

無鉛錒錫在球格陣列構裝應用之挑戰

CHALLENGES FOR THE APPLICATION OF LEAD-FREE SOLDERS ON BALL GRID ARRAY PACKAGES

莊東漢* 張世穎** 鄭明達† 王宣勝†

Tung-Han Chuang Shih-Ying Chang Ming-Da Cheng Shiuan-Sheng Wang

*教授 **博士後研究 †博士生
國立台灣大學材料科學與工程學系電子構裝實驗室
*Professor **Post-doctorate †Ph.D. candidate

Department of Materials Science and Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan 10617, R.O.C.

Abstract

The adoption of Pb-free solders in lieu of Pb solders is an inevitable trend in the electronics industry. This study sums up the failure modes to which the ball grid array packaging process is susceptible when various Pb-free solders, such as Sn-3.5Ag, Sn-0.9Cu, Sn-58Bi, Sn-51In, Sn-20In-0.8Cu, Sn-20In-2.8Ag, Sn-4Ag-0.5Cu, Sn-3Ag-0.5Cu and Sn-4Ag-5Cu, are employed. Examples of potential failure modes include: intermetallic embrittlement, gold embrittlement, void formation, Ag₃Sn plate formation, pad lifting, Sn-Bi joint degradation caused by Pb contamination, fatigue-induced ductile/brittle transition, Ag thick film dissolution, and non-wetting due to precipitation.

Keywords: electronic packaging, lead-free solders, BGA package, failure analysis.

摘要

電子構裝採用無鉛錒錫為一無可迴避的時代趨勢，本文列舉各種不同成分無鉛錒錫在球格陣列構裝製程所發現破損問題，其中無鉛錒錫包括：Sn-3.5Ag、Sn-0.9Cu、Sn-58Bi、Sn-51In、Sn-20In-0.8Cu、Sn-20In-2.8Ag、Sn-4Ag-0.5Cu、Sn-3Ag-0.5Cu、Sn-4Ag-5Cu等合金，歸納之破損實例包括：介金屬脆斷、金脆破損、孔洞形成、板狀Ag₃Sn形成、錒墊剝離、殘留鉛造成Sn-Bi接點劣化、疲勞造成延性轉脆破損、銀厚膜溶解破斷以及析出物造成錒錫不潤濕等。

關鍵詞：電子構裝、無鉛錒錫、球格陣列構裝、破壞分析。

1. 前言

傳統電子構裝使用銅合金或鐵鎳合金引腳與印刷電路板進行組裝 (assembly)，引腳排列有單邊 (Single In-line Package, SIP)、雙邊 (Dual In-line Package, DIP) 或四方排列 (Quad Flat Package, QFP)，其中四方排列構裝針對高 I/O 數需求已盛行十餘年，然而當構裝 I/O 數高於 300，使用 QFP 之接腳間距將小於 0.3mm，產品不良率劇增，導致生產成本提高，因應而生的是以錒錫球取代金屬引腳的球格陣列構裝 (Ball Grid Array Package, BGA)，BGA 由於採用面陣排列 (area array)，錒錫球接點間距可大幅放寬，降低產品不良率，此外對於同腳數構裝，BGA 尺寸縮小，與傳統引腳連接的 QFP 構裝相比，可節省電路板空間大約 49%，電性方面可減少 31% 訊號電容與 46%

交互電感，因而縮短訊號延遲大約 46%，此外，錒球的自行對位 (self-alignment) 亦有助於其製程良率的提高 [1]。

由於球格陣列構裝是利用錒錫球與印刷電路板連接，構裝內的晶片、封模膠、基板以及印刷電路板等不同材質所形成熱應力主要均由錒錫球承受，因此錒錫球接點的可靠度將決定球格陣列構裝的使用壽命，影響因素包括：錒錫球成分與微結構、錒錫球尺寸與形狀、錒錫球接點高度、錒錫球錒墊形式 (Solder Mask Defined, SMD 或 Non-Solder Mask Defined, NSMD) 與表面處理 (surface finishes)、錒錫球分佈 (全滿、中央空缺或間隔空缺)、錒錫球間距、錒與時效條件等，其中錒錫球成分由於電子產業長久以來以 Sn-37Pb 合金為主，有關 BGA 錒錫球接點可靠度的相關研究亦大部針對此傳統共晶鉛錒合金 [2~8]。

近年來，由於環保意識的提昇，電子產品改用無鉛鉛錫的呼聲日益高漲 [9]，歐洲共同市場已決議自公元 2008 年元月 1 日起全面禁用含鉛電子產品，日本幾家大公司 (Hitachi、NEC、Sony、Toshiba 等) 亦已訂定近期達到減少鉛使用量 50% 的目標，Matsushita 公司目前每個月生產超過 40,000 個使用無鉛鉛錫的迷你光碟機，並預計於近期完全將鉛由電子產品中趕出，Nokia 及 Toshiba 公司決定以 Sn-Ag-Cu 無鉛鉛錫用於其生產線上 [10]，1997 年加拿大 Nortel 公司亦生產第一具不含鉛的桌上型電話，其電路板組件接合使用 Sn0.7Cu 無鉛鉛錫 [11]，美國雖然早在 1990 年就已由參議院提案制定工業產品禁用鉛之法令，但因政商利益相互角力而在立法上仍無進展，然而在歐洲及日本的壓力下，許多公司 (尤其汽車製造業及電信通訊業) 亦無法置身事外，例如 Motorola 公司已訂出其發展無鉛產品的時程與工作指令。此外，許多重要工業組織如 NEMI、EIA 及 IPC 也在積極研商如何因應無鉛鉛錫立法通過後之衝擊，許多學術研究機構 (NCMS、NIST、里海大學等) 以及許多鉛錫製造公司 (Alpha Metals、AIM、Kester、Indium 等) 均已投注極大心力研發無鉛鉛錫。

因應時代潮流，球格陣列構裝使用無鉛鉛錫已是無可逃避的趨勢，然而現階段無鉛鉛錫球格陣列構裝仍有許多亟待克服的問題，本文將台大材料系電子構裝實驗室相關研究所發現各種無鉛鉛錫合金應用於球格陣列構裝的破損實例做一歸納，無疑的，面對無鉛鉛錫的挑戰，產學研界還有一段相當艱苦的路要走。

