

微冷卻器在電子散熱之應用

鄭仁豪* 劉君愷** 余致廣**

工研院電子工業研究所

先進構裝技術中心/構裝設計技術組

*副工程師 **工程師

摘要

電子元件在輕薄短小且高速、多功能的發展下，散熱的問題已是最重要的一個環節，然而傳統的散熱方式已逐漸無法滿足現今的需求，使用微機電技術發展的微冷卻器，提供傳統冷卻技術一個新的發展與方向，本文將介紹微冷卻器目前的發展與在電子散熱的應用。

關鍵詞

微冷卻器(Micro Cooler)、微機電技術(Micro-Electro-Mechanical System; MEMS)、電子散熱(Electronics Cooling)

前言

隨著電子元件體積越來越小及高速、多功能的發展趨勢下，在每單位面積產生的熱越來越多，將導致發熱密度的急遽升高，若不將熱量有效率的移除，將使電子元件無法正常運作，甚至損壞，熱的問題已成為許多電子元件發展的瓶頸。以微處理器而言，在2005年時，微處理器將會產生超過 200W的熱量。目前使用的氣冷散熱方式的散熱片體積越來越大，風扇風速越來越快，甚至於整合熱管的設

計，即使如此，隨著發熱密度的持續提昇，傳統的散熱方式已逐漸無法滿足需求，因此新的散熱設計方式的發展已成為目前電子散熱上迫切的問題。

另一方面，隨著半導體及機械加工製程技術的提昇，微機電技術(MEMS)的發展越來越成熟，元件尺寸可越做越小，精密度越來越高，也使得傳統的冷卻技術有了新的發展方向。冷卻器的設計與製程朝微小化的發展邁進，使得冷卻器體積縮小而散熱效率提昇，利用微機電技術發展的

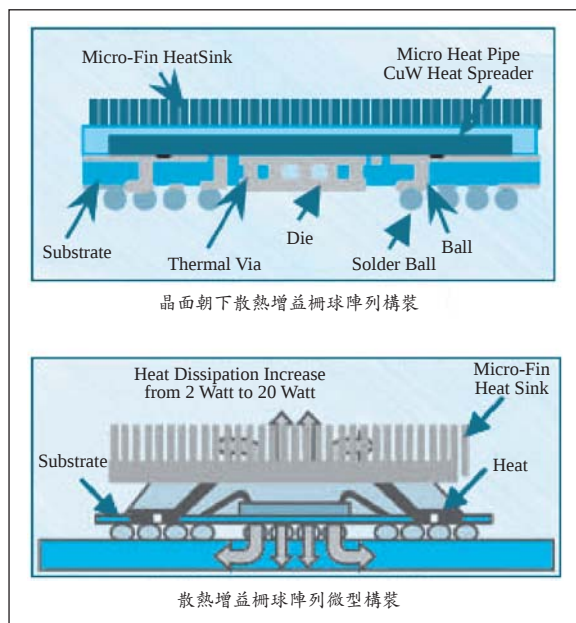
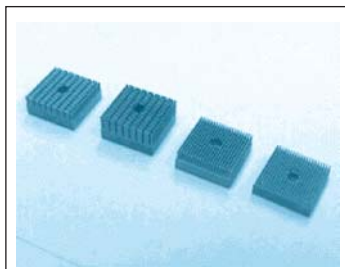
微冷卻器，已逐漸成為電子散熱技術中重要的發展方向。

微冷卻器技術之應用

一、微鰭片熱沉

利用微鰭片熱沉(Micro Fin Heat Sink)為一種有效率、方便的被動冷卻方式(圖一)^[1]，相較於傳統式的散熱鰭片深寬比小於 5，利用ICP深蝕刻微

►圖一 微鰭片熱沉 (資料來源：工研院電子所微系統組)



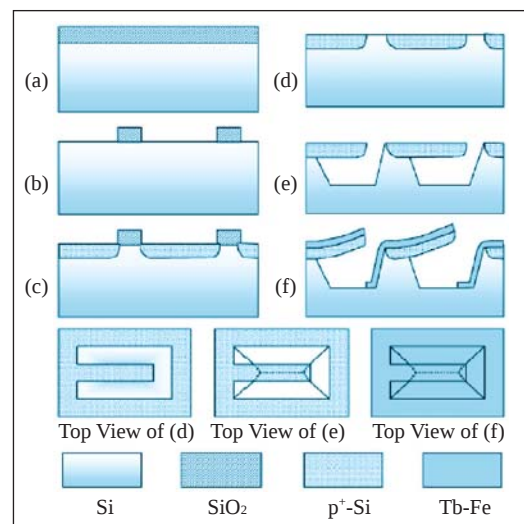
▲圖二 微鰭片熱沉整合於封裝之應用 (資料來源：工研院電子所微系統組)

加工製程或微放電加工(Micro EDM)製程可以達到深寬比20以上，高深寬比可以增加散熱的有效熱傳面積，且體積小於傳統式鰭片，將可以直接整合在晶片上或封裝在內部，以降低接觸熱阻(圖二)，增加散熱性能。

日本Go等人針對增益型震動式微鰭片熱沉陣列所做相關的研究^[2]，係利用流動導致微鰭片熱沉陣列的震動，進而提升整體的熱傳性能，元件使用微加工製程製作，使用Boron離子佈植(圖三(c))與EDP做矽晶圓非等向性蝕刻(圖三(e))，最後再沉積Tb-Fe合金(圖三(f))，完成出懸臂式的微鰭片熱沉陣列(圖三、四)。

