

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

智慧型微熱管之製造測試研究(I)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2218-E-032-001-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：淡江大學機械與機電工程學系

計畫主持人：康尚文

計畫參與人員：蔡聲鴻，尤宏仁，王一中

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 10 月 24 日

多孔矽毛細結構微迴路式熱管之研製

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC91-2218-E-032-001

執行期間：2002年08月01日至2003年07月31日

計畫主持人：康尚文

共同主持人：

計畫參與人員：蔡聲鴻，尤宏仁，王一忠

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢
 涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公開查詢

執行單位：淡江大學機械與機電工程學系

中華民國 92 年 10 月 13 日

摘要

本研究製作多孔矽毛細結構微迴路式熱管，其由蒸發端、汽相流道、冷凝端以及液相流道所組成。蒸發端之毛細結構利用陽極電化蝕刻方式製作，圖形為 $4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ 方孔陣列，間距 $10\ \mu\text{m}$ ，深度 $100\ \mu\text{m}$ ，面積 $11\text{mm} \times 10\text{mm}$ 。蒸發端結構由矽與 7740 玻璃陽極接合組成。汽相流道、液相流道使用 $1.5\text{mm} \times 3\text{mm}$ 透明太空管，長度 90mm 。冷凝端則以 15°C 之冷卻循環水通過長度 40mm 之紅銅管構成。工作流體為去離子水，以加熱排氣法方式充填。多孔矽毛細結構微迴路式熱管從加熱功率為 6 瓦時啟動產生蒸汽，汽相流道距離蒸發端 50mm 處的溫度 $T_{\text{sat}2}$ 開始變化。啟動前的 $T_{\text{sat}2}$ 溫度與啟動後的 $T_{\text{sat}2}$ 溫度相差 65.3°C 。啟動後熱阻從原本的 $10.94^\circ\text{C}/\text{W}$ 下降為 $0.27^\circ\text{C}/\text{W}$ 。

關鍵詞：相變化、多孔矽、迴路式熱管、微機電

Abstract

A micro loop heat pipe (MLHP) with porous silicon wick structure has been fabricated and characterized. Porous silicon was fabricated by anodic electrochemical etching on a 11mm×10mm wafer area, had a pore diameter of 4 μ m, pore pitch of 10 μ m and wick porosity of 8.15%. The evaporator was realized by bonding a 7740 glass wafer to the silicon substrate. Transparent tygon tube was used as vapor line、liquid line for two phase visualization. The condenser with a 3mm×40mm copper tube was maintained the temperature to 16°C by pumping flow of cooling water. Water was used as the working fluid. MLHP started up when heat load is at 6W and had a thermal resistance of 0.27°C/W.

Key words : phase change、porous silicon、MLHP、MEMS

一、緣由與目的

現今電子晶片的功能強大，具備多項的功能，而且製程走向奈米製程，電子電路元件內單位面積的電晶體倍增，相對地元件的單位面積發熱量也遞增。散熱問題是晶片工作頻率、功率增加的瓶頸。有效的熱管理(Thermal Management)確保所有系統元件在適當的工作溫度範圍有良好的效能。過高的溫度環境將造成晶片降低系統效能和無法復原的破壞，所以提出直接於晶片製作散熱元件的構想[1]。目前產品講求輕、薄、短、小的條件下，散熱零件的需求更往高效能、微小化、輕量化來發展。以相變化散熱模式的迴路式熱管，結合現有的微機電技術，可以空間體積平面化、熱傳輸遠距離化、元件重量減輕等[2]。

二、製程與測試

微迴路式熱管的組成分為蒸發端、蒸汽管路、冷凝端、液體管路及補償室，蒸發端包含毛細結構，利用毛細結構產生毛細力驅動工作流體。蒸發端結構利用微機電技術製作，可讓蒸發端平面化，完全接觸平面熱源。毛細結構則利用陽極電化蝕刻製作[3]。

