

行政院國科會專題計劃
晶圓暨覆晶構裝應力暨可靠度之研究 (2/3)
NSC 90-2212-E-002-190
執行期間：90年8月1日至91年7月31日
計劃主持人：吳恩柏
執行單位：國立臺灣大學應用力學研究所
計劃參與人員：陳志松、蔡怡庭、陳守龍

摘要

塑封球柵陣列構裝在製程中必須歷經多次高溫烘烤，而在迴溫表面黏著過程中，構裝本體與電路板之間的平面度就顯得格外的重要。本文將先介紹此種構裝方式之外型結構和相關製程，接著說明相移陰影疊紋量測系統之裝置與實驗步驟，由實驗結果加上有限元素分析模型，模擬分析比對在不同溫度的翹曲行為，作為構裝設計最佳化的準則。

關鍵字：相移陰影疊紋量測系統，翹曲，塑封球柵陣列構裝

Abstract

In manufacture process, PBGA (Plastic Ball Grid Array) packages must go through high temperature baking for several times. The coplanarity between package body and circuit board plays an important key point in reflow process for surface mounting. In this paper, we begin with the introduction of the appearance, structure and the related process of PBGA packages and then illustrate the setup and experiment steps of the phase-stepping shadow moiré. From the experiment results and finite element analysis, a better understanding of initial warpage and warpage behavior during reflow process can be achieved and then could be used to modify the manufacture process parameter and optimize the package design during product design stage.

Key Word : shadow moiré, phase stepping method, plastic ball grid array

緒論

針柵陣列 (Pin Grid Array) 構裝是最早將構裝側邊引角改在底部的平面陣列(Area Array)構裝方式。優點在於此種構裝方式在一定面積內之接腳數多、散熱良好、插槽式可更換；但其缺點為佔用空間且陶瓷基板成本較貴，適用於高價位產品。如：中央處理器 (Central Processing Unit, CPU)等。

為節省空間，於是後人便發展出以錫球(Solder Ball)代替針角(Pin)的產品-球柵陣列(Ball Grid Array)構裝。以表面黏著技術將構裝體固定於印刷電路板上，更有效利用印刷電路板的空間。

為降低成本，便發展出BT(Bismaleimide Triazine)基板供選擇，依基板材料的不同可區分為陶瓷球柵陣列(Ceramic Ball Grid Array, CBGA)與塑封球柵陣列(Plastic Ball Grid Array, PBGA)。前者具有高剛性與低熱膨脹係數，多用於航空、太空等精密儀器。

塑封球柵陣列構裝除可更換性之外，保有了原先針柵陣列構裝之優點，加上空間的有效利用及成本的降低，目前已大量的應用於一般的電子產品上。故本文將以此構裝為主題作一探討。

在構裝產品平面度問題的研究中，構裝體在製程中因高溫加熱而產生的翹曲問題最受到重視。翹曲變形產生之可能因素很多，必須確切的發現問題的原因，才能改善構裝體翹曲的情形。

近年來探討半導體構裝翹曲的研究方法，除了以有限元素分析模型來做預測外，還有建立實驗量測系統作分析。故本文中將建立以非破壞、非接觸性、高精度、高敏感性和直接量測全場表面的位移場，與數值模擬作分析比對，去探討電子構裝受溫所發生的行為變化。

應用光學方式量測電子構裝並進行力學分析方面的研究頗多，如 Ume 等人在架構陰影疊紋量測系統，可即時量測印刷電路板(PCB, PWB)在模擬製程升溫過程中的翹曲行為變化。他們的量測系統並無使用相移技術(Phase-Stepping or Phase-Shifting)，且對量測時試片的剛體位移效應無深入探討[1]。1998 年 Y. Guo 與 S. Liu 在曾以疊紋干涉術量測 CSP 的面內位移，並引入相移技術增加量測的精度[2]。1999 年本實驗室黃昭彰曾以相移陰影疊紋量測系統量測 PBGA 與 MCP-BGA 在模擬製程升溫過程中的翹曲行為變化，並以引用相移技術、數位影像量化處理技術與最小平方方法消除剛體旋轉效應[3]。

應用有限元素法預測電子構裝之力學分析方面的研究頗多，1996 年黃明哲與陳志中以有限元素分析模型模擬二維球型陣列電子構裝各部份所受之熱應力[4]。1997 年李世璋等人以有限元素分析模型預測塑封球柵陣列構裝在高溫下的翹曲變化[5]。2000 年陳文華、江國寧與蔡穎鋒以有限元素分析模型輔助設計塑封球柵陣列構裝在高溫下的翹曲變化[6]。