2. 實驗方法

本實驗使用 Sn-3.5Ag、Sn-0.9Cu、Sn-58Bi、Sn-51In、Sn-20In-0.8Cu、Sn-20In-2.8Ag、Sn-4Ag-0.5Cu、Sn-3Ag-0.5Cu 及 Sn-4Ag-5Cu 鉛錫。實驗中所使用的球格陣列構裝基板為 BT 塑膠基板及 Al_2O_3 陶瓷基板，塑膠構裝尺寸為 $7 \times 7 \times 1$ mm，內有矽晶片並封膠，BT 基板上 7 × 7 個陣列分佈的銅錫墊，圖 1 為其幾何結構與尺寸，陶瓷基板則於表面燒結 7 × 7 個陣列排列的銀厚膜錫墊。

BT 基板上銅錫墊的表面處理為 Au/Ni 鍍層，其厚度分別為 $0.7\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ ，其中 Ni 層是為了防止銅墊與鉛錫的快速反應，Au 鍍層是為了防止表層氧化並增加與鉛錫的潤濕性。 Al_2O_3 陶瓷基板上之銀厚膜錫墊厚度為 $20\mu\text{m}$ 。

實驗分別將各種不同成分錫球植在基板錫墊上 [12]，錫球尺寸均為直徑 0.4mm，然後進行迴錫。針對每一種不同成分的錫球分別採用特定的迴錫曲線，其最高溫度大約均高於錫球熔點 50°C ，迴錫爐為

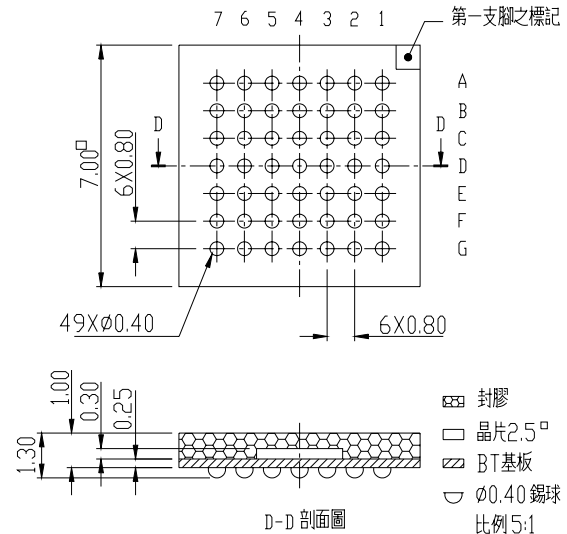


圖 1 本研究塑膠球格陣列構裝之幾何結構與尺寸
Fig. 1 Geometry of BGA specimens used in this study

五段均溫區熱風對流式。迴錫後的試片再於不同溫度及時間下進行時效處理，以模擬構裝實際使用之運作條件，所有試片均進行截面金相觀察，並以 SEM、EDX、EPMA 等儀器分析界面所生成介金屬化合物的成分。每種無鉛鉛錫球格陣列構裝試片另外進行推球測試，以評估接點的強度，部分構裝進行動態疲勞試驗。推球測試及疲勞試驗均使用 MTS-Tytron-250 微小負荷試驗機，此儀器可以在最小 0.001N 負荷及 $0.1\mu\text{m}$ 位移下進行靜態及動態機械性質測試。推球試驗規範依照 JEDEC 標準 (JESD22-B117)，試驗中推刀行進速率為 0.1mm/sec ，高度為錫球直徑的 1/2，推球測試後的樣品進行破斷面觀察，以探討破損的型態與機理。

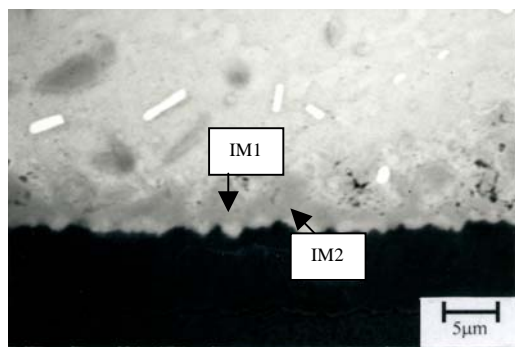
3. 結果與討論

綜合各種不同成分無鉛鉛錫球格陣列構裝實驗，可歸納出下列破損案例：

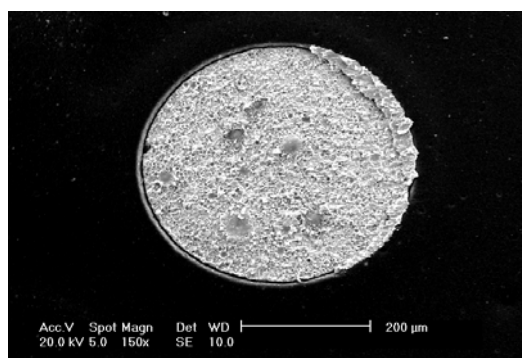
3.1 介金屬脆斷

Sn-20In-0.8Cu 合金之固液相線溫度分別為 163°C 與 187°C ，此無鉛鉛錫主要的優點為其熔點接近傳統的共晶鉛錫合金，亦即針對共晶 Sn-0.9Cu 無鉛鉛錫的高熔點問題加以改善，In 的添加除了降低熔點，更可以提高合金的抗潛變性及防止金脆現象的發生。

圖 2(a) 為此種 Sn-20In-0.8Cu 無鉛鉛錫迴錫後，再經 115°C 時效處理 1,000 小時之金相組織，錫球與基板上的 Au/Ni 鍍層反應，於其界面處先後形成兩種介金屬 (IM1 及 IM2)，其中最初形成的 IM1 介金屬層



(a) 界面介金屬型態



(b) 推球試驗斷面組織

圖 2 Sn-20In-0.8Cu 錒錫球格陣列構裝製程經 115°C 時效 1,000h 後之破損案例：(IM1: $\text{Cu}_6(\text{Sn},\text{In})_5 + \text{Ni}_3(\text{Sn},\text{In})_4$; IM2: $\text{Ni}_3(\text{Sn},\text{In})_2$)

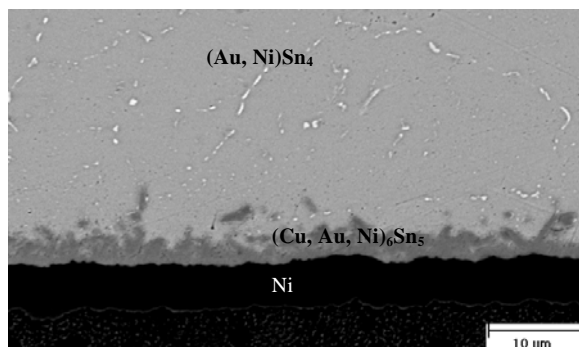
Fig. 2 Sn-20In-0.8Cu solder joint in BGA packaging after aging at 115°C for 1,000 hours, (a) morphology of the intermetallic compounds; (b) fractography after ball shear test

