

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 總計畫(III)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC91-2216-E-002-036-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學材料科學與工程學研究所

計畫主持人：莊東漢

共同主持人：林景崎，方治國，葉明勳

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 2 月 3 日

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

總計畫：無鉛錒錫球格陣列構裝製程與可靠度分析(第三年)

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫  
計畫編號： NSC91 - 2216E - 002 - 036  
執行期間： 91 年8 月1 日至92 年7 月31 日

主持人： 莊東漢教授 台灣大學材料系  
共同主持人： 林景崎教授 中央大學機械系  
葉明勳教授 中華大學機械系  
方治國教授 中華技術學院機械系

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

執行單位：國立台灣大學 材料科學與工程學系

中華民國九十二年七月三十日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

總計畫：無鉛錒錫球格陣列構裝製程與可靠度分析(第三年)

General Program: Manufacturing and Reliability Analysis of Pb-free Solder Ball Grid Array Package (Third year)

計畫編號：NSC91-2216-E002-036

執行期限：91年8月1日至92年7月31日

主持人：莊東漢教授 台灣大學材料系

共同主持人：林景崎教授 中央大學機械系

葉明勳教授 中華大學機械系

方治國教授 中華技術學院機械系

## 一、中文摘要：

總計劃的主要目的係經由群體研究無鉛錒錫球格陣列構裝製程、界面反應動力學研究與破損分析，建立無鉛錒錫接點壽命的預測模型，完成BGA構裝在化金(Ni/Au)電路板上的可靠度資料庫，做為相關研究學者或產業界的重要應用依據。此外，利用構裝模組的電性分析可提供更直接的應用參考數據，配合金相分析探討錒錫接點的界面金屬成長、組織變化及疲勞裂紋的萌生與成長。最後，由於整體構裝模組構成材料複雜，微觀組織影響疲勞壽命甚大，致使數據離散性較大，故本研究亦藉由機率、統計等相關理論，對整個系統進行可靠度分析，了解壽命分佈情況，預估疲勞壽命。

**關鍵詞：**無鉛錒錫，球格陣列構裝，冷熱循環試驗，動態疲勞試驗，電性分析

## ABSTRACT:

Through the group studies including the manufacturing process, interfacial reaction kinetics and failure analysis, the prediction model of failure life for Pb-free solder joints of BGA packages with Au/Ni surface finish. In addition, using the electrical analysis for packaging modulus more direct information can be obtained.

Accompanying with the metallographic observations, the intermetallics growth, microstructure change, crack nucleation and propagation of solder joints are investigated. Finally, the probability and statistics theory are employed to evaluate the reliability of the whole packaging system, which result in the clarification of failure life distribution and the prediction of failure life.

**Keyword:** Pb-free solder, BGA, thermal cycling, dynamic fatigue tests, electrical analysis.

## 二、緣由與目的

本總計劃在第一年計畫中完成了多種無鉛錒錫球之製程研究與可靠度研發分析，建立數種成分無鉛錒錫之迴錒曲線及其介面反應動力學研究。在第二年的研究中，則順利的規劃、協助與督導各子計畫的進行，並有良好的研究成果，成功建立無鉛錒錫球格陣列構裝的冷熱循環、雲紋干涉、潛變及金脆等研究的知識庫。總計畫第三年則對整體BGA電子元件構裝模組進行一系列可靠度測試，並以非破壞方式In-Situ量測、記錄整體構裝模組的電阻變化情形。另外再配合金相分析，觀察疲勞裂紋成長情形，推斷成長機構，並找出

循環週次與電阻值的對應關係。最後，由於整個 BGA 電子產品組件構造複雜，生產過程冗長，運用的材料很多且精細，致使整體構裝模組品質難穩定，故為了能得到較可靠的實驗數據，需做很多的試驗，才可得到較可靠的數據。因此本研究亦藉由機率、統計等相關理論，對系統進行可靠度分析，了解壽命分佈情況並更進一步對壽命進行預測。

