

無鉛錒錫之電遷移

許穎超* 陳智**

國立交通大學 材料科學與工程學系

*博士生 **助理教授

摘要

由於覆晶接點(Flip-chip Bumps)之特殊幾何形狀，電流擁擠效應(Current Crowding Effect)將發生於錒錫與導線之接點處，進而造成接點破壞而產生可靠度之問題。本研究將利用實際覆晶接點進行電遷移之研究，同時配合電流密度模擬與溫度量測，分析電流密度與焦耳熱(Joule Heating)在覆晶接點之分佈情形。最後將介紹純錒受電流驅動所產生之錒晶鬚(Tin Whisker)成長。

關鍵詞

無鉛錒錫(Pb-free Solders)、電遷移(Electromigration)、覆晶技術(Flip-chip Technology)、錒晶鬚(Tin whisker)、焦耳熱(Joule Heating)

前言

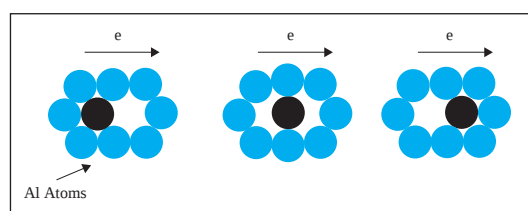
覆晶封裝技術(Flip-chip Technology)目前已廣泛應用於高階電子產品之封裝上，在現今之電路設計上，每一個錒錫凸塊接點所承受之電流為0.2安培（不久未來，所承受之電流將高達至0.4安培），而錒錫凸塊之尺寸也將由直徑100 μm 縮小至50 μm ，屆時電流密度將高達 $10^4\text{A}/\text{cm}^2$ ，在100 $^\circ\text{C}$

之元件操作溫度下，錒錫藉由晶格擴散(Lattice Diffusion)將會產生電遷移(Electromigration)。電遷移為材料內部原子受到電場與電荷載子之影響而移動的現象。以鋁原子為例，其示意圖如圖一所示，黑色金屬原子受電荷載子撞擊所產生動量轉移之作用下，將在晶格中由原本位置移至鞍點(Saddle Point)再移動至空位(Vacancy)。純金屬的電遷移可以下列數學式表示：

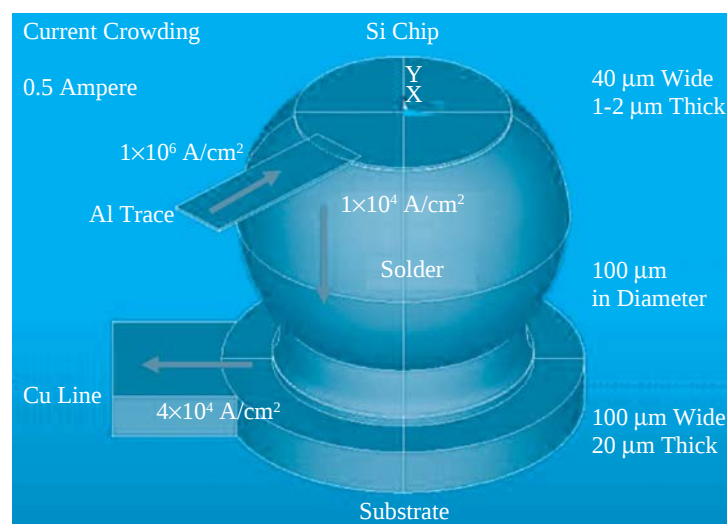
$$F = Z^* e E = (Z_{el}^* + Z_{wd}^*) e E$$

在電場 E 的作用下，電子所受之力為 eE ，而作用於離子之力為 $Z^* e E$ ， Z_{el}^* 為擴散原子之標稱原子價（金屬離子在電場作用下之庫倫作用力）， Z_{wd}^* 為電子有效電荷係數（其來源為電子與金屬離子動量之轉移）。當 $Z_{wd}^* > Z_{el}^*$ ，原子將朝電子移動之方向移動。對金屬而言， Z_{wd}^* 遠大於 Z_{el}^* 。

