錫鉛銅與錫鉛鎳覆晶銲錫凸塊之電遷移現象

賴逸少* 李秋雯** 邵郁琇*** 劉業繡****
日月光集團高雄廠應力可靠度實驗室
*部副理 **專案工程師 ***初級工程師
國立成功大學材料科學及工程學系
****博士候選人

摘 要

本文以實驗方式探討62Sn-36Pb-2Cu及62Sn-36Pb-2Ni在兩組環境溫度與平均電流密度測試條件組合下之電遷移現象。實驗結果顯示，錫鉛銅在高溫低電流測試條件下，具有較長電遷移壽命的優越性；在低溫高電流測試條件下，則以錫鉛鎳具較長電遷移壽命。

關鍵詞

電遷移(Electromigration)、覆晶(Flip-Chip)、銲錫凸塊(Solder Bump)

緒論

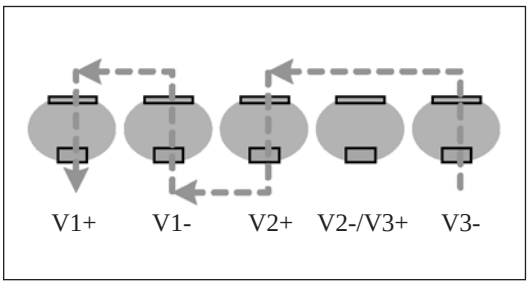
電遷移(Electromigration)指高電流密度通過金屬導體時，因動量轉換而使金屬離子擴散移位的現象，此現象常能使封裝體導線或銲錫接點產生斷路或短路，而形成嚴重的可靠度問題[(1)]。為提昇覆晶封裝的I/O密度並考量大功率的需求，未來銲錫凸塊將可能承受約20kA/cm^{2}之平均電流密度，也加深了銲錫凸塊電遷移可靠度問題的嚴重性與迫切性。

本文以高溫操作壽命試驗(High-Temperature Operation Life; HTOL)方式探討62Sn-36Pb-2Cu及62Sn-36Pb-2Ni兩種覆晶銲錫凸塊，在兩組環境溫度（30 ˚C及150˚C）與兩組平均電流密度（5 kA/cm^{2}及20kA/cm^2）測試條件組合下之電遷移壽命，以及相關的電遷移現象。

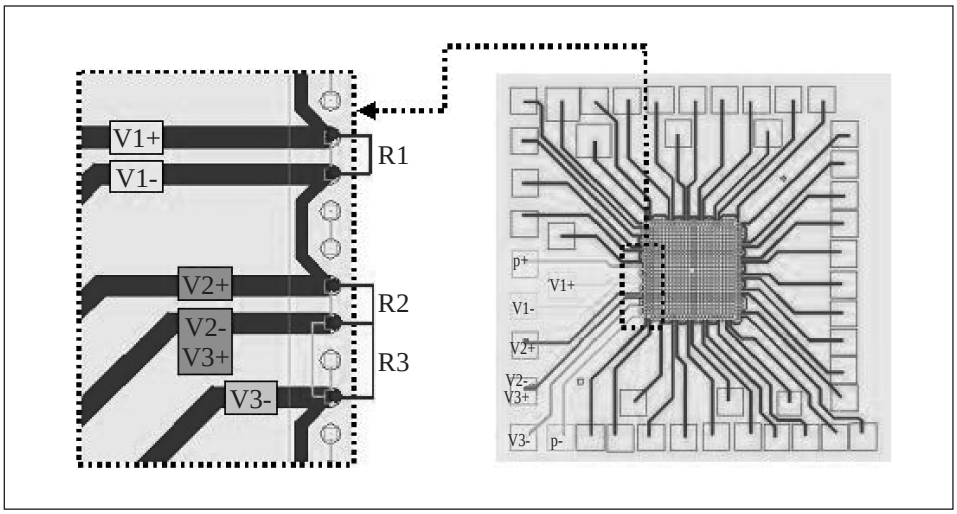
實驗設計

高溫操作壽命試驗試片為27×27 mm²覆晶封裝體，包含一個7.6×7.6mm²具迴路設計(Daisy Chain)之晶片。此晶片以720顆防銲綠漆界定(Soldermask-defined)銲錫凸塊黏接於同具迴路設計的基板上，並施以填充底膠(Underfill)。銲錫凸塊組成成份為62Sn-36Pb-2Cu或62Sn-36Pb-2Ni，直徑約為130μm、間距為270μm；保護層(Passivation)開口寬度為90μm；使用鋁/鎳釩/銅三層式凸塊下金屬層(UBM)，以及無電鍍鎳金表面處理之銅質基板銲墊，其中鎳層約3μm厚、金層約0.05μm厚。