### 三、結果與討論

#### 3.1 錫鉛的疲勞實驗與力學分析

圖一是 Sn-51In BGA 模組在循環剪力測試過程中的典型非線性力學行為。微觀而言，這種的錫鉛變形遲滯曲線(Hysteresis loop)是由於材料內部組織發生不可逆變化的結果，如差排的增生、移動，晶界的滑移，微孔洞或裂縫的形成和發展等。若假設材料為連續介質，從巨觀的力學角度來看，遲滯曲線有下列特點：

- (i) 伴隨 Bauschinger 效應
- (ii) 為耗能的不可逆過程
- (iii) 應力回復過程 (recovery process) 會釋放一部分應變能
- (iv) 為損傷過程，且具累加性
- (v) 反覆變形將導致承載力逐漸降低，最後產生低周疲勞破壞。

對於疲勞壽命的預估，本研究採用 Solomon 的塑性剪應變疲勞理論及 Morrow 的塑性應變能疲勞理論進行探討，並求得疲勞壽命方程式。圖二至六是 Sn-58Bi BGA 在  $\pm 0.04\text{mm}$  剪位移循環作用下，力學實驗結果。圖二顯示第一循環的承載力最大，而後續循環的承載力則緩慢減少，這種現象尤其在較大的剪位移範圍作用下更為明顯，這是因為在大剪位移作用下，第一次材料降伏對材料微結構造成的損傷最大，

隨後的降伏則損傷程度相對較小。在初期的循環荷載，裂紋處於萌生階段，因此承載力變化並不大，但隨著周期再增加，裂紋漸漸成長，承載力開始明顯下降，亦即會有循環軟化現象，最後到了接近疲勞斷裂時，裂紋面積已相當大，使承載力逐漸鬆弛至零。圖三顯示應力、應變遲滯曲線，遲滯圈面積大小即代表應變能吸收的多寡。第一個遲滯圈面積由於應力由原點出發，少了第一象限上半部份面積，因此面積較小，從第二圈開始則逐漸加大，直到即將破壞的時候，遲滯圈才會再開始變小。在圖四則顯示隨著循環荷載增加，不可逆的塑性變形亦隨之增加，導致塑性剪應變範圍隨之遞增。在圖五中顯示隨循環數增加，材料內部的損傷亦逐漸增加，相對的應變能量吸收密度亦在累積增加中，但到了即將破壞的時候，由於材料的可承受應力下降，使得此現象又逐漸緩和下來。另外曲線呈鋸齒狀，則是因為在每一循環的回復過程中，有部份能量釋放出來所造成的結果。最後將塑性剪應變範圍與失效循環數關係畫於雙對數圖中，如圖六，可明顯看出呈線性關係，符合 Solomon 的預期。利用最小平方法求得 Sn-58Bi BGA 壽命預估線，其方程式如下：

$$N_f = 1.399\Delta g_p^{-1.514} \dots\dots\dots (a)$$

若將遲滯圈吸收能量與失效循環數畫於雙對數圖中，如圖七亦可發現呈線性關係，符合Morrow塑性應變能疲勞理論的預期。再利用最小平方法亦可求得疲勞壽命預估線，方程式如下

$$N_f^{0.7571} W = 91.79 \dots\dots\dots (b)$$

#### 3.2 破損分析

在本研究的 PBGA 構裝模組三點彎曲及剪力疲勞試驗中均發現，最先發生破壞的地方是在錫球接點處，這主要是以下兩個因素：

- (1)PBGA 整體構裝模組的三點彎曲及剪力疲勞試驗的施力型態均使得錫球成為幾何位置的應力集中處。
- (2)錫球材料是整個構裝模組中，降伏點最低、且最具延展性者。

