

五. 研究方法

實驗的內容包括推球測試與 IMC 成長的觀察做為強度對照依據，待放至於室溫老化 1000 小時後進行四點循環彎矩測試與熱循環測試，其中 IMC 層對四點循環彎矩測試結果的影響也一併考慮進來。材料組成分為兩種不同表面處理的焊墊；ENIG(electroless nickel/immersion gold)焊墊與 OSP(organic solder ability preservatives)焊墊；搭配成分為 Sn-Ag-Cu 的錫球。選用 ENIG 的焊墊原因是此種表面處理為常見的無鉛表面處理，而選用 OSP 焊墊則是因為其是無鉛表面處理中成本最低的，而且在焊墊一直變小的狀況下，OSP 的表面處理可以解決在 Au-Ni 表面處理狀況下因電流密度不均所造成電鍍過程不易的缺點，此種表面處理方法頗能被手機製造商接受；隨著無鉛化的要求 OSP 表面處理在多次迴焊、焊墊濕潤能力(wettability)與保存期限上不斷的在進步中。Sn-Ag-Cu 則是最廣泛被接受的無鉛錫料成分，希望藉由實驗的結果提供各研發單位及學術機構做為改善無鉛錫料特性的參考，整個實驗的流程也可當做快速評估 CSP 等級錫點可靠度的方法之一，圖 5.1 為實驗流程圖與試片規劃圖。

IMC 實驗的目的在於觀察 IMC 的成長機制與經等溫時效作用後剪力強度的變化。藉由等溫時效作用加速 IMC 層的成長，並嘗試用擴散理論求得在兩種不同表面下 IMC 的擴散係數。在剪力強度方面，利用 JESD22-B117 規範的剪力推球測試法分析錫球在迴焊後黏著至基板後的錫點強度並用來觀察 IMC 的成長對剪力強度的影響。四點彎矩測試在架構上符合 IPC/JEDEC-9702 規範建議其架構模型。實驗目的用來模擬焊點受反覆的純彎矩作用下所造成的破壞分析，有別於較常見的三點彎矩測試。熱循環測試則符合 JESD22-A104-B 規範，測試溫度範圍採用 G 的條件(表 3.1)，目的用來測試因熱膨脹係數的

不同在升溫與降溫過程中熱疲勞(thermomechanically fatigue)對焊點所造成的影響；其在一定的熱循環周次後的殘餘強度測試以正向拉開(pull)的方式進行，好處在於可以量得組裝好的元件(component)狀態的殘餘強度。再加上金相實驗、SEM 及 EDX 等用來探討影響銲點破壞面、微結構、與成分分析等。

5.1 試片組成

試片的組成主要分成錫球與基板。錫球AIM出產直徑為0.4mm的錫球的商用錫球 TSC-4，批號為 E9650，詳細成分是 Sn/Ag3.8-4.0/Cu0.5-0.7，詳細目錄於表5.1，其使用期限為2004/5至2005/5；焊墊部分為兩種不同表面處理(ENIG表面處理與OSP表面處理)其焊墊開口大小為直徑0.35mm(四點彎矩用)與直徑0.3mm(熱循環測試用)，開口定義為阻焊層定義(SMD)。BT印刷電路板板材是南亞樹酯NP-200TL其詳細的規格於表5.2，板材厚度為0.38mm。本文所使用的ENIG表面處理銲墊，其金(Au)、鎳(Ni)、銅(Cu)層厚度分別為0.23 μm 、5 μm 和20 μm ，在厚度上在IPC-2221的要求之內。本文所使用的OSP表面處理銲墊，其Cu厚度為20 μm ，OSP保護膜厚2.5-3 μm 。

5.1.1 試片改進過程

試片設計與改進總共分三次。初始試片設計為 63 顆 Daisy Chain Samples 其規格符合 AMD 32M 及 64M FBGA 的規格如圖 5.2[28]，其完成品如圖 5.3；其上增加四個電鍍導孔，其目的除了作為定位用外，透過對背面的佈線連接導孔達到所要的電阻量測；以一片厚度相同大小不同 BT 板取代圖 5.2 背部 component 的部分；換句話說是以兩片

大小不同 BT 板做測試平台，中間植入要測試的錫球。

初期測試結果發現，板材勁度不夠(因材料是軟板)放上平台會有塌陷的情形，造成有一個初始的應力存在、其次是錫球數目太多以手工方式不易植入，要達到所要求的電訊失效量測還需要搭配可定位植球機與網板做前段植球動作。

