

## 具加熱晶片之印刷電路板於熱場分析與模型驗證

王栢村<sup>1</sup>、李曜成<sup>1</sup>、謝長鴻<sup>1</sup>、賴逸少<sup>2</sup>、葉昶麟<sup>2</sup>、李英志<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 屏東科技大學機械工程系

<sup>2</sup> 日月光集團高雄廠應力可靠度實驗室

wangbt@mail.npust.edu.tw (聯絡人：王栢村)

### 摘要

具熱效應之印刷電路板(print circuit board, PCB)是值得探討的議題。本文使用配置四顆加熱晶片之 PCB 當成熟源來模擬 PCB 在實際運作過程中所產生之熱場，此加熱晶片之設計為使用直流電壓並可迅速達到高溫，且溫度是隨電壓增加而呈現線性上升。本實驗使用紅外線熱像儀拍攝 PCB 上溫度分佈並搭配有限元素對 PCB 及加熱晶片之溫度分佈進行實驗與分析之驗證。由驗證結果顯是理論分析與實驗驗證結果非常吻合。此外，有無熱效應之 PCB 之模態特性驗證結果也十分良好。經驗證成功之具熱效應 PCB 有限元素模型可進一步延伸至頻譜響應分析，探討隨機振動與熱效應之耦合分析。

**關鍵字：**印刷電路板、加熱晶片、有限元素分析、熱效應

### 1. 前言

當今的電子產品，因製程技術快速提升，都以輕薄短小、功能多元化、高效率及高功率的趨勢發展，相對減少印刷電路板所需佔用的體積，但對印刷電路板所能承受之要求愈趨嚴格，其中最重視的是因高功率電子晶片所導致的高溫破壞，有鑑於此必須先了解印刷電路板受熱效應後之溫度分佈以及熱應力分佈，故本文針對不同熱效應之印刷電路板進行一系列分析及探討。

鄭等人[1]針對 FC-BGA 進行熱阻值的模擬與實驗，實驗採用熱測試晶片，利用晶片內二極體的順向偏壓對溫度之關係來模擬實際封裝體運作時的溫度變化。模擬方面是使用 Flotherm 建構 FC-BGA 模型來模擬實際晶片內部流場的溫度變化。由分析結果得知當晶片功率愈高，溫度愈高，熱阻值會因空氣對流而降低，但晶片溫度卻無明顯的下降，是因為基板與晶片的低熱傳導性導致溫度無法有效的傳導致大氣中；於晶片上黏貼熱擴散板則有效的降低熱阻值，也有助於晶片散熱。余等人[2]對 CiSP 內藏式晶片於室溫且自然對流下的熱流進行分析，由分析結果可發現封裝體內部溫度值與厚度有極大關聯，溫度值會隨厚度增加而增加，CiSP 下表面是藉由錫球將熱傳導至基板上，而 CiSP 上表面則是因自然對流將熱傳導到大氣中；改變基板厚度也可提升 CiSP 之散熱性能，基板厚度愈薄，熱阻值愈低，散熱效能愈高。

黃等人[3-4]運用熱傳—應力耦合分析對封裝晶

片進行功率與溫度耦合循環測試，探討晶片功率開啟順序與純粹溫度循環測試比較錫球接點之可靠度。由分析得知純粹由溫度循環測試之錫球疲勞壽命較長；由兩片晶片不同步開啟所導致的溫度補償效應對錫球的疲勞壽命有明顯延長；而單一晶片以及兩片晶片同步開啟之錫球疲勞壽命大致相同。

黃等人[5]針對裸晶型晶圓級封裝迴焊進行有限元素分析，分析裸晶型晶圓級封裝迴焊於印刷電路板上於加速度循環測試下之疲勞可靠度，並搭配田口法與變異分析探討封裝體結構在溫度疲勞可靠度上的影響。經由有限元素分析加速度循環測試之結果得知凸塊高度、UBM 直徑、凸塊間距和銅墊厚度都是對溫度循環疲勞壽命有極大影響。黃等人[6]針對疊合封裝結構進行溫度循環測試，測試疊合封裝結構之疲勞可靠度。由分析結果發現對疊合封裝溫度循環疲勞可靠度影響最大的控制因子有：VFBGA 基板厚度、晶片厚度及錫球接點高度、SPBGA 晶片厚度及封膠厚度。