另外，外加之電流(I)在通過金屬（電阻 R ）時，也會加熱此金屬（即焦耳熱效應(Joule Heating Effect)，造成



▲圖一 材料內部原子受到電場與電荷載子之影響而移動



▲圖二 鉅錫接點幾何形狀示意圖

金屬溫度升高，擴散係數也隨之提高，使電遷移效應更加嚴重。因此，電遷移為電與熱效應之結合使原子移動之現象。更嚴重的是，由於覆晶接點(Flip-chip Joint)之特殊幾何形狀（如圖二所示），電流擁擠效應(Current Crowding Effect)將發生於鉅錫與導線之接點處，此效應將對鉅錫與導線接點處產生破壞，造成可靠度問題(Reliability Issue)。此外，在The International Technology Roadmap for Semiconductors：2003 提及“Electromigration will become a more limiting factor。It must be address through materials changes together with thermal/mechanical reliability modeling”，由此可知其重要與急迫性。

鉅錫凸塊的電遷移

一、破壞模式

一般鉅錫凸塊受電遷移破壞分為下列三種形式。首先由於鉅錫凸塊特殊幾何形狀（如圖二所示），當通入0.5安培的電流時，其鉅錫導線與凸塊的電流密度分別為 1×10^6 及 1×10^4 A/cm²，再加上其鉅錫導線與凸塊之間電阻值分別為180mΩ與8mΩ，此

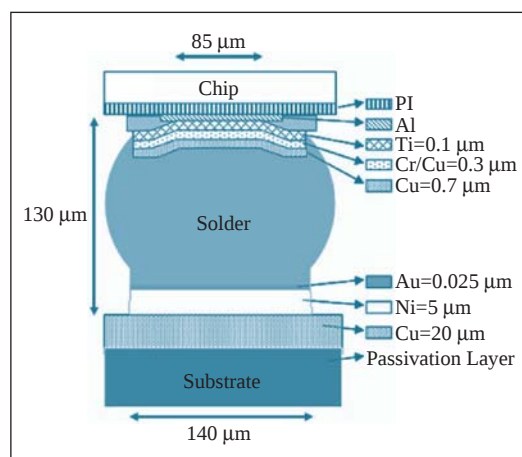
電阻值之差異以及其特殊幾何形狀，造成大部分之電子流從凸塊與鋁導線接點處向下流動，也就是電流擁擠效應。此效應將加速破壞鋁導線與錐錫凸塊之接點。除此之外，鋁導線之焦耳熱效應較大，因此將使錐錫凸塊產生溫度梯度，進而造成熱遷移(Thermomigration)現象發生，而產生另一個錐錫凸塊破壞模式。第三種造成錐錫凸塊失效之原因為基板之金屬墊層中之銅與鎳原子，因受電子流的影響遷移至錐錫凸塊中，在UBM與錐錫凸塊間反應形成介金屬化合物，如 $(\text{Cu}, \text{Ni})_6\text{Sn}_5$ 或 $(\text{Ni}, \text{Cu})_3\text{Sn}_4$ 堆積產生應力而破壞。

圖三為本研究所使用覆晶接點之橫截面示意圖，晶片端使用之 Under Bump Metal-lization (UBM)為Ti：0.1 μm ，Phase-in Cr-Cu：0.3 μm ，和Cu：0.7 μm ，基板端使用之金屬墊層分別Au：0.025 μm ，Ni：5 μm ，和Cu：20 μm 。一般而言，錐錫凸塊直徑約為100 μm ，而晶片端錐錫凸塊與UBM之接觸面積直徑約為85 μm （本研究中之電流密度是以錐錫凸塊與UBM之接觸面積估算），基板端錐錫凸塊與UBM之接觸面積直徑約為120 μm 。電子流將由晶片端之左前方進入，經過錐錫凸塊再由基板端之左方流出，如圖二之三度空間示意圖所示。以下我們將利用有限元素分析法(Finite Element Analysis)分析電流密度分佈、紅外線溫度偵測分析，以及實際錐錫凸塊進

行電遷移研究。

圖四為實際共晶錫銀銅錐錫凸塊在通入20000 A/cm²之電流密度，100°C溫度下在0小時、20小時、264小時、408小時之掃描式電子顯微鏡影像圖。由圖可發現破壞發生於晶片端導線進入錐錫凸塊之處，在錐錫凸塊表面處發現小錫球散佈於表面，此證明晶片端導線進入錐錫凸塊之處，在破壞時溫度已高至凸塊本身之熔點。配合有電流分析法與溫度偵測分析可得知：晶片端導線進入錐錫凸塊之處因電流擁擠效應加速電遷移破壞，以及焦耳熱效應產生之熱遷移破壞之雙重影響下，將加速對錐錫凸塊造成可靠度上的危害。

