

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 小型熱聲冷凍機製造及研究 (3/3)

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2212-E-002-010-

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：胡文聰

報告類型：完整報告

報告附件：出席國際會議研究心得報告及發表論文

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 31 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 小型熱聲冷凍機製造及研究 (3/3)

計畫執行起訖: 2004.08.01 至 2005.07.31

計畫編號 93-2212-E-002-010

國立台灣大學應用力學研究所

主持人: 胡文聰

### 一、摘要

本計畫分三年執行，總目的為設計、製造及分析一小型熱聲學冷凍機。第一年將進行系統設計、使用矽製造 stack 關鍵零件、安裝在熱聲冷凍機平台中、及測試。第二年將專注於熱聲 driver 之設計、製造及測試。第三年將進行熱聲冷凍機系統整合、製造及測試。

因第二年之進度比預期超前(已進行機系統整合、製造及測試)，第三年度之進度為進行熱聲冷凍機系統測試及確認數據。結果顯示實驗中明顯觀察出熱聲冷凍效應，並可達到 8% 之壓力振幅，且使用陶瓷 stack 及兩種不同間隔之矽 stack 為次熱聲媒介。實驗結果在使用陶瓷 stack，在壓力振幅為 6%、150Hz. 的條件下，stack 兩端溫差明顯有 4.4 度。而在矽 stack 方面，兩種矽 stack 之溫差為 0.8 度。

關鍵字：熱聲學 thermoacoustic，stack，冷凍機 refrigerator

### 一、Abstract

This three-year proposal aims at design, fabrication and experimental study of small cooling devices. The first year will focus on the *stack*, perhaps the key component in a thermoacoustic device, and its performance. The second year will focus on the *driver* (micro-speaker) and its performance. The focus of the third year would be to integrate results from the first two years.

Since the second year effort is ahead of schedule (finished integration), the third year emphasis was placed confirming results of system integration, collecting and analyzing data. Results clearly indicated success in obtaining thermoacoustic efforts. The pressure fluctuation is up to 8% of the mean pressure. Two stack designs were investigated: ceramic and the MEMS-based stack. Results show that for the ceramic stack, the pressure fluctuation is 6% at 150Hz., and the temperature difference is 4.4 degrees. For MEMS-based stack, the temperature difference is 0.8 degree. Heat accumulation problem of the driver piston is seen as the dominant source of heat input into the device.

### 二、前言

由於 IC 製程的進步，目前市面上已有號稱極快速之 CPU 上市，但隨著電腦運算速度的增加，電腦機殼內之散熱已變成阻礙 CPU 運算的最大元兇。電腦的 CPU 是機殼內最主要的發熱源，局部高溫熱點(hot spot)導致 CPU 的熱應力不均，是造成 CPU 運作不良而當機的因素，本文之重點便是著重在消除電腦機殼內 hot spot 之效應。

雖然散熱風扇是現今最常用之散熱法，但微熱管相變化散熱才能符合未來筆記型電腦體積小且須高散熱的需求。當微熱管受熱端溫度越來越高時，若冷端沒有即時提供一個低溫環境來凝結水氣，則受熱端會因為沒有適當的凝結水來達成相變化吸熱(圖 1)，而造成受熱端溫度無法適時的降低而產生 hot spot，導致電腦當機。

因此為了使微熱管能在高溫下產生更大的效用，故考慮使用熱聲學冷凍儀接在熱管冷端處，使得微熱管冷端能提供一穩定的低溫環境，如圖 2。熱聲冷凍儀使用活塞為聲波源，主要目的為提供高聲壓值及穩定之平面聲波，以提高在非共振模態下之熱聲冷凍效應。實驗中並使用三種不同之 stack-陶瓷 stack 及矽 stack(兩種結構)，以了解不同 stack 材質及結構下之特性。

適當的配置熱聲冷凍儀與微熱管，微熱管的溫度使用範圍會變得更廣，也因此可適用於產生高熱源的筆記型電腦、PDA 及其他電子 IC 產品，亦可使其使用壽命增長。

### 三、熱聲原理

利用在密閉腔中輸入聲波使得 stack 兩端產生溫度差(非共振模態)，即為熱聲冷凍效應。如圖 3，當 piston 動作時，若觀察固定分子量之空氣粒子，可區分為以下四步驟：