為 $\text{Cu}_6(\text{Sn},\text{In})_5$ 與 $\text{Ni}_3(\text{Sn},\text{In})_4$ 混合組成，IM2 介金屬組成為 $\text{Ni}_3(\text{Sn},\text{In})_2$ 。推球試驗顯現脆性破斷，接點強度由迴錒狀態的 4.5N 降至 3.2N，破斷位置亦由原先穿過錒錫內部轉換為沿著 IM2 介金屬層，證實界面介金屬脆斷為其接點強度劣化的肇因 [13]。

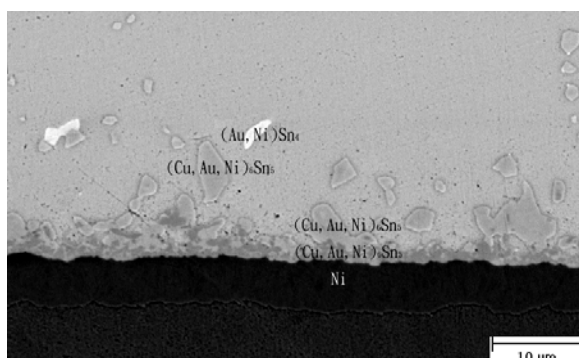
3.2 金脆破損

共晶 Sn-0.9Cu 合金為一極被看好的無鉛錒錫，美國國家電子製造協會 (NEMI) 最近建議迴錒 (reflow) 製程採用 Sn-3.9Ag-0.6Cu 合金，波錒 (wave soldering) 製程採用共晶 Sn-0.9Cu 合金。此無鉛錒錫熔點高達 227°C，為其最主要缺點，但因具有較佳的接合強度與低廉的成本，而受到業界重視。

針對無鉛錒錫迴錒製程所進行之研究，圖 3(a) 顯示 Sn-0.9Cu 錒錫迴錒後，錒墊上的鍍 Au 層完全融入錒錫中，並形成島嶼狀 $(\text{Au},\text{Ni})\text{Sn}_4$ 介金屬化合物，而在接點界面處形成 $(\text{Cu},\text{Ni},\text{Au})_6\text{Sn}_5$ 介金屬層，此時推



(a) 迴錒後



(b) 150°C 時效 300 小時

圖 3 Sn-0.9Cu 錒錫球格陣列構裝破損案例

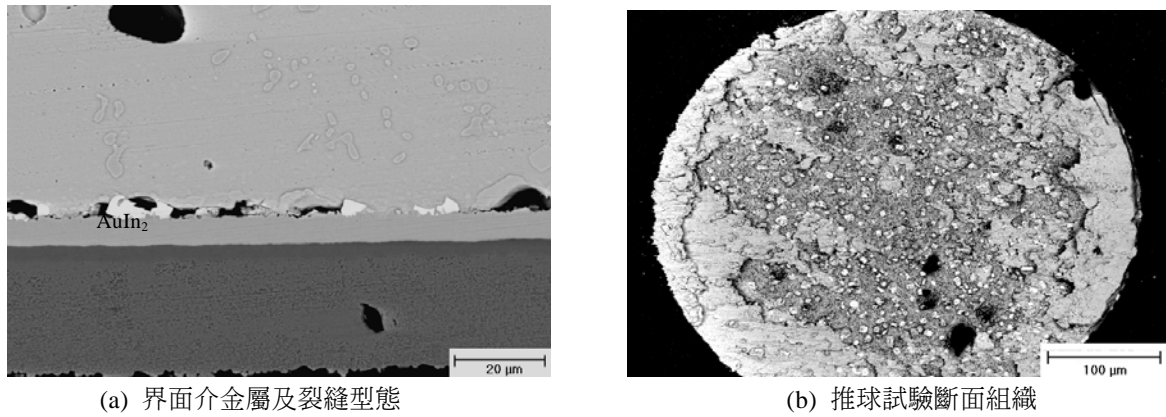
Fig. 3 Morphology of the Sn-0.9Cu solder joint of the BGA package after (a) reflow; (b) aging at 150°C for 300 hours

球強度高達 8.4N。然而後續在 150°C 時效處理 300h 後，原先位於錒錫內部的 $(\text{Au},\text{Ni})\text{Sn}_4$ 介金屬會回到界面處，使原先界面之介金屬層內 Au 含量提高一倍 (圖 3(b))，此時進行推球試驗可發現其破斷位置沿著界面的介金屬層，接點強度亦大幅降低至 5.1N [14]。

3.3 孔洞形成

Sn-20In-2.8Ag 如同 Sn-20In-0.8Cu 合金也是為了降低共晶 Sn-3.5Ag 合金熔點而添加 In 元素，其固液相線溫度分別為 175°C 與 187°C，此無鉛錒錫擁有極佳的延展性與抗潛變性。

然而，本研究發現 Sn-20In-2.8Ag 球格陣列構裝經迴錒後，再進行 100°C 時效處理 700 小時 (圖 4)，錒球接點內部與界面均出現明顯的孔洞，此孔洞的形成與介金屬化合物成長相關聯，其結果導致錒球破斷沿界面發生。此 Sn-20In-2.8Ag 錒錫在 150°C 不同時間進行時效處理後，孔洞形成更加嚴重 (圖 5)，當時效時間長達 1,000 小時，錒球幾乎變成空心結構 (圖 5(e))，推球試驗強度亦由迴錒狀態的 5.1N 降至 3.5N [15]。