1. 毛細結構微加工

多孔矽之毛細結構是使用晶片阻值 $1-4 \Omega\text{-cm}$ 、 $\langle 100 \rangle$ 方向的 N 型晶片來製作，在晶片上沈積一層 2000 \AA 的氮化層。利用光微影製程在氮化層成形 $4 \times 4 \mu\text{m}$ 的方孔陣列，方孔間距為 $10 \mu\text{m}$ ，再以離子蝕刻方式去除沒有光阻遮蔽的氮化矽層，然後使用 wt.40% 非等向蝕刻液於溫度 70°C 蝕刻倒金字塔形狀的凹槽，接著使用溫度 160°C 的 wt.80% 磷酸去除晶片背面氮化矽層，最後再將晶片進行電化學蝕刻，製作流程如 Fig2 所示。

多孔矽的實驗架設如 Fig3 所示，將晶片背面放置銅網，以四顆螺絲鎖緊於鐵氟龍反應槽，使銅網與晶片緊密貼合，然後將銅網用導線接至電源供應器之陽極。使用銅網可以提供良好的導電性及均勻的電場分佈，使電洞均勻地朝向倒金字塔形狀的凹槽尖端前進。電源供應器之陰極則以導線接於鐵氟龍反應槽中的白金網，構成整個實驗架構。反應溶液由 HF (wt.49%)、純水、乙醇 (wt.99.99%) 三種成分組成，氫氟酸、純水及乙醇量則各為 9ml、20ml、60ml。反應時施加電壓並以 500W 之鹵素燈光穿透過銅網照射在晶片背面，激發晶片產生電洞對。電源供應器施加的偏壓設為 0.4V，電流為 0.8mA 來進行電化學蝕刻，將晶片蝕刻到深度 $100 \mu\text{m}$ 。

蝕刻反應完後，多孔矽結構以鑽石切割刀沿多孔圖形陣列方向切割，並以 $0.03 \mu\text{m}$ 的氧化鋁粉進行細拋。使用掃瞄式電子顯微鏡觀察多孔矽試片表面及剖面，如 Fig4、Fig5 所示。

2. 蒸發端結構微加工

蒸發端組成除了毛細結構，還有由矽晶片與 7740 玻璃結構。利用光微影製程在矽晶片上蝕刻 $16\text{mm} \times 13\text{mm}$ 的方形凹槽，並以鑽石鑽頭鑽直徑 1 mm 的圓形孔，做為汽相管路、液相體管路與充填管間的進出口，如 Fig6 所示。7740 玻璃結構則 lift-off 方式在玻璃上製作 500 \AA 的鉻層與 2000 \AA 的金當做蝕刻的阻擋

層。再以 wt.49%HF 於溫度 50°C 蝕刻 13mm×13mm 的方形凹槽，如 Fig7 所示。

3. 冷凝端及蒸汽管路、液體管路

冷凝端以 15°C 之冷卻循環水通過 40mm 之紅銅管構成，使蒸發端所攜帶來的熱量迅速與冷卻管路做熱交換。蒸汽管路、液體管路則使用內徑 1.5mm、外徑 3mm 與長度為 90mm 的透明太空管(Tygon)，其具有低的熱傳導性質及可方便觀察工作流體作動的情況。

4. 封裝

微迴路式熱管蒸發端結構的矽結構與 7740 玻璃結構藉由陽極接合方式接合，蒸發端結構如 Fig8 所示。在進行陽極接合之前，先將矽結構與 7740 玻璃結構分別進行清洗。矽結構先浸入 BOE 去除自然生成的氧化物，再以 piranha(H₂SO₄:H₂O₂)清洗，最後以純水洗淨。封裝步驟是將多孔矽結構放入蒸發端的矽結構的溝槽內，然後再放置 7740 玻璃結構，利用矽與 7740 玻璃之凹槽結構斜邊將多孔矽層固定。再將蒸發端構置於陽極的電熱板上，接著放置陰極於 7740 玻璃上，然後將電熱板加熱至 400°C 至 500°C 之間，並調整電源供應器的電壓在 400 至 900 伏特之間進行接合。蒸發端、蒸汽管路、冷凝端、液體管路及補償室各結構使用真空 AB 膠黏合一起，以防止微迴路式熱管真空度的洩漏，如 Fig9 所示。