在本研究中發現，造成錐錫凸塊失效之原因，除了電流擁擠效應造成的電遷移及熱遷移造成在陰極破壞外，同時也發現，因受電子流驅動形成大量介金屬化合物，並堆積於陽極



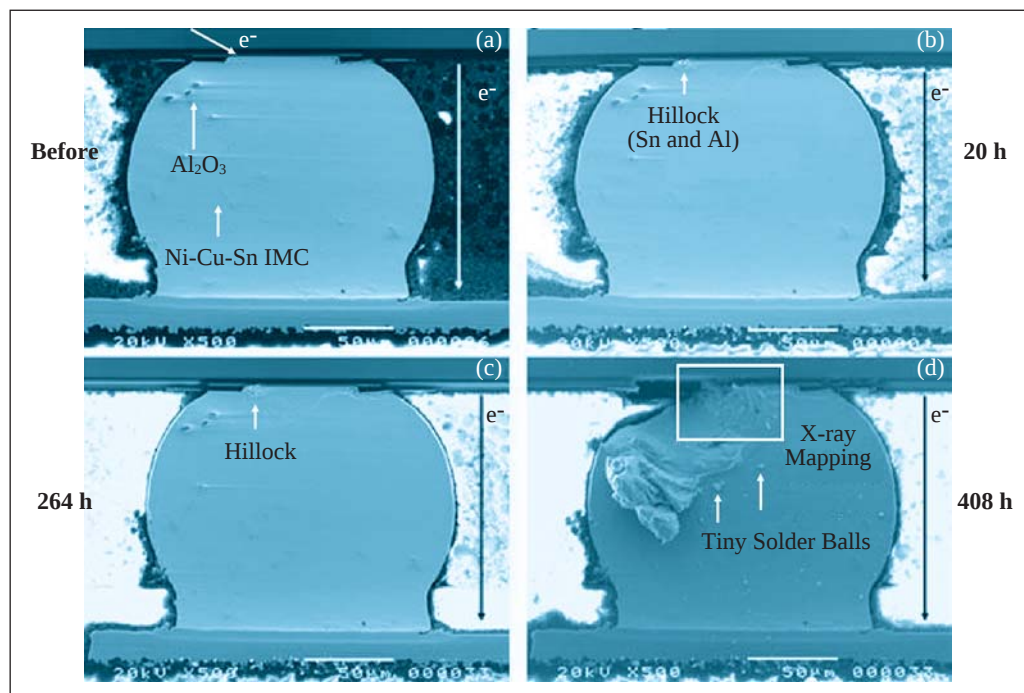
▲圖三 本研究所使用覆晶接點之橫截面示意圖

造成應力之破壞。圖五為鐳錫凸塊在電流密度 10000 A/cm^2 、 150°C 、22小時後失效之掃描式電子顯微鏡影像圖，發現破壞發生於陽極晶片端。圖六為失效鐳錫凸塊陽極晶片端，經選擇性蝕刻液蝕刻移除鐳錫後之電子顯微鏡影像圖，發現大量介金屬(Cu , Ni) $_6\text{Sn}_5$ 堆積在UBM與鐳錫界面處，推測此現象將造成應力，而使鐳錫凸塊在該界面處產生裂縫而破壞。

二、電流密度之模擬

為了更加瞭解在整個覆晶鐳錫接點的電流密度分佈，利用有限元素分

析法分析電流密度在鐳錫凸塊之三度空間分佈情形，其結果如圖七所示。由分析結果發現，電流密度在晶片端鋁導線處最高，而在鐳錫凸塊內的電流密度，以晶片端鐳錫凸塊與鋁導線接觸處最高。再更進一步進行其主軸橫截面電流密度分析，如圖八所示，發現在晶片端導線與UBM接觸處電流密度高至 200000 A/cm^2 ，而鐳錫凸塊內平均電流密度約為 5000 A/cm^2 ，兩者相差將近四十倍，由於電流擁擠效應，造成大部分之電子流在經鋁導線進入凸塊時，會集中在靠近接點處流進鐳錫。由上述發現，晶片端因電流擁擠效應之產生使該處電流密度極高，成



