

## 第四章、結果討論

### 4-1. 試片剖面的觀察

本研究中所觀察到電遷移破壞都發生在電子流向下的 b3 錫接點，破壞模式大多為孔洞生成造成的電路開路，而在配合錫錫電阻量測而即時中止測試的各階段試片中，也都發現到孔洞生成的現象，如（圖 28 ~ 31），然而與通入 0.8 A 的試片相比較，通入電流為 0.9 A 的試片，雖然主要的破壞機制亦為孔洞生成，但同時也伴隨著較快速的介金屬化合物成長，且在通電到電路斷路後研磨 0.9 A 的試片當中，可以發現到 UBM 整個塌陷消失的情況。其次，通入 0.9 A 電流的試片之電遷移測試時間平均僅 13.8 小時，遠低於 0.8 A 試片的測試時間 756.6 小時，此一現象應與前述之 UBM 快速反應有關。

由 Black's equation :

$$MTTF = A \frac{1}{j^n} \exp\left(\frac{Q}{kT}\right) \quad (6)$$

可得知在電遷移測試下，指數函數中的溫度項對於可靠度的影響較大，特別在溫度接近熔點時尤其如此，結合上述兩點可推測 0.9 A 的測試條件下，錫錫接點內部的溫度應該很接近熔點，才可能觀察到如此的現象。

但孔洞生成的同時伴隨著如此快速的 UBM 反應，反而會造成實驗

觀測上的困難，一方面破壞時間過短，銲錫電阻變化過快，不容易利用銲錫電阻的變化標定各個不同的破壞階段；另一方面，孔洞的生成大多發生在介金屬化合物與銲錫的介面上，介金屬化合物抗電遷移的能力較佳，IMC 成長過快就會阻礙到孔洞的成長，此外也會造成孔洞厚度分析不易。

故在本研究著重在 150 °C、0.8 A 測試環境下的孔洞生成行爲，在此測試環境下，IMC 成長的速度較 150 °C、0.9 A 的環境下要慢的多，對於孔洞生成的影響較少，且平均破壞時間的範圍分布在 400~1100 小時之間，初始變化階段（階段 1）所需的時間則分布在 25 ~ 40 小時之間，對於實驗實務上是比較容易觀測、控制的時間範圍。150°C、0.8 A 的試片如（圖 20）所示

## 4-2. 銲錫電阻曲線分析

### 總電阻量測結果

（圖 19 a）展示的曲線是在 150 °C、0.8 A 的電遷移測試條件下損壞的電阻曲線，垂直軸表示總電阻，水平軸表示正規化時間，起始的電阻為 1.77 Ω，曲線在測試總時間的前 80 %並未顯示有明顯的趨勢，可是在超過 80 %的測試時間以後，曲線開始有明顯而且不規則的劇烈上升，直到試片破壞。

(圖 19 a) 的左上角是測試時間前 80 % 的總電阻放大圖，在測試的初期會發現曲線呈現約 20 至 30 mΩ 的下降，這個現象也許是因為外加電流使各種不同材料間的接觸電阻下降的緣故，詳細的原因未來可以在做更詳細的研究，此處先不深入討論。而在曲線經過測試時間的 80 % 以後上升了約 30 mΩ，因為整個測試回路上電阻的主要構成是鋁導線與外導線提供，所以這些上升主要是來自電遷移測試時所造成的鋁導線劣化、銅外導線氧化與各金屬間接觸電阻變化的緣故，可是在測試中發現鋁導線的電阻在測試中幾乎沒有上升，所以此時觀測到的總電阻曲線上升應該大多來自於 FR4 基板上的銅導線氧化與接觸電阻的變化。

此外，總電阻的測試曲線中可以發現，曲線的雜訊大小約為 5 至 10 mΩ，這些雜訊除了來自儀器本身的量測誤差以外，大部份源於溫度改變造成的電阻變化；若以佔整個迴路絕大部分的鋁、銅金屬來看，電阻溫度係數 (Temperature coefficient of resistance) 約為  $4 \times 10^{-3} \text{K}^{-1}$ ，則可推得溫度變化對整個迴路造成的影響為  $7 \text{ m}\Omega / ^\circ\text{C}$ ，由此結果可推論溫度為此雜訊的主要來源。