圖一為基板佈線圖。在進行通電試驗前，封裝完畢之試片經過兩次迴銲以模擬植球與上板兩項過程。通電試驗時，此試片僅施加定電流於圖中標示位於晶片邊緣區域的單一迴路上。此迴路包含五顆銲錫凸塊，其給定名稱與電子流方向詳見**圖二**，電流沿反方向流動。試驗中即時監測**圖一**所標示的R1、R2及R3三區段之電阻，待任一區段測得之電阻超越2Ω即判定接點失效，停止試驗。**圖二**中標示V2-/V3+之銲錫凸塊僅容電流通過頂部，可藉以觀察銲錫凸塊高溫儲藏老化(Aging)現象。本研究考慮兩種定電流與環境溫度組合之測試條件：0.32 A-150 ˚C以及1.28 A-30 ˚C。這兩組定電



▲圖二　電子流方向示意圖



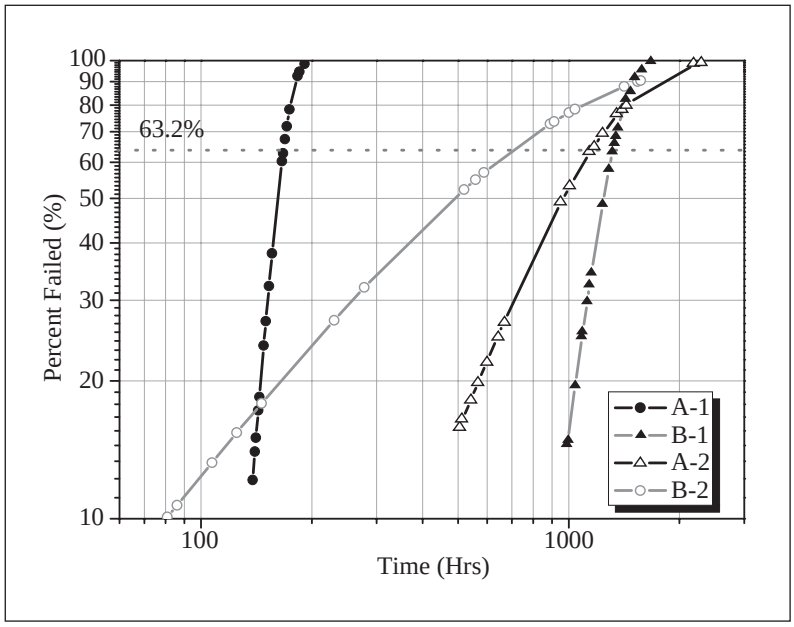
▲圖一　基板佈線圖

表一　試驗組合

試驗批號	電流	平均電流密度	環境溫度
A-1（錫鉛鎳）	0.32 A	5 kA/cm^2	150˚C
A-2（錫鉛鎳）	1.28 A	20 kA/cm^2	30˚C
B-1（錫鉛銅）	0.32 A	5 kA/cm^2	150˚C
B-2（錫鉛銅）	1.28 A	20 kA/cm^2	30˚C

表二　電遷移壽命

	0.32 A-150 ˚C		1.28 A-30 ˚C	
試驗批號	A-1	B-1	A-2	B-2
初次失效	138小時	992小時	506小時	81小時
特徵壽命	168小時	1316小時	1145小時	692小時
韋柏斜率	10.6	6.5	2.1	1.0



▲圖三　電遷移壽命之韋柏分佈圖

流對90μm之保護層開口寬度而言，相對應的銲錫凸塊平均電流密度分別為5kA/cm^{2}及20kA/cm^2。試驗組合見**表一**，每組試驗包含22個試片。

電遷移壽命

試驗中發現R2區段最易跨越接點失效門檻。此區段對應的有效銲錫凸塊為V2+，其電子流由UBM往基板銲墊流動。相較於0.32 A-150 ˚C測試條件下電阻逐漸升高至跨越2Ω失效門檻，在1.28 A-30 ˚C測試條件下電阻的變動較為劇烈。**圖三**為各試驗條件下電遷移壽命之韋柏分佈(Weibull Distribution)，結果整理於**表二**。由結果可知，在0.32 A-150 ˚C測試條件下試驗結果較為穩定。此外，在0.32 A-150 ˚C測試條件下62Sn-36Pb-2Cu具有較長電遷移壽命，然而在1.28 A-30 ˚C測試條件下則以62Sn-36Pb-2Ni具有較長電遷移壽命。