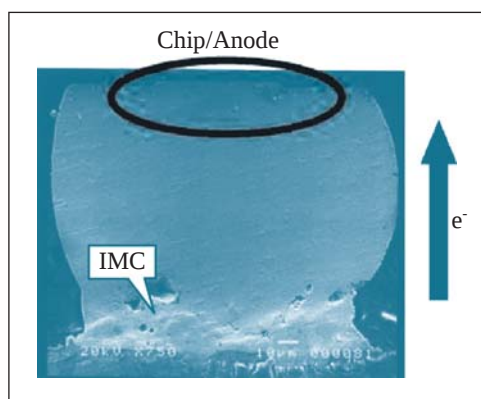
▲圖四 共晶錫銀銅鐳錫凸塊在 20000 A/cm^2 電流密度， 100°C 溫度下隨時間增加之電子顯微鏡影像圖

為銲錫凸塊最易發生破壞的地方。

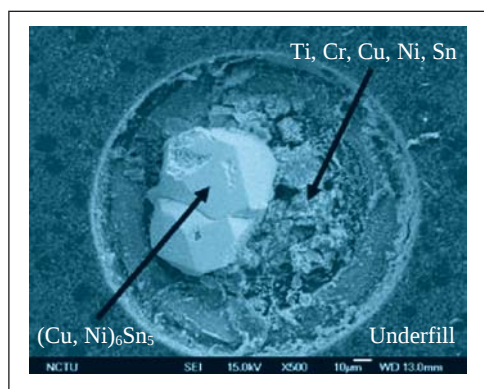
三、通電時的溫度量測

在作電遷移加速測試時，需施加一大電流（密度），此電流又會因焦耳效應而增加熱銲，造成銲錫的實際溫度比預定的測試溫度高出許多，使銲

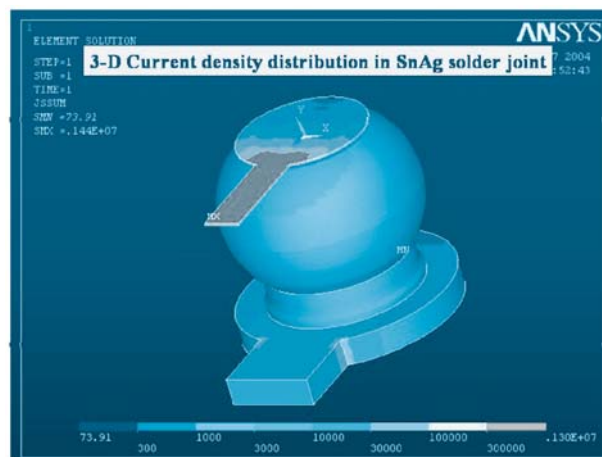
錫凸塊的破壞時間（或平均破壞時間，Mean-time-to-failure）縮短，因此需要校正通電時的溫度。圖九為我們使用之紅外線偵測裝置示意圖。首先我們將共晶錫銀銲錫凸塊稍微研磨並加以拋光（其所剩質量為原先之97%），將銲錫凸塊施加0.586安培之電流，並置於加熱板上維持70°C之恆



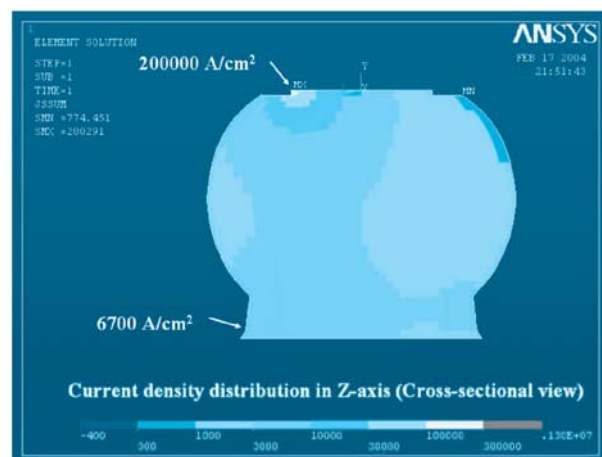
▲圖五 共晶錫銀銲錫凸塊在電流密度 $10000\text{A}/\text{cm}^2$ 、 150°C 溫度下，失效之電子顯微鏡影像圖