本文主要的目的在建立相移陰影疊紋即時量測系統，將之應用在塑封球柵陣列構裝表面翹曲的量測上，探討構裝體在溫度效應下的行為變化，並與有限元素模型作模擬比對，進而了解與分析構裝體材料組成之特性。

實驗原理與方法

相移陰影疊紋量測系統

本文中之量測主題為面外變形量(翹曲量)很小的塑封球柵陣列構裝，因此適合使用平面度量測的相移陰影疊紋。

將一組重複出現的亮暗條紋互相疊合在一起，其交疊出來的紋路即是疊紋。將一片光柵玻璃置於待測物表面上方，再將一束平行光照射在玻璃上，此時在物體表面會形成條紋陰影，與光柵玻璃的條紋，會交織成類似等高線的疊紋，此即是陰影疊紋，如圖 1 所示。其條紋幾何關係如圖 2 所示，其關係式如下：

$$w = \frac{Np}{\tan \alpha + \tan \beta} \quad (1)$$

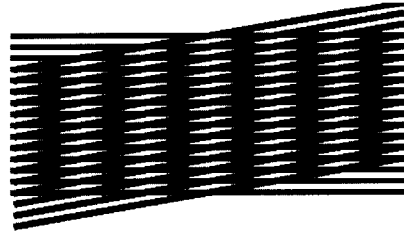


圖 1 疊紋

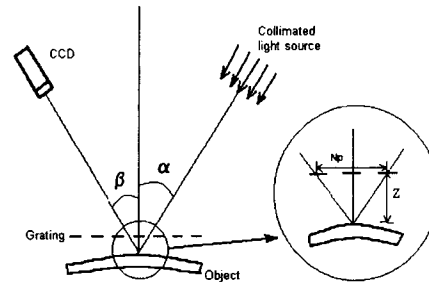


圖 2 陰影疊紋法實驗架設示意圖

其中 w 為面外位移值 (Out-of-plane displacement)， N 為條紋序號 (Fringe order)， p 為光柵玻璃的條紋密度 (pitch)， α 為入射光束與光柵玻璃法線之夾角， β 為 CCD 相機方向與光柵玻璃法線之夾角。陰影疊紋條紋影像的光強分佈可以用一個近似餘弦的式子表示：

$$I(x, y) = B(x, y) + A \cos(\phi(x, y)) \quad (2)$$

其中 (x, y) 是影像中每一個像素的座標， $I(x, y)$ 表示疊紋影像的光強分佈， $B(x, y)$ 表示背景光強， A 表示餘弦振幅， $\phi(x, y)$ 則是每一個點的相位值。

當考慮得到三個相位相差 $2\pi/3$ 的影像，關係式如下所示：

$$\begin{aligned} I_1(x, y) &= B(x, y) + A \cos(\phi(x, y)) \\ I_2(x, y) &= B(x, y) + A \cos\left(\phi(x, y) - \frac{2\pi}{3}\right) \\ I_3(x, y) &= B(x, y) + A \cos\left(\phi(x, y) - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

我們可以解得其相位為

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{\sqrt{3}(I_2 - I_3)}{2I_1 - I_2 - I_3} \quad (4)$$

可知當光柵玻璃上移一個 pitch 的距離，則光柵

陰影亦會隨之移動一個 pitch 的距離。由圖 3(a)-(c) 所示為一 PBGA 三步相移法的影像圖形；而圖 3(d) 與 (a) 的影像相位剛好差一個週期 2π 。

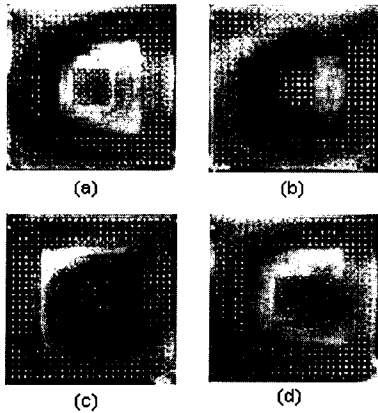


圖 3 PBGA 三步相移陰影疊紋影像

利用相位資訊即可提高陰影疊紋的解析度，此即相移陰影疊紋技術。圖 4(a)-(e) 為數位影像量化處理示意圖，圖 4(a) 為圖 3(a)-(c) 利用中值濾波與式 (3)-(4) 所計算之相位圖 (Phase Map)；圖 4(b) 為相位圖灰階取閾值二值化，再行邊緣細線化結果；圖 4(c) 為其細線條紋定序號取點所成之三維曲面圖；圖 4(d) 為利用最小平方法取切平面消除剛體旋轉效應之三維曲面圖；而圖 4(e) 為其二維灰階等高線圖 [7]。