(活塞向右):壓力增加，壓縮空氣粒子，因其移動速度相對於空氣粒子在兩端停滯時來的快，且低頻聲波壓縮時熱傳很小，可視為絕熱壓縮。

(活塞向右到底):此時壓力正要改變，空氣粒子停滯，因為空氣粒子被壓縮導致溫度增加 ( $Pv=nRT$ )，此時空氣粒子有短暫時間放出熱能傳遞給 stack。

(活塞向左):壓力變小，空氣粒子體積膨脹，因其移動速度相對於空氣粒子在兩端停滯時來的快，且低頻聲波壓縮時熱傳很小，可視為絕熱膨脹。

(活塞向左到底):此時壓力正要改變，空氣粒子停滯，因為空氣粒子膨脹導致溫度降低，此時空氣粒子有短暫時間可吸收 stack 之熱能。

如圖 3，當空氣粒子在兩端吸放熱之時，便使得兩端有了溫度差。理論上，壓力波頻率越快，其熱聲效應會越好，但頻率必須不能接近密閉腔共振頻率(約 3k~5k)。

若壓力波波動越大，則熱聲效應會越好，因為高的壓力波動會使得空氣粒子吸放熱能的能力增加，再配合適當的頻率，可產生良好的熱聲現象。

### 四、儀器設備與量測

#### 4-1 儀器設備：

微熱聲儀器(圖 4)主要可分為熱交換器、聲波產生源、次熱聲媒介 stack 及密閉腔，以下將分項列述：

##### 熱交換器：

冷端熱交換器是由 7 片 0.5mm 厚、5mm 寬之兩端削尖的紅銅薄片，及直徑 36.1mm、厚 4mm 之黃銅片製作而成。

室溫熱交換器是由 7 片 0.5mm 厚、5mm 寬之兩端削尖的紅銅薄片，及直徑 50mm、厚 4.5mm 之黃銅片製作而成。

紅銅片長邊兩端削尖之用意是為了使通過之氣流較平穩，減少形狀阻力而不產生紊流。在冷端及室溫熱交換器側邊各放入一 thermocouple 以量測其溫度變化。在熱聲現象發生時，在冷端熱交換器之溫度應比室溫低，在室溫熱交換器之溫度應比室溫高。

兩熱交換器之穿透率(氣體可通過面積與總面積之比值)皆為 81%。

##### 聲波產生源：

聲波源活塞是由台灣雷虎公司所製造的遙控飛機引擎改裝而成。利用此引擎之活塞裝置，加裝上日本 Makita 公司所製造可達每分鐘 30000 轉之馬達，可使活塞每分鐘可達三萬次(500hz)反覆運動，輔以可控制馬達輸入之電壓控制器，便成了可控制活塞運動頻率由 0~500Hz 之強力聲波壓力源。其中活塞之衝程(stroke)為 6.8 mm，目的是為了使空氣粒子位移不超過 stack 之長度(17.5mm)，如此才能在密閉腔內產生熱聲現象。

##### 次熱聲媒介 stack：

Stack 為熱聲裝置中相當重要的一個部份，在此使用之 stack 主要可分為兩大類以茲比較：

##### (一)陶瓷 stack：

為長寬 26.7mm、高 17.5mm、穿透率(porosity)為 74% 之圓柱形多孔性材料，實際上為汽車觸煤轉換器中的一個元件，為陶瓷材料製成，熱傳導係數相當低，因此能有效降低熱能藉由 stack 之熱傳導從高溫的熱端傳至冷端所造成之損失。見圖 5。

##### (二)矽 stack：

成品如圖 6，利用 MEMS 技術製造而成，目的在製造微細之結構以減低密閉腔內之阻力(製作方法見圖 7)。使用晶格方向為(110)、厚度為 500  $\mu$ m 之矽晶圓，蝕刻成直徑 20mm 之中空

圓環片，圓環中間有 16 條 0.2mm 寬度之橫桿，橫桿之作用為交換熱，其穿透率為 83.9 %。為確保此矽 stack 不沿軸方向有熱傳行為，故在每一個矽組件間加入同一厚度之紙環，使其長度與陶瓷 stack 相同為 17.5mm，以便對照。

改變紙環之厚度為 1.7mm 及 2.2mm，stack 的長度維持為 17.5mm，如此可有兩種不同矽之間隔的 stack，如此可用來比較在不同之間隔下矽 stack 之表現情形。

#### 密閉腔：

一個完整的密閉腔裝置是由熱交換器、stack，及其他零組件組成，其材料為分別為尼龍鋼及鋁。

由圖 8 可見，密閉腔後段設計成圓錐狀(可分三段)，因壓力波在圓錐狀的密閉腔內其壓力振幅會產生放大的效果，而後段不加圓錐狀體積可增加壓力振幅，其效果各有不同。其內部體積可經由調整密閉腔後段組件之長度而定，其可調整之壓力振幅分別為 8%、6%、3%。

#### 4-2 量測方式：

壓力感測器經由螺紋鎖入於密閉管管壁上，其前端與共振管內壁切齊，以避免干擾內部流場、影響實驗結果及量測數據。

溫度感測器為 J 型熱電偶，分別將其裝置於引擎、冷端熱交換器、室溫熱交換器及室內，以方便量測所需之數據。

所有數據結果皆利用 Labview 程式一次擷取及處理，見圖 9。

### 五、實驗結果與討論

#### 陶瓷 stack：

實際量測陶瓷 stack，分別在 50hz，100hz，150hz，200hz，250hz 不同頻率，不同之壓力振幅下(即密閉腔體積不同)，在引擎溫度保持在常溫(21~25 度)以上之條件，所得之結果為圖 10:

圖 10 中可得兩個結果：

(1)依頻率不同：在頻率 150hz 之前，溫差隨著頻率而增加；而在 150hz 之後，溫差會隨著頻率而下降。

(2)依體積不同：依溫差表現來比較，壓力振幅 6%>3%>8%。

理論上，陶瓷 stack 應在頻率 300hz 以下時，其 stack 兩端溫差皆隨著頻率而增加，若改變其壓力振幅，則越大之壓力振幅會有越好的溫差表現，即壓力振幅 8% >6%>3%。