▲圖六 失效共晶錫銀銲錫凸塊陽極晶片端經選擇性蝕刻液蝕刻後之電子顯微鏡影像圖



▲圖七 有限元素分析法分析電流在銲錫凸塊之三度空間分佈情形（彩色圖片請參見目錄頁）



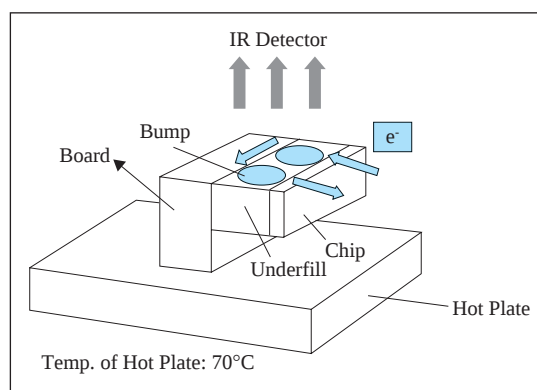
▲圖八 銲錫凸塊橫截面電流密度分析（彩色圖片請參見目錄頁）

溫，觀查橫截面之溫度分佈情形。我們發現，整體鉛錫凸塊因焦耳熱效應之影響溫度升高達 54.5°C 之多，如圖十所示。進一步分析鉛錫凸塊沿圖十右圖的直線之溫度梯度，如圖十一所示，發現凸塊內之溫度梯度達 $365^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ （溫度梯度的計算方式為晶片端之溫度—基板端之溫度/鉛錫凸塊之高度），此溫度梯度下鉛錫原子將受到熱遷移之影響由上往下擴散，進而使在晶片端的鉛錫凸塊接點處產生孔洞之破壞。經上述之研究發現鉛錫凸塊除受電流擁擠效應之影響外，因焦耳熱效應所產生溫度梯度(Thermomigration)也將影響鉛錫凸塊之可靠度。