第一次的試片改進中保留原本的測試想法,大大簡化 joint 連接的複雜度如圖 5.4，其完成圖如圖 5.5；改採用對每一個植球點作量測方式，其目的要避免一個球失效而造成所有的球都失效的情形，並把板材換成南亞生產 NP-200TL。其在推球測試完的結果發現兩個問題：第一，剪力推球試驗後在金像顯微鏡下發現 pad lift 的狀況占破壞模式比例太高如圖 5.6，造成的原因主要是回焊曲線控制不良，此圖片中右邊是壞在錫球，左邊則是壞在基材與銅焊墊之間，然而左邊的圖隱約可以看到基材的纖維；如果以阻焊層定義(solder mask define, SMD)取代非阻焊層定義(non-solder mask defined, NSMD)作為焊墊的開口定義，應可以改善此一情形，因焊墊與基材間的強度又被加強了；兩種不同定義開口的方式比較在圖 5.7[29]。這樣做的目的在於想讓問題集中在錫球部分(壞在錫球)，而不是壞在銅箔與 BT 基材，如此一來討論時才不會有多重的破壞方式出現，可以把焦點集中在錫球以及焊墊。因為透過阻焊層定義焊墊開口，可以保證焊墊本身與銅箔的強度一定大於錫球；第二，阻焊層只有上在要迴焊(reflow)面，造成回焊完後板材有翹曲的狀況，這樣會造成推球試驗是在一個彎曲的曲面上完成，影響推球強度的測試條件與結果。

試片的最後完成體為採用第二次的圖樣並改善焊墊開口定義的方法與兩面的防焊處理。

試片的電路設計測試模式是要在受一定的彎矩數目、一定的冷熱

迴圈數目後對每一個點做電阻值的量測，這樣可以避免一個焊點失效造成整片試片失效的情形；後來因為低阻計上搭配有 RS232 介面，透過連接阜跳線的修改可以達到即時紀錄的功能，再加上滑鼠自動點擊程式的設定，可以達到每 500 豪秒自動記錄一筆電阻值，因此在四點彎矩測試中電阻的上升量測，只對八個焊點中的中間四點取其中一點做即時的量測。試片由良達科技 董事長 張簡雲耀叔叔大力支持與幫助，並由良達科技高雄廠製造。

(1)印刷電路板(printed circuit board, PCB)

印刷電路板為覆有傳導電路的高分子複合材料基板，其功能為提供完成第一層次構裝元件與其它電子電路零件接合的基材，以組成一具特定功能的模組或成品。其較常見板材的有兩種，FR-4(Flame Retarded)環氧樹脂與 BT，其中以 BT 所能承受的回焊溫度比較高，可以承受無鉛製程的回焊溫度上升，當然高玻璃化轉化溫度(High Tg)的 FR-4 基板也是無鉛製程的一個不錯的選擇。印刷電路板成型及導體電路製成後，其表面除了元件錫墊或插孔之外，其餘部份通常披覆上一層高分子薄膜(也稱為防錫漆或綠漆，即 solder mask)，以避免電路板上的連線電路受到外來環境的侵害，並防止後續接合製程中因錫料溢流而造成的短路或元件錫接至不正確的位置。圖 5.8 為一般常見 PCB 基材的製造流程[30]。

(2)助錫劑

助錫劑為構裝元件與電路板接合製程中的必要材料。助錫劑的功能包括清潔錫墊表面，增高錫料與錫墊金屬間的潤溼性，提供適當的腐蝕性、發泡性(forming)、揮發性與黏滯性，以利錫接製程的進行。因本文採用樹脂狀免洗助錫劑，故不需再對試片進行清洗的步驟。

5.2 實驗設備

1. Instron-8848 微拉伸試驗機 (MicroTester)
2. 溫度/溼度控制箱
3. 剪力推球系統
4. 研磨/拋光機 (Polisher)
5. 紅外線迴焊爐 (IR reflow oven)
6. 高溫烤爐 (Oven)
7. 光學金相顯微鏡 (Optical Microscope)
8. 掃描式電子顯微鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM)
9. 低阻計 (Milliohm Meter)
10. 溫度溼度循環烘箱 (Temperature/Humidity Chamber)

5.2.1 微拉伸測試系統

(1) Instron-8848 微拉伸試驗機

本文使用的材料拉伸試驗儀器為 Instron 8848 微拉伸試驗機，如圖 5.9。主要組成架構包括 Fastrack 8800 控制器(controller)、負載架(loadframe)、荷重元(load cell)、夾具(grip/fixture)和致動器(actuator)。負載架本身的勁度相當高因此機器本身不易產生變形，所以可確保試片在測試時不會因機器的變形而造成實驗誤差。荷重元與試片本體形成串聯，可將力量轉換成電路訊號以供控制系統量測和顯示。夾具除了原廠的氣動式夾具外，如圖 5.10，亦可配合試片的需要而做不同設計，致動器則提供整個儀器的動力來源，上夾具端可隨致動器移動，但下夾具端則固定不動，荷重元位於其下方。