二、微熱管

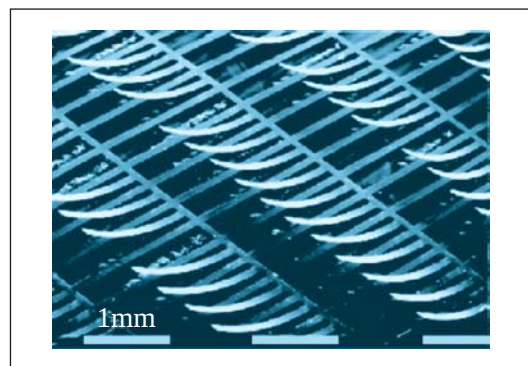
微熱管(Micro Heat Pipe)是由密閉容器、毛細結構與工作流體所構成，



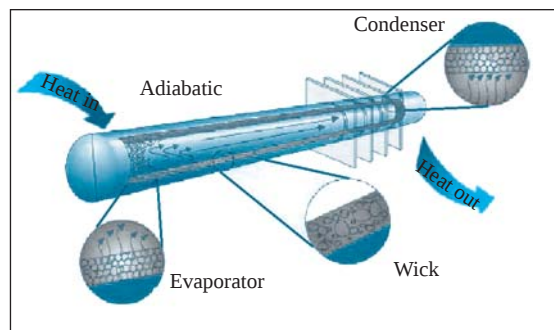
▲圖三 微鰭片熱沉陣列製程圖

將容器抽真空後注入適量的工作流體，然後將微熱管密封起來以維持適當的填充量，當微熱管一端受熱，工作流體吸熱而氣化，所產生的蒸氣則流向容器另一端放熱凝結，凝結液藉由多孔材料或毛細結構的毛細作用力或重力回流至原加熱位置（圖五）。

利用微機電製程製作之微熱管，使用CMOS相容的微加工製程，提升微熱管與電子元件或發熱晶片的整合性。Mallik研究群利用化學氣相沉積方式製作微熱管^[3]，使用KOH體型微加工蝕刻(110)矽晶圓，以蝕刻出溝槽，並配合化學氣相沉積來製作微熱管



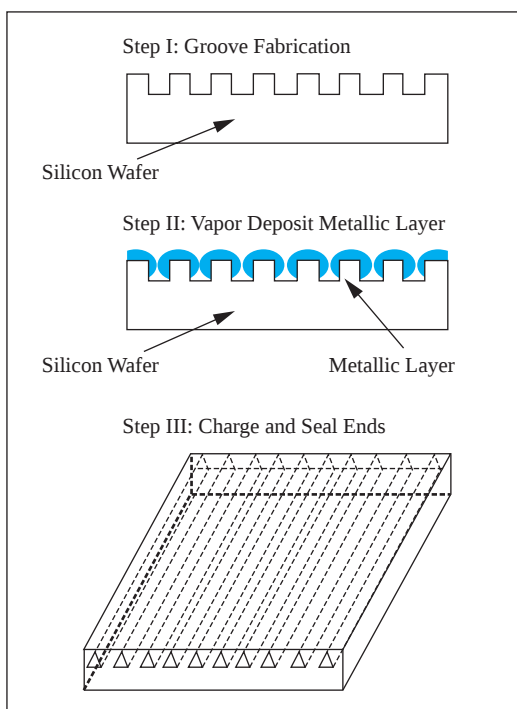
▲圖四 微鰭片熱沉陣列SEM圖



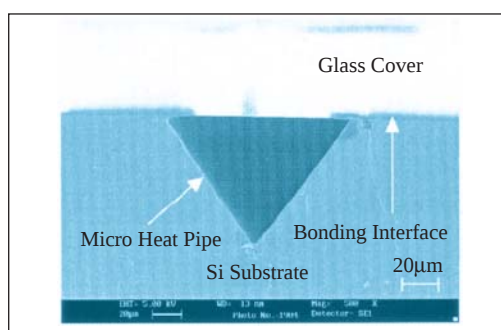
▲圖五 微熱管示意圖

（圖六）。

香港大學 Lee等人用TMAH蝕刻系統，並配合玻璃接合製程製作微熱管陣列^[4]（圖七），並整合加熱器、溫度感測器於微熱管陣列中（圖八），以準確、快速的量測微熱管在運作時的溫度與空泡分率(Void Fraction)。



▲圖六 氣相沉積式微熱管



▲圖七 三角形的微熱管斷面圖

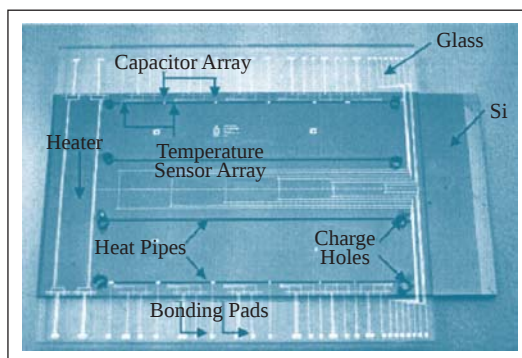
三、平面式微型毛細泵吸環路

利用微機電技術製作的平面式微型毛細泵吸環路(Planar Micro Capillary Pumped Loop)，提供未來電子元件散熱與溫度控制的一種方式，初期研究於1960年代由 NASA 的 F.J. Stenger發明，然而隨著半導體、微機電技術快速的發展，相關的研究也由大型毛細泵吸環路往微型毛細泵吸環路(μ -CPL)研究邁進，以符合於現今微小化的散熱元件趨勢，以下文章說明Berkeley

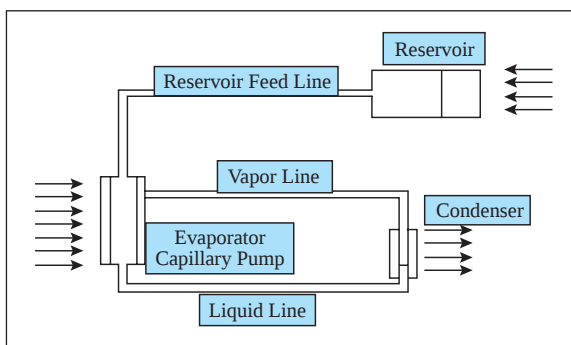
Sensor and Actuator Center之Dorian Liepmann等學者在 μ -CPL上的相關研究[5,6]。平面式微型毛細泵吸環路是一個高效率的雙相移熱工具，原理為利用工作流體的相變化，將所需移除的熱由蒸發器吸收傳遞至冷凝器釋放出來，整個平面式循環迴路使用毛細力作為驅動力，不需要藉助重力效應與額外的機械功驅動。整個迴路的設計包含：蒸發器(Evaporator)、冷凝器(Condenser)、儲水槽(Reservoir)與液、氣流動路線(Liquid、Vapor Line) (圖九)。