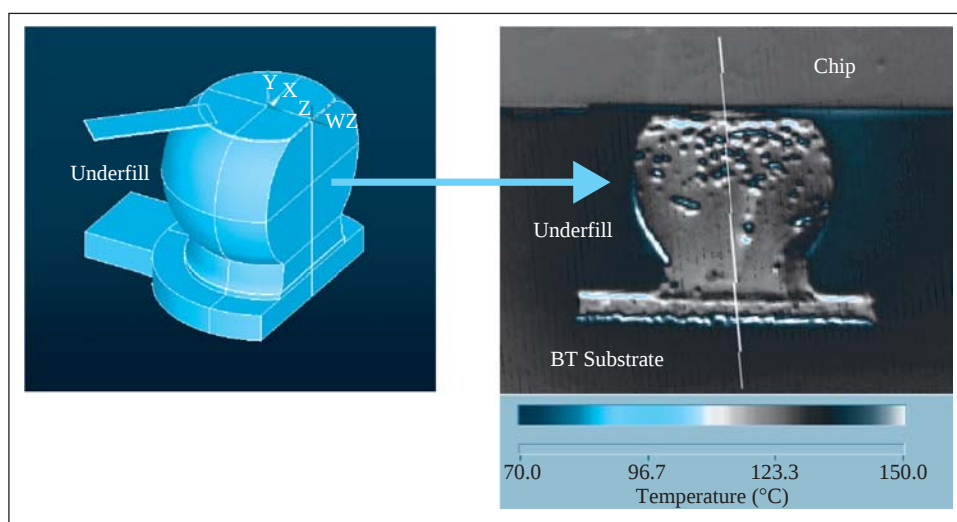
純錫之電遷移研究

在無鉛化之發展趨勢下，錫將成為鉛錫之主要材料，加上引腳架可能會因錫層產生之錫晶鬚成長造成短

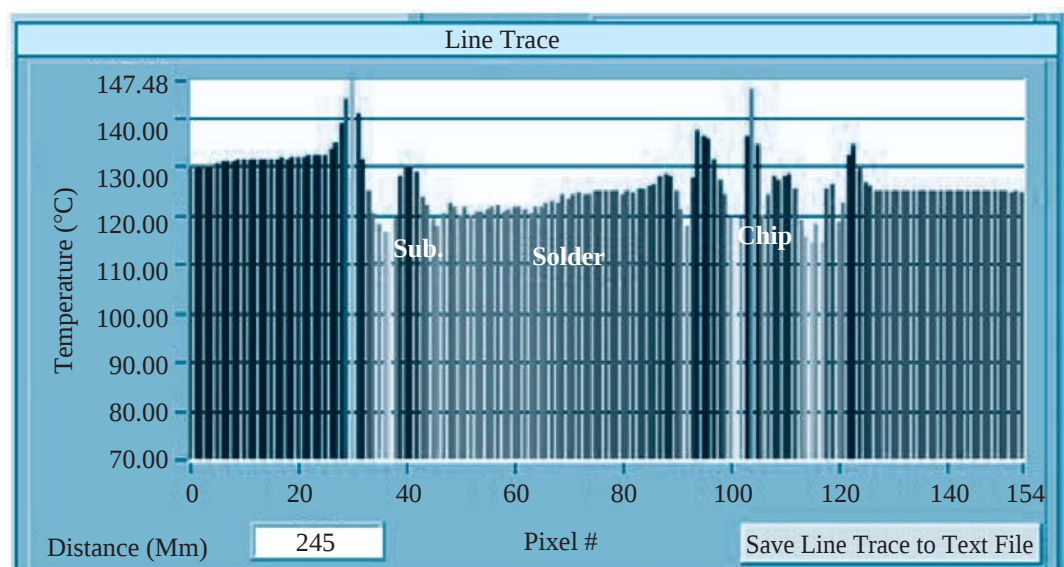
路，故純錫之電遷移也將會是無鉛鉛錫的可靠度問題之一。為了觀察純錫之電遷移現象，我們利用微影蝕刻技術將 $5000\text{\AA}$ 的錫薄膜蒸鍍於 $700\text{\AA}$ 的鈦膜之上的試片，來研究純錫的電遷移效應。圖十二為本實驗純錫試片之俯視與側視圖，使用的電流密度為 $1.5\times 10^5\text{ A}/\text{cm}^2$ 。圖十三為經過通電後我們觀察到在隨不同時間30小時、70小時、140小時和 260小時陽極部份產生



▲圖九 本研究所使用之紅外線偵測裝置示意圖

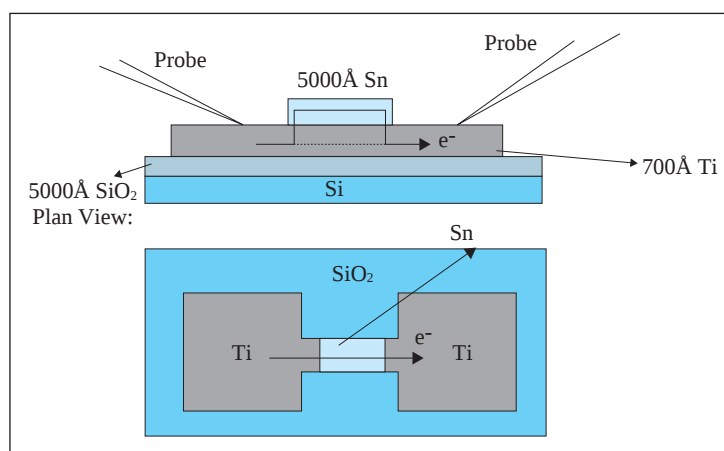


◀圖十 溫度偵測分析示意圖（彩色圖片請參見目錄頁）



Thermal Gradient: +365°C/cm

▲圖十一 鉍錫凸塊之溫度梯度。此圖為圖十右圖中沿白線之溫度分佈，溫度梯度為365°C/cm



▲圖十二 本實驗純錫試片之俯視與側視圖

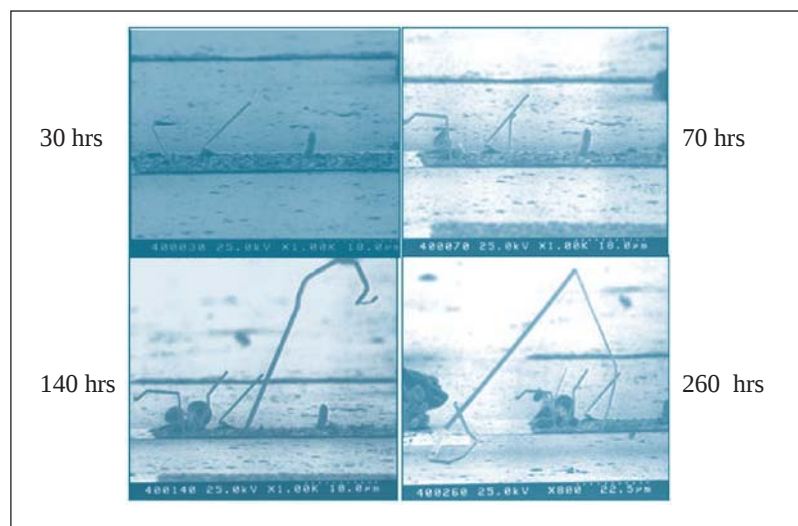
錫晶鬚及突出物之電子顯微鏡影像圖，我們發現錫晶鬚之長度與數量隨時間之增加而增加。圖十四為錫晶鬚體積對時間作圖，我們發現在室溫下、電流密度 $1.5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 時，錫晶