### 凱文鐳錫球結構量測結果

鐳錫球受電遷移影響所造成的電阻改變可以利用凱文鐳錫球結構做非常精確的量測，而且這些量測到的改變可以視為來自電遷移時孔洞

生成或是微結構上的改變。

凱文鍍錫球結構的量測曲線與總電阻曲線呈現相當大的差異。(圖 19 b) 所示為凱文鍍錫球結構所量測的鍍錫電阻曲線，起始的鍍錫電阻僅只有  $0.6 \text{ m}\Omega$ ，隨著測試時間的增加，鍍錫電阻也隨著不斷的上昇，持續到測試時間的 80%，而後曲線開始急劇上升直到試片在測試 756.6 hr 後破壞。(圖 19 b) 左上角的圖為鍍錫電阻在測試時間前 80% 的放大圖，由圖中可得知曲線在通電後 20 hr 開始上升，在通電 29.8 hr 後達到初始值的 1.03 倍 (亦即上升 3%)，此時間僅佔總破壞時間的 4%，與模擬的結果比較後得知，此時應為孔洞生成的初始階段，此點與後續的有限元素模型分析結果對照後可驗證。另外，在鍍錫電阻上升到初始值之 1.5 ~ 2 倍之間時，可以發現電阻的斜率有明顯的增加。

### 4-3. 利用電阻量測標定孔洞形成的各階段

#### 各階段孔洞生成大小與電阻變化

因為凱文鍍錫結構可針對特定區域的精確量測特性，研究中利用鍍錫電阻上升的多寡來標定孔洞成長的各個不同階段。

(圖 20 a ~ f) 展示了成長到不同階段的孔洞，(圖 20 a) 為鍍錫在通電測試前的剖面電子顯微鏡圖，標示為階段 0。

(圖 20 b) 是  $150^\circ\text{C}$  時通入 0.8 A 電流 29.8 小時的剖面電子顯微鏡

圖形，此時的鍍錫電阻由  $0.6 \text{ m}\Omega$  上升至  $0.62 \text{ m}\Omega$ ，亦即為初始鍍錫電阻的 1.03 倍，圖中的箭號表示電子流的方向，此階段標示為階段 1，圖中可以發現在鍍錫與介金屬化合物間、接近電子流入口處有一個小孔洞生成，且因為錫與鎳的介金屬化合物生成速率較慢，故此時沒有觀測明顯的介金屬化合物成長。

(圖 20 c) 則是另一個試片在同樣的參數下通電 101.5 小時 的情況，此時鍍錫的電阻已經上升到初始值的 1.1 倍，圖中可以看到在鍍錫與介金屬化合物的介面上已經有更大孔洞的生成，此階段標示為階段 2。

(圖 20 d ~ f) 為同樣參數下通電 140、155.3、383.0 小時的情況，此時的鍍錫電阻上升為初始值的 1.2、1.5 與 10.0 倍，相較於階段 2，孔洞大小仍有持續顯著的成長，此階段標示為階段 3 ~ 5。

由上述的結果可以看出，孔洞開始生成所花費的時間僅為總破壞時間的 5%，而剩餘 95% 的時間則是孔洞成長與最後破壞的時間，這種現象或許是因為 UBM 截面積的尺寸遠比鋁導線截面積的尺寸大，所以才會孔洞的成長才會花費絕大部分比例的時間。

另外，由後續有限元素分析的結果可以發現，孔洞的生成會造成電流集中效應被減緩並分散到大範圍的情況，可是雖然電流集中效應被減緩至一定程度，集中的範圍卻反而變大，綜合起來孔洞成長的速度有增無減，此點由鍍錫電阻在上昇至 1.5 倍後，斜率明顯增加可以清楚說明。

與有限元素分析的比對中也發現到，在同樣的電阻變化時，實際實驗上所觀測到的孔洞大小要比有限元素分析中所觀測到的大小要稍大一些，主要是因為溫度效應造成初始值上升，進而減緩了鎘錫電阻變化的量。此點在 4-4. 有較詳細的討論。

而在(圖 20 e. f.)中可以發現到孔洞呈現兩段式的分布，此點在 4-4. 中也會做較為詳細的討論。

### 實驗後期之電阻急遽上升

(圖 33.34.) 為模擬與實際實驗比較，兩者相對照的孔洞生成長度，雖然實驗與模擬的結果沒有完全重合，可是兩曲線表現出相同的趨勢，在量測到的電阻上升到初始值 1.5 倍以前，電阻都隨孔洞的逐漸成長緩慢上升，在電阻值超過初始值 1.5 倍以後、10 倍以前，不論是實驗與模擬觀測的結果皆呈現急遽上升。

曲線呈現如此的趨勢與電流集中效應造成的電流密度分佈有密不可分的關係，因為電流集中效應，大部分的高電流密度區域都分布在靠近電子流入口處，因此在遠離電子流入口處幾乎沒有電流流過，在電流流經的平面(也就是金屬墊層開口)可以觀測到有所謂有效區域電流區域的存在。在孔洞生成的初期，剩餘的金屬墊層大小仍遠大於有效電流通面積的大小，在(圖 20.)中 1.5 倍初始電阻值的結果可以發現孔洞生成的長度已經超過金屬墊層直徑的一半，當實驗超過此階段以後，