元件的製作係利用乾式電漿蝕刻毛細溝槽於蒸發器與冷凝器，並利用熔合接合(Fusion Bonding)將三塊矽基板結合成整體元件，製程與元件如圖十~十一，最後在元件的背邊鍍上鉻(500Å)、金(12000Å)，作為與測試設備的接合層。

元件製作完成後，先抽真空並填

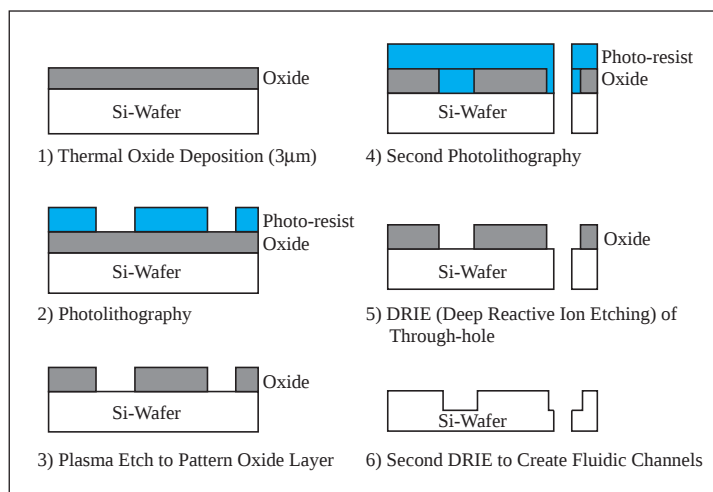


▲圖八 整合式微熱管陣列



▲圖九 μ -CPL設計示意圖

▶圖十 蒸發器與冷凝器製程圖



入適當量的工作流體，以維持環路內部的低壓狀態與去除不必要的氣體，環路內部的真空度與液體填充量將決定元件的操作條件，相關量測架構如圖十二。

四、微流道冷卻系統

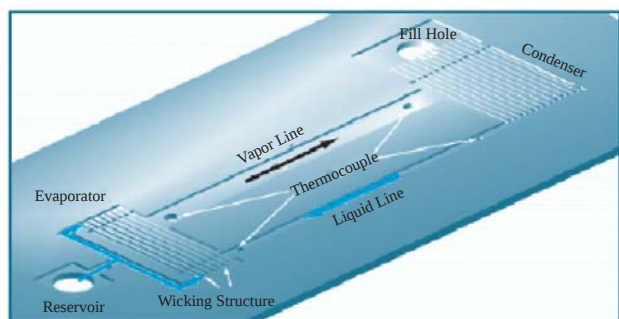
迴路式電滲透微流道冷卻系統(Microchannel Cooling System)為Stanford大學 Goodson教授的研究團隊所研發的技術^[7, 8]，此冷卻技術係利用工作流體流過微流道熱交換器，將貼

附於熱交換器下的IC發熱體產生的熱量帶走，再將自熱源帶走的熱量於熱釋放器釋放出來，整個環路使用電滲透幫浦做為推進液體的驅動源，冷卻系統架構如圖十三所示。

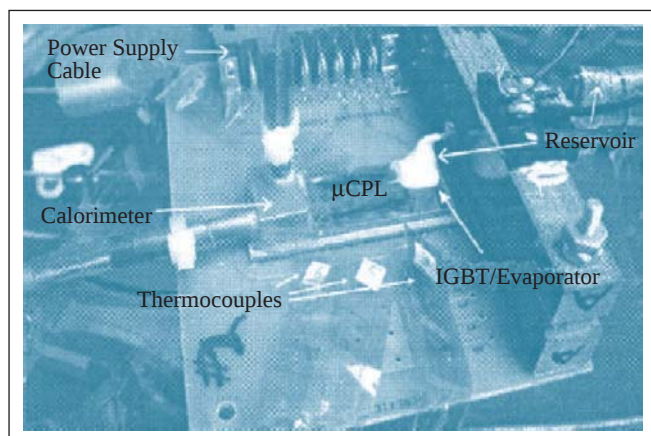
整個冷卻系統的三個主要部份如下：

- (1)微流道熱交換器(Microchannel Heat Exchanger)
- (2)電滲透式幫浦(Electroosmotic Pump)
- (3)熱釋放器(Heat Rejecter)

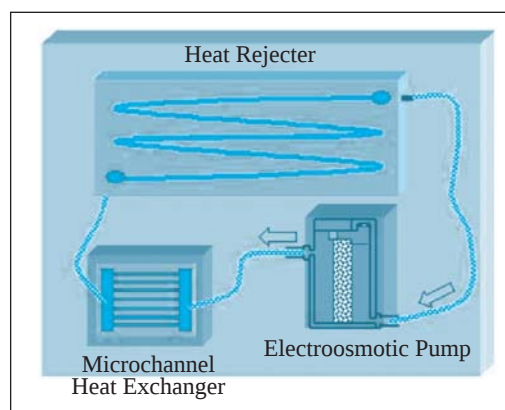
微流道熱交換器係採用電漿蝕刻技術於矽晶圓材料上製作而成，晶圓上並接合一玻璃做密封作用，且於玻璃上開孔並利用管路與電滲透式幫浦、熱源釋放器連接（圖十四、十五），使用矽材可增加熱交換器與發熱矽晶片的相容性，與增加多層晶片上的整合性，經由熱晶