Sn-58Bi 迴錫後的正常組織型態為白色的不連續富錫相，散佈在暗色的富錫相基地中，如圖八所示。經疲勞試驗後，發現裂紋總是先在構裝模組最角落的錫球產生，且裂縫會從該球最外側且應力集中因素較大的錫球位置，如孔洞、凹陷等地方開始成長，之後隨著循環週數的增加，裂縫會再往中心且約略平行於銅墊上鍍層的方向逐漸成長，最後則完全斷裂。若更仔細的觀察也可發現裂紋多延著  $AuSn_4$  方塊的邊界擴展。這是由於沿著  $AuSn_4$  方塊邊界擴展所需消耗的功較低的緣故。圖九是 Sn-58Bi BGA 構裝模組在反覆等量剪應變作用下的錫球破斷面，可清楚看到有許多方塊  $AuSn_4$ ，因此破斷面傾向發生在錫球與  $AuSn_4$  的界面。這種現象也是由於兩者剛性差異大，不能有效傳遞應力，而較容易產生疲勞破裂。另外在圖十可以發現劈裂型態的破斷面，這是由於 Sn-58Bi 性質較脆的緣故。

### 3.3 可靠度分析

PBGA 構裝模組在 PCB 反覆彎曲試驗下，利用電阻監測方式得到錫球疲勞壽命數據結果，進行集中量數與離散量數的數學統計分析後發現，在相同撓度情況下，楊氏模數及抗拉強度較大的錫球材料，塑性應變範圍 ( $\epsilon_p$ ) 相對較小，裂紋孕核期較長，且在任何情況下，提高撓度均使壽命急速下降，這是因為撓度大則

明顯增大，壽命符合 Coffin- Manson 方程式的預期。然而較低的平均壽命，其數據的離散程度卻有降低的趨勢；例如 Sn-37Pb 由 2 % 提高到 4 % 撓度時，壽命降低了約有 5 倍之多，但標準差與平均值的比值，即變異係數(coefficient of variation)則由 0.51 降至 0.42，顯然在低的平均壽命下，壽命較趨於一致。這是由於低撓度下破壞機制較為複雜的緣故，而這種現象在其他金屬材料也有相同的結果。

另外在不同頻率作用下，疲勞失效循環次數也有所不同，而與受力暫留時間(dwell time)有關，本研究發現當施力頻率低、暫留時間長將導致疲勞壽命變短，這是因為較長的暫留時間，會促進潛變機制的進行，而使其提前遭到破壞，這印證了錫球材料在常溫下即有相當程度的潛變行為。

為了能從既有的壽命資料推廣到其他不同撓度下的壽命與破壞機率的關係，本研究也以機率、統計觀點及數學方法，將實驗資料繪成圖十一至十三形式。這些圖可用來分別了解任一撓度下的 Sn-37Pb、Sn-51In 及 Sn-58Bi PBGA 構裝模組彎曲疲勞壽命值與破壞機率，提供日後研究者參考。

## 四、計畫成果自評

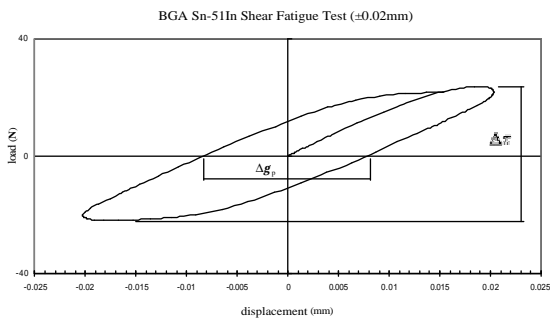
本研究針對無鉛錫球材料應用在 BGA 晶片接點上之可靠度進行一系列試驗，提供無鉛焊料的應用資訊；對於產、學、研界應有相當的幫助。主要成果條列如下：

- (i) 自行製作無鉛錫球，並獲得一項中華民國發明專利。
- (ii) 針對實際尺寸的無鉛錫球 BGA 構裝模組進行熱機疲勞性質測試。
- (iii) 以非破壞方式即時監測整體構裝模組的電阻歷史，進行裂紋成長動力學探討。
- (iv) 使用有限元素電腦模擬搭配實驗結果求出 Coffin-Manson 壽命關係式。