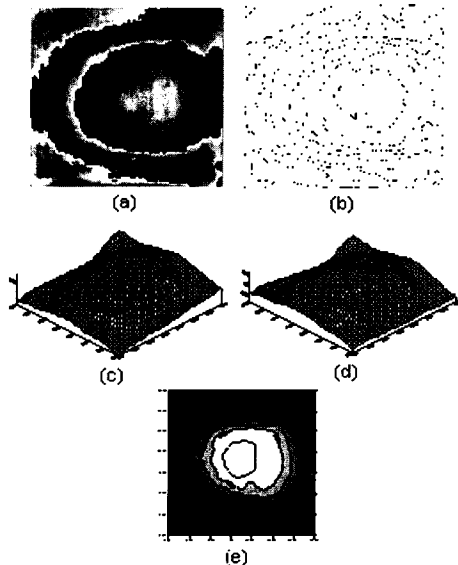


圖 4 陰影疊紋影像量化圖

本文所探討之塑封球柵陣列構裝之外形視圖如圖 5 所示，而其尺寸大小與內部材料組成如圖 6 所

示，主要由晶片 (Chip)、黏膠 (Adhesive)、BT (Bismaleimide Triazine, BT) 基板、金線 (Gold Wire)、鑄模灌酯 (Molding Compound) 與錫球 (Solder Ball) 所組成，其中 BT 基板組成以 BT Resin 為主，表面覆有銅箔 (Copper Foil) 線路與綠漆 (Solder Mask)。製造過程如圖 7 所示，步驟如下 [8]：

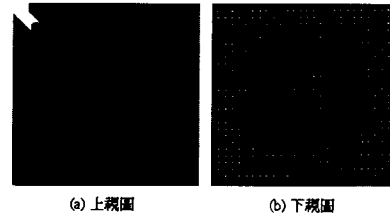


圖 5 塑封球柵陣列構裝之視圖

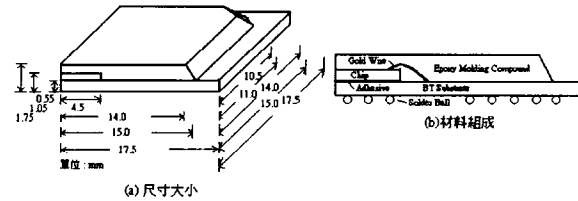


圖 6 PBGA 之尺寸大小與材料組成

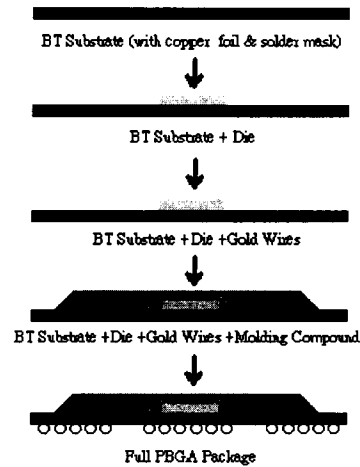


圖 7 PBGA 製程圖

1. 150°C 晶片與 BT 基板之結合

晶片以黏膠材料黏著於 BT 基板上，在 150°C 下通常需歷時 4hr 烘烤 (Postcure) 以使高分子材料固化，此目的在於固定晶片。

2. 打金線

在高溫下，以熱音波 (Thermosonic) 方法將金線焊

接於焊墊上，此目的在於晶片與外界之訊號傳遞。

3. 175°C 鑄模灌酯

在 175°C 下，環氧樹脂利用轉移成形法 (Transfer-Molded) 將晶片與金線密封在樹脂中，此過程通常需歷時 4~6hr 以使高分子材料固化，此目的在於保護晶片與金線，免於外界環境如濕氣進入所產生的破壞。