▲圖十一 μ-CPL示意圖



▲圖十二 μ-CPL量測架構圖

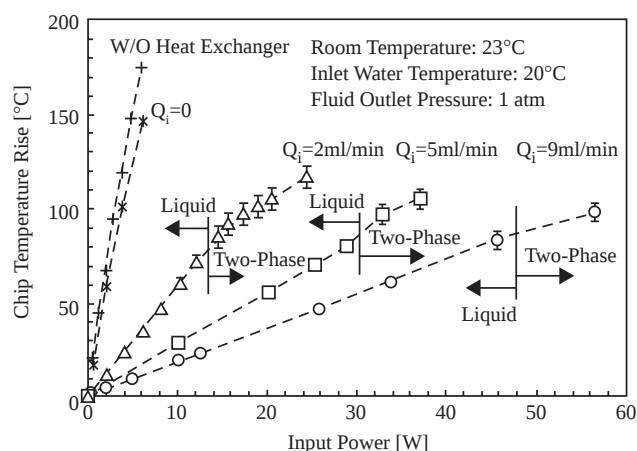


▲圖十三 迴路式電滲透微流道冷卻系統示意圖

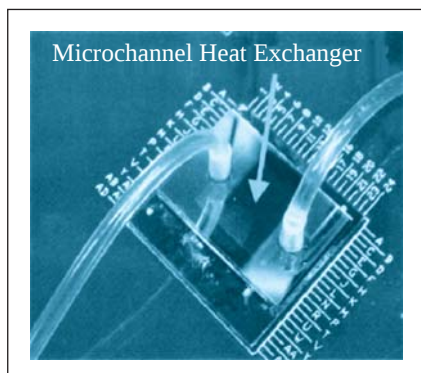
片貼附於微流道熱交換器下方的測試，可以得到熱交換器在不同流量使用，與發熱晶片不同發熱功率下對整個熱晶片溫度的影響（圖十六）。由上述結論可知：越大工作流體的流量在熱交換器中，將可使發熱晶片在較低的溫度下工作，也就是工作流體的流量增大，在單位時間下可以帶走發熱晶片更多的熱，因而將降低發熱晶片溫度。

熱釋放器上整合鋁製鰭片與風扇，當工作流體利用潛熱吸收發熱體上的熱量，使工作流體呈現二相流(Two-phase Flow)的狀態，工作流體流到熱釋放器時，藉由鰭片與風扇以氣冷方式移除熱量，使二相流冷凝為液體狀態，且降低工作流體溫度以利輸送。整個冷卻系統測試的架構與實際應用於筆記型電腦的情形如圖十七所示。

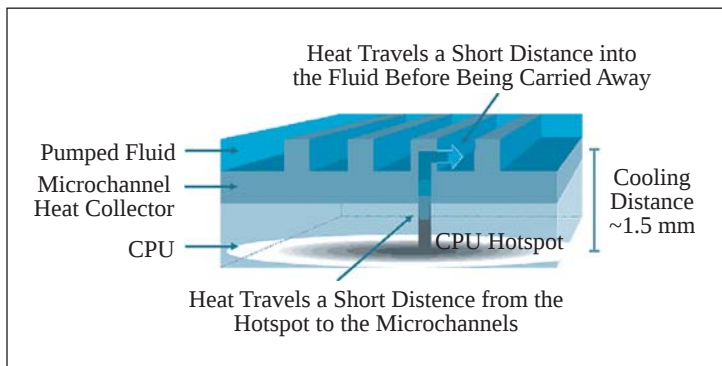
系統測試時，施加150V的電場於電滲透式幫浦，產生4ml/min的流量於迴路中，將可以移走38W的熱在1×1cm的發熱晶片，且維持發熱晶片在100°C以下的工作溫度運作（圖十八），迴路式電滲透微流道冷卻系統提供一種方便、穩定、可靠的冷卻方法，相關研究未來將朝向提升電滲透式幫浦的性能，以及將微流道熱交換器整合於發熱晶片上，以降低接觸熱阻、提升系統的效能。