但所量得之實驗數據與理論不同，其原因分兩方面解釋：

(1)以頻率而言：

實際溫差在頻率 150hz 以上時不增反減，這是因為實驗之活塞壓力源在較高頻率時(150hz 以上)，活塞會產生高溫，導致會有多餘的熱能由引擎向冷端熱交換器方向流動。雖然在實驗過程一開始，很明顯的可以察覺頻率越高，其 stack 兩端溫差會越大，但為求得穩定狀態之數據，必須等待一段時間使其達到動態平衡，此時在冷端熱交換器由熱聲效應產生之低溫，會漸漸吸收由引擎傳導之熱能，以至於冷端熱交換器之溫度會提高，甚至會使 $\Delta T$ 有負值之情況產生。

(2)以體積(壓力振幅)而言：

理論上應是 8% >6%>3%，但實際上 8%卻是表現最差的，猜想其原因應該是活塞設計之問題。在壓力振幅=8%時，由於活塞並未與管壁密合，因此當密閉腔內壓力為 8%時，引擎內支熱空氣會沿著活塞支邊緣鑽入密閉腔內，導致腔內之空氣變熱，此時再經由傳導與對流，冷端熱交換器溫度會因此而上升， $\Delta T$ 也會失真。而壓力振幅在 6%以下之情形，由於壓力不大，因此引擎內之空氣鑽入密閉腔情形不嚴重，因此除了壓力振幅 8%數據失真，其他兩組仍符合預期之趨勢。

#### 矽 stack：

使用不同間隔之矽 stack，分別在 50hz，100hz，150hz，200hz，250hz 頻率，在不同之壓力振幅，在引擎溫度保持在常溫(21~25 度)以上之條件下，所得之結果為圖 11、圖 12。

圖 11、圖 12，其實驗誤差值在 $\pm 0.2^{\circ}C$ 之內，因此考慮此誤差值，不同矽 stack 溫差之表現由高至低均為 3% > 6% > 8%。

不同矽 stack 間隔之表現，以溫差表現值比較，在壓力振幅為 3%時，1.7mm 間隔之矽 stack 略佳於 2.2mm 之矽 stack。

矽 stack 之  $Q_{load}$  平均都是負值，代表冷端熱交換器總熱能是向外流的(溫度高)，冷端熱交換器溫度升高之原因亦為活塞壓力源之緣故。

密閉腔內熱對流的影響為，若引擎溫度為 30 度，則活塞之溫度可能為 80 度以上，此時由於矽 stack 之間隔較大，會造成熱對流進入矽 stack，亦會影響矽 stack 前端之溫度。

由於矽 stack 構造為不連續性，因此空氣氣流通過一片矽組件時會產生若干穩流，若矽組件越多，則會產生越多紊流，使得空氣粒子來回運動的假設被破壞，熱聲現象就會消失。(見圖 13)

因此綜合以上兩點推斷在壓力振幅為 3%時，2.2mm 之矽 stack 表現較好的原因主要為 stack 內之紊流較少(spacing 相差不多)之故。

此外，在此亦使用了 DeltaE 軟體來預測本實驗陶瓷 stack 之實驗結果，其比較圖如圖 14。

## 六、結論

比較陶瓷 stack 之結果及矽 stack 之結果可發現，此三結果(圖 10、圖 11 及圖 12)之圖形曲線皆是拋物線型，只不過陶瓷 stack 之溫差最高在頻率 150hz 處，而矽 stack 的溫差最高在 100hz 處。由此可了解兩種 stack 之結果曲線皆受兩大因素而影響：

### (A) 熱聲現象：

拋物線之曲線上升部分，可代表熱聲現象，即溫差隨著頻率而增加之現象。

### (B) 引擎升溫現象：

拋物線之曲線下降部分，可代表引擎由於高頻所產生之熱能，已超過在此頻率下熱聲現象冷端所能帶走之熱能，因此溫差隨著頻率而下降。

拋物線的範圍，代表不同 stack 之效能，如陶瓷 stack 其曲線範圍幾乎在溫差為 0 之基準線以上，與矽 stack 曲線範圍幾乎在 0 之基準線以下相較之下效能較好。

拋物線之高點(溫差最大處)，代表熱聲現象與引擎升溫現象達到平衡，此時通常是 stack 兩端溫差最大之時。兩種 stack 之高點不同，陶瓷 stack 較晚發生，表示陶瓷 stack 較能免除引擎之高溫帶來之影響。

若能有效排除引擎在高頻下產生之高溫影響，則 stack 結果曲線即可去除引擎升溫現象之因素，結果曲線應是開口向下之上升拋物線。

截至今日，針對熱聲致冷機的發生機制與構造，已有相當多的研究加以探討。但是，根據實驗數據比較顯示<sup>13</sup>，不論是家用冷氣或是冰水機，皆比目前各實驗室所發展出之熱聲致冷模型機的效率為佳。因此，如何提高熱聲致冷機的效率成為主要的研究方向。不論是改變 stack 的位置、stack 的形狀、利用程式做最佳化的設計、降低熱交換器的熱能損耗，或是改變工作流體、工作壓力..等方法，仍無法將熱聲制冷機的效率提高至可與市面上的冷卻系統相提並論。因此，效率不高成為熱聲制冷機商品化過程中最大的缺點。