5. 工作流體充填

完成微迴路式熱管後，採用加熱排氣法[4]如 Fig10 將管內抽到負壓，進行工作流體的填充，讓工作流體容積佔滿液相流道、補償室、部分毛細結構及冷凝端。然後利用太空管超高溫軟化的特性，將填充口封閉。

6. 量測與觀察

實驗測試架設如 Fig11 所示，加熱方式以陶瓷加熱片做為熱源加熱，調整電源供應器的電壓到所需功率，每間隔為一瓦作為測試點。溫度擷取器使用 T 型熱電耦於蒸發端(Tsat1)、距離蒸汽出口端 50mm 處的蒸汽流道(Tsat2)、冷凝端的中點(Tcondenser)、熱源(Th2)和熱源與微迴路式熱管接觸界面(Th1)量測溫度，如 Fig 12 所示。等迴熱式熱管在每一加熱功率的溫度達到平衡時，再紀錄穩態溫度。在每一功率平衡的狀態量測時間為 120 秒。

蒸汽管路、液體管路使用透明的太空管製作，方便觀察工作流體的動作情形。因此微迴路式熱管從蒸汽產生的啟動情形到工作流體正常運作的現象，可由溫度擷取器對照工作流體的溫度變化來加以探討。

檢討迴路式熱管的性能，可由熱阻 R_{LHP}(K/W)分析，即蒸發端與冷凝端表面溫度差 ΔT(K)，可以傳輸多少熱輸送量 Q(W)。

$$Q = \frac{AK}{L}(T_{hot} - T_{cold}) = \frac{\Delta T}{L/AK} = \frac{\Delta T}{R}$$

$$\therefore R = \frac{\Delta T}{Q} \quad (\text{K/W})$$

Q：加熱功率

A：加熱面積
K：熱傳導係數
L：蒸發端與冷凝端的距離
 T_{hot} ：蒸發端表面溫度
 T_{cold} ：冷凝端表面溫度
R：熱阻

三、結果與討論

Fig13 為多孔矽毛細結構微迴路式熱管之加熱功率與溫度關係穩態圖(45%充填量)。由 Fig13 中得知當微迴路式熱管未啟動時，加熱功率增加之後，蒸發端出口的蒸汽溫度 T_{sat1} 與蒸汽流道距離蒸發端 50mm 處的溫度 T_{sat2} 之間的溫差變大。而且當熱管從加熱功率為 6 瓦時啟動產生蒸汽，飽和蒸汽流經蒸汽流道流向冷凝端，因此溫度 T_{sat2} 開始變化升高。等微迴路式熱管達到穩態平衡時，溫度 T_{sat2} 與溫度 T_{sat1} 的數值非常接近，如 Fig13 所示。在啟動階段，溫度 T_{sat1} 暫態的下降趨勢，主要是蒸汽將熱能帶離蒸發端，且液體流入蒸發端，補充汽化的液體，溫度下降到一平衡溫度，如 Fig14 所示。

微迴路式熱管開始作動之後，蒸發端的溫度 T_{sat1} 隨加熱功率增加，其曲線曲率增加也趨緩。迴路式熱管最大的特性在於液、汽相流道分離，熱在傳輸過程中壓力降損失小，可以達到遠距離熱傳效果。由 Fig15 所示，微迴路式熱管啟動後熱阻值維持 $0.3^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 以下。

