

五. 研究方法

本文的實驗包括兩大部份，IMC 實驗與潛變實驗。材料組成包括三種材料，分別為 63Sn-37Pb、Sn-3.5Ag 和 Sn-4Ag-0.5Cu。選用 Sn-3.5Ag 和 Sn-4Ag-0.5Cu 的原因為此兩種錒料是目前最廣被接受的無鉛錒料，將這兩種錒料與現今商用最普及的 63Sn-37Pb 做比較，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錒料特性的參考，整個實驗的流程也可當做快速評估錒點可靠度的方法之一，圖 5.1 為實驗流程圖。

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 IMC 生成的致動能。在剪力強度方面，利用 JESD22-B117[55]規範的剪力推球測試法分析錒球在迴焊後黏著至基板後的錒點強度，再加上金相實驗、SEM 及 EDX 等用來探討影響錒點發生破壞的原因，以做為改善 PCBA 的標的。

5.1 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)

5.1.1 微拉伸測試系統

(1) Instron-8848 微拉伸試驗機 (MicroTester)

本文使用的材料拉伸試驗儀器為 Instron 8848 微拉伸試驗機，如圖 5.2。主要組成架構包括 Fasttrack 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 5.3，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：± 1Kg、± 100Kg

(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 5.4。溫度的變化範圍為 $-40^{\circ}\text{C}\sim 250^{\circ}\text{C}$ (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。

5.1.2 剪力推球系統

本文對於鋁料的剪力推球測試主要藉由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($300\ \mu\text{m/s}$)、高度($60\ \mu\text{m}$)及 overtravel 等。

5.1.3 研磨/拋光機

關於金相試片的研磨、拋光過程均藉由研磨機來達成，如圖 5.5。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。

5.1.4 紅外線迴焊爐(IR reflow oven)

銲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。因 Sn-Pb 及無鉛銲料的迴焊曲線並不相同，因此迴焊過程依銲料的種類而使用不同的迴焊爐。

5.1.5 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℃，烤箱的作用為試片進行等溫時效實驗的環境空間(chamber)，如圖 5.6。

5.1.6 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、拋光後即可由江國寧老師實驗室的光學金相顯微鏡放大 1000 倍來觀察銲料 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。

5.1.7 掃瞄式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope)

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，或是以線掃瞄(line scans)及 Mapping 來顯示特定成份線性或其整體分佈的情形。

掃瞄式電子顯微鏡具有以下的特性[56]：

- (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 萬倍的放大部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 試片組成

試片的組成除了三種直徑均為 0.76mm(30mil) 的錫球 63Sn-37Pb、Sn-3.5Ag 和 Sn-4Ag-0.5Cu 外，尚包括 352 I/O 的印刷電路板(Cu/Ni/Au 表面處理)、助鉺劑，茲將其簡介如下[1]。

(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。印刷電路板的絕緣板材由高分子樹脂與玻璃強化纖維組成，FR-4 環氧樹脂具有低廉的價格與優良的特性，是為硬式印刷電路板最常見的高分子原料，FR 為阻燃(Flame Retarded)的縮寫。印刷電路板成型及導體電路製成後，其表面除了元件鉺墊或插孔之外，其餘部份通常披覆上一層高分子薄膜(也稱為防鉺漆或綠漆，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鉺料溢流而造成的短路或元件鉺接至不正確的位置。表 5.1 為一般常見 PCB 基材的主要性質。本文使用的基

板鐸墊的表面處理為 Au/Ni/Cu，厚度分別為 $1\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 和 $20\mu\text{m}$ 如圖 5.8。鐸墊間距為 1.27mm ，基板上銅鐸墊直徑是 0.889mm ，綠漆定義開口直徑為 0.6mm ，PCB 厚度為 0.5mm 。