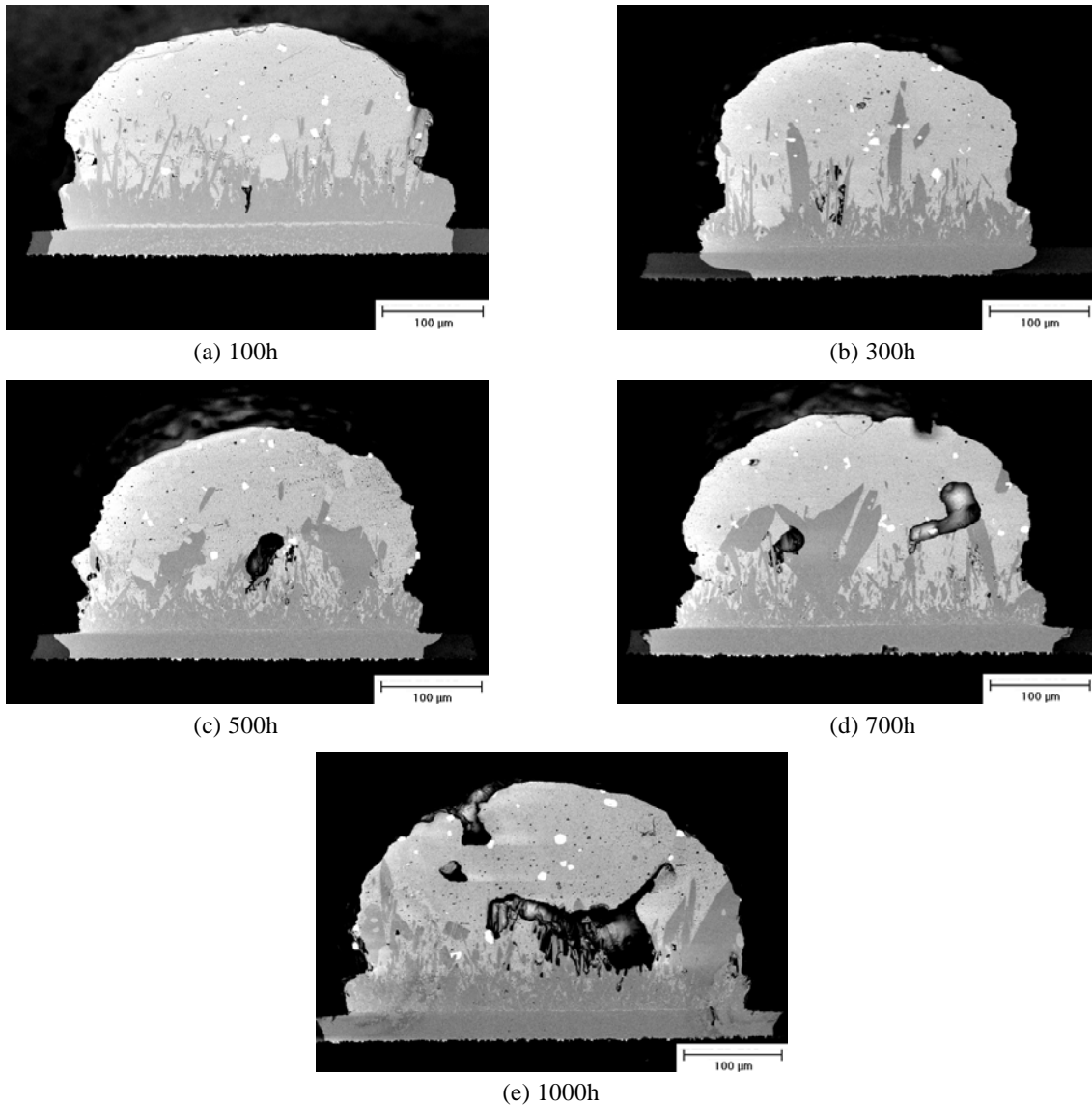


(a) 界面介金屬及裂縫型態

(b) 推球試驗斷面組織

圖 4 Sn-20In-2.8Ag 錒錫球格陣列構裝製程經 100°C 時效 700h 後之破損案例

Fig. 4 Sn-20In-2.8Ag solder joint in BGA packaging after aging at 100°C for 700 hours: (a) morphology of the intermetallic compounds and cracks; (b) fractography after ball shear tests



(a) 100h

(b) 300h

(c) 500h

(d) 700h

(e) 1000h

圖 5 Sn-20In-2.8Ag 錒錫球格陣列構裝經 150°C 不同時間時效後之孔洞形成破損案例

Fig. 5 Voids formation for Sn-20In-2.8Ag solder joint in BGA packaging after aging at 150: (a) 100 h; (b) 300 h; (d) 500 h; (d) 700 h; (e) 1,000 h

3.4 板狀 Ag_3Sn 介金屬形成

共晶 Sn-Ag-Cu 系列合金是被視為最有機會採用的無鉛錫錫，其熔點約在 216 ~ 218°C 之間，具有良好的機械性質，且與基材有很好的潤濕性。

一般情況，Sn-Ag-Cu 錫錫內部會散佈著顆粒狀 Ag_3Sn 介金屬相，主要扮演析出強化效應，然而本研究發現將一成分為 Sn-4Ag-0.5Cu 的球格陣列構裝迴錫後，錫球內部會生成大塊板狀的 Ag_3Sn 介金屬 [16] (圖 6(a) 和圖 6(b))，後續的動態疲勞試驗顯示裂縫主要發生於 Ag_3Sn 板塊與錫錫基材的的界面；此外，長條板狀 Ag_3Sn 介金屬的存在亦會形成額外的電路連結，造成電性的改變。

將另一成分為 Sn-3Ag-0.5Cu 的無鉛錫錫球格陣列構裝迴錫後之金相組織顯示錫球內部並不會產生板狀 Ag_3Sn 介金屬 (圖 6(c) 和圖 6(d))，由此證實可藉由調整錫錫合金內 Ag 含量低於 3wt%，以抑止有害的板狀 Ag_3Sn 生成。

3.5 高溫時效錫錫剝離

共晶 Sn-3.5Ag 合金也是相當被看好的無鉛錫錫，由於內部 Ag_3Sn 析出相的強化作用，此種錫錫具有極佳的機械強度與抗潛變性，221°C 的高熔點被公認是此合金取代傳統 Sn-37Pb 錫錫的障礙，然而實驗顯示在球格陣列構裝的應用上，Sn-3.5Ag 的問題不亞於其

他無鉛錫錫：前述 Sn-0.9Cu 錫錫球格陣列構裝的金脆破損現象同樣發生在 Sn-3.5Ag 合金 [17] (圖 7)，前述 Sn-4Ag-0.5Cu 的大塊板狀 Ag_3Sn 介金屬當然也存在於 Sn-3.5Ag 球格陣列構裝 [17] (圖 8)，而當金脆與 Ag_3Sn 板狀介金屬同時出現在錫球與錫錫界面時 (圖 9(a))，即使是昂貴的 BT 基板也在錫錫區域形成嚴重問題 (圖 9(b))，其結局是導致推球試驗時發生錫錫剝離 (圖 9(c))，錫球接點強度亦由 8.9N 大幅降至 2.9N [17]。