未來微熱聲冷凍機在體積及外型設計上取得一平衡點將是一重要關鍵。實驗所用之矽 stack，如何設計其間隔大小及密閉腔形狀大小會影響其表現，因此改善矽 stack 之構造不連續性或尋求更方便加工之 stack 材料是未來發展之重點，使用矽 stack 其用意是可在矽內加工微熱管，可直接接觸電子零件散熱。

在活塞產生之發熱源方面，或可在活塞及冷交換器之間加上一毛細管，雖然增加了壓力降，但卻可使來自活塞方面的熱傳導大大的減低。此熱聲機之再微小化應是勢在必行，因此如何使用其他材料來取代活塞是今後的重點之一，如使用振幅較大的喇叭、雙壓電材料、電磁鐵控制活塞等也許是不錯的選擇。

另外，矽 stack 是使用微機電加工而成，因此或許直接將整個熱聲機構位小化至 mm 等級，由數十個或數百個熱聲儀器串聯使用，由於體積變小，需要大振幅的要求就不再重要，可直接使用壓電材料為聲波源，但由於熱聲儀器之密閉腔設計皆為軸向對稱，現今微製程並無法完全作到，若要以微製程製造熱聲儀器，恐怕要在理論及加工方法上多下工夫。

## 七、參考文獻

1. Madou M.J., *Fundamentals of Microfabrication*, CRC press, 1997.
2. Kovacs G.T.A., *Micromachined Transducers*, McGraw-Hill press, 1998.
3. Swift G.W., "Thermoacoustic Engines", *Acoustic Society of America*, 1145-1179, 84(4), 1988.
4. Symko O.G., "Energy Conversion Using Thermoacoustic Devices", *International Conference on Thermoelectrics*, 18, 645-648, 1999.

5. Arnott W.P., Raspet R., and Bass H.E., "Thermoacoustic Engines", *Ultrasonics Symposium*, 995-1003, 1991.
6. Lawrenson C.C., Lipkens B., Lucas T.S., and Perkins D.K., "Measurements of Macrosonic Standing Waves in Oscillating Closed Cavities", *Acoustical Society of America*, 104(2), 623-636, 1998.
7. Swift G.W., *Thermoacoustics: A unifying perspective for some engines and refrigerators*, Los Alamos National Lab, 1999.
8. 陳冠勳, 熱驅動熱聲冷凍實驗設備之設計與性能實驗, 台大應力所碩士論文, 2000.
9. 黃科志, 電子裝備冷卻系統, 清華大學動機系, 1998.
10. 刁建成, *ULSI 製程技術*, 全華科技圖書出版, 2000.
11. 張俊彥, *積體電路製程及設備技術手冊*, 經濟部技術處發行, 1997.
12. 白明憲, *聲學理論與應用*, 全華科技圖書出版, 1999.
13. 鄭名山, "非蒸氣壓縮式新冷卻法簡介", *中國冷凍空調雜誌*, 42, 92-109, 1999.