許[7]使用加熱片作為外部熱源施加熱效應於 PCB 上之封裝體，觀察加熱片於不同輸入電壓下所產生的熱源於 PCB 上溫度場變化及溫度分佈，並運用有限元素分析進行不同溫度下之溫度場驗證，再將驗證成功之 PCB 於溫度場有限元素模型延伸至熱應力場分析，探討 PCB 上封裝體受熱後的應力分佈情況。由分析結果發現溫度升高時，熱應力值也有相對的提高，且最大應力出現於 PCB 與晶片接合處上，故推斷 PCB 受熱後可能產熱應力破壞之位置為 PCB 與晶片接合處。梁[8]延續許[7]材料參數級實驗結果，針對電路板、封裝體細部的基板、錫球及 Compound 進行溫度場有限元素分析與驗證，由驗證結果可知 PCB 受熱後之熱應力發生於晶片四個角落處。

本次分析，皆使用有限元素套裝軟體 ANSYS 來進行溫度場分析。綜合以上文獻結果，瞭解 PCB 於溫度場之分析與實驗方法，進而歸納本文分析目的如下：

1. 了解四顆加熱晶片之加熱特性，並得知加熱晶片達到穩態溫度所需之時間。
2. 得到 PCB 整體溫度分佈之後，與有限元素模型做溫度場之驗證得到等效於實際印刷電路板溫度分佈之有限元素模型。
3. 由驗證成功之有限元素模型延伸至熱應力場分析，得之印刷電路板受熱應力之分佈情形。

## 2. 印刷電路板於溫度場分析

欲了解印刷電路板與加熱晶片表面溫度分佈，必須先針對加熱晶片進行加熱特性之探討，得知加熱晶片之加熱特性後，再觀察印刷電路板整體溫度達穩態之時間。

### 2.1 實驗方法與步驟

本實驗探討如圖 1 印刷電路板配置四顆加熱晶片(heating ICs)並施加一直流電壓做為發熱源，使其產生一固定溫度之熱源於 PCB 上，探討 PCB 受到一熱效應後之溫度場分佈，並搭配有限元素分析對 PCB 及加熱晶片整體之溫度分佈做一分析與實驗驗證，了解 PCB 上整體溫度分佈。綜合上述說明，歸納本文實驗項目如下：

1. 測試四顆加熱晶片之加熱特性是否一致。
2. 於加熱晶片上規劃量測點，並使用不同電壓施加於加熱晶片，觀察加熱晶片上各量測點之溫度，最後紀錄加熱晶片達到穩態溫度之時間以及印刷電路板整體之溫度分佈情形。
3. 找出四顆加熱晶片之電壓與溫度以及時間與溫度之加熱特性。