▲圖十六 發熱功率與晶片溫度關係圖



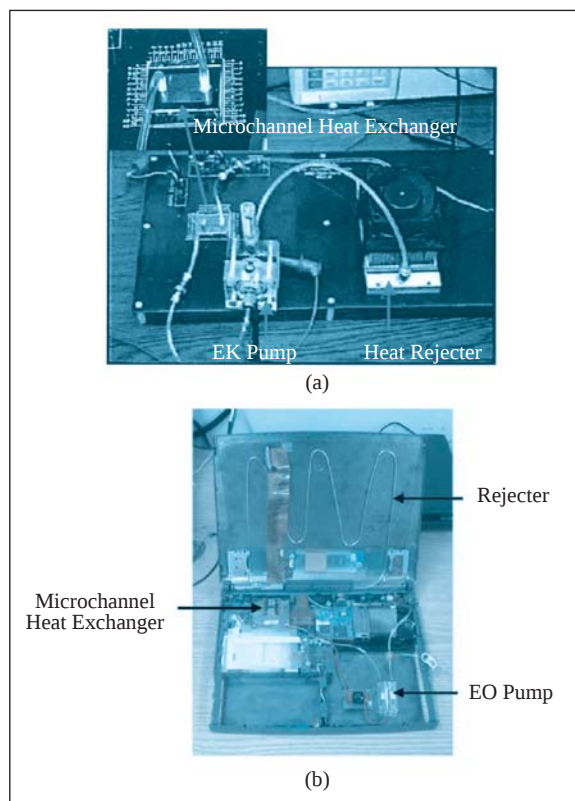
▲圖十四 微流道熱交換器



▲圖十五 微流道熱交換器冷卻示意圖

五、衝擊式冷卻

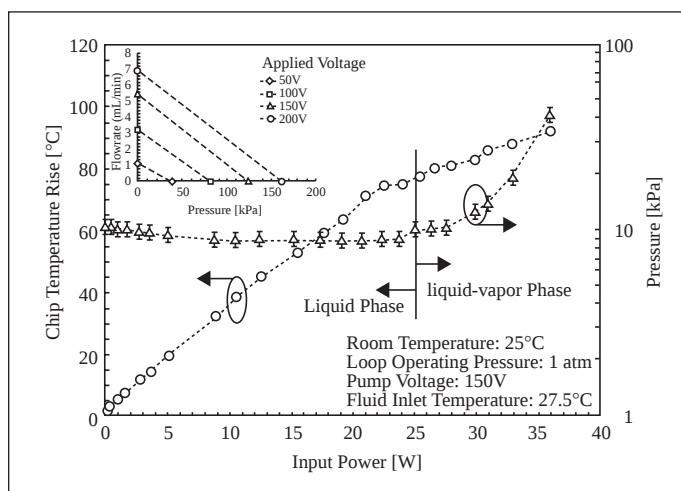
Chisina等人提出 EDIFICE(Embedded Droplet Impingement for Integrated Cooling of Electronics)衝擊式冷卻(Impinging Cooling)的概念^[9]，其方法與架構如圖十九、廿，此項冷卻技術利用深反應性離子蝕刻(DRIE)製作特殊形狀的微型噴孔，利用幫浦加壓將工作流體從噴嘴噴出，噴出的工作流體液滴大小約在50~ 100 μm 間，並製作出微結構整合於發熱晶片上，以提升液滴衝擊於發熱區上的擴散與蒸發效能，



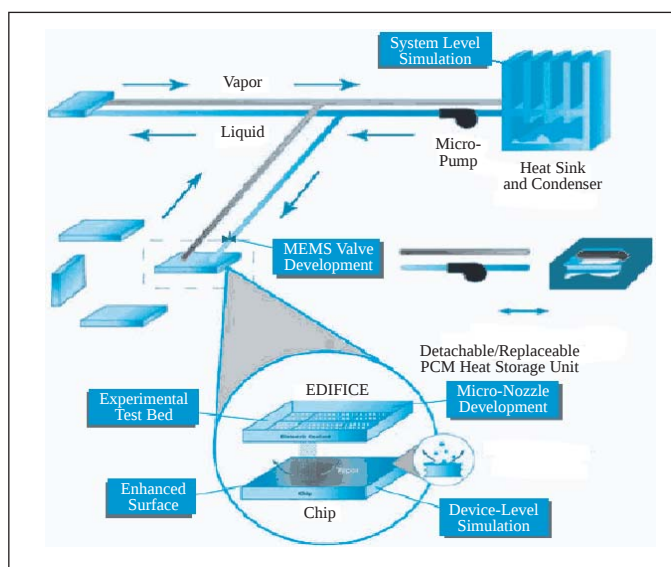
▲圖十七 測試架構(a)與實際應用圖(b)

當工作流體衝擊於發熱表面上，工作流體利用潛熱相變化的方式，將熱點上的熱移除並轉變為雙向流狀態，再由幫浦傳送至冷凝器釋放出熱量，凝結回液體狀態，並重新輸送回微型噴孔再行冷卻。