可以發現剩下可通電的面積很可能已經小於電流通的有效面積，因此量測到的電阻值才會劇烈上升。

#### 4-4. 模擬結果與實驗結果的對照

##### 遠小於估計值的鉚錫電阻

凱文鉚錫結構所量測到的鉚錫電阻為  $0.6 \text{ m}\Omega$ ，這個結果遠比實驗前所預期的低。由簡化的圓柱結構來計算，鉚錫球的電阻應該約為  $1.5 \text{ m}\Omega$ ，若由三維有限元素模型結構來推論鉚錫球的電阻則約  $7$  至  $10 \text{ m}\Omega$ ，這個現象主要由兩個原因所造成。其一、本研究中所使用的鉚錫高度遠比一般所預期的低，僅  $25 \text{ }\mu\text{m}$  高，約為一般和習球的四分之一到六分之一；其二、電流集中效應造成的影響，由整個鉚錫的結構來看，凱文鉚錫結構所分布的量測位置是位在低電流密度分佈的區域，所以凱文鉚錫結構能夠量測到的電位分布只佔實際電位分布的一小部份，縱整以上兩個原因才使此時量測的鉚錫電阻遠比預想的低。

##### 孔洞生成與電位分布的變化

爲了要對孔洞生成的行爲做更精細的討論，在此處引入三維的有限元素模型，分析的方法、輸入的條件已詳述於 3-3.。(圖 32) 分別爲同樣鉚錫電阻的階段 1 ~ 5 之有限元素模型與實際實驗的對照圖，電子流皆由圖的左上角通入，由左下角流出。

由圖形顯示的分布可以發現，右手邊的電位分佈要小於左手邊的電位分佈，是故凱文鐳錫結構所量測的電阻值遠較理論推得值小，階段 0 在右側分布的電位差 0.4 mV，故電阻值為 0.5 mΩ，與實驗值分佈在同一個數量級上，之所以沒有辦法作完全準確的計算，主要是因為本研究中所做的有限元素分析僅為純粹電性的分析，然而電性並非在所有情況下都是穩定不變，而是會隨著溫度等週遭環境而改變，第二章回顧之文獻也有提及溫度變化對於電性行為的影響，因為有 TCR 的存在，在溫度越高時電阻的值就會越大，是故此處所做之有限元素分析與實際實驗上一樣只著重在變化的大小上。

孔洞持續成長的同時，電子流可流過的面積隨之逐漸減少，高電位的分布區亦隨之向右側延展，導致凱文鐳錫球結構量測到的電位分佈逐漸增加，鐳錫電阻也就不斷上升。

### 接觸電阻的大小

除了上述的條件以外，雖然模擬的過程中並沒有考慮到接觸電阻的問題，可是在實際的量測上接觸電阻對於量測的接點電阻很可能有很大影響，故在本研究中為分離接觸電阻的因素，另外由不同高度的鐳錫接點嘗試利用外插法計算接觸電阻的大小，(圖 35) 為高度 75 μm 之鐳錫球量測 140 小時的電阻曲線，電阻的平均值為 1.1 mΩ，由此結果與高



度  $25\ \mu\text{m}$  之電阻值相比較可得接觸電阻與金屬墊層的電阻合小於  $0.05\ \text{m}\ \Omega$ ，故可推論接觸電阻在本研究中所佔的影響甚微。

### 兩段式的孔洞分佈

在（圖 20 e. f.）中的銲錫接點剖面會發現到一個有趣的現象，此兩階段的孔洞分布呈現兩段式的分布，靠左側的孔洞是因為靠近電流集中的位置而產生，這是符合文獻所提及的情況，可是在靠右側的銲錫與介金屬化合物交界處也發現有孔洞的生成，此現象可由有限元素分析結果說明之。

由（圖 34）所示，當孔洞生成的初期階段，電流集中的區域還是緊靠在電子流流入的區域，可是當孔洞逐漸成長到後期，就會出現電流集中的區域出現在銲錫周圍，造成電流密度呈現碗狀分布的情形，故研磨後就會觀察到孔洞呈兩段式的分布。此種碗狀分布的情形主要是因為 UBM 形狀在剖面上呈帽子狀的緣故，本研究中的 UBM 採用的是 Cu 與 Ni，皆為導電性質較銲錫佳之金屬，故由剖面上來看，帽簷部分的阻值要比中心部份的阻值小，故電流密度在邊緣處的分布會高於中心的分布。