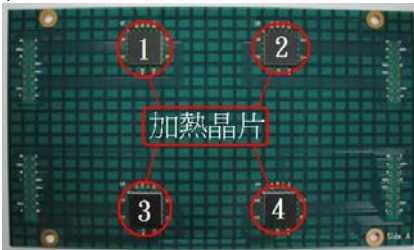


圖 1 PCB 與加熱晶片實際結構圖

綜合上述實項目後，可歸納出實驗所需之方法與步驟如下：

1. 圖 2 為實驗儀器架設，透過電源供應器供給加熱晶片一直流電壓，使加熱晶片產生熱效應；溫度量測儀器是使用紅外線熱像儀，分別量測如圖 3 實驗量測點位置之溫度分佈，以便量測加熱晶片及 PCB 上之溫度分佈。
2. 使用電源供應器供給直流電壓使加熱晶片產生熱源，並使用紅外線熱像儀量測加熱晶片及印刷電路板之溫度變化及分佈，也同步記錄時間，直到晶片與印刷電路板之溫度分佈達到穩態。
3. 得知加熱晶片於固定電壓下之溫度變化後，接著進行不同輸入電壓於加熱晶片，探討不同的輸入電壓下加熱晶片之加熱特性以及印刷電路板上之溫度分佈情況
4. 由步驟 2 及步驟 3 可以得知加熱晶片在不同電壓下時間與溫度之加熱特性。
5. 完成加熱晶片之加熱特性分析及溫度分佈後，接著進行具熱效應之印刷電路板有限元素分析，將理論分析所得到的溫度場結果與實際實驗做比較驗證，確認理論分析所得之印刷電路板整體溫度分佈等效於實驗所量測到之印刷電路板整體溫度分佈，也可將其延伸至熱應力分析，探討印刷電路板受熱應力之分佈情形。

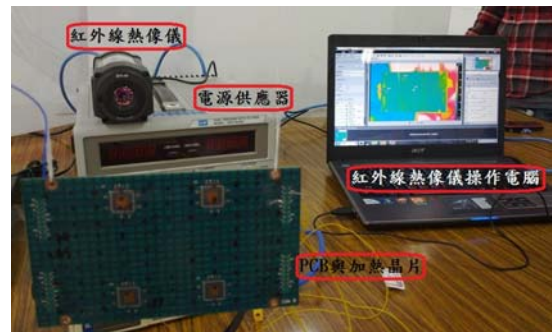


圖 2 實驗儀器架設圖

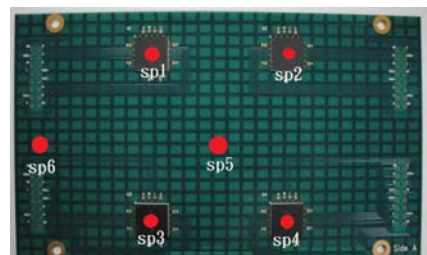


圖 3 實驗量測點示意圖

### 2.2 加熱晶片特性分析

經由前節之實驗步驟所規劃之量測點，使用紅外線熱像儀拍攝加熱晶片於不同輸入電壓下得到加熱晶片及印刷電路板整體表面溫度變化及分佈，以及整體溫度達穩態所需時間。由實驗量測所得加熱晶片及印刷電路板之溫度變化，綜合討論如下：

1. 表 1 為各量測點於不同輸入電壓下對應溫度之關係表，由表 1 中可以觀察到分別輸入 3.5 伏特、4.5 伏特及 5.5 伏特電壓下，加熱晶片溫度達穩態所需時間分別為 240 秒、285 秒及 300 秒。

表 1 各量測點達溫態時間對應電壓之關係表

電壓 \ 量測點	3.5V		4.5V		5.5V	
	Time (sec)	Temp (°C)	Time (sec)	Temp (°C)	Time (sec)	Temp (°C)
1 號晶片	240	49.3	285	62.2	300	78.5
2 號晶片	240	49.5	285	62.5	300	78.8
3 號晶片	225	47	240	58.8	270	73.6
4 號晶片	240	49	285	62.2	300	78.5
PCB 中央	270	34	300	38	315	42.4
PCB 邊緣	375	30.3	360	32.5	330	34.6