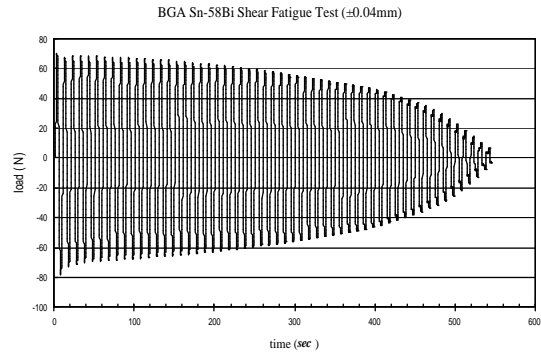
(v) 藉由機率、統計等相關理論，對系統進行可靠度分析，瞭解壽命分佈、破壞機率，進而預估疲勞壽命。

本年度計畫合計發表專利 1 件及學術論文 7 篇：

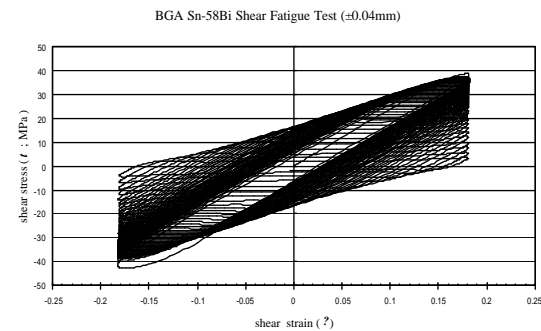
1. 莊東漢、王宣勝：球格陣列構裝用超微小鉍錫球的製造方法及其裝置，中華民國發明專利，領證中。
2. Y.C. Chan, M.Y. Chiu, and T.H. Chuang, 2002, "Intermetallic Compounds formed during the Soldering Reactions of Eutectic Sn-9Zn with Cu and Ni Substrates", Z. Metallkd., 93, 95-98, Germany.
3. M.D Cheng, S.S. Wang, and T.H. Chuang, 2002, "Soldering Reactions between In49Sn and Ag Thick Films", J. Electron. Mat., 31, 3, 171-177, U.S.A.
4. T.L. Su, L.C. Tsao, S.Y. Chang, and T.H. Chuang, 2002, "Morphology and Growth Kinetics of Ag<sub>3</sub>Sn during Soldering Reaction between Liquid Sn and Substrate", J. Mat. Eng. Perf., 11, 2, 187-193, U.S.A.
5. T.L. Su, L.C. Tsao, S.Y. Chang, and T.H. Chuang, 2002, "Interfacial Reaction of Liquid Sn and Sn-3.5Ag Solders with Ag Thick Films," J. Mat. Eng. Perf., 11, 5, 481-486, U.S.A.
6. M.J. Chiang, and T.H. Chuang, 2002 "Interfacial Reaction between Liquid Sn-20In-0.8Cu BGA Package with Au/Ni/Cu Solders and Ag Substrate", Z. Metallkd., 93, in press, Germany..
7. M.J. Chiang, S.Y. Chang, and T.H. Chuang, 2003, "Reflow and Burn-in of an Sn-20In-0.8Cu BGA Package with Au/Ni/Cu Pad", J. Electron. Mat., in press, U.S.A.
8. H.M. Wu, M.D Cheng, S.Y. Chang, and T.H. Chuang, 2003, "Mechanisms for Interfacial Reaction between Liquid Sn-3.5Ag Solders and Cu Substrates," J. Electron. Mat., 33, 1,(2004)