### 不同角度所量測到的銲錫電阻變化

由有限元素分析所延伸出來的問題之一在於，本研究中所用之結構

究竟是否為最適合觀測變化之結構？利用有限元素分析可快速改變材料性質、求得各部位詳細結果的特性，對應不同孔洞成長的大小，研究中做了一系列不同孔洞大小的有限元素模型，並分別找出不同孔洞大小時，不同位置所量測到的電阻變化大小，結果如（圖 27）。

根據三條不同角度的鉚錫電阻變化曲線可以發現，在  $180^\circ$  的位置，也就是本研究中所提出的凱文鉚錫結構，在升成同樣的孔洞大小時，可以量測到最大的鉚錫電阻變化，換句話說，同樣在鉚錫電阻上升到 1.2 倍（本研究所述之階段 3）的情況下，凱文鉚錫結構可以確實標定到較小的孔洞。儘管凱文鉚錫結構量測到的並非實際完整的鉚錫電阻，但卻可確實感測到鉚錫電阻的變化。

#### 4-5. 結論

凱文鉚錫球結構的精確性符合研究孔洞生成與成長的需求，而且可以利用電阻變化量確實分辨出電遷移造成的不同階段孔洞成長。除此之外，模擬的結果可以良好的對照到實驗的結果，利用兩者相互交叉比較是一個系統性研究鉚錫變化的方法。且由本研究中所做之有限元素分析，證明凱文鉚錫結構是偵測變化較為敏感的量測法。