## 八、附圖

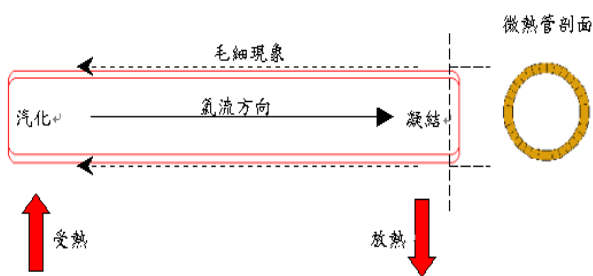


圖 1 微熱管內部相變化示意圖

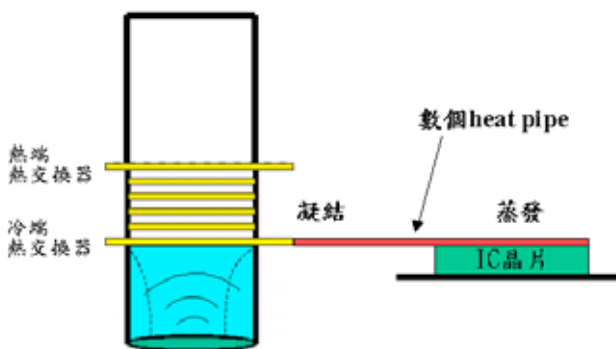


圖 2 微熱聲儀器應用於微熱管示意圖

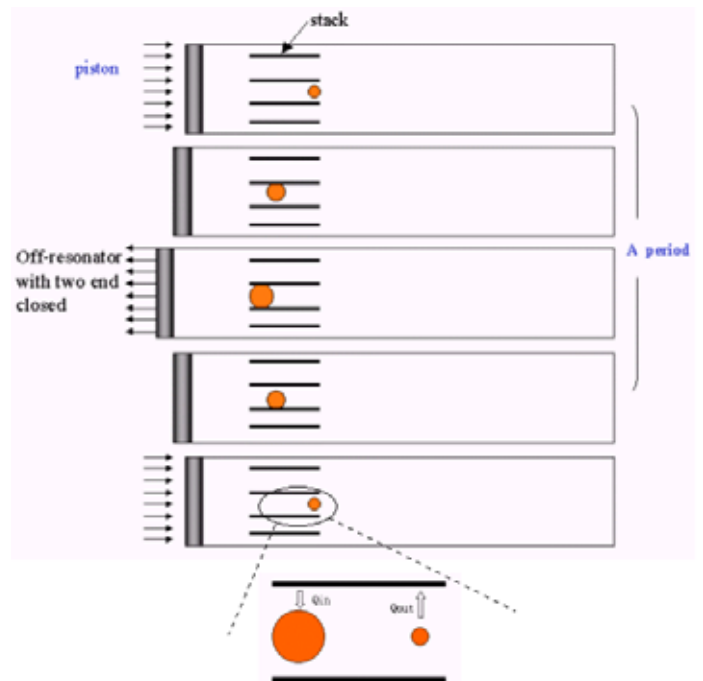


圖 3 空氣粒子在密閉腔內之熱聲效應

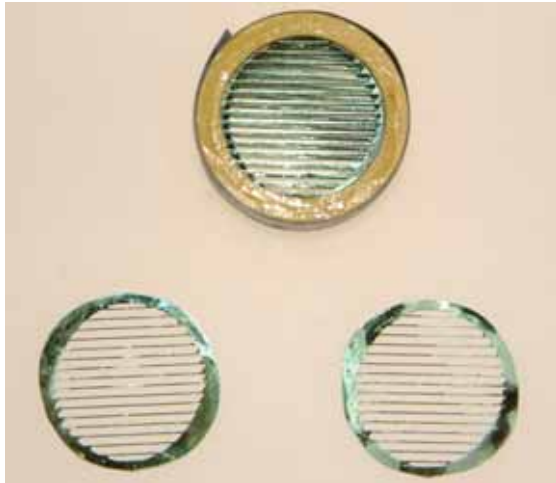