2. 表 2 為加熱晶片之加熱特性曲線總表，可以觀察到四條特性曲線的趨勢一致，然而所對應溫度及達穩態溫度所需時間如表 1 所示。

表 2 加熱晶片之加熱特性曲線總表

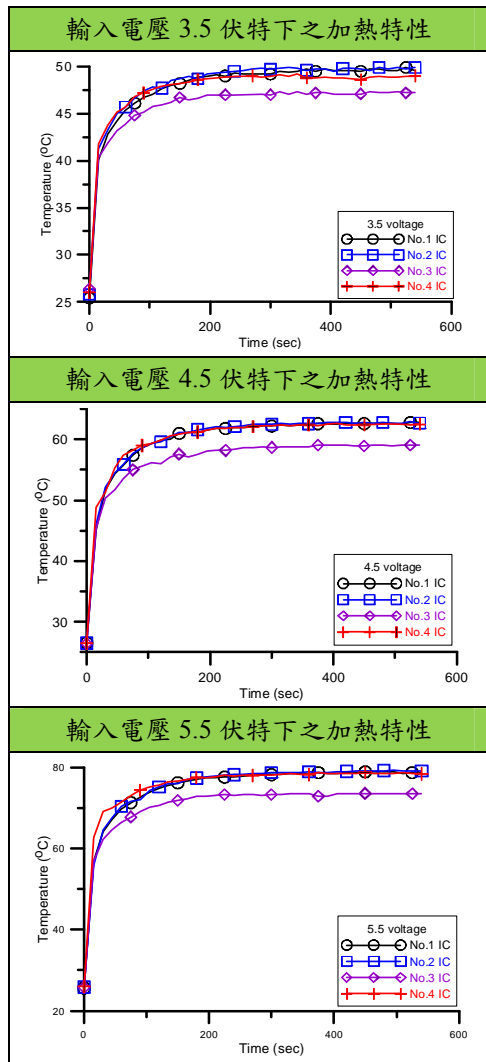
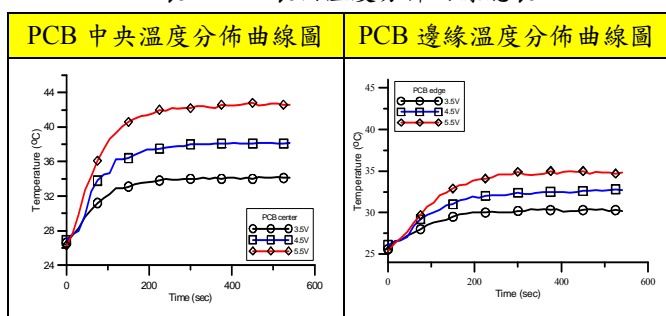


表 3 PCB 表面溫度分佈曲線總表



3. 表 3 為 PCB 表面溫度分佈曲線總表，分別為 PCB 中央溫度分佈曲線圖及 PCB 邊緣溫度分佈曲線圖，分別輸入 3.5 伏特、4.5 伏特及 5.5 伏特電壓下，印刷電路板表面溫度達穩態所需時間分別為 375 秒、360 秒及 330 秒。對應至表 1 的 PCB 中央，所對應溫度分別是 34°C、38°C 及 42.4°C；對應至表 1 的 PCB 邊緣，所對應之溫度分別為

30.3°C、32.5°C 及 34.6°C。

4. 圖 4 為加熱晶片電壓-溫度特性圖，由圖中可以觀察到四顆加熱晶片的加熱特性是呈現線性上升的，不過可以看到 3 號加熱晶片的加熱特性略低於其他三顆加熱晶片。

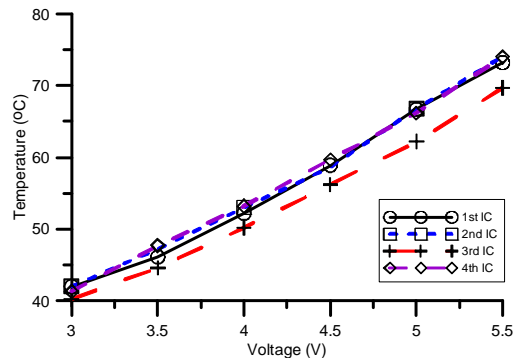


圖 4 四顆加熱晶片電壓-溫度特性圖

### 3. 刷電路板於溫度場驗證與熱應力分析

本節利用有限元素分析進行 PCB 於自由邊界受熱效應之溫度場分析，設定固定溫度於加熱晶片，並進一步討論 PCB 於自由邊界之溫度分佈，再經由溫度場分析結果延伸至熱應力場分析探討印刷電路板溫度及熱應力分佈情形。表 4 為電路板及封裝體於有限元素分析之材料參數設定。