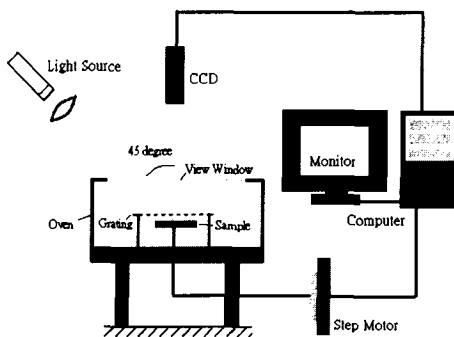
4. 植球與鐸錫

在最高溫 220~230°C 下，以紅外線加溫 (IR Reflow) 使錫球熔接於基板的焊墊 (Solder Pad) 上，此目的在於將經由金線和銅箔線路的訊號傳遞至電路板。

完成以上步驟後，即運送至主機板工廠，以表面黏著技術被黏著於印刷電路板 (PCB, Printed Circuit Board) 上。

塑封球柵陣列構裝在製程中必須歷經多次高溫烘烤，由於材料組成為一上下不對稱結構，加上各材料間之熱膨脹係數 (Coefficient of Thermal Expansion, CTE) 的差異，產生不同的伸縮量，造成構裝體翹曲變形或脫層等行為，使表面黏著製程良率降低。

實驗裝置如圖 4 所示。在進行實驗之前，為增加量測表面對光的反射率，也就是增加疊紋幾何干涉的對比，在試件表面噴上一層薄白漆。



為求量測結果的可靠性與代表性，我們使用變異數法來選取試片作迴溫量測，定義如圖 9 所示，首先選取 W0、W1、W2、W3 及 W4 五組獨立變數 (a, b, c, d, e)，接著求出各組試片在 W0、W1、W2、W3 及 W4 的五組平均值 (i, j, k, l, m, n)，即相關變數，最後利用兩兩間

的差值平方和除以組數，即為變異數，其運算式如下所示：

$$V(\text{Variance}) = \frac{(a-i)^2 + (b-j)^2 + (c-k)^2 + (d-l)^2 + (e-n)^2}{5} \quad (5)$$

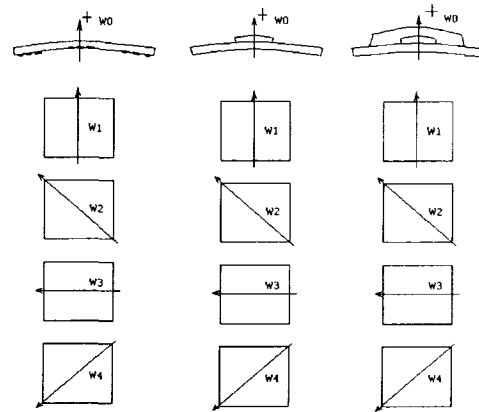


圖 9 PBGA 各組試片翹曲值定義圖

試片之準備

本實驗使用尚未植球試片的 BT 基板表面作為量測面，分別量測其在溫度為 25、100、150、180、200 及 225°C 時的翹曲值。選擇三組試片作為量測：

第一組：BT 基板

共有 4 片，目的為觀察在升溫歷程的翹曲變化，了解材料組成的物理現象。

第二組：BT 基板+晶片

共有十三片，目的為觀察在升溫歷程的翹曲變化，了解材料組成的物理現象與製程溫度點的關係。

第三組：BT 基板+晶片+打線+鑄模灌酯

有三列 (Trip)，每列五片共有十五片，目的為觀察在升溫歷程的翹曲變化，了解材料組成的物理現象與製程溫度點的關係，並藉由 24 小時 125°C 的烘烤，觀察 BT 基板因吸濕效應所造成的影響。

實驗結果與討論

為解釋實驗量測結果的物理現象，在此我們引入了材料常數如表 1 所示 [9]。

第一組：BT 基板

25°C 室溫下之量測結果如圖 10 所示，由量測面觀察其翹曲方向為凹，原因可能為強化纖維、銅箔線

路與綠漆所組成的 BT 基板幾何上下排列不對稱而產生。且各試片間的一致性很低，原因可能與製程步驟先後秩序有關。實驗的結果可能會影響到往後各組間翹曲的不一致性。

	CTE (ppm/°C)	Young's Modulus (Gpa)	Poisson' Ratio
Chip (Die)	2.8	131	0.3
EMC	14.0	16	0.25
BT Substrate	16.2 (x,y) 52.0 (z)	26 (x,y) 11 (z)	0.39 (xz,yz) 0.11 (xy)