3.6 殘留鉛造成 Sn-Bi 錫錫接點劣化

共晶 Sn-58Bi 錫錫擁有良好的機械強度與抗疲勞性，其熔點為 138°C，價格低廉，為相當有潛力的低溫無鉛錫錫，但是在電子產業完全進入無鉛錫錫製程前的過渡時期，部分設備及元件可能仍殘留微量鉛，這些微量鉛一旦混入 Sn-Bi 無鉛錫錫內，將形成三元介金屬相 (Bi-30Pb-8Sn)，此三元介金屬相的熔點僅為 97°C，在使用上將造成接點的劣化。圖 10 為 Sn-58Bi 添加不同鉛含量之 DSC 分析結果，在 97°C 存在有一吸熱峰，為前述 Bi-30Pb-8Sn 低溫介金屬相的生成反應，隨著鉛含量的提高，此吸熱峰增大，顯示此三元 Bi-30Pb-8Sn 介金屬的生成量隨著鉛含量的

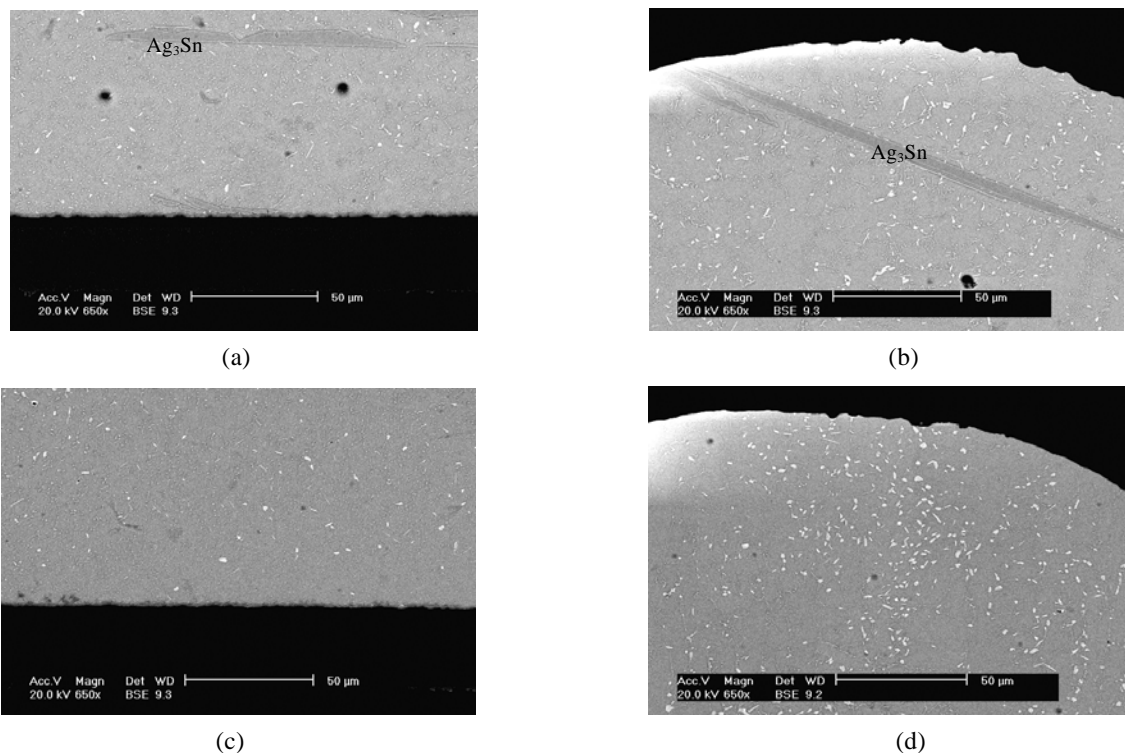


圖 6 (a)、(b)：Sn-4Ag-0.5Cu 錫錫球格陣列構裝迴錫後形成板狀 Ag_3Sn 介金屬；(c)、(d)：比較 Sn-3Ag-0.5Cu 錫錫無此現象

Fig. 6 (a), (b): Platelike Ag_3Sn formation for Sn-20In-2.8Ag solder joint in BGA packaging after reflow;

(c), (d): compared with Sn-3Ag-0.5Cu showing the solder without the phenomenon

感，這些情況均需使用低熔點鉛錫。

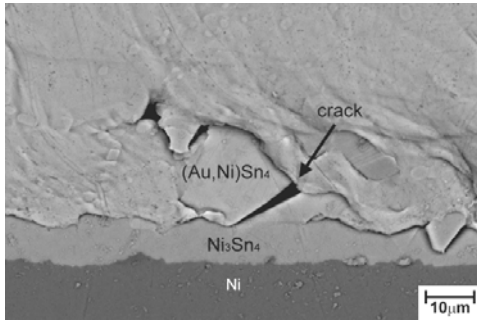


圖 7 Sn-3.5Ag 錫球格陣列構裝經 175°C 時效 1,000 h 後的破損案例

Fig. 7 Morphology of the Sn-3.5Ag solder joint of the BGA package after aging at 175°C for 1,000 h

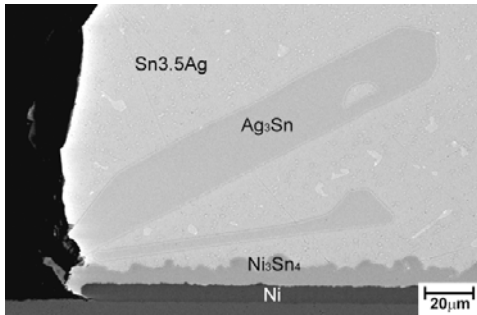


圖 8 Sn-3.5Ag 錫球格陣列構裝經 200°C 時效 300h 後，錫球內部出現巨大的板狀 Ag₃Sn 介金屬

Fig. 8 Platelike Ag₃Sn formation for Sn-3.5Ag solder joint in BGA packaging after aging at 200°C for 300 h

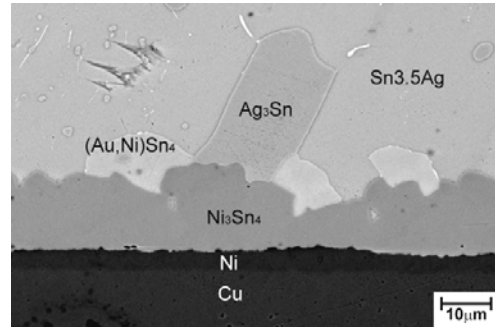
提高而增多。圖 11 之推球試驗結果證實添加 0.5wt% 鉛於此 Sn-58Bi 錫中，其錫球接點強度由原先 9.1N 降低至大約 7.6N，隨著鉛添加量提高至 2.0wt%，錫球接點強度亦繼續降至 7.3N。