#### 1.1 PCB 之有限元素模型

考慮 PCB 於自由邊界受熱效應之溫度場分析，透過建立溫度場分析得到 PCB 溫度分佈，由溫度場分析得到的結果代入熱應力場分析得 PCB 之熱變形及熱應力，整體模型如圖 5 分別為 PCB 與加熱晶片，建構有限元素模型，PCB 及加熱晶片皆選用使用線性立方體熱傳元素(Solid70)，並設定 PCB 熱膨脹係數  $\alpha=16 \times 10^{-6}$  ( $1/^{\circ}\text{k}$ )，熱傳導係數為  $19.27(\text{W}/\text{m} \times ^{\circ}\text{k})$ ；加熱晶片熱膨脹係數  $\alpha=9.23 \times 10^{-6}$  ( $1/^{\circ}\text{k}$ )，熱傳導係數為  $0.84(\text{W}/\text{m} \times ^{\circ}\text{k})$ 。元素分割皆使用 mapped mesh 將模型分割為 10564 元素，21232 個節點。進行溫度場分析時，假設加熱晶片為固定溫度，故於加熱晶片上設定所有節點為穩態溫度，而 PCB 表面均為對流邊界，需設定週界溫度  $27^{\circ}\text{C}$ 、對流係數  $h_f=48(\text{W}/\text{m}^2 \times ^{\circ}\text{k})$ 。在熱負荷條件設定方面，PCB 除了加熱晶片設定固定溫度之外，並無其他熱源產生，所以不用設定定熱產生率或熱通量。

由完成 PCB 於自由邊界溫度場分析後，經由溫度場分析結果再延伸至熱應力場分析，所建構熱應力場有限元素模型之元素選用需注意的是因熱傳溫度場分析時印刷電路板使用線性立方體熱傳元素(Solid70)，於熱應力場分析時須轉換元素為線性立方體元素(Solid45)。在熱應力場分析時，以全自由邊界模擬無須設定任何位移限制。最後，進行熱應力場分析，由溫度場分析結果帶入節點對應溫度值，即可分析熱變形及熱應力。



表 4 材料參數總表

材料參數	電路板	封裝體
楊氏係數 (N/m <sup>2</sup> )	$E_x = 15.16 \times 10^9$ $E_y = 14.92 \times 10^9$ $E_z = 10.37 \times 10^9$	$E = 18.25 \times 10^9$
剪力係數 (N/m <sup>2</sup> )	$G_{xy} = 5.92 \times 10^9$ $G_{yz} = 5.02 \times 10^9$ $G_{xz} = 3.92 \times 10^9$	$G = 7.42 \times 10^9$
蒲松比	$\nu_{xy} = 0.36$ $\nu_{xz} = 0.32$ $\nu_{yz} = 0.25$	0.23
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2165	3125
熱膨脹係數 (1/°k)	$16 \times 10^{-6}$	$9.23 \times 10^{-6}$
熱傳導係數 (W/m × °k)	19.27	0.84

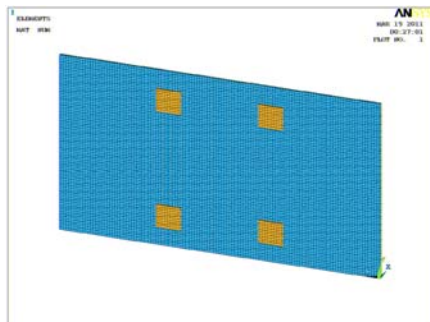
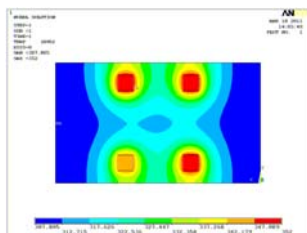
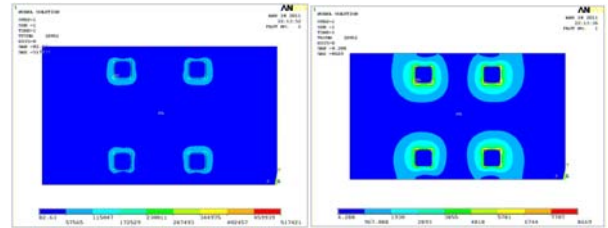