電遷移現象

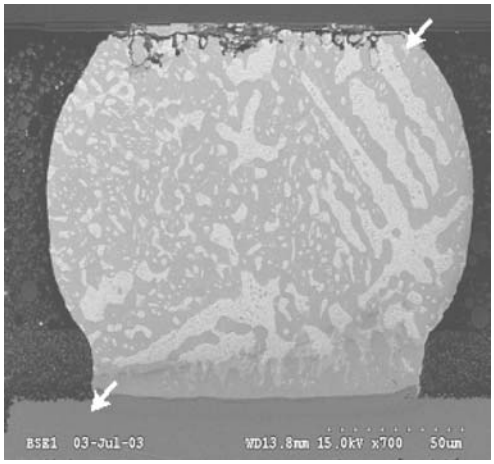
銲錫接點經判定失效時，將試片

取出，以掃描式電子顯微鏡觀察其斷面上所顯示的電遷移現象。由觀察結果發現，電子流由UBM流向基板之V1+及V2+銲錫凸塊較電子流反向流動之V1-及V3-銲錫凸塊易於發生電遷移破壞。**圖四**為0.32 A-150 ˚C測試條件167小時之V2+錫鉛鎳銲錫凸塊，圖中箭頭為電子流方向。由此圖可明顯發現，孔洞(Void)發生於UBM週遭，其原因為UBM電遷移或消耗(Depletion)。銲錫凸塊內微結構的分佈與排列方向可能與電子流方向有關。部分研究認為銲錫凸塊中，電子流沿著流入口與流出口相連之對角線最短路徑行進[2]，然而根據數值分析結果顯示，雖在流入口與流出口兩處之電子流有偏移(Tilting)與擁擠(Crowding)等現象，但銲錫凸塊中電子流大抵皆沿縱向流動[3,4]。

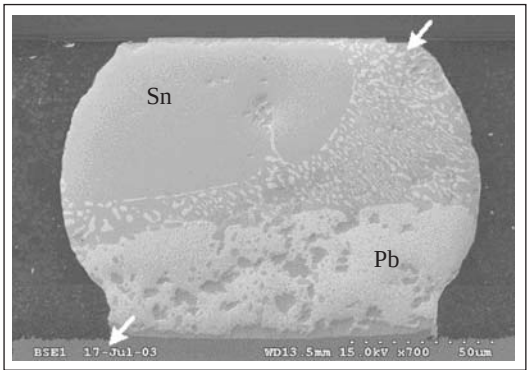
在0.32 A-150 ˚C測試條件下銲錫凸塊錫鉛分離現象明顯，如**圖五**所示。然而此現象在1.28 A-30 ˚C測試條件下並不常發生。

圖六所示為1.28 A-30 ˚C測試條件542小時之V1+錫鉛鎳銲錫凸塊，於鄰近UBM區域之介金屬化合物(Intermetallic Compound; IMC)分析。這些介金屬化合物主要成份為錫、鎳、銅，亦包含由基板銲墊遷移而來的金元素。

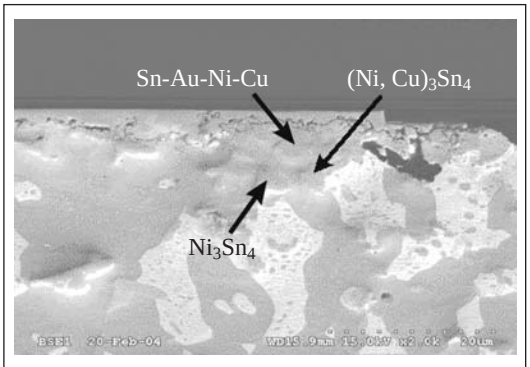
根據銲錫凸塊斷面觀察結果顯示，在1.28 A-30 ˚C測試條件下之錫鉛銅銲錫凸塊電遷移失效模式較錫鉛鎳銲錫凸塊更為複雜。**圖七**為1.28 A-30