藉由溫度擷取器的即時繪圖功能配合觀察工作流體運作的情形，如 Fig16 所示，發現當工作流體不連貫時，蒸汽流道的溫度 T_{sat2} 下降，蒸發端的溫度 T_{sat1} 升高，等工作流體連貫通過汽相流道時，兩者溫度達到平衡時同時又下降，這個現象類似啟動狀態。如此反覆的震盪，造成工作流體不連貫的原因可能是充填量的不足或蒸發端毛細力或滲透率不夠。

四、結論

本研究主要在探討微型迴路式熱管利用微米級多孔矽當作毛細結構的可行性。實驗測試下可以正常運作，而且使熱源升高的溫度下降。另外本實驗的微迴路式熱管使用具有可撓性的太空管作為蒸汽管路、液體管路。在空間狹窄的熱源處，平面型的蒸發端配合撓性管路更具空間的優勢。

五、參考文獻

- [1] Cotter T. P., "Principles and Prospects for Micro Heat Pipe", Proc. 5th Int. Heat Pipe Conf., Tsukuba, Japan, pp. 328-335, (1984).
- [2] Mohammad. Hamdan, "Loop Heat Pipe (LHP) Modeling And Development By Utilizing Coherent Porous Silicon (CPS) Wicks", PhD Dissertation, University of Cincinnati, (2003).
- [3] V. Lehmann, "Porous Silicon - A New Material for MEMS", IEEE, The Ninth Annual International Workshop on, pp1-6, (1996).
- [4] 熱管技術理論實務(Heat Pipe Technology)，日本熱管技術學會編著，依日光譯。(1986.3)。