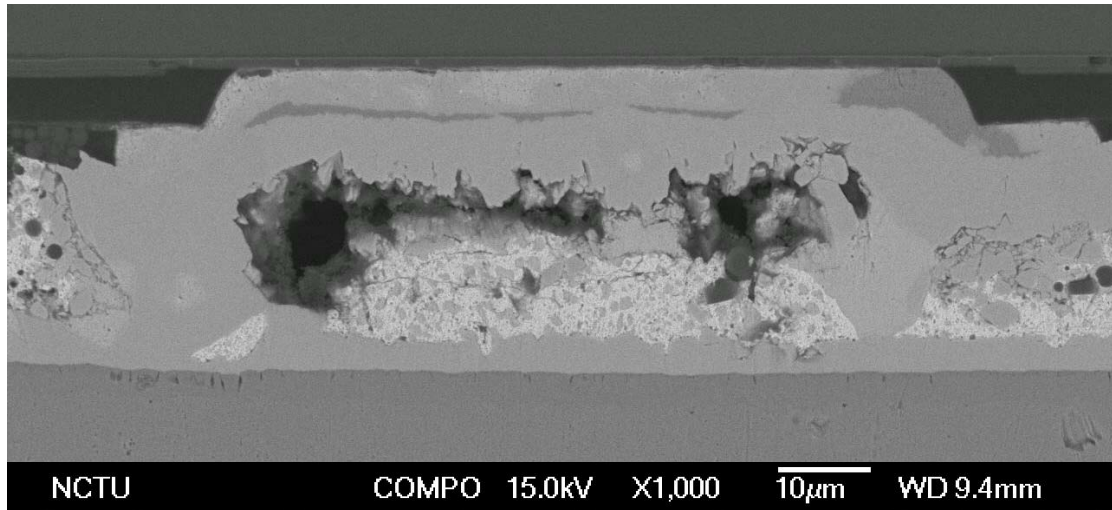


圖 28 150°C 通入 0.9 A，銲錫電阻上升到初始值八倍的 b3 銲錫接點剖面 SEM 影像。

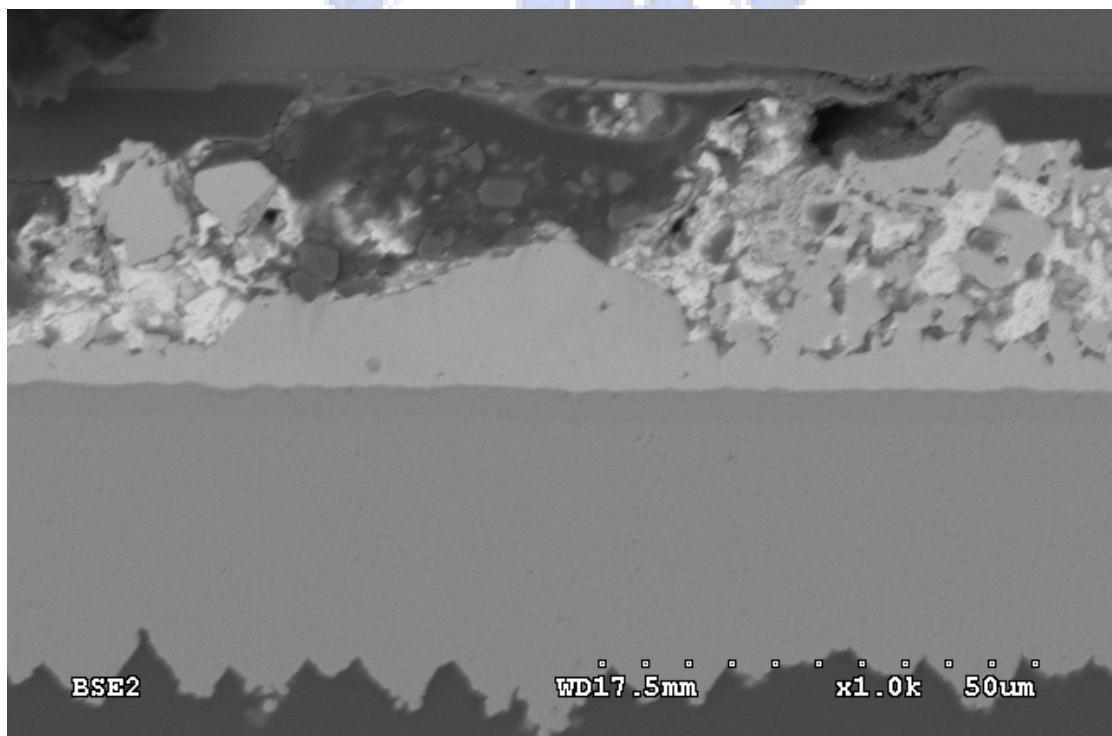


圖 29 150°C 通入 0.9 A，量測到電路開路後的 b3 銲錫接點剖面 SEM 影像。