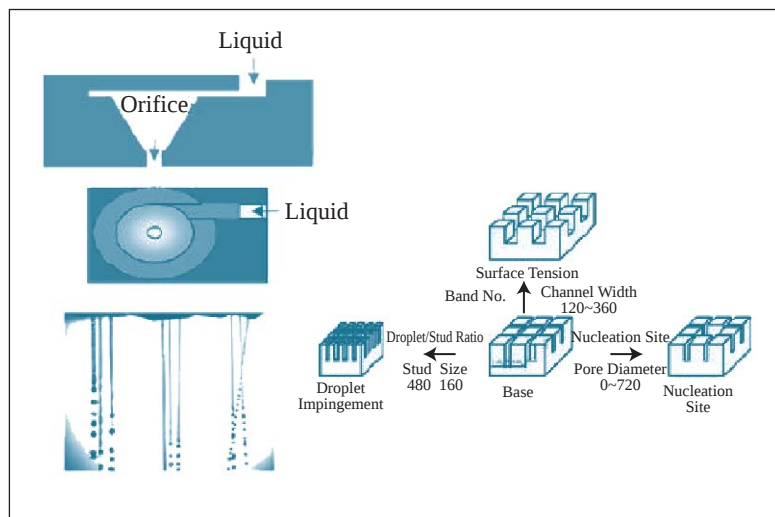
Georgia Tech發展利用壓電材料震



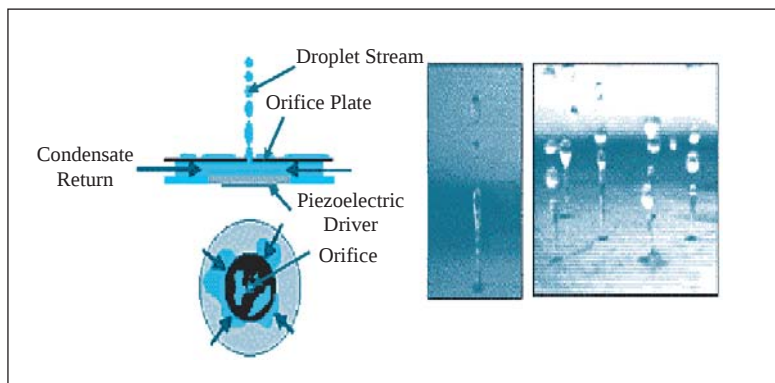
▲圖十八 冷卻系統性能量測結果



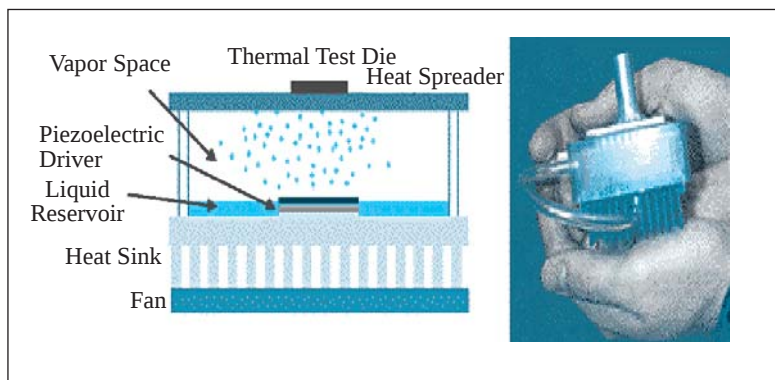
▲圖十九 EDIFICE示意圖



▲圖廿 微型噴孔與表面微結構



▲圖廿一 壓電震動式微噴孔



▲圖廿二 VIDA元件架構圖

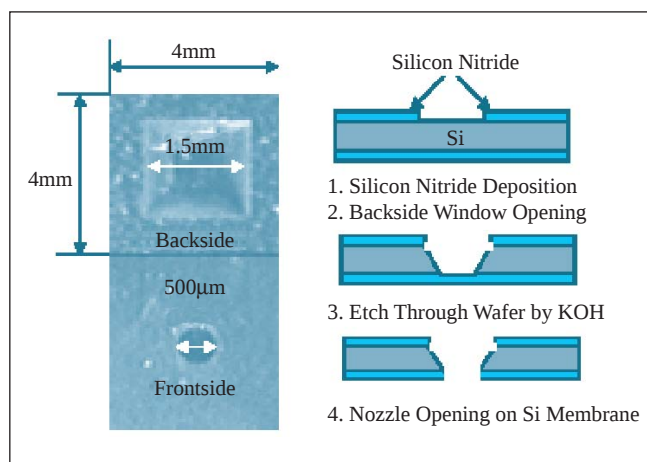
動的方式將工作流體形成霧化狀冷卻發熱晶片，此方式稱為 Vibration-induced Droplet Atomization (VIDA) (圖廿一、廿二)，霧化狀的工作流體隨即迅速的變形而散開，變成一液體薄膜覆蓋在固體表面上，因此可以吸收固體表面的熱量而達到冷卻熱物體。

UCLA何志明教授的研究群，利用微機電技術研發微型氣體噴流式冷卻技術^[10]，此技術使用壓縮空氣源，將空氣藉由微噴孔往發熱區傳送並帶走熱量，圖廿三~廿五為單一微噴孔與微噴孔陣列之相關製程。

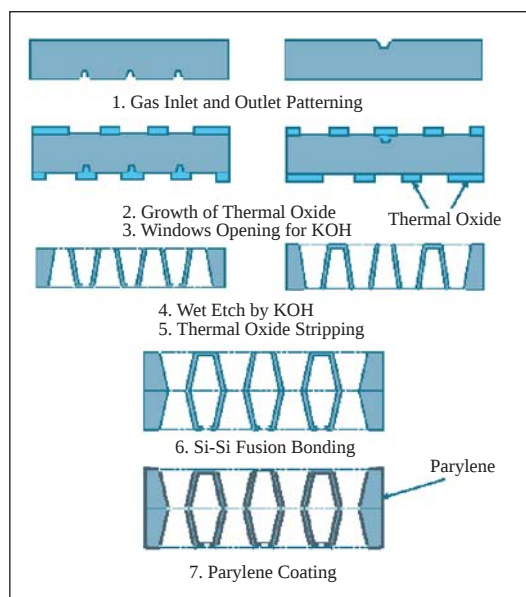
單一微噴孔使用Nitride膜做為KOH體型微加工的保護層，並以KOH蝕刻貫穿 Silicon做為壓縮氣體通過的通道，再將背面的Nitride膜以RIE蝕刻而完成單

一微噴孔元件。

微噴孔陣列分別在二片晶圓上以 KOH 體型微加工完成微噴孔與氣體進口端，再將這二片晶圓對準、接合成微噴孔陣列，最後塗佈上 Parylene 來密封未接合的表面與增加熱絕緣性。



▲圖廿三 單一微噴孔製程圖



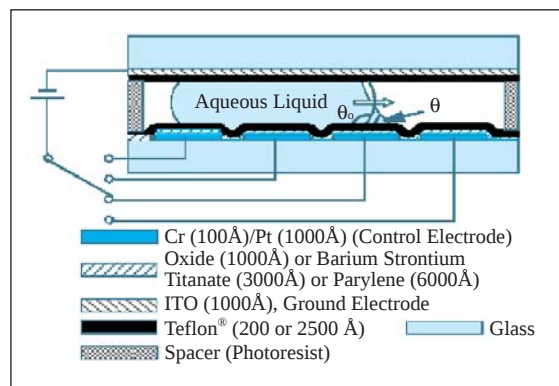
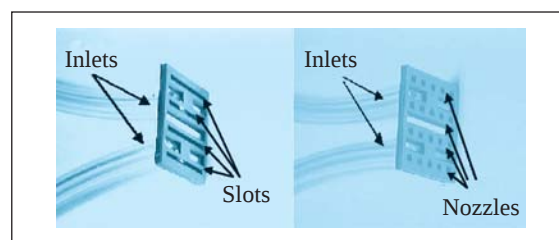
▲圖廿四 微噴孔陣列製程圖

封未接合的表面與增加熱絕緣性。

六、微流體液珠控制式冷卻 (Droplet-base Microfluidic Cooling)

Duke大學利用電潤濕(Electrowetting)控制微液珠的方式，整合於印刷電路板中，將發熱晶片或熱點達到快速而有效的冷卻^[11]。電潤濕是利用靜電力來控制微液珠^[12]（圖廿六），原理是先以微製程鋪設出許多電極，在電極上鋪上一非親水