微拉伸試驗機的用途相當廣泛，不僅可做靜態拉伸/壓縮試驗

外，對於潛變實驗、疲勞實驗、三點彎矩或四點彎矩等實驗均可輕易達成。由 Fasttrack 8800 控制器、Merlin 測試軟體和 Instron-8848 微拉伸試驗機構成的微拉伸測試系統，對於試片的測試可藉由施加微小的力量(force)但卻可得到相當高的位移解析度，因此特別適合微米級(micro scale)的材料進行測試。

Instron-8848 微拉伸試驗機工作效能：

1.位移控制 / 量測精確度 / 解析度

- (a)行程範圍：軸向行程 $\pm 100\text{mm}$
- (b)量測精確度： $\pm 0.1\%$ 之設定速度
- (c)位移控制解析度： $\pm 0.05 \mu\text{m}$

2.負載控制 / 量測精確度 / 解析度

- (a)負載範圍： $\pm 1\text{Kg}$ 、 $\pm 100\text{Kg}$
- (b) 1Kg 荷重元 - 精確度： 0.05g 解析度： 0.004g
 100Kg 荷重元 - 精確度： 5g 解析度： 0.4g

(2) 溫/溼度控制箱

為便於探討不同溫/溼度環境條件下之材料性質，因此於微拉伸試驗機上外掛一溫/溼度控制箱，如圖 5.11。溫度的變化範圍為 $-40 \sim 250$ （夾頭最高容許工作溫度）；溼度的控制以加熱蒸餾水產生水蒸氣導入控制箱，如此一來即可精確評估不同環境條件下對試片材料性質造成的影響。箱內的溫度則由溫度感測器進行量測。

5.2.2 剪力推球系統

本文對於鐳料的剪力推球測試主要借助江國寧老師實驗室設備型號為 Dage 4000 微推拉力機來完成剪力強度的測試。將製做完成的試片放置於剪力推球系統的試片平台上，利用幫浦的運作而吸附固定試片平台的位置，適當地調整推刀(blade)的位置後，再由軟體來設定控制推刀推進時的參數，包括推刀的速度($400\ \mu\text{m/s}$)、高度($20\ \mu\text{m}$)及 overtravel($100\ \mu\text{m}$)等。

5.2.3 研磨/光機

關於金相試片的研磨、拋光過程均藉由研磨機來達成，如圖 5.12。研磨機的轉速可依需要在 70rpm~ 300rpm 之間做調整。當進行試片的研磨時，於研磨機的轉盤上依次放置不同號數的砂紙，而在進行拋光時則僅需將轉盤上的砂紙換成軟絨布再加上鑽石懸浮液的輔助即可完成試片的拋光。

5.2.4 高溫烤箱(熱風循環烘箱)

高溫烤箱內部的加熱方式為電熱絲底部加熱循環，加熱溫度最高可達 500°C ，烤箱的作用為試片進行等溫時效實驗的環境空間(chamber)，如圖 5.13。

5.2.5 紅外線迴焊爐

鐳料接著於基板上的迴焊過程為使用工研院電子所構裝課的紅外線迴焊爐，本次實驗所使用的回焊曲線如圖 5.14；非常感謝吳建樹學長，居中協調機台的借用事宜。

5.2.6 光學金相顯微鏡

光學金相顯微鏡的放大倍率一般都在 50 到 2000 倍範圍內，這個倍率已足以解析材料顯微組織中大部份的組成物與細節。雖然其放大倍率不及於各式的電子顯微鏡，但因操作非常簡便及試片製備容易，因此仍是使用最廣且最基本的研究工具。本文的試片在經研磨、拋光後即可借助江國寧老師實驗室的光學金相顯微鏡放大 1000 倍來觀察鋁料 IMC 層的成長狀況及內部微結構的改變，並配合軟體 Optimas 6.5 進行 IMC 層的厚度量測。

5.2.7 掃描式電子顯微鏡

SEM 是從事材料科學研究常使用的一項工具，它的主要用途是高倍影像的觀察，若搭配 EDX(Energy dispersive X-ray spectroscopy)使用則可以點分析(point analysis)或面分析(area analysis)方式對顯微組織內的局部區域進行化學成份定性及定量分析，或是以線掃描(line scans)及 Mapping 來顯示特定成份線性或其整體分佈的情形。