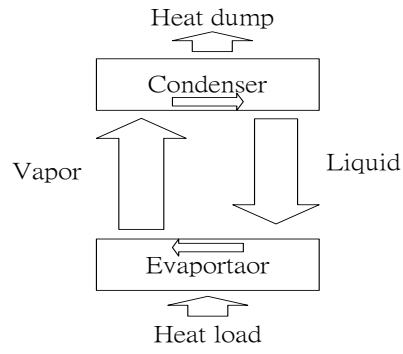


Fig. 1 MLHP 示意圖

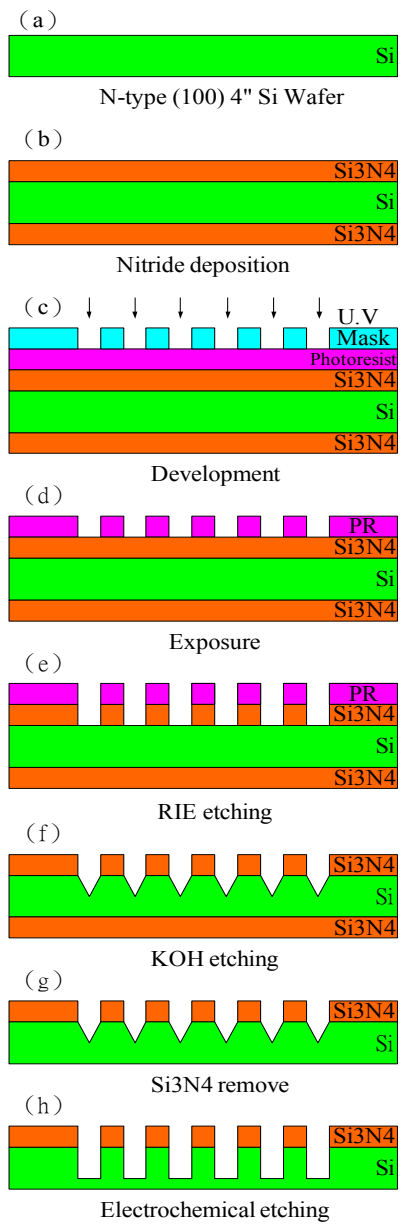


Fig. 2 多孔矽製作流程

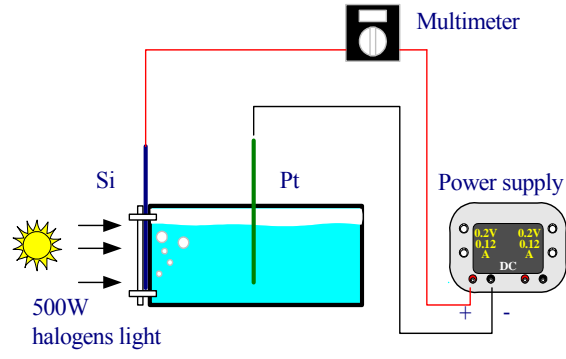


Fig. 3 蝕刻裝置示意圖

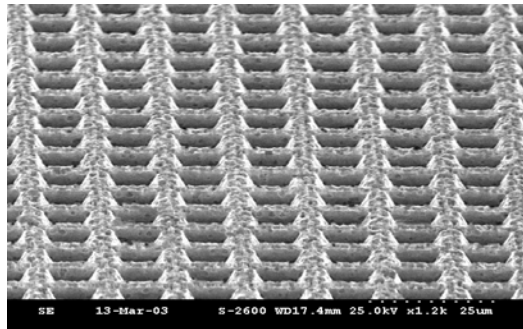


Fig. 4 多孔矽表面 SEM 圖, 多孔性: 8.15%

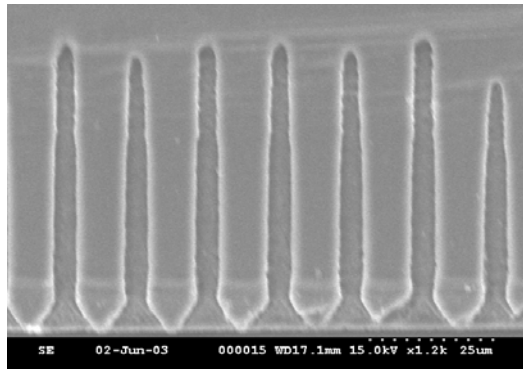


Fig. 5 多孔矽寬度: 4 μm , 間隔: 10 μm

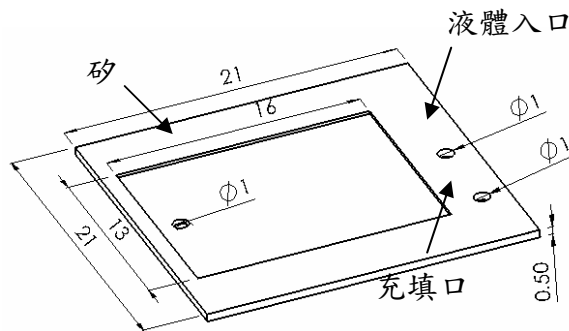