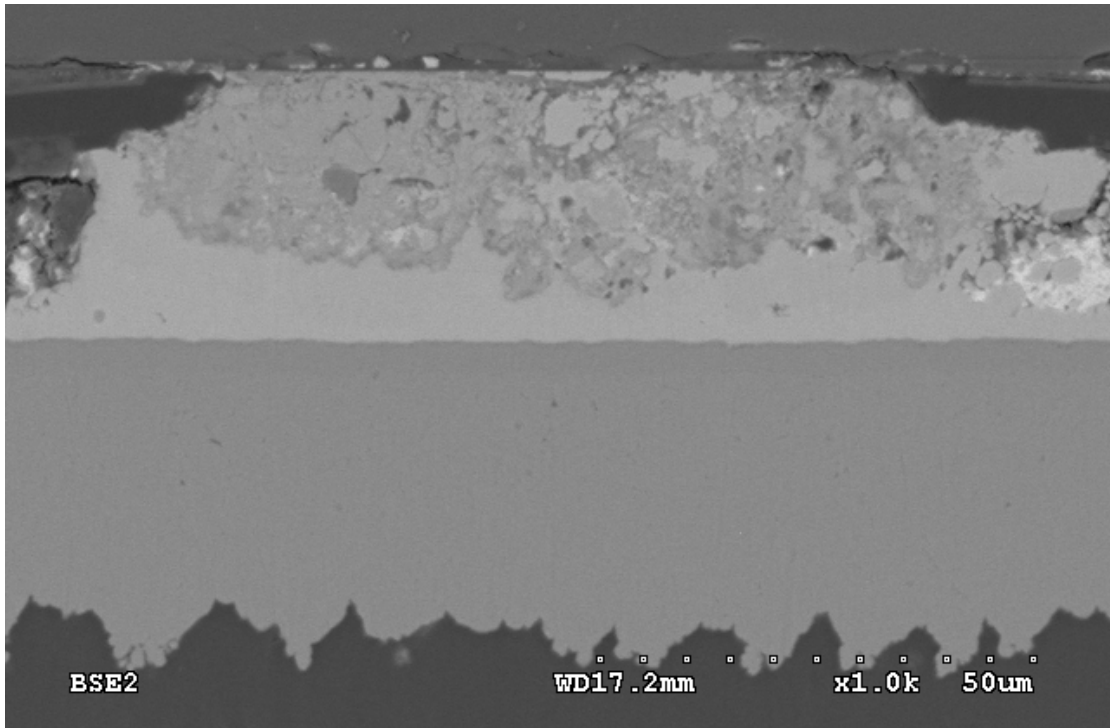


圖 30 150°C 通入 0.9 A，量測到電路開路後的 b3 錫錫接點剖面 SEM 影像。

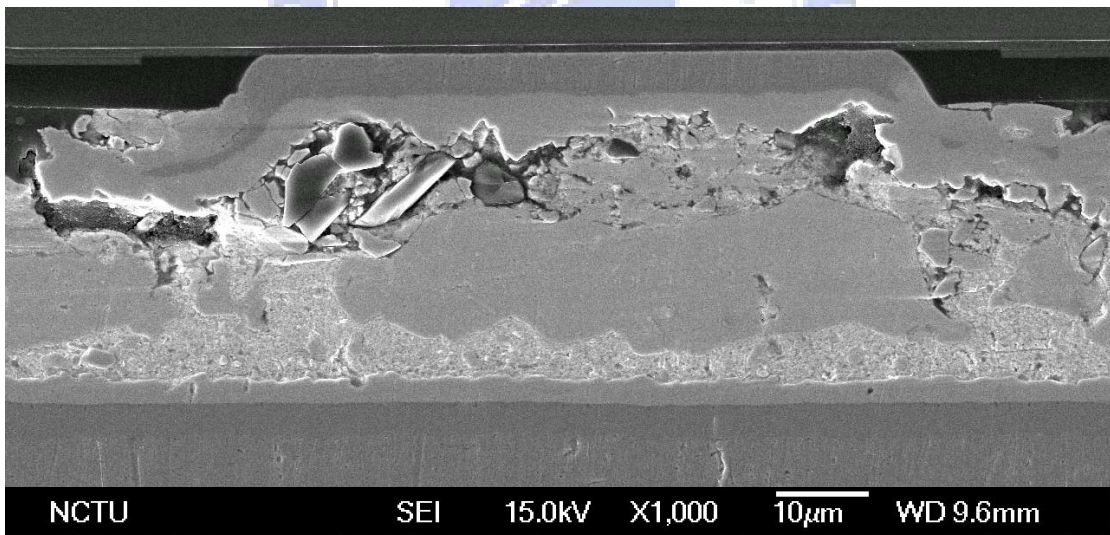


圖 31 150°C 通入 0.8 A，錫錫電阻上升到初始值十倍的 b3 錫錫接點剖面 SEM 影像。