圖 6 MEMS 技術製作之 stack。下方為蝕刻而成之矽圓環，上方為利用紙環間隔而成之 stack 成品。

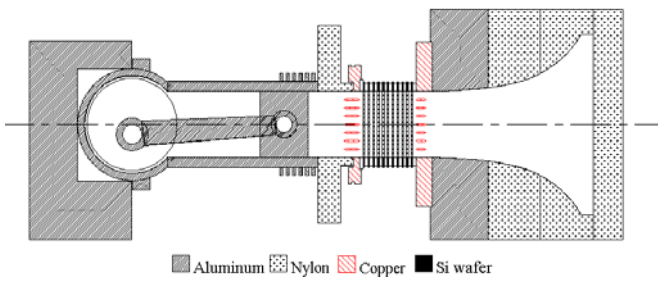


圖 4 微熱聲冷凍儀器圖

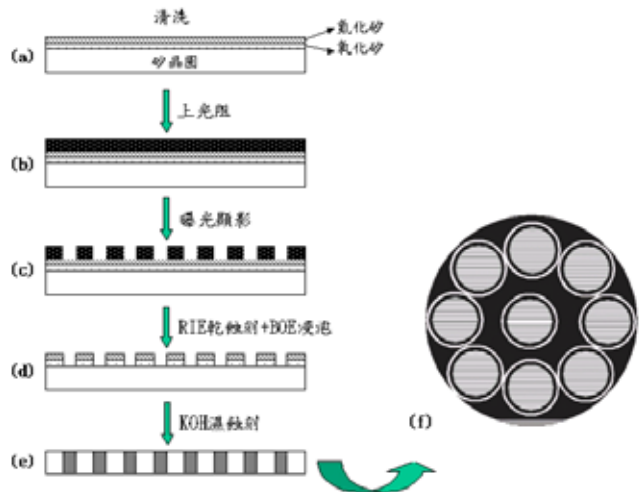


圖 7 矽 stack 之製作過程

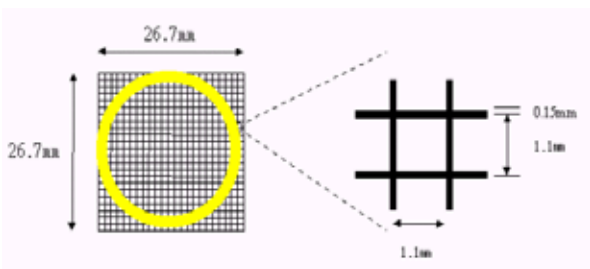