Fig.6 蒸發端頂部

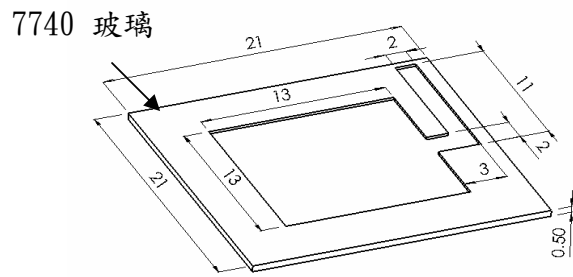


Fig.7 蒸發端底部

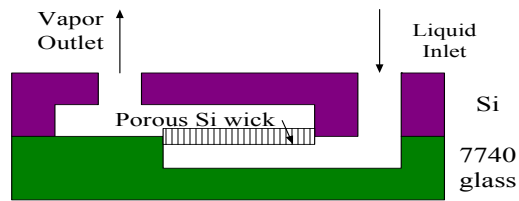


Fig.8 MLHP 蒸發端元件示意圖

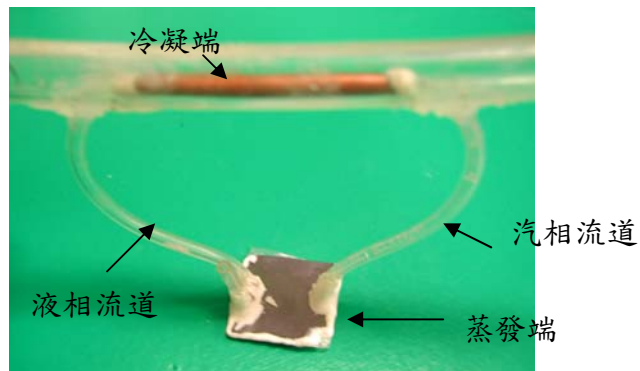


Fig.9 微迴路式熱管

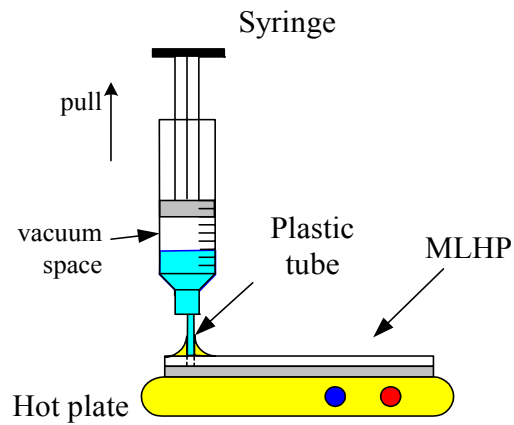


Fig.10 MLHP 充填示意圖

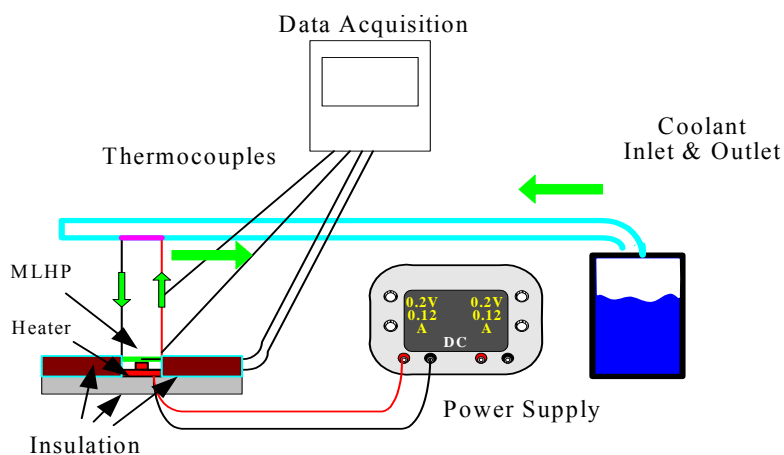


Fig.11 測試平台示意圖