3.7 疲勞造成延性轉脆破損

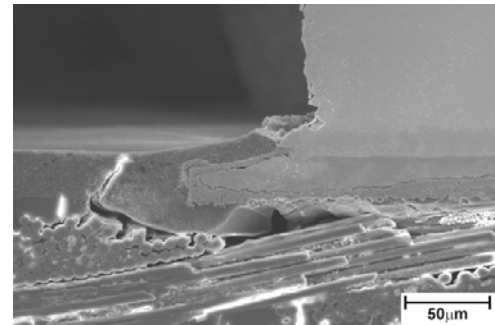
圖 12(a) 為 In-49Sn 錫球格陣列構裝迴錫後的金相組織，雖然在其錫球與錫墊的界面處會生成 AuIn₂ 介金屬，但靜態推球試驗顯示破斷沿著錫球內部，其破斷面呈現延性破壞特徵 [18] (圖 12(b))，亦即界面之 AuIn₂ 介金屬對此構裝破損並無影響，然而動態彎曲疲勞試驗卻顯示裂紋沿著界面 AuIn₂ 介金屬延伸 (圖 12(c))，其破斷亦轉換為脆性特徵 [19]。

3.8 銀厚膜溶解破斷

共晶 In-49Sn 合金熔點僅 118°C，為一典型的低熔點無鉛錫，在電子構裝製程中，較後段的迴錫溫度必須低於前段，此外，部分電子元件對溫度較為敏



(a)



(b)



(c)

圖 9 (a) Sn-3.5Ag 錫球接點經 200°C 時效後，Ni₃Sn₄、(Au,Ni)Sn₄ 與 Ag₃Sn 三種介金屬同時生成；(b) Sn-3.5Ag 錫球接點經 200°C 1,000h 時效後 BT 基板及錫墊出現嚴重破損；(c) Sn-3.5Ag 錫球接點經 200°C 時效 1,000h 後的推球斷面，呈現錫墊剝離現象

Fig. 9 (a) Ni₃Sn₄, (Au,Ni)Sn₄ and Ag₃Sn formation for Sn-3.5Ag solder joint in BGA packaging after aging at 200°C; (b) Damage of the BT substrate and solder for Sn-3.5Ag solder joint of BGA package at 200°C for 1,000 h; (c) Spalling of the solder pad for Sn-3.5Ag solder joint of BGA package at 200°C for 1,000 h

在 Al₂O₃ 陶瓷基板上燒結 20µm 厚的銀厚膜錫墊 (圖 13(a))，並植入 In-49Sn 錫球，以製做陶瓷球格陣列構裝。此 In-49Sn/Ag 厚膜界面在 275°C 進行錫錫反應 15min 後，顯示銀厚膜快速溶解進入錫中，並在界

面處形成裂紋(圖 13(b))，導致錫錫與陶瓷基板分離 [20]。

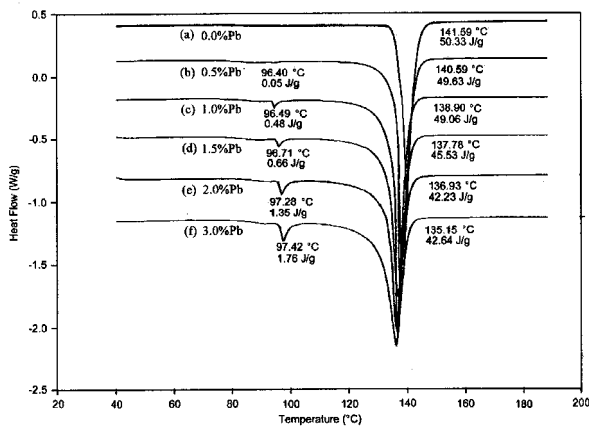


圖 10 Sn-58Bi 添加不同 Pb 含量之 DSC 曲線
Fig. 10 DSC analysis of Sn-58Bi solder with various Pb contents

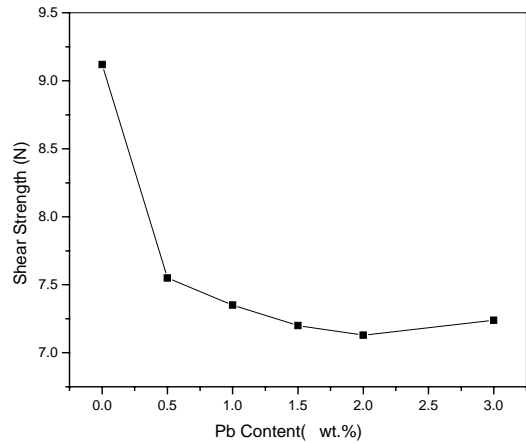
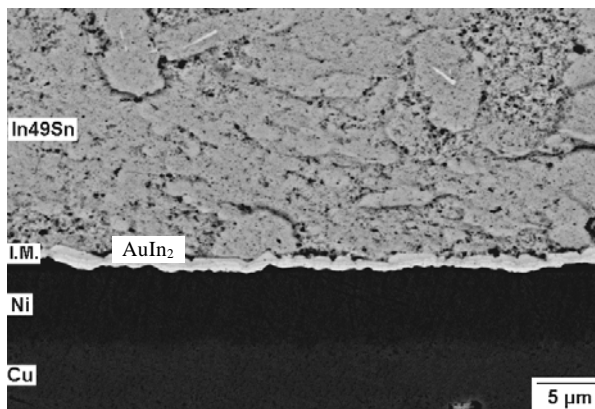
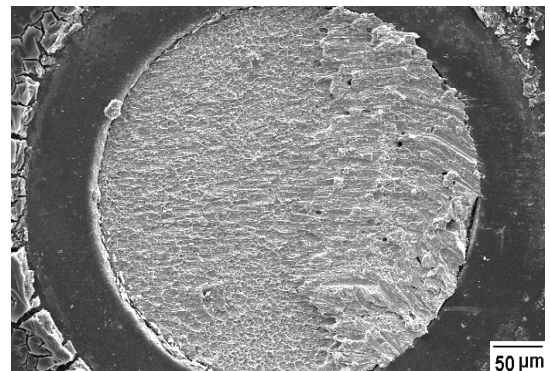