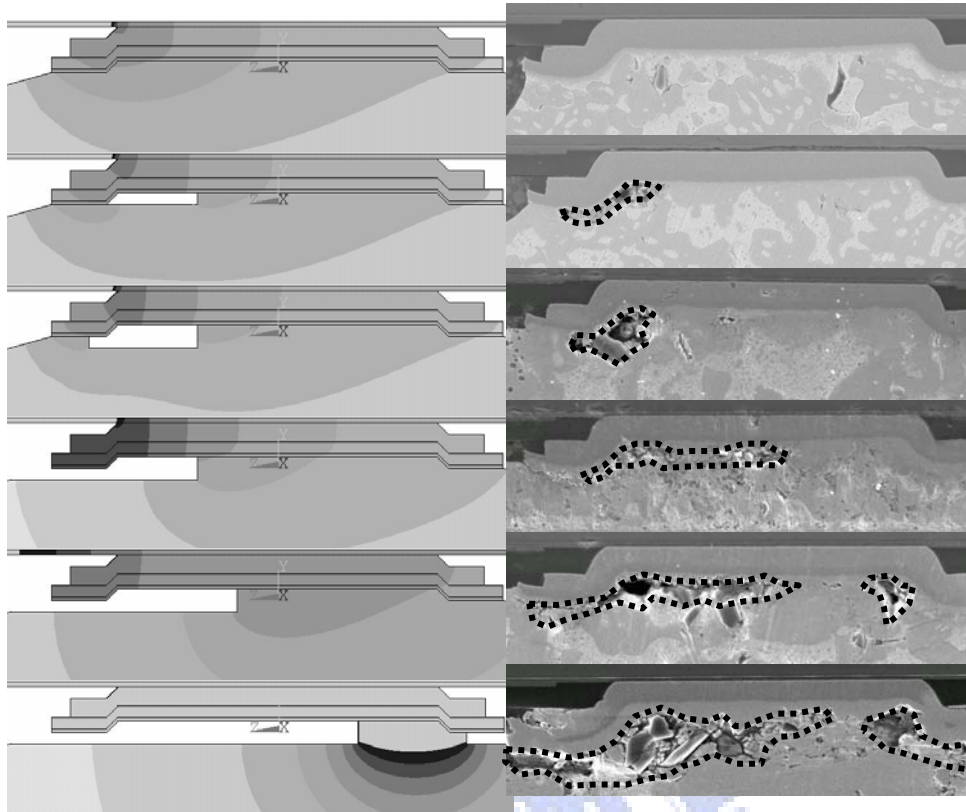


圖 32 實驗與有限元素分析對應的各階段

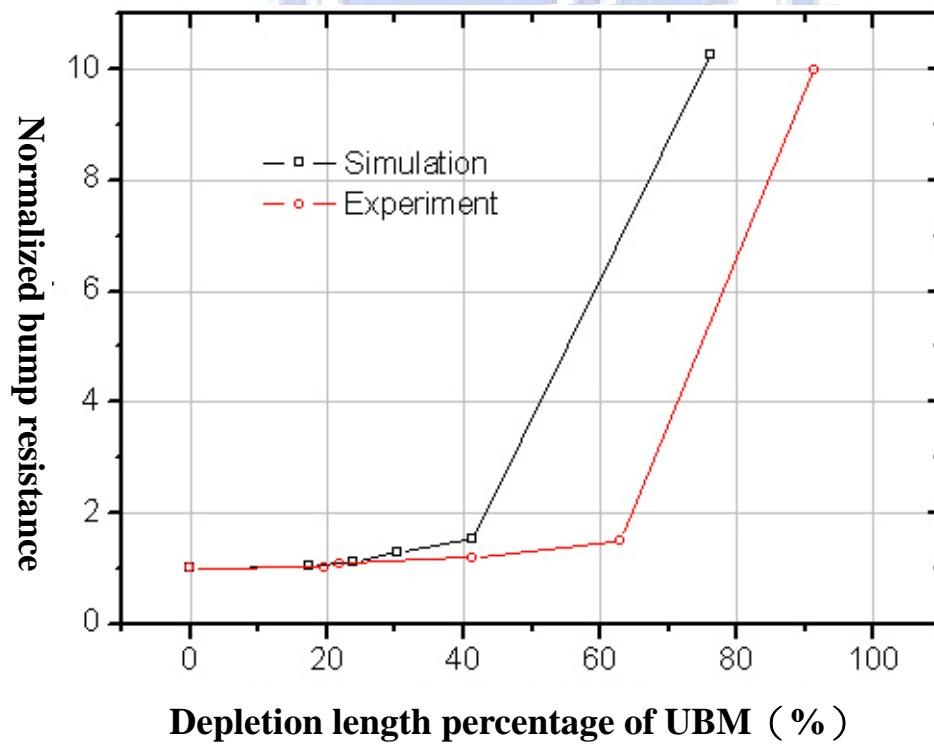


圖 33. 模擬與實驗觀察之孔洞長度比較。

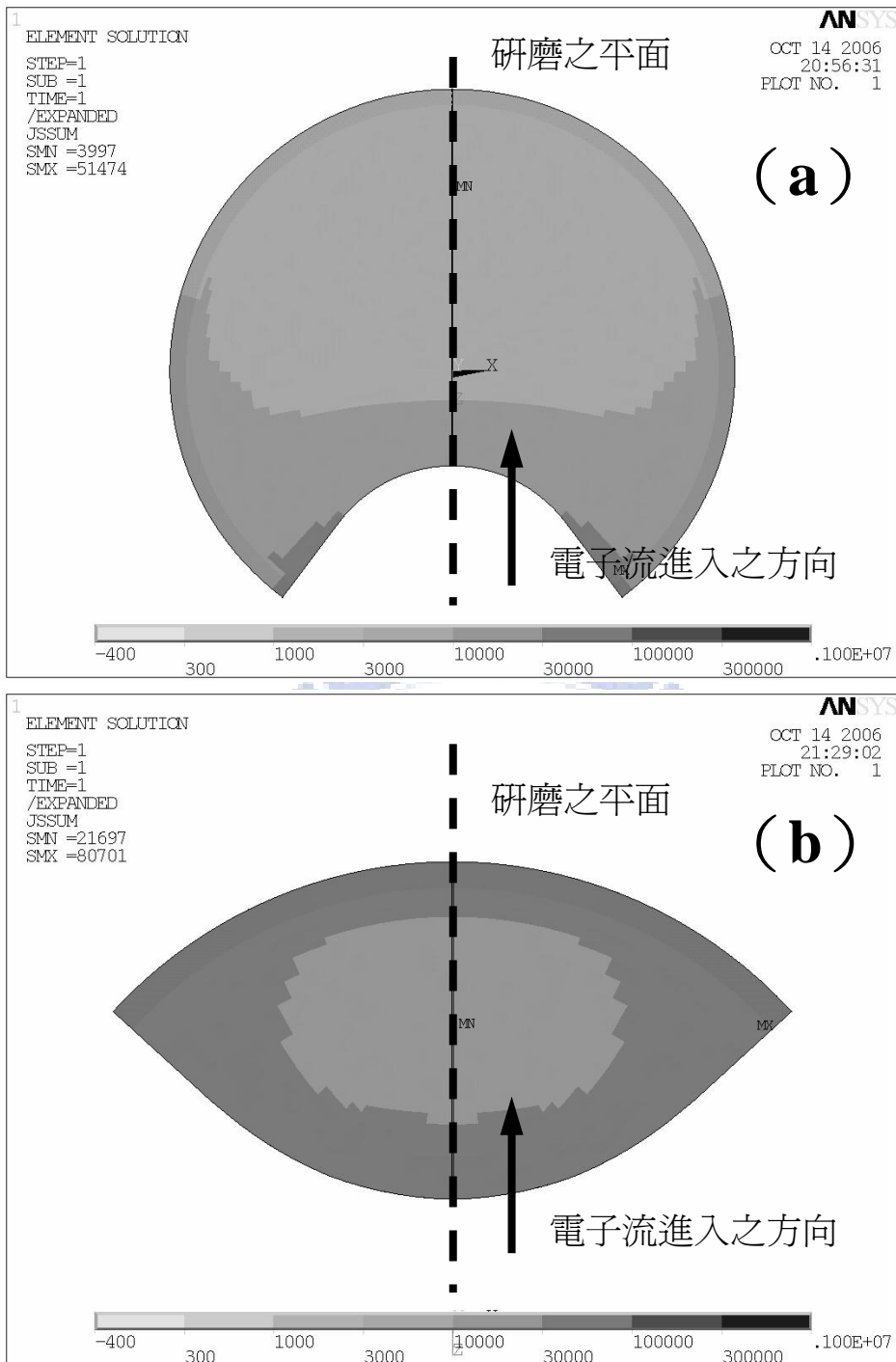