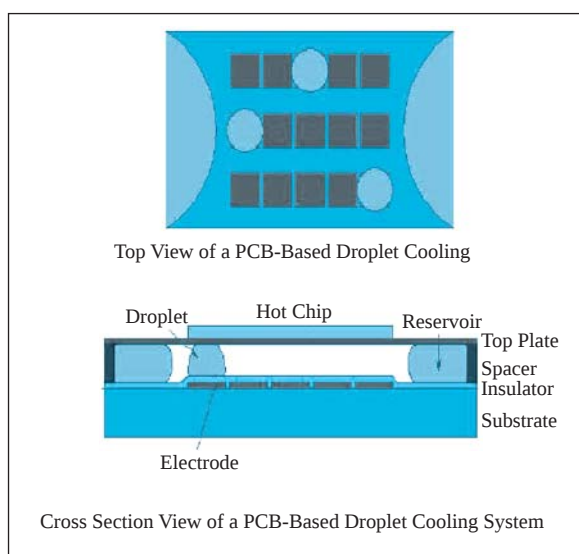
▼圖廿五 單一微噴孔與微噴孔陣列成品



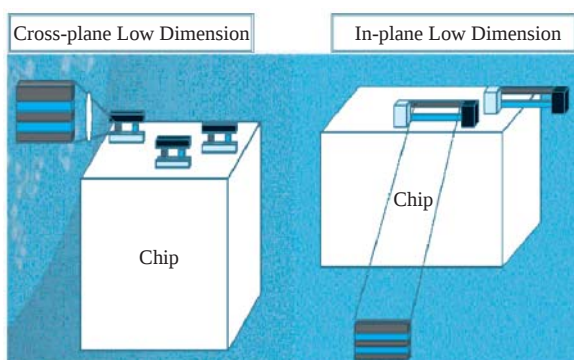
▲圖廿六 電潤濕驅動方式

層，使液珠以球狀附著於非親水層上，並依照液珠的流動方向，依序的改變電擊的正負電壓，使這非親水層形成一電容的型式，再利用電極與液滴中所形成之靜電力相吸，使液珠以滾動的方式往靜電力較大處移動，進而控制微液珠的行進方向與位置。

整合於發熱晶片之構想如圖廿七



▲圖廿七 應用於PCB之微液珠冷卻系統



▲圖廿八 Cross-plane與In-plane型式之熱電元件

七，將發熱晶片接合於微液珠控制元件的上方，當發熱晶片上某一熱點需要降溫時，即可驅動液珠到所需降溫處。

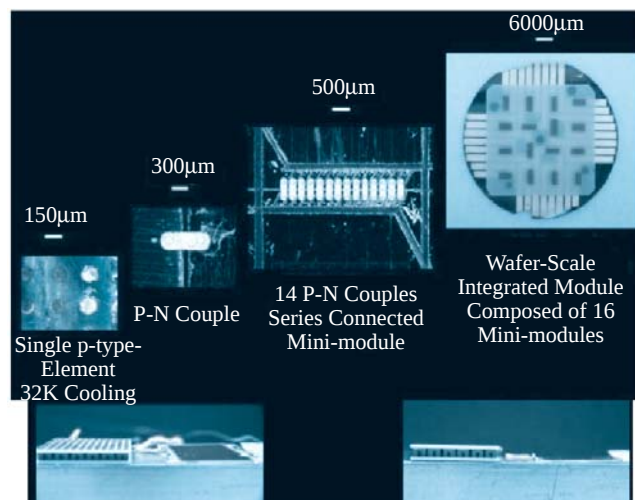
七、微型熱電元件

熱電元件又稱制冷器，利用許多N型及P型半導體所串接組成，通以電流時會將熱由一端傳送至另一端的原理，又稱熱幫浦(Heat Pump)，可加熱亦可冷卻，其理論基礎 Peltier Effect可追溯到19世紀，若在兩接合點存在有溫度差時，則迴路中將產生電流，此種效應被命名為 Seeback Effect，此為溫差發電技術的基礎。

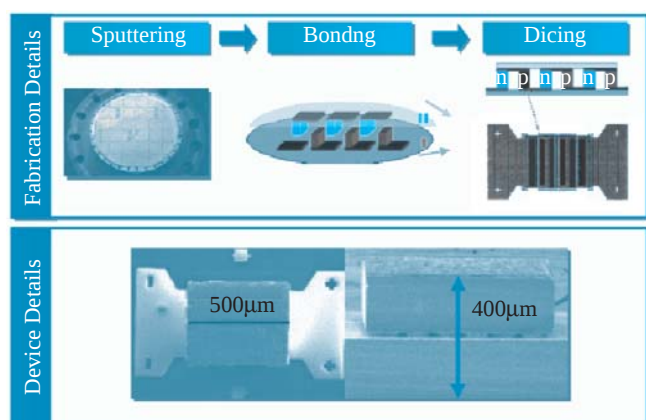
微型熱電元件(Micro Thermoelectric Cooler)可根據結構的不同分為：①Cross-plane Type；②In-plane Type（圖廿八）。

美國 Research Triangle Institute (RTI) 研究單位利用超晶格結構(Superlattices)製作 Cross-plane的微型熱電元件^[13]，超晶格結構控制聲子(Phonon)與電子(Electron)在晶格內部的移動，藉由超晶格結構的介面(Interface)阻礙聲子將熱反向的流動，但不會影響電子的運動，進而提升熱電材料ZT值(Figure of Merit)與元件的性能。