圖 5 PCB 及加熱晶片有限元素模型示意圖

由上述所定義完成 PCB 有限元素模型，可以探討 PCB 於自由邊界溫度場分析進行討論，圖 6 為加熱晶片施加 3.5 伏特時自由邊界於溫度場分析，由圖 6(a) 可以觀察到溫度分佈，而溫度最低的地方則是出現在 PCB 左右兩邊；再由圖 6(b)、(c) 熱通量與熱梯度分佈圖，可以觀察到四個加熱晶片為熱源中心，向 PCB 四周傳遞。



(a) 溫度向量總量分佈圖



(b) 熱通量向量總量分佈圖 (c) 熱梯度向量總量分佈圖  
圖 6 PCB 於溫度場之各分佈圖(3.5V)

### 1.2 PCB 於溫度場之有限元素模型之模型驗證

本節結合溫度場有限元素分析及實驗分析所得之溫度分佈，有限元素模擬印刷電路板上加熱晶片為穩態溫度並進行溫度場分析，實驗方面運用不同輸入電壓施加於加熱晶片，探討不同輸入電壓下所產生之溫度及溫度分佈，最後結合有限元素分析及實驗分析之結果進行驗證。本節綜合討論如下：

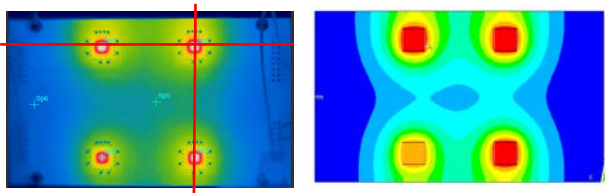
表 5 PCB 於不同時間下之實際溫度分佈總表

(a) 未加熱	(b) 45 秒
(c) 150 秒	(d) 300 秒
(e) 450 秒	(f) 540 秒

1. 表 5 為實驗量測得 3.5 伏特時 PCB 於不同時間下之溫度分佈總表，由表 5 可觀察到實際 PCB 溫度分佈情形。
2. 圖 7 為有限元素分析及實驗分析所得之 PCB 溫度分佈圖，兩者溫度分佈皆以加熱晶片為中心向 PCB 四周傳遞。
3. 表 6 為實驗與分析之溫度分佈曲線圖，分別取 PCB 縱向及橫向之溫度分佈進行比對，由表 6

中可以觀察到實驗及分析之溫度分佈曲線有相同的趨勢，代表在溫度場驗證之結果有相當的可靠度。

4. 表 7 為無熱效應之 PCB 於自由邊界自然頻率比對表，由表 7 中可以觀察到理論分析與實驗分析所得到的頻率誤差皆在 5% 以內，代表 PCB 在無熱效應下之材料參數有相當的可信度。由無熱效應驗證成功之 PCB 延伸至表 8 輸入電壓 5.5 伏特下之 PCB 於自由邊界自然頻率比對表，由表 8 中可以發現絕多數的頻率誤差皆在 5% 以內，也代表 PCB 於熱效應中之模型驗證有相當的可靠度。



(a) 實驗量測之溫度分佈 (b) 模擬分析之溫度分佈  
圖 7 PCB 溫度分佈比對圖(3.5 伏特)