(2)助鐸劑

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

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。待 PCB 擦拭乾淨後便可將其裁切成適當的大小，並利用針尖沾附微量的(免洗)助焊劑置於 PCB 的鐸墊上，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鐸墊上，在進行迴焊前助焊劑可暫時黏著錫球於鐸墊上而不致任意移動。在每一試片均植上 4×4 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[3]，63Sn37Pb 鐸料的迴焊曲線如圖 5.9(a)；Sn-3.5Ag、Sn-4Ag-0.5Cu 的迴焊曲線如圖 5.9(b)。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，於此同時也完成和鐸墊的接著。剪力推球試片製作流程如圖 5.10 所示，圖 5.11 則為示意圖。剪力推球的試片數量包括 3 個溫度分別為 125°C 、 150

℃、175℃，10 個時效時間點 0、24、48、72、96、120、240、480、720 和 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金相研磨拋光及剪力推球測試，因此需 60 個試片。所選用的材料為 63Sn-37Pb、Sn-3.5Ag 和 Sn-4Ag-0.5Cu 三種錫球，因此共需 180 個 IMC 試片。

5.3.2 IMC 成長實驗及剪力推球測試

將製作完成的試片均放入高溫烤箱內進行 125℃、150℃、175℃ 三種不同溫度的烘烤，分別在 9 個不同時間點 24、48、72、96、120、240、480、720 和 1000 小時(JESD22-A103-B, Condition A、B、C [57])，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、研磨和拋光等工作後(見 5.5 小節)，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 軟體量測 IMC 某一區塊的面積後再除上該區塊的長度則可得到 IMC 層的平均厚度。IMC 層平均厚度的量測在每種環境條件下至少進行五次量測，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(4x4 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 300 μ m/sec、推球的高度(shear height)為 60 μ m 符合 JESD22-B117 之規範，如圖 5.12。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。

5.4 靜態與潛變實驗方法

5.4.1 潛變試片製作

製作潛變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 的鐳墊上，最後再送進紅外線迴焊爐中進行二次迴焊，如圖 5.13(2x2 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，錫球與鐳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，因此潛變試片在二次迴焊後即完成製作。

5.4.2 潛變實驗

潛變試片在二次迴焊後即製作完畢，先將迴焊後的潛變試片置於室溫環境下至少 1000 小時後才進行潛變實驗，假設 1000 小時後鐳料內部的微結構已達到穩定狀態，如此可將時效作用對潛變實驗造成的影響降至最低。

潛變試片放置於室溫環境下 1000 小時後，將其黏著至夾具上即可開始進行潛變實驗。先利用 CN 膠(CYANOACRYLATE)將其一端黏著至製作完成之夾具上，待 CN 膠略乾後即可藉由對準輔具的小溝槽完成另一端試片的黏著。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 膠已完全固化才藉由微拉伸測試系統來進行潛變測試。圖 5.14 為潛變試片黏著至夾具之流程。潛變試片的數量如下：包括 4 個溫度分別為 25°C、75°C、125°C、150°C，在靜態實驗的部份，每個溫度的有效試片數為 7 個，因此需有 28 個試片進行靜態強度測試以決定應力等級的選取。每個溫度選取 5 個應力等級進行潛變實驗，每種應力等級的有效試片數目為 3 個，因

此需 60 個試片。所選用的材料為 Sn3.5Ag 和 Sn4Ag0.5Cu 三種鉛料，因此共需 176 個潛變試片。圖 5.15 為進行靜態及潛變實驗的夾具圖。

5.5 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→拋光→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。以下將鑲埋、研磨、拋光與浸蝕等步驟的目的作簡略說明[56]。

5.5.1 鑲埋

鑲埋的目的就是將形狀複雜、尺寸較小或不易握持的試片固定住，以便進行後續的研磨及拋光工作。通常藉由圓柱型的模子倒入塑性材料後製成一個圓柱體型的鑲埋件，由於它易於握持，因此在研磨拋光後可得到平坦的表面。依鑲埋材料的種類可將鑲埋法分成兩類，一為熱鑲埋，它使用熱硬性或熱塑性材料，需加熱加壓才會硬化(可藉由熱鑲埋機)；另一類為冷鑲埋，使用酚醛、聚乙烯和環氧樹脂等材料，可在室溫下硬化。