圖 34 有限元素模型與 IMC 相接處的銲錫

(a) 孔洞面積佔 UBM 面積 16.9 %

(b) 孔洞面積佔 UBM 面積 77.5 %

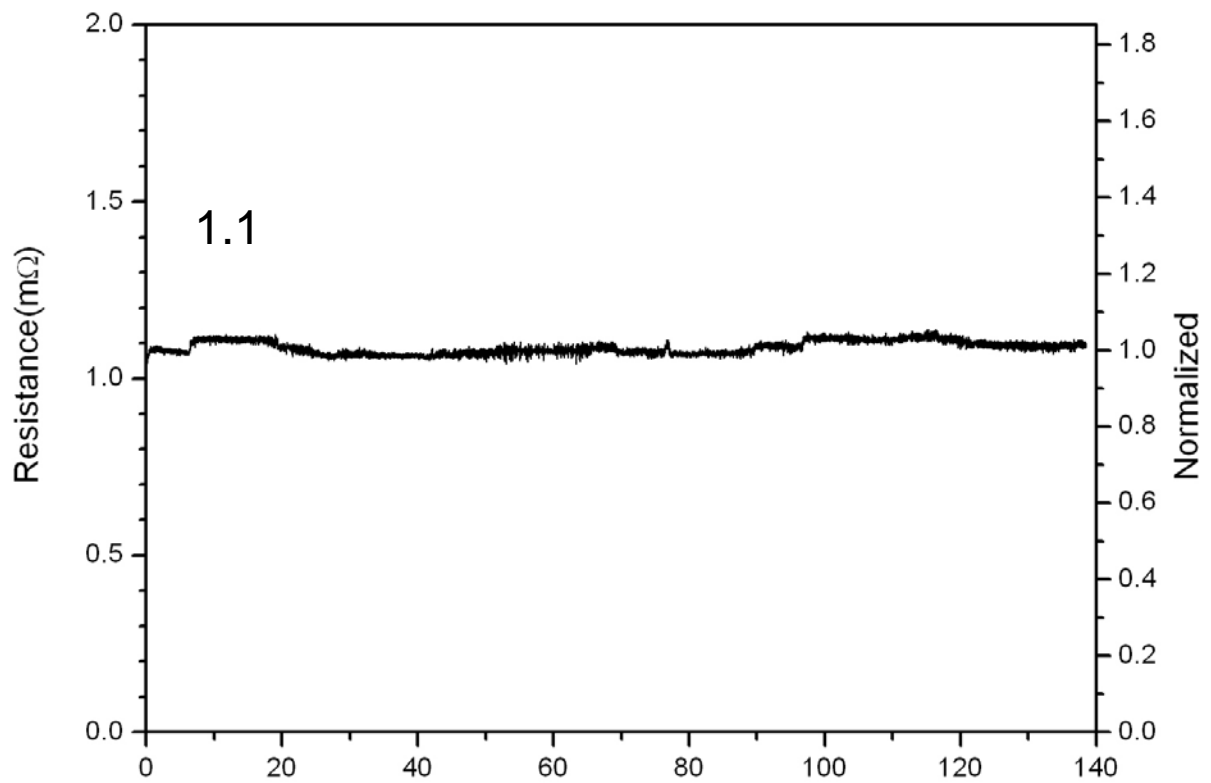


圖 35. 高度  $75 \mu\text{m}$  之銲錫接點量測 140 小時的電阻曲線。