表 6 實驗與分析之溫度分佈曲線圖

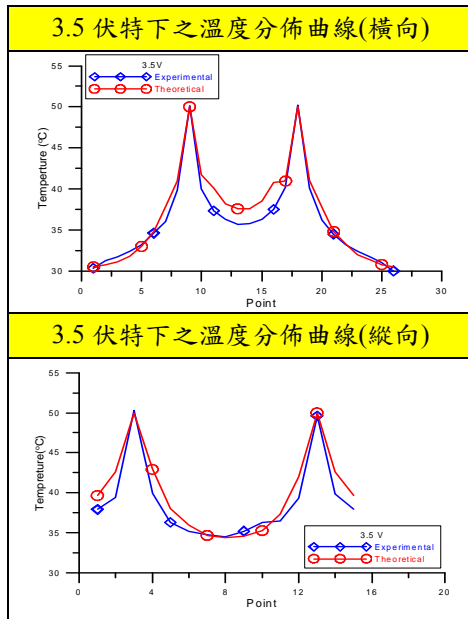


表 7 無熱效應之 PCB 於自由邊界自然頻率比對表

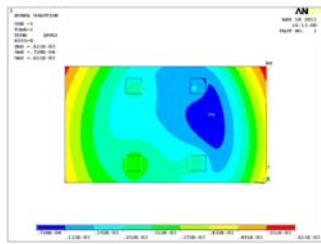
理論頻率		實驗頻率		ERR (%)
mode	Freq (Hz)	mode	Freq (Hz)	
F-01	136.46	E-01	137.66	-0.87
F-02	165.61	E-02	160.15	3.41
F-03	320.29	E-03	322.56	-0.70
F-04	434.59	—	—	—
F-05	457.32	E-04	466.45	-1.96
F-06	541.40	E-05	561.16	-3.52
F-07	648.78	E-06	622.30	4.26
F-08	822.45	E-07	798.02	3.06
F-09	861.47	E-08	879.89	-2.93

表 8 輸入電壓 5.5 伏特下之 PCB 於自由邊界自然頻率比對表

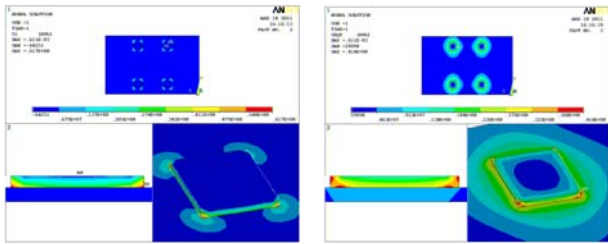
理論頻率		實驗頻率		ERR (%)
mode	Freq (Hz)	mode	Freq (Hz)	
F-01	132.40	E-01	131.38	0.77
F-02	160.30	E-02	153.47	4.45
F-03	314.25	E-03	311.90	0.75
F-04	430.01	—	—	—
F-05	453.13	E-04	463.91	-2.32
F-06	541.09	E-05	558.89	-3.18
F-07	642.21	E-06	611.93	4.95
F-08	824.82	E-07	778.15	5.99
F-09	856.30	E-08	874.75	-2.11

### 3.3 具熱效應之 PCB 於熱應力場分析

本節探討印刷電路板受熱後之熱應力分佈情形，經由溫度場驗證成功之等效有限元素模型進行分析，探討不同溫度場所產生之熱應力分佈情形。圖 8 為印刷電路板熱應力分佈圖，由圖中觀察到麥西斯應力及最大主應力皆出現於印刷電路板與晶片接合之四個角落處；表 9 為不同輸入電壓下之應力總表，分別於不同輸入電壓下所產生熱效應之熱應力總表，由表 9 中可以觀察到隨輸入電壓上升，熱應力值也隨溫度上升。



(a) PCB 之熱變形圖



(b) 最大主應力分佈圖 (c) 麥西斯應力分佈圖

圖 8 印刷電路板熱應力分佈圖

表 9 不同輸入電壓下之應力總表

電壓	3.5 伏特	4.5 伏特	5.5 伏特
熱變型與應力			
$\delta_{th}$ (m)	$0.61 \times 10^{-3}$	$0.59 \times 10^{-3}$	$0.61 \times 10^{-3}$
$\sigma_1$ (MPa)	61.7	63.8	66.3
$\sigma_{eqv}$ (MPa)	41.4	42.9	44.6

#### 4. 結論

本文探討印刷電路板配置四顆加熱晶片並施加直流電壓使其產生固定溫度，探討印刷電路板受到熱效應後之溫度分佈，並搭配有限元素分析對印刷電路板及加熱晶片進行溫度場之模型驗證，瞭解印刷電路板整體溫度分佈再延伸至熱應力場分析。綜合以上討論，本文歸納結論如下：