表 1 材料性質表

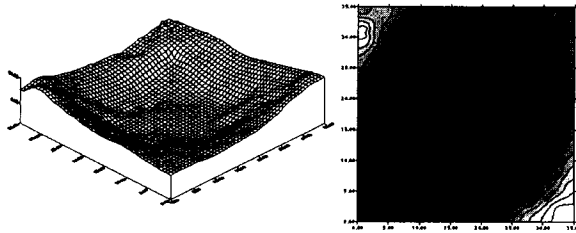


圖 10 第一組試片室溫下之量測結果

選取變異數最小之試片三作為迴溫量測，其結果如圖 11 所示，當溫度為 100°C→180°C 時，其翹曲值漸漸變大，可能與綠漆過玻璃轉化溫度(Tg)有關；當溫度為 180°C→200°C 時，其翹曲值漸漸變小。在溫度為 180°C 時有一極大值，其原因可能與 BT 基板內樹脂過玻璃轉化溫度後，樹脂剛性變弱且熱膨脹係數變大，產生翹曲變化反向。但翹曲值變化不大且略有不對稱，其原因可能與 BT 基板的組成以樹脂為主有關，加上強化纖維、銅箔線路及綠漆的排列不對稱及製程不完美所產生。

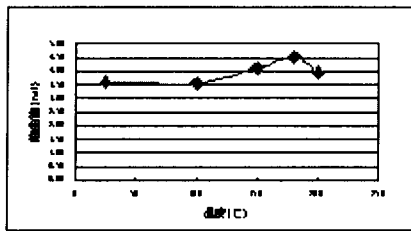


圖 11 第一組試片迴溫過程之量測結果

第二組：BT 基板+晶片

25°C 室溫下之量測結果如圖 12 所示，由量測面見其圖形為凹，其原因可由各材料間熱膨脹係數不匹配來解釋，在 150°C 晶片與 BT 基板結合時，因黏膠所佔的比例非常少可略，假設各材料間無應力產生不發生翹曲行為，待其冷卻至室溫時，由於 BT 基板的熱

膨脹係數大於晶片，因此產生向 BT 基板之凹形彎曲。

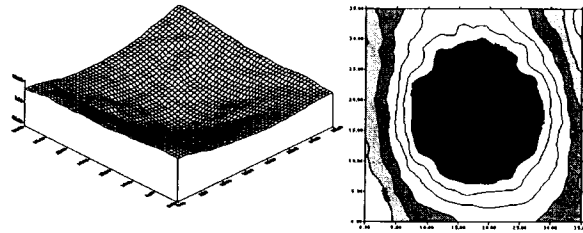


圖 12 第二組試片室溫下之量測結果

選取變異數最低的試片 2-2 與任一試片 2-1 作迴溫量測實驗結果如圖 13 所示，25°C→150°C 時，其翹曲值漸漸變小略成一線性變化，由於 BT 基板的熱膨脹係數大於晶片所致；當溫度為 150°C→225°C 時，其翹曲值幾乎保持不變。在溫度為 150°C 時有一轉折點，其原因可由第一組實驗結果來解釋，因 BT 基板成凸形變化導致翹曲值未能以線性減小。

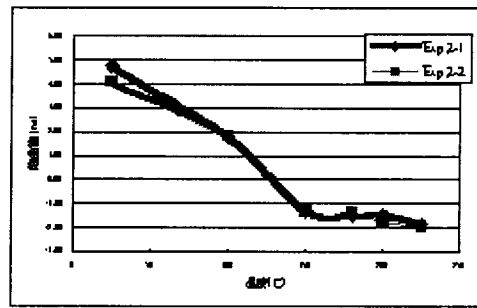


圖 13 第二組試片迴溫過程之量測結果

第三組：BT 基板+晶片+打線+鑄模灌酯

除去 BT 基板水汽烘烤前後 25°C 室溫下之量測結果如圖 14 所示，發現翹曲值除試片 1-3 外，其餘皆比烘烤前為小，原因為試片歷經烘烤過程中，逐漸將 BT 基板內部的水汽蒸發出來，使得 BT 基板的體積收縮，造成翹曲值變小。