超晶格結構利用金屬有機化學氣相沉積製作而成(Metal Organic Chemical Vapor Deposition; MOCVD)，可將

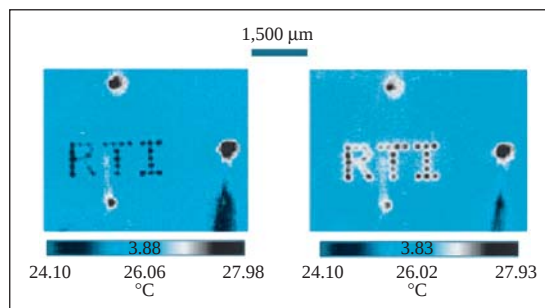


▲圖廿九 RTI製作的微型熱電元件



▲圖卅一 Co-sputter微型熱電元件製程

p-type $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_3$ 的熱電材料 ZT 值提升到 2.4。初步完成的微型熱電元件如圖廿九，可以看出其與傳統熱電元件高度尺寸上的差異，量測結果由熱影像圖展示其局部加熱/冷卻的效果（圖卅），並說明元件擁有帶走熱密度 $700\text{W}/\text{cm}^2$ 的能力，以及元件在加熱/冷卻反應時間相較於傳統塊材熱電元件



▲圖卅 局部加熱/冷卻的效果

更為快速。

其他製作成 Cross-plane Type 微型熱電元件的研究單位還有如：Infineon 科技公司^[14]利用 Co-sputter 的方式，將熱電材料濺鍍在二片晶圓上，其中一片為 P-type 的 $(\text{Bi},\text{Sb})_2\text{Te}_3$ 材料，另一片則為 N-type 的 Bi_2Te_3 材料，再將二片晶圓對準、接合成微型熱電致冷器如圖卅一，此元件可整合於現今微電子元件的

製程，將微型熱電致冷器內建於電子元件或封裝中。

結論

隨著電子元件高發熱密度的發展趨勢，微冷卻器的設計及應用越來越受到重視，利用新製程技術的開發使

得元件的體積縮小而性能大幅提昇。本文中介紹目前幾種利用微機電製程技術所開發的元件，希望對於此類電子散熱元件有進一步的了解及應用。然而，利用微機電製程所開發的元件尚有一些值得注意的地方，第一是需要了解該設計中，相關微尺寸下流體的特性，如空氣對流的邊界層尺寸、流體的流動特性以及表面張力的影響等，才能正確評估微冷卻器的效能。其次是技術及成本的評估。由於微冷卻元件的製程方式和傳統冷卻器的製程方式不同，因此在製造過程中，設備費用的增加及技術的困難性都是需評估的地方，否則元件成本過高，會造成應用受到限制。最後，微冷卻器的可靠性也是技術是否能被接受的重點，而使用壽命也需符合電子產品的壽命需求。儘管如此，微冷卻器的發展已為電子散熱技術提供新的發展方向。

參考文獻

1. 工研院電子所微系統組
2. Jeung Sang Go, Sung Jin Kim, Geunbae Lim, Hayong Yun, Junghyun Lee, and Y. Eugene Pak "Heat transfer enhancement using flow-induced vibration of a microfin array" *Sensors and Actuator A*, PP.201-210, 2003
3. Arnab K. Mallik, G. P. Peterson, and Mark H. Weichold "Fabrication of vapor-deposited micro heat pipe arrays as an integral part of semiconductor devices" *Journal of Microelectromechanical System*, PP.119-131, 1995
4. Man Lee, Man Wong, and Yitshak Zohar "Integrated Micro-Heat-Pipe Fabrication Technology" *Journal of Microelectromechanical System*, PP.138-146, 2003
5. K. Pettigrew, J. Kirshberg, K. Yerkes, D. Trebotich, D. Liepmann, "Performance of a MEMS based Micro Capillary Pumped Loop for Chip-Level Temperature Control" *IEEE MEMS* 2001, P-427, 2001
6. K. Pettigrew, B. Smith, K. Yerkes, C. Gamlen, D. Liepmann, "Development and Test of a Planar, Silicon Mini-Capillary Pumped Loop" *ASME* 2001
7. L. Jiang, J. Mikkelsen, J. M. Koo, D. Huber, S. Yao, L. Zhang, P. Zhou, J. G. Maveety, R. Prasher, J. G. Santiago, T. W. Kenny and K. E. Goodson "Closed-Loop Electroosmotic Microchannel Cooling System for VLSI Circuits" *IEEE Transaction on Components & Packaging Technologies*, PP.347-355, 2002
8. K. E. Goodson, J. G. Santiago, T. W. Kenny, L. Jiang, S. Zeng, J. M. Koo, L. Zhang, S. Yao and E. Wang "Electroosmotic Microchannel Cooling System for microprocessors" *ElectronicsCooling*, PP.46-47, 2002
9. Amon, C.H. "Thermal Management of High-Heat-Flux Device EDIFICE: Embedded Droplet Impingement for Integrated Cooling of Electronics" *ASME-ZSITS International Thermal Science Seminar*, Eds. Bergles and Golobic, Bled, Slovenia, Vol. 1, pp47-56, 2000
10. Q. Lin, S. Wu, Y. Yuen, Y. C. Tai, C. M. Ho, "MEMS impinging-jet cooling" *Proceeding of ASME MEMS* 2000, vol. 2, pp 137-142, 2000
11. Vamsee K. Pamula and Krishnendu Chakrabarty "Cooling of Integrated Circuits Using Droplet-Based Microfluidic" *GLSVLSI*, 2003
12. Sung Kwon Cho, Shin-Kang Fan, Hyejin Moon, and Chang-Jin "CJ" Kim "Towards digital microfluidic circuit: Creating, Transporting, Cutting and Merging liquid droplets by electrowetting-based actuation", *IEEE*, PP.32-35, 2002
13. Rama Venkatasubramanian, Edward Siivola, Thomas Colpitts and Brooks O' Quinn "Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit" *Nature*, vol. 413, pp.579-602, 2001
14. H. Bottner, A. Schubert, K.H. Schlereth, D. Eberhard, A. Gavrikov, M. Jagle, G. Kunzel, J. Nurnus and G. Plescher "New Thermoelectric Components using Micro-System-Technologies" *ETS* 2001