掃描式電子顯微鏡具有以下特性：

- (1)影像的景深很大：影像的景深大可以表現出實物的立體感，適合材料斷口破裂面的觀察，或是任何對於實物外形的觀察。
- (2)影像對比佳：影像對比是經由電氣系統的調整，因此可容易調到最好的對比。
- (3)解像能高：掃描式電子顯微鏡的解像能較光學顯微鏡高出甚多，且其操作簡單，試片準備及更換試樣皆極方便，因此 5 至 14 萬倍的放大倍率已足以應用於一般的研究工作。
- (4)試片製備簡單：掃描式電子顯微鏡可直接觀察光學顯微鏡用的金相試片或任何小型實體試片，只要其大小可安置於試片載物台上。

5.2.8 低阻計

對於 PCB 等低阻抗產品一般是採用低阻計並且以四點量測的方式如圖 5.15。本次實驗所用的低阻計量測範圍其所能選擇的檔位有 20m/200m/2/20/200/2K/20K/200K/2MO 是還具備 RS-232 標準介面，可以透過電腦連接紀錄電阻值。

5.2.9 溫度溼度循環烘箱

機台內部尺寸 102×266×208(cm)，溫度控制範圍-70~180 ；溼度控制範圍為 10%~98%。機台的照片在圖 5.16。



5.3 IMC 實驗方法

5.3.1 IMC 試片製作(即剪力推球試片)

首先為使 PCB 表面保持清潔，因此先用少許酒精將其擦拭乾淨以避免灰塵或其他雜質顆粒附著。利用針尖沾附微量的(免洗)助焊劑置於 PCB 的鐳墊上，接著即藉由針尖挑起錫球(solder ball)將其放置於塗有微量助焊劑的鐳墊上，在進行迴焊前助焊劑可暫時黏著錫球於鐳墊上而不致任意移動。在每一試片均植上 2x4 陣列的錫球，最後再送進紅外線迴焊爐中，錫球則依迴焊烤爐所設定的迴焊曲線完成焊接步驟，待 6~7 分鐘後錫球即完成與 PCB 板的焊接。錫球迴焊的過程共可分為四段，包括 preheat、soak、reflow 和 cooling。錫球在迴焊過程中先熔融後再藉由本身的表面張力形成球狀，於此同時也完成和鐳墊的接著。試片製作流程如圖 5.17 所示，圖 5.18 則剪力推球試片示意圖，圖 5.19 則四點循環彎矩與熱循環試片示意圖。剪力推球的試片數量包括 2 個溫度分別為 25、150，6 個時效時間點 0、120、240、480、720、1000 小時，在每種環境條件下(即溫度相同與時間相同)將有兩組相同的試片分別進行剪力推球測試，因此需 24 個試片。所選用的表面處理為 ENIG 與 OSP 兩種焊墊，因此共需 48 個剪力試片。IMC 的量測只在 150 的條件下量測，因此要 12 片 IMC 試片。所以就單面植球的試片(圖 5.17)要有 60 片。

5.3.2 IMC 成長實驗及剪力推球測試

將製作完成的試片放入高溫烤箱內進行 150 溫度的烘烤，分別在 6 個不同時間點 0、120、240、480、720 和 1000 小時，由高溫烤箱中取出經等溫時效作用後的試片，在相同環境條件下(溫度相同和時間相同)每次取出二組試片分別進行 IMC 成長實驗與剪力強度測

試。IMC 成長實驗為將烘烤過的試片進行鑲埋、研磨和？光等工作後，利用 Optimas 量測軟體來進行照相及厚度量測。IMC 的厚度量測為利用 Optimas 軟體，拉線量測 IMC 的厚度。IMC 層平均厚度的量測在每種環境條件下至少進行 10 次量測(量測 10 次)，以求將 IMC 層不規則之輪廓造成的誤差降至最低。剪力強度實驗為將烘烤過的試片藉由 Dage 4000 微推拉力機來完成，每種環境條件下(溫度相同、時間相同)至少進行 16 次(2x8 陣列)測試。其中剪力推球測試的參數設定主要包括推球的速度為 $400\ \mu\text{m/sec}$ 、推球的高度(shear height)為 $20\ \mu\text{m}$ 。待試片進行剪力推球實驗完畢後，藉由 Optimas、SEM 和 EDX 等工具的輔助來完成試片破壞模式的觀察。