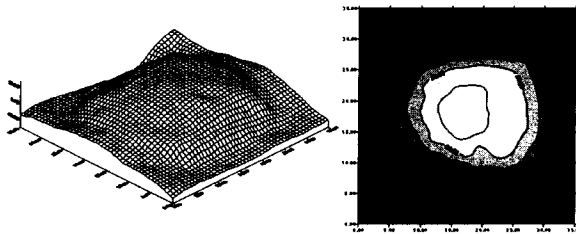


圖 14 第三組試片室溫下之量測結果

25°C 室溫下之量測結果如圖 15 所示，由量測面

見其圖形為凸，若由 BT 基板的热膨脹係數大於晶片與鑄模灌酯，因此 BT 基板收縮量大產生凹形彎曲來解釋，發現實驗結果不然。其原因可由鑄模灌酯為熱固性材料來解釋，由液態熔膠固化時，化學分子產生新的鍵結，造成體積的收縮，稱為模縮(Mold Shrinkage)效應，關係定義如下：

(Mold = Chemical + Thermal) Shrinkage

模縮效應=化學收縮效應+熱收縮效應

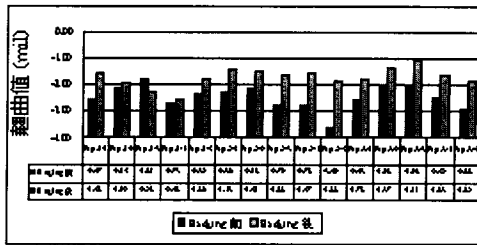


圖 15 第三組試片烘烤前後之量測結果

因模縮效應使製程上利於脫模動作的進行，由廠商所提供的資料可知化學收縮量約為總體積的

0.06%。若把數值改以熱膨脹係數表示，如下所示：

$$\frac{0.06}{100} \times \frac{1}{150(^{\circ}C)} \times 10^6 (ppm) = 4 (ppm/^{\circ}C) \quad (6)$$

因此若加上鑄模灌酯的热膨脹係數(14ppm/°C)，在此製程裡，鑄模灌酯所呈現的热膨脹效應係數應為18(ppm/°C)。當溫度由175°C冷卻至室溫時，鑄模灌酯的热膨脹係數大於晶片與BT基板，因此鑄模灌酯收縮量大產生凸形彎曲。

迴溫過程25°C→225°C，不僅想了解試片的翹曲行為變化，也了解試片在同一溫度點翹曲值的分佈情況，因此選取全部十五個試片作迴溫量測與觀察。其實驗結果如圖16所示。當溫度為25°C→180°C時，其翹曲值漸漸變大略成一線性變化，原因為BT基板的热膨脹係數大於晶片與鑄模灌酯產生凸形彎曲。當溫度為180°C→225°C時，其翹曲值成反向漸漸變小略成一線性變化。其原因與鑄模灌酯為熱固性材料有關，過玻璃轉化溫度(180°C)後，熱膨脹係數會從14ppm/°C改變為52ppm/°C約增加為四倍；楊氏模數會從16Gpa改變為0.8Gpa約減少為二十分之一[8]，因此鑄模灌酯膨脹量大產生凹形彎曲，即造成更小的凸

形彎曲。

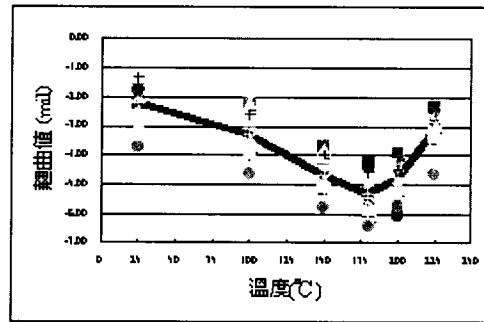


圖 16 第三組試片迴溫過程之量測結果

數值模擬分析結果

巨觀塑封球柵陣列構裝的結構，因其為一對稱性結構，不需作全場分析，如圖17所示，可將原模型簡化為八分之一作分析。模擬分析的元素型態為三維20個節點，以第二、三組製程構裝為主，探討構裝體在製程溫度時，由於熱膨脹係數不匹配，產生之翹曲行為變化。

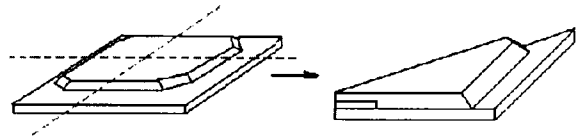


圖 17 有限元素模型簡化示意圖

第二組：BT 基板+晶片

晶片在150°C下以黏膠材料黏著於BT基板上，為簡化模型本文將不考慮黏膠(後約1mil)，假設溫度為150°C時各材料間無應力產生不發生翹曲行為，模擬冷卻至室溫(25°C)，也就是受熱負載為-125°C之翹曲行為，其結果如圖18所示。