圖 5 陶瓷 stack

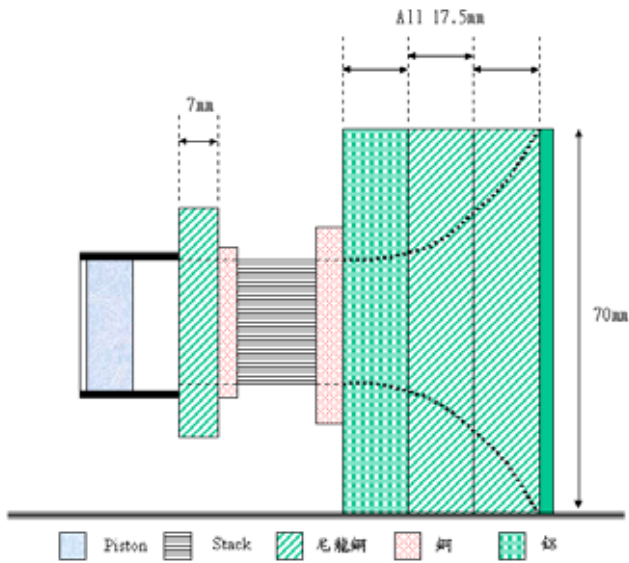


圖 8 熱聲儀器之密閉腔，可分為三段

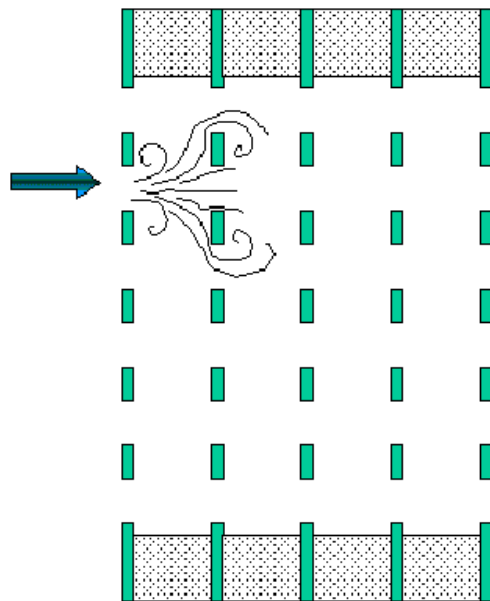


圖 13 矽 stack 內部之紊流

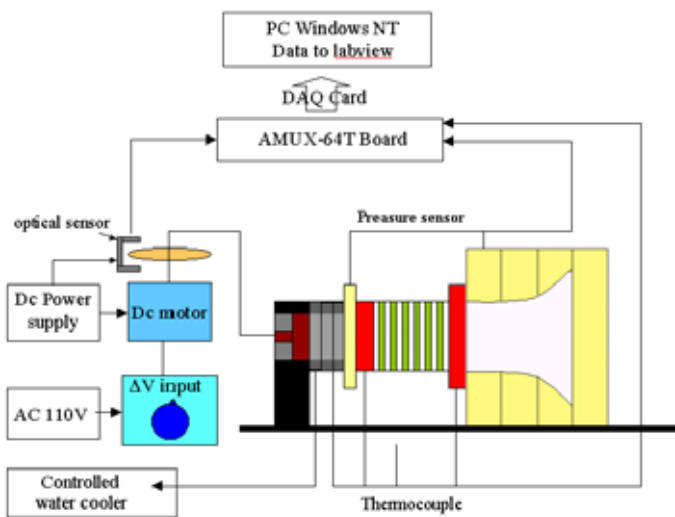


圖 9 熱聲儀器之量測系統



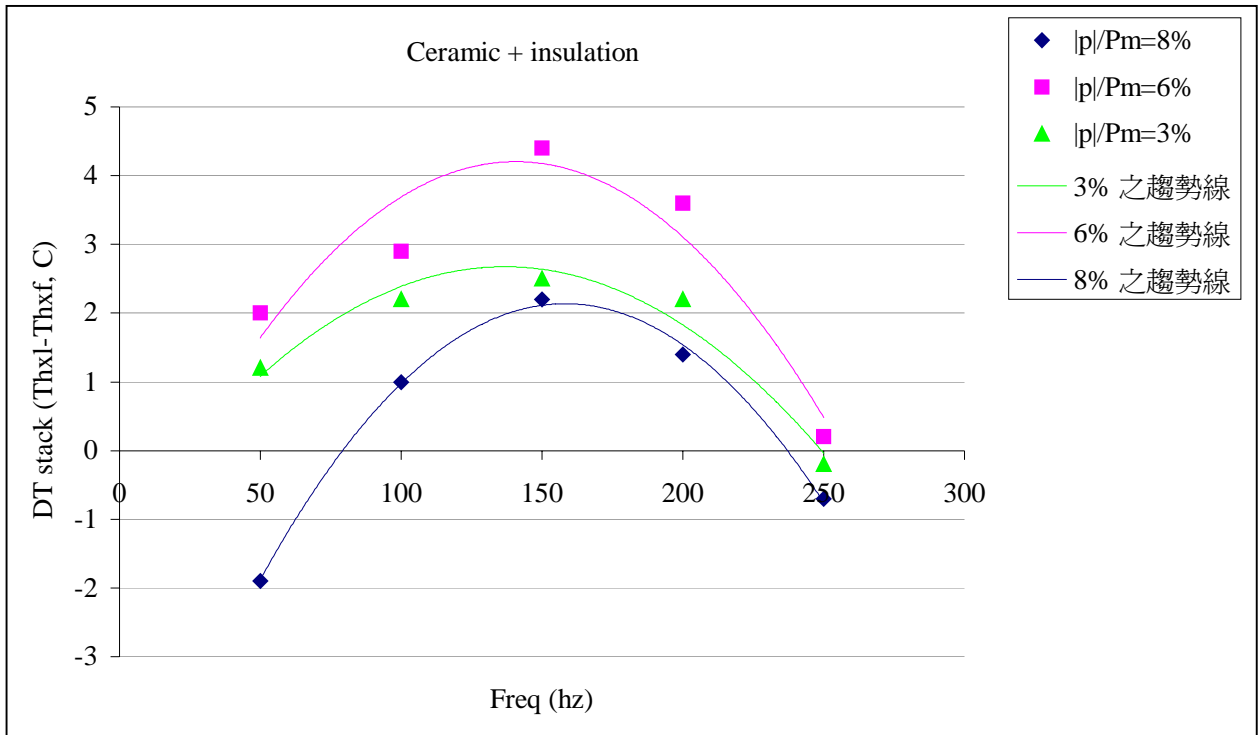