5.3.3 金相觀察

材料的微觀組織意指材料透過顯微鏡放大後觀察到的細部組織，一般而言是指經光學顯微鏡觀察到的結果。製作微觀試片的方法一般是按照以下步驟：

取樣 鑲埋 研磨 ？光 浸蝕 顯微鏡觀察

藉由金相試片的製作即可用來觀察材料內部的微觀組織。

5.4 四點彎矩實驗方法

5.4.1 試片製作

製作四點彎矩試片的起始步驟如同剪力推球試片(見 5.3.1 節)，待剪力推球試片製作完畢後，將其翻覆過來後施以輕壓使其接著置另一塗有助焊劑之 PCB 的銲墊上(圖 5.19)，利用預先鑽好在 PCB 板上的導孔做定位，當八個導孔皆可透視貫穿表示球已經對在適當的 PAD 上面了。最後再送進紅外線迴焊爐中進行二次迴焊，其完組合圖及完成圖如圖 5.20(2x4 陣列)。由於錫球本身具有自我對準的特性，因此將製作完成後的剪力推球試片翻置於另一 PCB 上時，錫球與銲墊間稍許的偏差在迴焊後將自動對準，所以並不會影響試片製作的良窳，因此四點彎矩試片在二次迴焊後即完成製作。

5.4.2 四點循環彎矩實驗

四點彎矩實驗試片在二次迴焊後即製作完畢，先將迴焊後的四點彎矩試片置於室溫環境下至少 1000 小時後才進行四點彎矩實驗，假設 1000 小時後銲料內部的微結構已達到穩定狀態，如此可將時效作用對四點彎矩實驗造成的影響降至最低。

四點彎矩實驗試片放置於室溫環境下 1000 小時後，利用焊槍把預先量好電阻值的編織型電線焊在背面所預留的 PAD 上；先把試片放置到夾頭上如圖 5.21，其中上夾頭的內徑寬 2cm，下夾頭的內徑寬 3cm。為使試片在循環彎矩實驗過程中不至於產生晃動或位移，預先施加預力 0.3kgf，並設定此點為位移頂點，之後轉成行程控制，再開始進行循環彎矩測試，振幅行進的波型為三角波如圖 5.22，夾頭移動速度 1mm/s，在本次試驗中這個值是固定的；彎矩施加時以微阻計的扁平夾，夾住電線的另外一端，透過 RS232 的傳輸由 PC 自動紀錄電

阻值變化。四點彎矩實驗試片的數量如下：包括 2 個溫度分別為 25 、 120 的測試環境與 150 下 1000 小時的老化試片(內含 IMC 層)；在每秒 1mm 的上夾頭移動速度下進行三個不同振幅(0.5mm、0.6mm、0.7mm)的測試；以 0.5mm 振幅為例，定義施加預力的平衡位置為位移頂點，向下 0.5mm 的振幅行進位置為振幅中點，再向下 0.5mm 為振幅底點。每個條件的有效試片數為 7 個，因此需有 63 個試片進行四點彎矩測試。所選用的焊墊為 ENIG 與 OSP 表面處理的焊墊，因此共需 126 個四點彎矩試片(圖 5.20)。



5.5 熱循環實驗方法

5.5.1 試片製作

製作方法參照 5.3.1，試片同四點循環彎矩的形式。

5.5.2 熱循環實驗

熱循環實驗試片在二次迴焊後即製作完畢，先將試片置於室溫環境下至少 1000 小時後才進行熱循環實驗，假設 1000 小時後錫料內部的微結構已達到穩定狀態，如此可將時效作用對熱循環實驗造成的影響降至最低。

熱循環實驗試片放置於室溫環境下 1000 小時後，利用焊槍把預先量好電阻值的編織型電線焊在要量測電阻的試片的焊墊上。溫度範圍選取為-40 ~125，溫度隨時間變化的曲線為圖 5.23。在一定的熱循環周次間隔後取出試片量測其電阻值變化；並取出另一組試片以正向拉力(pull)的方式把試片拉開，測試其殘餘強度(方法於 5.5.2.1 節)，其後以 SEM 觀察其破壞面。熱循環實驗試片的數量如下：取 6 個時間點；一個試片做電阻上升量測(8 點)，四個試片做殘餘強度測試。每個條件的有效試片數為 5 個，因此需有 30 個試片進行熱循環實驗。所選用的材料為 ENIG 與 OSP 表面處理的焊墊，因此共需 60 個熱循環實驗試片。

5.5.2.1 殘餘強度測試

待試片受一定熱循環迴圈破壞後，利用 CN 膠(cyanoacrylate)將其一端黏著至製作完成之夾具上，待其固定後再把另一片夾具粘上，為避免 CN 膠在未完全固化前黏著力不足的問題，因此至少放置 12 小時後，待 CN 膠已完全固化在常溫之下藉由微拉伸測試系統來進行拉力測試。其使用的夾頭設計圖與組合圖如圖 5.24。