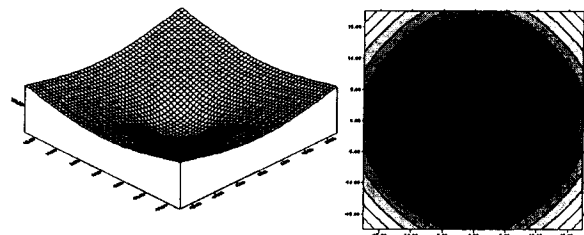


圖 18 第二組試片室溫下之分析結果

與實驗結果作比對如圖19所示皆為凹形彎曲，乃由於晶片與BT基板熱膨脹係數的差異(BT基板>晶片)所產生；但翹曲值大小差量約為60%，其原因可能

與溫度為 150°C 時各材料間無應力產生不發生翹曲行為之假設有關係。

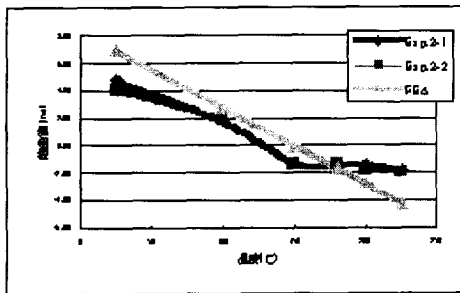


圖 19 第二組試片迴溫過程之分析結果

在此我們將數值模擬的結果作一調整，分別將數值結果加上在 150°C 時之實驗平均值，結果如圖 20 所示，差量分佈於 -20~30%，原因可能與製程的不完美有關，可由室溫下翹曲值約有 -30~50% 的差量可知。而 150~225°C 翹曲值之比對結果，發現趨勢並不一致，其原因如實驗結果第二組試片所述。

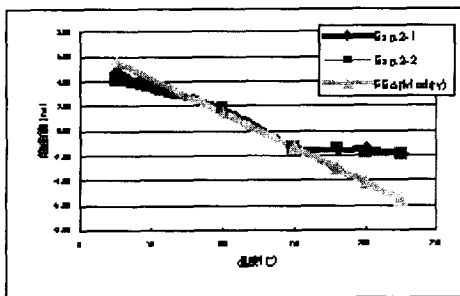


圖 20 第二組試片修正後之分析結果

第三組：BT 基板+晶片+打線+鑄模灌酯

在 175°C 下，以環氧樹脂利用轉移成形法 (Transfer-Molded) 將晶片與金線密封在樹脂中。假設溫度為 175°C 時各材料間無應力產生不發生翹曲行為，模擬冷卻至室溫 (25°C)，也就是受熱負載為 -150°C 之翹曲行為，其結果如圖 21 與 22 所示。

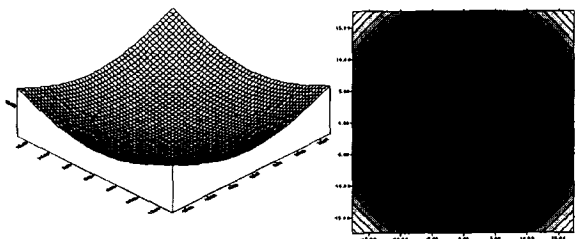


圖 21 第三組試片無模縮效應之分析

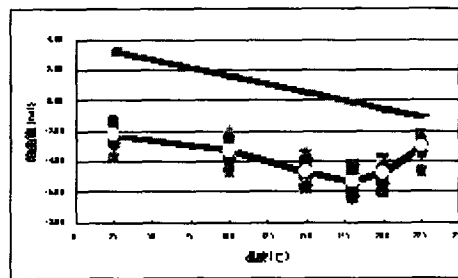


圖 22 第三組試片無模縮效應之分析

25°C 室溫下與實驗結果之比對結果翹曲方向不一致，發現數值分析結果為凹形彎曲，原因如實驗結果第三組試片所述。若以調整鑄模灌酯熱膨脹係數的大小來描述模縮效應，其結果如圖 23 所示，產生凸形彎曲，且翹曲值差量合理約為 5%。