1. 加熱晶片輸入不同直流電壓下之加熱特性，由實驗中可得知加熱晶片之溫升與輸入電流成正比，電壓愈高，溫度也愈高，而晶片達到穩態時間約為 300 秒。
2. 由實驗結果得知加熱晶片加熱特性呈現線性上升，電壓提高 1V，溫度則升高 12°C 到 15°C，印刷電路板於不同輸入電壓下之溫度分佈，印刷電路板中央達穩態時間約為 375 秒，並搭配有限元素分析印刷電路板之溫度分佈與實驗結果趨勢相當一致。

4. 由驗證成功之溫度場有限元素模型延伸至熱應力場分析，由分析中發現熱應力集中於晶片與印刷電路板接合的四個角落處，故推測可能產生熱應力破壞之位置為晶片與印刷電路板接合的四個角落處。
5. 經驗證成功具熱場之 PCB 有限元素模型可進一步延伸至頻譜響應分析，探討隨機振動與熱效應之耦合分析。

#### 5. 參考文獻

1. 鄭宗杰、余致廣、劉君愷、蔡伯晨、鄭明欣，FC-PBGA 之熱流模擬簡介，奈米通訊，第 4 期，第 11 卷，第 17-21 頁，2004
2. 余致廣、鄭宗杰，內藏式晶片封裝之熱傳研究，奈米通訊，第 3 期，第 12 卷，第 30-33 頁，2005
3. 黃東鴻、李長祺、賴逸少、王靜君，疊合封裝結構受功率與溫度耦合循環測試之熱傳特性與疲勞可靠度評估，簡訊專文，10 月號，第 42 號，第 4-8 頁，2007
4. 黃東鴻、李長祺、賴逸少、王靜君，堆疊晶片尺寸封裝受功率與溫度耦合循環測試的熱傳特性與疲勞可靠度表現，中華民國力學學會第三十屆全國力學會議，彰化，2006
5. 黃東鴻、賴逸少，裸晶型晶圓級封裝溫度循環疲勞可靠度之最佳化設計，中國機械工程學會第二十一屆全國學術研討會論文集，高雄，2004
6. 黃東鴻、王靜君、賴逸少，疊合封裝結構溫度循環疲勞可靠度之最佳化設計，中華民國力學學會第二十九屆全國力學會議，新竹，2005
7. 許富翔，具封裝體 PCB 於熱效應及振動複合試驗之響應預測，碩士論文，國立屏東科技大學，屏東，2009
8. 梁秀瑋，隨機振動與熱效應複合負載下之封裝體錫球應力預測分析，碩士論文，國立屏東科技大學，屏東，2010

## **Thermal Analysis and Model Verification of PCB with Heating ICs**

Bor-Tsuen Wang<sup>1</sup>, Yau-Chang Lee<sup>1</sup>,  
Chang-Hung Hsieh<sup>1</sup>, Yi-Shao Lai<sup>2</sup>, Chang-Lin  
Yeh<sup>2</sup>, Ying-Chih Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering  
National Pingtung University of Science and  
Technology

<sup>2</sup>ASE GROUP Kaohsiung  
Stress-Reliability Lab

### **Abstract**

The thermal effect of printed circuit board (PCB) is of interest. This work uses four heating ICs mounted on the PCB as heating sources for emulating the PCB heated process during operation. The heating ICs are designed to arise high temperature quickly by applying direct current. The heating temperatures of ICs are calibrated and shown about linear dependent on the applied voltages. The temperature distributions on the PCB due to heating are studied by finite element analysis (FEA) and verified with experimental measurement by digital infrared thermography (DIT). The FE model of PCB with four heating ICs is constructed and performed thermal field analysis. The temperature distribution over the PCB is analyzed and shown very good agreement with experiments. In addition, the modal properties of PCB with and without heating are shown to calibrate the FE model as well. The thermal stress of PCB is also presented. The validated FE model of PCB with heating effect can be adopted for further analysis such as spectrum response prediction in accordance with random vibration test with coupling thermal effect.

**Keywords** : Pcb, Heating Ics, Finite Element Analysis,  
Thermal Effect