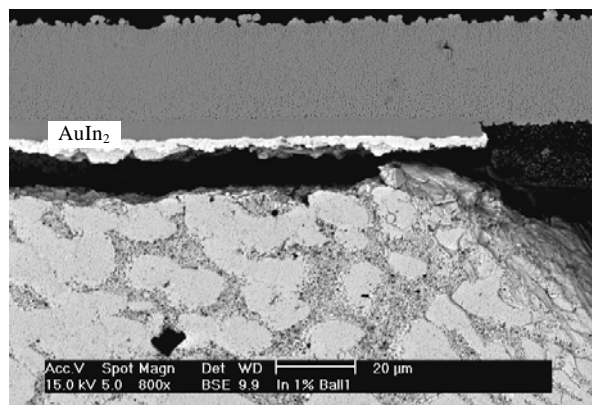
圖 11 Sn-58Bi 添加不同 Pb 含量之推球強度
Fig. 11 Ball shear strengths of Sn-58Bi solder with various Pb contents



(a)



(b)



(c)

圖 12 (a) In-49Sn 球格陣列構裝迴錫後之界面介金屬型態；(b) In-49Sn 球格陣列構裝迴錫後進行靜態推球試驗，破斷穿過錫球內部並呈現延性破損特徵；(c) In-49Sn 球格陣列構裝迴錫後進行動態彎曲疲勞試驗，呈現沿介金屬脆斷特徵

Fig. 12 (a) Morphology of the In-48Sn solder joint of the BGA package after reflow; (b) Fractography of the

In-49Sn solder joint of the BGA package after ball shear tests; (c) IN-49Sn solder joint in BGA packaging showing brittle fracture after bending fatigue tests

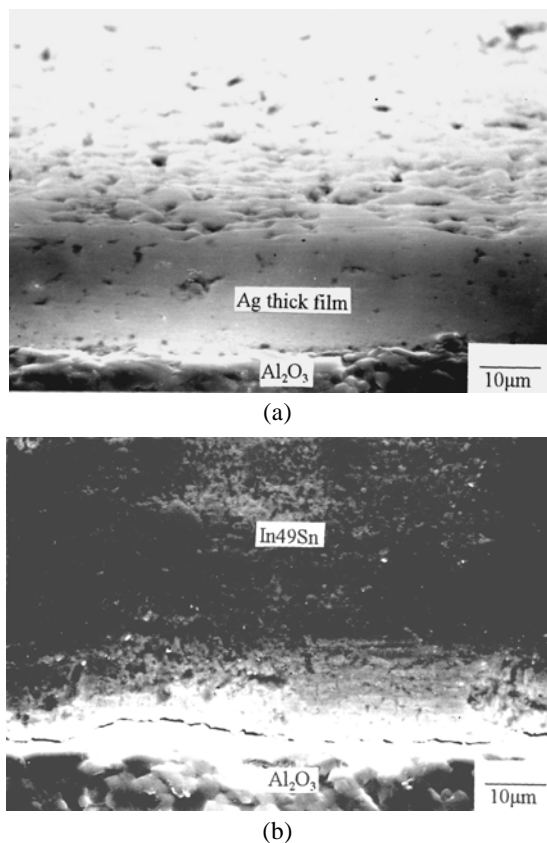


圖 13 (a) Al_2O_3 陶瓷基板表面燒結銀厚膜錒墊之截面金相；(b) 銀厚膜與 In-49Sn 錒錫在 275°C 反應 15 分鐘後，界面出現裂縫

Fig. 13 (a) Cross-sectional image of Ag thick layer on Al_2O_3 substrate; (b) Cracks formation for Ag thick layer with I-49Sn solder reaction at 275°C for 15 minutes

3.9 析出物造成錒錫不潤濕

Sn-4Ag-0.5Cu 錒錫球格陣列構裝迴錒後顯示良好的接合性，且與錒墊間有極佳的潤濕性（圖 14(a)），然而此 Sn-Ag-Cu 錒錫成分的專利問題目前仍困擾著電子構裝業界 [21]，也成為無鉛錒錫應用的一個障礙，為了突破此專利障礙，本研究亦嘗試發展其他組成的 Sn-Ag-Cu 無鉛錒錫，Sn-4Ag-5Cu 為其中之一。

雖然 DSC 分析顯示此 Sn-4Ag-5Cu 新錒錫合金亦為共晶成分，且其熔點與 Sn-4Ag-0.5Cu 錒錫接近（圖 15(a) 和圖 15(b)），此外其機械強度更遠高於 Sn-4Ag-0.5Cu 合金，然而此一高 Cu 含量 Sn-4Ag-5Cu 合金和錒墊的潤濕性極差，金相分析發現其內部形成許多大塊狀 Cu_6Sn_5 介金屬（圖 14(b)），這些大塊 Cu_6Sn_5 介金屬導致錒球與錒墊無法潤濕 [16]。

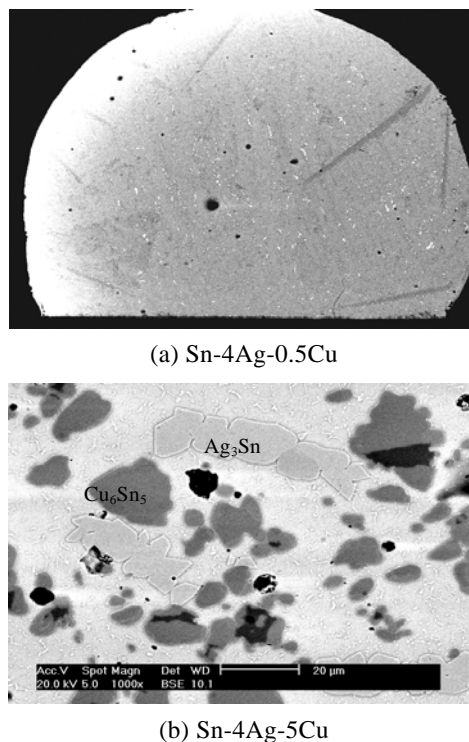


圖 14 兩種組成 Sn-Ag-Cu 錒錫迴錒後金相組織
Fig. 14 Morphology of two solder joints of the BGA package after reflow