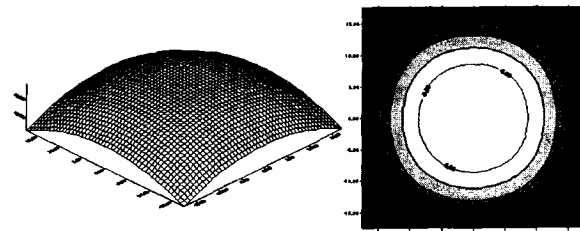


圖 23 第三組試片模縮效應之分析

25~180°C 迴溫過程翹曲變形之比對結果，如圖 24 所示，由於 BT 基板的热膨脹係數大於晶片與鑄模灌酯所致，皆產生更大的凸形彎曲，且翹曲值差量合理約分佈於 -6~14%。

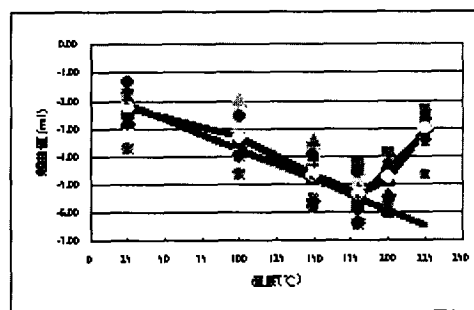


圖 24 第三組試片模縮效應之分析

但 180~225°C 迴溫過程翹曲變形之比對結果，如圖 24 所示，翹曲值變化呈現反向遞減，原因如實驗結果第三組試片所述。若以調整鑄模灌酯熱膨脹係數及楊氏模數的大小來描述玻璃轉化溫度效應，其結果如圖 25 所示，由於鑄模灌酯的熱膨脹係數大於晶片

與 BT 基板所致，皆產生較小凸形彎曲，且翹曲值差量合理約分佈於-7~5%。

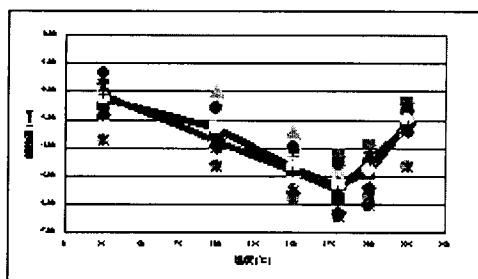


圖 25 第三組考慮模縮與 Tg 效應之分析

結論

本文以塑封球柵陣列構裝為主題，除了建立相移陰影疊紋量測系統作實驗量測並觀察構裝體在受溫變化之翹曲行為，並利用數值分析結果作比對，探討第二組試片，定義出 BT 基板於 150°C 的初始翹曲值，為數值分析的翹曲值修正定量，指出迴溫過程 25~150°C 所產生之翹曲變化，為 BT 基板與晶片間熱膨脹係數的不匹配所產生；迴溫過程 150~225°C 所產生之翹曲變化可能為 BT 基板過玻璃轉化溫度後所造成的影響。探討了第三組試片，指出翹曲行為除了各材料間熱膨脹係數不匹配所產生之外，亦與鑄模灌酯的模縮效應與玻璃轉化溫度有高度的相關性。

參考文獻

- [1] I.C. Ume and M.R. Stieler, "System for real-time measurement of thermally induced PWB/PWA warpage", Journal of Electronic Packaging, Vol.119/1, March 1997.
- [2] Y. Guo and S. Liu, "Development in optical methods for reliability analysis in electronic packaging applications", Journal of electronic packaging, Vol.120, pp.180-120, June 1998.
- [3] 黃昭彰, "相移陰影疊紋量測系統在半導體暨電子構裝之應用", 國立台灣大學應用力學研究所碩士論文, 1999.
- [4] 陳志中, "電子構裝 BGA 力數值分析", 國立成功大學工程科學研究所碩士論文, 1997.

- [5] Ho. T., J. Lee, R. Lee, and A. Lin, "Linear finite element stress simulation of solder joint on 255 I/O plastic BGA package under thermal cycling", Proceeding of IEEE Electronic on Components & Technology Conference, pp.930-936, May 1995.

- [6] 蔡穎鋒, "塑封球柵陣列構裝於製造過程之翹曲分析", 國立清華大學動力機械工程研究所碩士論文, 2000.

- [7] 陳志松, "應用光測力學在電子構裝之量測分析", 國立台灣大學應用力學研究所碩士論文, 2000.

- [8] John H. Lau, "Ball Grid Array Technology", McGraw, Inc. 1995.

- [9] 呂家祥, "塑封球柵陣列構裝在高溫環境下之翹曲行為研究", 國立台灣大學應用力學研究所碩士論文, 1998.