▲圖四　以0.32 A-150 ˚C測試167小時之V2+錫鉛鎳銲錫凸塊



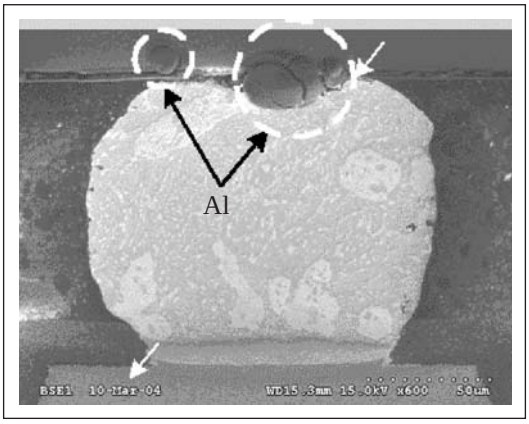
▲圖五　以0.32 A-150 ˚C測試1345小時之V1+錫鉛銅銲錫凸塊



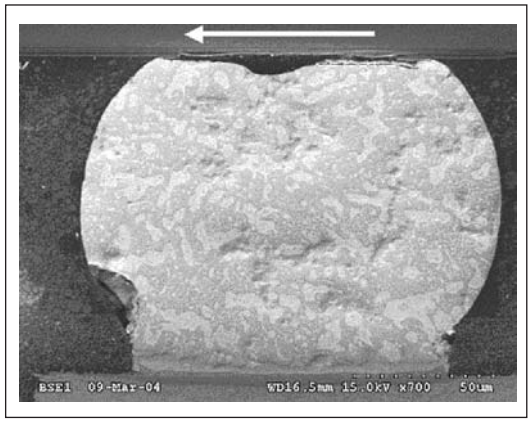
▲圖六　以1.28 A-30 ˚C測試542小時之V1+錫鉛鎳銲錫凸塊

˚C測試條件519小時之V1+錫鉛銅銲錫凸塊斷面，可發現導線與UBM中的鋁元素經電遷移堆疊於電子流流入銲錫凸塊處或導線中，而形成丘狀凸起(Hillock)。

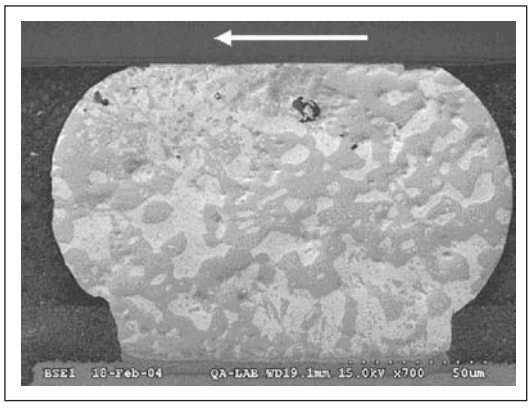
試片中之V2-/V3+銲錫凸塊僅容電流通過頂部，可藉以觀察銲錫凸塊，高溫儲藏老化現象如**圖八**所示，為1.28 A-30 ˚C測試條件542小時之V2-/V3+錫鉛鎳銲錫凸塊斷面。然而由**圖九**所示，在1.28 A-30 ˚C測試條件107小時之V2-/V3+錫鉛銅銲錫凸塊斷面，發現銲錫合金在UBM處產生消耗而形成孔洞。更嚴重者如**圖十**所示，為1.28 A-30 ˚C測試條件519小時之V2-/V3+錫鉛銅銲錫凸塊斷面，銲錫凸塊側面已全部消耗而形成柱狀體。值得注意的是，這類特殊電遷移失效模式，大部分發生於1.28 A-30 ˚C測試條件下之錫鉛銅銲錫凸塊，而相同測試條件下之