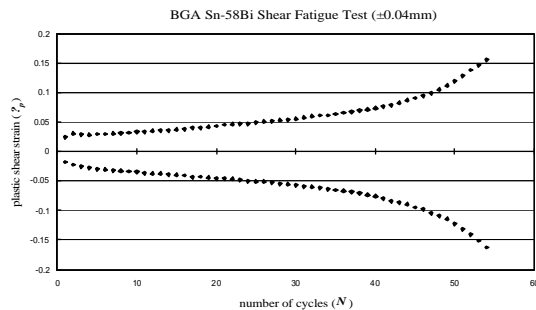
圖一：Sn-51In BGA 在循環剪力測試過程中的非線性力學行為



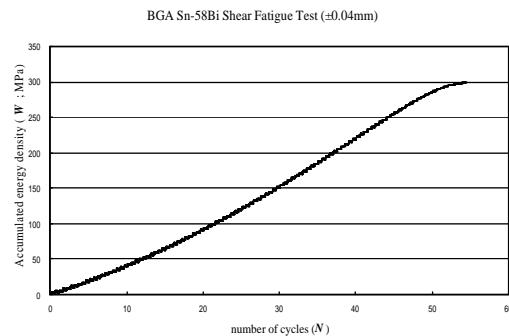
圖二：BGA Sn-58Bi 在±0.04mm 等量剪位移範圍循環作用下，時間與承載力的關係



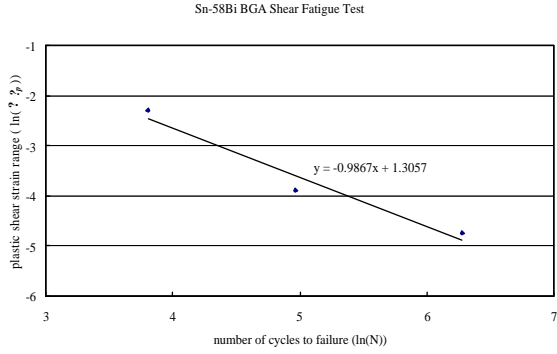
圖三：BGA Sn-58Bi 在±0.04mm 等量剪位移範圍循環作用下，剪應變與剪應力的關係



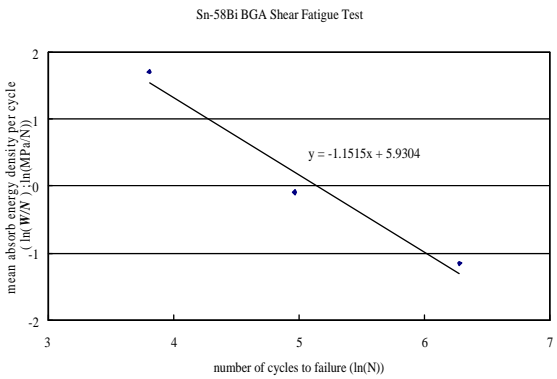
圖四：BGA Sn-58Bi 在±0.04mm 等量剪位移範圍循環作用下，塑性剪應變值隨循環數增加的變化情形



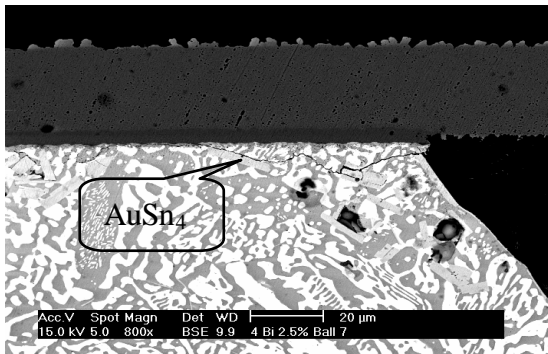
圖五：BGA Sn-58Bi 在±0.04mm 等量剪位移範圍循環作用下，累積能量吸收密度隨循環數增加的變化情形