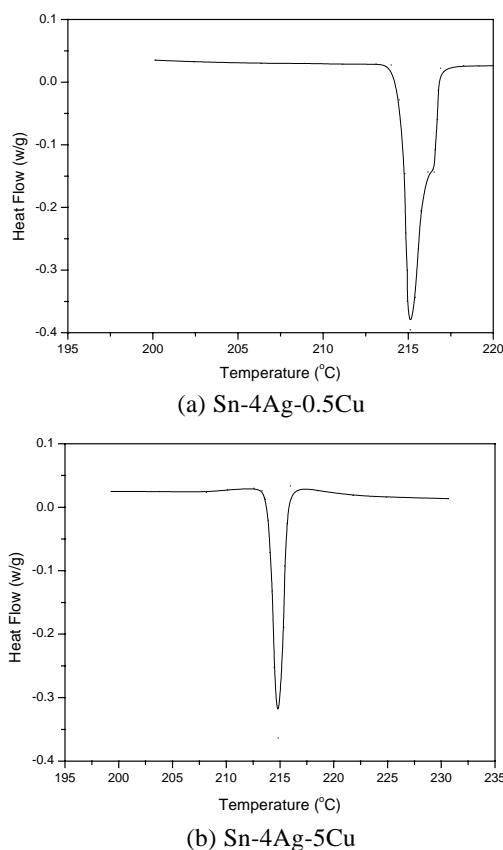


圖 15 兩種組成 Sn-Ag-Cu 錒錫之 DSC 曲線
Fig. 15 DSC analysis of two Sn-Ag-Cu solders

4. 結 論

鉛錫合金從羅馬時代使用至今，基於現代人的環保意識考量，開發無鉛錫以取代傳統鉛錫合金是電子產業的宿命任務，雖然本文列舉許多無鉛錫球格陣列構裝製程研究所發現破損問題，但是經由破損機理的瞭解，適當選擇無鉛錫成分與製程參數，電子構裝綠色產品的時代仍是指日可待。

參考文獻

- [1] J. H. Lau (Editor), *Ball Grid Array Technology*, McGraw-Hill, Inc., New York, 1995.
- [2] S. C. Bolton, A. J. Mawer and E. Mammo, "Influence of Plastic Ball Grid Array Design/Material upon Solder Joint Reliability," *The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging*, Vol. 18, No. 2, 1995, pp. 109-121.
- [3] Y. W. Chan, T. H. Ju, S. A. Herob, Y. C. Lee, J. S. Wu and M. J. Lii, "Reliability Modeling for Ball Grid Array Assembly with a Large Number of Warpage Affected Solder Joints," *ASME Advances in Electronic Packaging*, Vol. 19, 1997, pp. 1507-1514.
- [4] Q. Yu, T. Kashiwamura, M. Shiratori and K. Satoh, "Reliability and Structure Optimization of BGA Packages," *ASME Advances in Electronic Package*, Vol. 19, 1997, pp. 1761-1767.
- [5] O. Yu and M. Shiratori, "Thermal Fatigue Reliability Assessment for Solder Joints of BGA Assembly," *Advances in Electronic Packaging*, Vol. 26, No. 1, 1999, pp. 239-246.
- [6] O. Yu and M. Shiratori, "Effects of BGA Solder Geometry on Fatigue Life and Reliability Assessment," *表面實裝學會誌*, Vol. 1, No. 4, 日文, 1998, pp. 278-283.
- [7] R. Rorgren, P. E. Tegehall and P. Carlsson, "Reliability of BGA Packages in an Automotive Environment," *Journal of Surface Mount Technology*, April 1998, pp. 35-44.
- [8] M. Avery, L. Gopalakrishnan and R. Srivastava, "Interconnect Reliability of Micro BGA and Chip Scale Packages," *Journal of Surface Mount Technology*, July 1999, pp. 6-14.
- [9] B. Trumble, "Get the Lead Out," *IEEE Spectrum*, May 1998, pp. 55-60.
- [10] P. Zarrow, "Lead-Free: Don't Fight a Fact, Deal with it," *Circuit Assembly*, August 1999, pp. 18-20.
- [11] A. Grusd, "Connecting to Lead-Free Solders," *Circuit Assembly*, August 1999, pp. 32-38.
- [12] 莊東漢、王宣勝，「球格陣列構裝用超微小錫球的製造方法及其裝置」，中華名國發明專利核准，公告中 (案號 91109034)，2003。
- [13] M. J. Chiang, S. Y. Chang and T. H. Chuang, "Reflow and Burn-in of an Sn-20In-0.8Cu BGA Package with Au/Ni/Cu Pad," *Journal of Electronic Materials*, 2003 in press.
- [14] 王逸敏，「Sn0.9Cu 球格陣列構裝界面反應研究」，國立台灣大學材料科學與工程學研究所碩士論文，2002年。
- [15] 吳峰誌，「Sn20In2.8Ag 球格陣列構裝界面反應研究」，國立台灣大學材料科學與工程學研究所碩士論文，2002年。
- [16] 鄭明達，「Sn-Ag-Cu 錫球格陣列構裝界面反應研究」，國立台灣大學材料科學與工程學研究所博士論文，2003年。
- [17] 余昭倫，「Sn37Pb、Sn36Pb2Ag、與 Sn3.5Ag 錫球格陣列構裝界面反應研究」，國立台灣大學材料科學與工程學研究所博士論文，2002年。
- [18] T. H. Chuang, S. Y. Chang, L. C. Tsao, W. P. Weng and H. M. Wu, "Intermetallic Compounds Formed during the Reflow of In-49Sn Solder Ball-Grid Array Packages," *Journal of Electronic Materials*, Vol. 32, No. 3, 2003, pp. 195-200.
- [19] 王宣勝，「Sn-58Bi、Sn-51In 與 Sn-37Pb 球格陣列構裝的動態疲勞研究及可靠度分析」，國立台灣大學材料科學與工程學研究所博士論文，2003年。
- [20] 黃于恬，「電子構裝 In49Sn 無鉛錫與銀厚膜及銀基板之界面反應研究」，國立台灣大學材料科學與工程學研究所碩士論文，2000年。
- [21] M. Abtey and G. Selvaduray, "Lead-free Solder in Microelectronics," *Materials Science and Engineering*, Vol. 27, 2000, pp. 95-141.



莊東漢 (Tung-Han Chuang) 民國 42 年生。德國斯圖佳特大學材料博士。現職台灣大學材料科學與工程學研究所教授。專長為電子構裝、材料接合、破損分析。



張世穎 (Shih-Ying Chang) 民國 56 年生。德國席根大學機械博士，現職台灣大學材料科學與工程學研究所博士後研究。專長為電子構裝、陶瓷接合、高溫腐蝕。



鄭明達 (Ming-Da Cheng) 民國 66 年生。國立台灣大學材料科學與工程學研究所博士。專長為電子構裝、無鉛錒錫電鍍、微結構分析。



王宣勝 (Shiu-an-Sheng Wang) 民國 54 年生。國立台灣大學材料科學與工程學研究所博士。專長為電子構裝、金屬加工、可靠度分析。