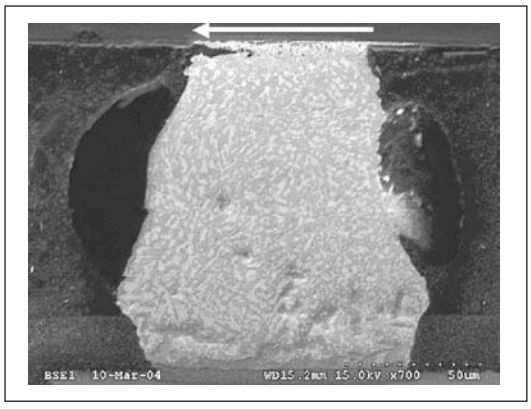
▲圖七　以1.28 A-30 ˚C測試519小時之V1+錫鉛銅銲錫凸塊



▲圖九　以1.28 A-30 ˚C測試107小時之V2-/V3+錫鉛銅銲錫凸塊



▲圖八　以1.28 A-30 ˚C測試542小時之V2-/V3+錫鉛鎳銲錫凸塊



▲圖十　以1.28 A-30 ˚C測試519小時之V2-/V3+錫鉛銅銲錫凸塊

錫鉛鎳銲錫凸塊則較少發生。

鋁導線因通入電流形成焦耳熱(Joule Heating)效應，使V2-/V3+銲錫凸塊產生縱向溫度梯度，而可能發生熱遷移(Thermomigration)效應[5]。然而根據此試片的電熱耦合數值分析結果發現，此銲錫凸塊的縱向溫度梯度約僅1˚C[4]，因此造成如**圖九**與**圖十**所示之斷面模式的主要驅動力應為電遷移。因電遷移使此銲錫凸塊在鄰近UBM區域產生孔洞，如**圖九**所示。當通電試驗持續進行，因孔洞所引致的焦耳熱提昇，可能使銲錫凸塊溫度接近其熔點而產生近似迴銲(Reflow)情況，使銲錫熔融填補孔洞，造成如**圖十**所示之柱狀結構。與**圖九**相比，**圖十**之柱狀結構中晶粒粗化(Grain Coarsening)結構較少的現象似可支持此一觀點。此外，銅較鎳易與錫在鄰近UBM區域形成介金屬化合物，也較易因介金屬化合物形成時的體積收縮而形成孔洞。

結論

本文以高溫操作壽命試驗方式探討62Sn-36Pb-2Cu及62Sn-36Pb-2Ni兩種覆晶銲錫凸塊在0.32 A-150 ˚C與1.28 A-30 ˚C測試條件組合下之電遷移壽命，以及相關的電遷移現象。結果發現，試片在0.32 A-150 ˚C測試條件下較為穩定。在0.32 A-150 ˚C測試條件下，錫鉛銅銲錫凸塊具有較長電遷移壽命，然而在1.28 A-30 ˚C測試條件下則錫鉛鎳銲錫凸塊有較長電遷移壽命。

以掃描式電子顯微鏡觀察銲錫凸塊迴路失效時，銲錫凸塊斷面上所顯示的電遷移現象發現，電子流由UBM流向基板之V1+及V2+銲錫凸塊較電子流反向流動之V1-及V3-銲錫凸塊易於發生電遷移破壞。在0.32 A-150 ˚C測試條件下，銲錫凸塊錫鉛分離現象明顯，然而此現象在1.28 A-30 ˚C測試條件下並不常發生。在1.28 A-30 ˚C測試條件下，錫鉛銅銲錫凸塊電遷移失效模式較錫鉛鎳銲錫凸塊更為複雜，即便試片中之V2-/V3+銲錫凸塊僅容電流通過頂部，也具有特殊的電遷移失效模式。

參考文獻

1. Tu, K. N. (2003). Recent advances on electromigration in very-large-scale-integration of interconnects. J. Appl. Phys., 94(9): 5451-5473.
2. Zheng, P.-J., C.-Y. Hung, Z.-J. Lee, C.-W. Lee, C.-S. Chung and J.-D. Wu (2003). A comparison of electromigration and thermal fatigue performance between thin and thick film UBM. Proc. IMAPS 2003, pp. 93-99.
3. Lai, Y.-S. and C.-L. Kao (2004). Numerical investigation of current crowding in flip-chip bumps. Proc. IMAPS Taiwan Tech. Symp. 2004.
4. 高金利、賴逸少 (2004)：「覆晶封裝電流擁擠與焦耳熱效應之電熱耦合分析與驗證」，機械工程學會第二十一屆全國學術研討會論文集，國立中山大學，高雄市。
5. Ye, H., C. Basaran and D. Hopkins (2003). Thermomigration in Pb-Sn solder joints under Joule heating during electric current stressing. Appl. Phys. Lett., 82(7): 1045-1047.