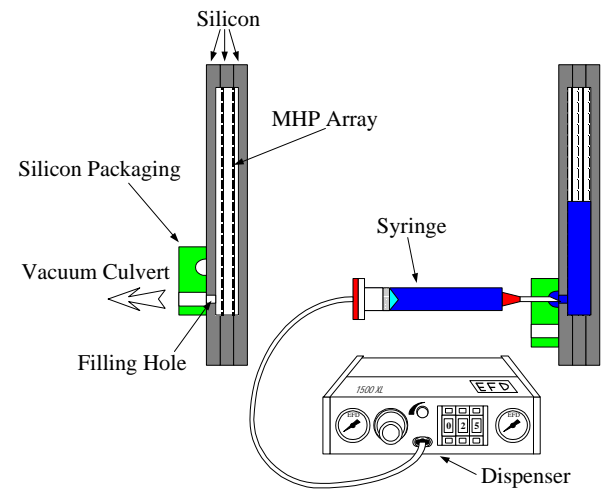


圖 14 工作液體充填示意圖

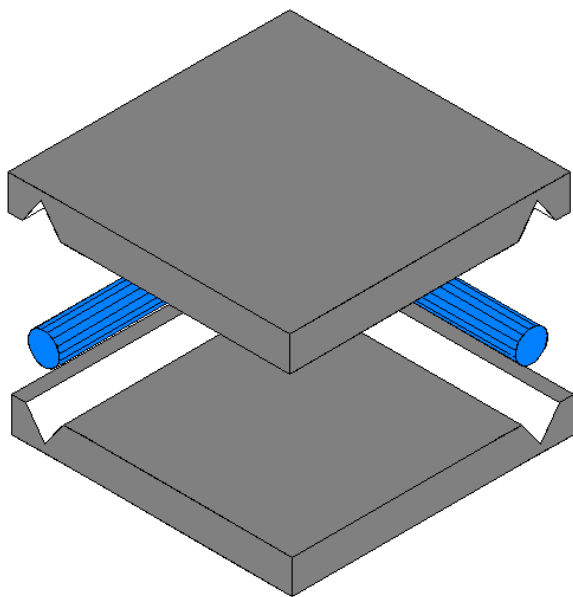


圖 12 光纖對準示意圖

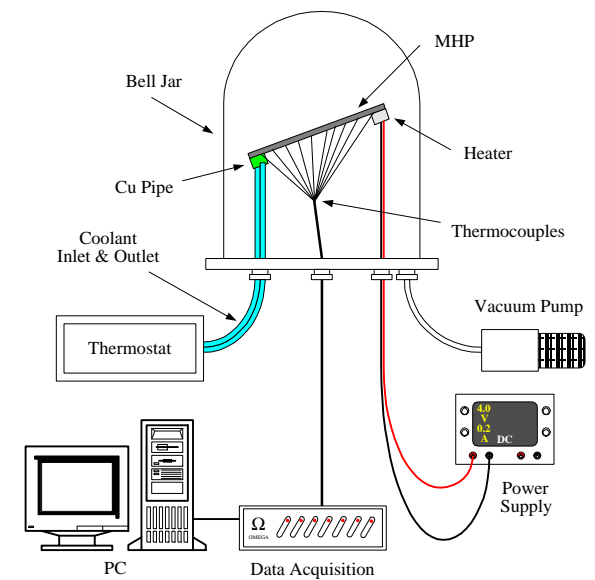


圖 15 微熱管性能測試系統示意圖