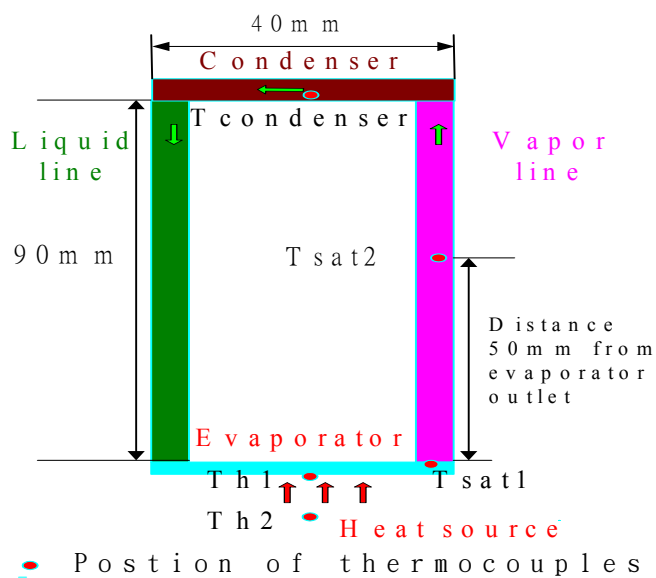


Fig.12 MLHP 溫度量測點示意圖

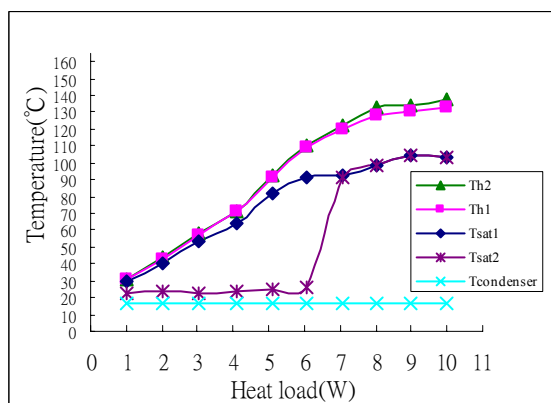


Fig.13 多孔矽毛細結構之 MLHP 加熱功率與溫度關係圖(45%充填量)

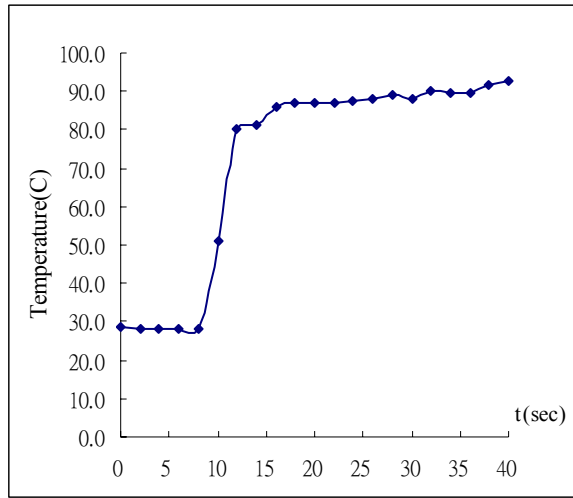


Fig.14 T_{sat1} 啟動溫度變化

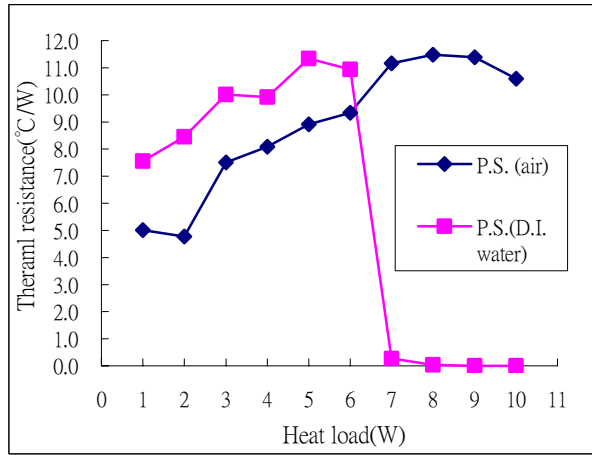


Fig.15 多孔砂毛細結構之 MLHP 加熱功率與熱阻關係圖(45% 充填量)

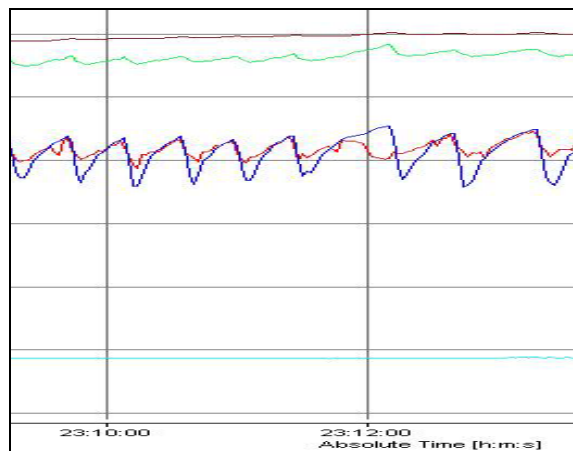


Fig.16 工作流體不連續之時間與溫度暫態關係圖