5.5.2 研磨

研磨的作用就是要去除試片經取樣割切時所產生的變形，同時也是欲獲得一個平整的表面層，為後續的拋光過程奠下基礎。為了使研磨過程中減少熱量的產生並帶走砂紙上的研磨顆粒，因此在研磨過程中需加水濕磨，否則倘若砂紙顆粒嵌入試片後，如果在後續的過程中未能去除之，將會被誤認為材料內部的雜質。

5.5.3 拋光

在研磨完成後試片表面仍會殘留些許的應變層刮痕，這些應變層與刮痕必須在拋光過程中將之去除，以便得到一個平坦無應變層的鏡面表面。所謂“鏡面表面”並非指完全沒有刮痕，而是要求將刮痕減至最低的程度，對於一般的金相觀察，少數的刮痕存在是被允許的，只要不致影響到真正的顯微組織，某些細微刮痕在浸蝕後會減少或甚至消失。

5.5.4 浸蝕

拋光後的試片在顯微鏡下可觀察到夾雜物顆粒及孔洞，主要是因為這些非金屬夾雜物的光學反射率與金屬基材差異很大，而孔洞處的凹陷會造成光線反射的不平均，因此在顯微鏡下觀察時，夾雜物及孔洞呈現暗色而金屬基地則為亮色。對於大部份的材料，由於拋光後的鏡面表面會使顯微鏡光源的入射光線造成平行的反射，因此只能看到光亮的試片表面，但卻無法觀察到細部的組織，將拋光面浸蝕處理後，顯微組織內的各細節(不同的相、晶界與差排等)會對於浸蝕液反應出不同程度的腐蝕效應，因此浸蝕的結果將使試片拋光面產生不平坦的地形效果，藉著光線反射將隱藏在內的顯微組織完全顯現出來。

5.5.5 金相試片製作

本文採用冷鑲埋法來完成試片的鑲埋，鑲埋的材料組成包括環氧樹脂及硬化劑，依 100：1.5 的比例在常溫下混合成黏稠狀液體後注入圓柱形模內，待黏稠狀液體硬化後即可脫模進行研磨，鑲埋的流程如圖 5.16 所示。為使鑲埋件的表面保持清潔，因此在進行研磨前先利用空氣噴槍將鑲埋件表面的灰塵及雜質顆粒清除，之後才開始研磨試片。研磨試片的砂紙先由 240 號開始進行粗磨，將試片逆著研磨機

轉盤轉動方向(即轉盤順時針向，研磨方向則朝逆時針向)進行研磨，以得到任意方向的刮痕並可保持表面平坦。接著依次使用 400、800、1200、2500 和 4000 號數的砂紙進行研磨的工作，務必能使試片表面的刮痕達到最小以利後續之拋光。在研磨過程中每一道砂紙研磨的時間以能去除前一道砂紙留下的刮痕為原則，至於施壓的程度則依個人的經驗及感覺而定，通常為能使試片順暢進行及去除刮痕為前提，過輕的壓力只產生熱量並無研磨的效果，而過重的壓力會將研磨顆粒嵌入表面甚至造成無法除去的深刮痕。為避免研磨時試片因砂紙顆粒的嵌入而影響試片在金相觀察所得到的結果，因此當試片置換不同號數的砂紙時，將其置入超音波清洗機內，如圖 5.7，藉由適當的超音波震盪將其表面的砂紙顆粒震落，避免因雜質顆粒而造成金相觀察與微觀組織分析時的困擾。

試片在研磨完畢後即可進行拋光，以除去試片上的微細刮痕而得到鏡面表面便於金相觀察。首先將研磨機轉盤上的砂紙置換成軟絨布，然後將軟絨布先用水及刷子清洗一次，除了可除去灰塵顆粒外，亦可將前一次拋光時的殘留物清洗掉。接著在軟絨布上沾上拋光介質(本文為鑽石懸浮液)，在進行拋光時不需加入水以避免將附著於絨布上的鑽石顆粒帶走，而無法達到拋光的效果。經不斷地反覆拋光後即可將試片表面大部份的刮痕去除，再利用空氣噴槍將試片表面吹乾後便可進行金相觀察。