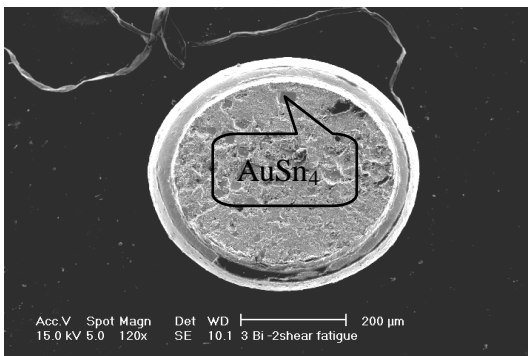
圖六： Sn-58Bi BGA 塑性剪應變範圍與疲勞壽命的關係



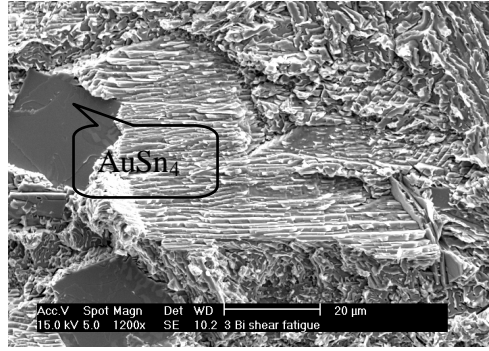
圖七： Sn-58Bi BGA 能量吸收密度與疲勞壽命的關係



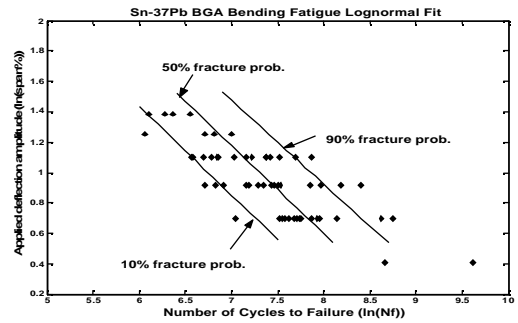
圖八 Sn-58Bi BGA 構裝模組在 PCB 反覆彎曲作用下，在最角落錫球應力集中處產生裂紋並沿 AuSn<sub>4</sub> 邊界成長的情形



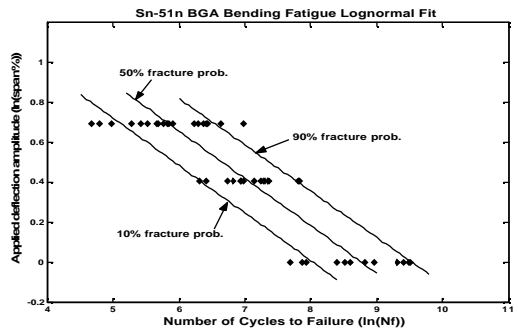
圖九： Sn-58Bi BGA 構裝模組在反覆等量剪應變作用下，錫球剪力疲勞的破斷面



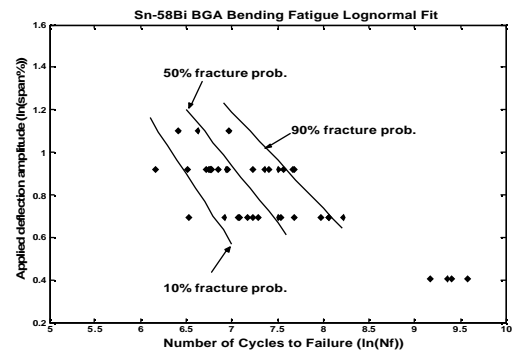
圖十： Sn-58Bi BGA 構裝模組在反覆等量剪應變作用下，錫球剪力疲勞破斷面的劈裂型態



圖十一： Sn-37Pb BGA 構裝模組在 PCB 彎曲變形下，錫球疲勞壽命、撓度與破壞機率三者間的關係



圖十二： Sn-51In BGA 構裝模組在 PCB 彎曲變形下，錫球疲勞壽命、撓度與破壞機率三者間的關係



圖十三： Sn-58Bi BGA 構裝模組在 PCB 彎曲變形下，錫球疲勞壽命、撓度與破壞機率三者間的關係