圖 10 陶瓷 stack 之實驗結果

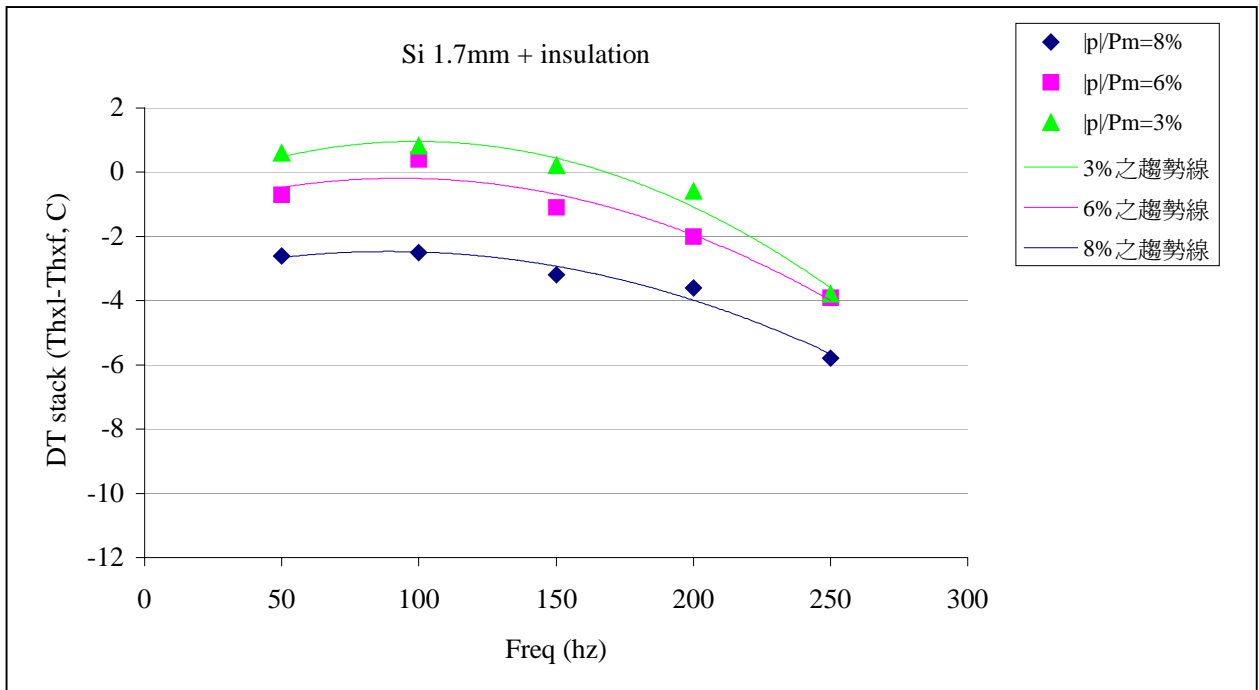


圖 11 矽 stack(1.7mm)之實驗結果

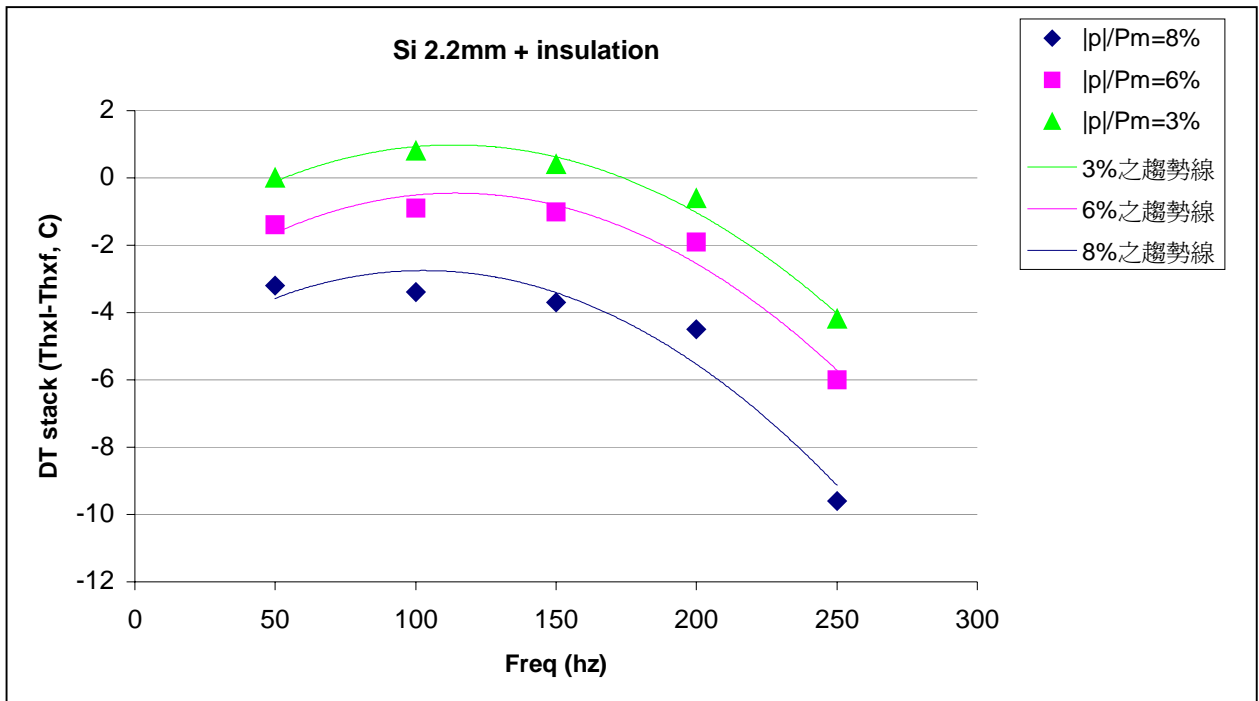


圖 12 矽 stack(2.2mm)之實驗結果

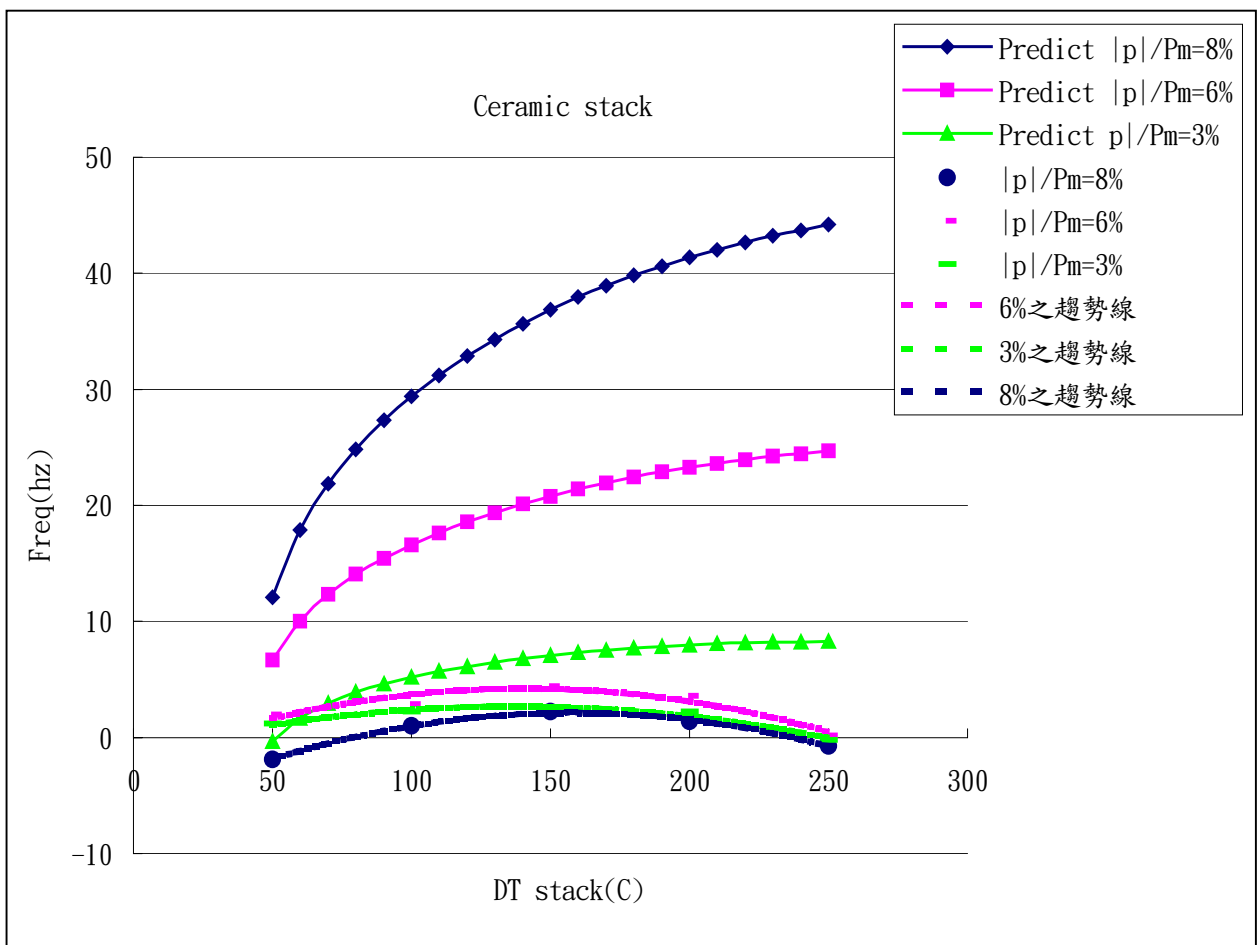


圖 14 實驗值與 DeltaE 預測值比較圖