鬚的成長速率大約為 3 Å/sec 。

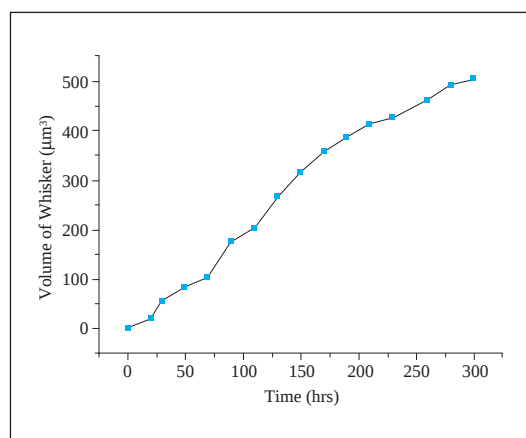
結論

隨著鉍錫凸塊尺寸之縮小及無鉛化之發展趨勢下，無鉛鉍錫電遷移將成為可靠度上的新議題。本研究利用實際覆晶接點進行電遷移之研究，同時配合有限元素分析法與紅外線溫度

偵測器分析，發現造成鉍錫凸塊失效之原因，為電流擁擠效應與焦耳熱效應造成之熱遷移雙重影響下，使鋁導線與鉍錫凸塊接點處為最易產生破壞之處。同時也發現，對於共晶錫銀鉍



◀圖十三 隨不同時間30小時、70小時、140小時和260小時陽極部份產生錫晶鬚及突出物之電子顯微鏡影像圖



▲圖十四 錫晶鬚體積對時間作圖

錫而言，因銅與鎳原子受電子流驅動溶入錐錫中，並於陽極大量形成介金屬化合物並造成應力破壞。最後在純錫之電遷移部分，我們發現錫晶鬚在室溫下，電流密度 $1.5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ 時的成長速率大約為 3 Å/sec 。

參考文獻

1. K. N. Tu, "Recent advances on electromigration in very-large-scale-integration of interconnects" J. Appl. Phys., 94, 5451 (2003).
2. K. N. Tu and K. Zeng, "Reliability Issues of Pb-free Solder Joints in Electronic Packaging Technology" Materials Science and Engineering Reports, R38, 55 (2002).
3. S. Brandenburg and S. Yeh, "Electromigration Studies of Flip Chip Bump Solder Joints" Proceedings of Surface Mount International Conference and Exhibition, SM198, San Jose, CA, Aug. 23-27, 1998, p. 337.
4. C. Y. Liu, Chih Chen, C. N. Liao, and K. N. Tu, "Microstructure-Electromigration correlation in a Thin Strips of Eutectic SnPb Solder Stressed between Cu Electrodes" Appl. Phys. Lett., 75, 58 (1999).
5. Y. C. Hsu, T. L. Shao, C. J. Yang, and Chih Chen, "Electromigration study in SnAg3.8Cu0.7 Solder Joints on Ti/Cr-Cu/Cu Under Bump Metallization" Journal of Electronic Materials, 32, 11, 1222 (2003).
6. S. W. Chen, C. M. Chen, W.C. Liu, "Electric Current Effects Upon the Sn\Cu and Sn\Ni Interfacial Reactions" JEM, 27, 11, 1193 (1998).
7. W. T. Chen, C. E. Ho, and C. R. Kao, "Effect of Cu concentration on the interfacial reactions between Ni and Sn-Cu solders" Journal of Materials Research, 17, 263 (2002).
8. K. N. Tu, "Interdiffusion and reaction in bimetallic Cu-Sn thin film, Acta Metall" 21, 347 (1973).
9. S. H. Liu, P. C. Liu, T. Chou, and Chih Chen, "Tin Whisker Growth Driven by Electrical Currents" to be published in June 2004 in Journal of Applied Physics.
10. Hua Ye, Cemal Basaran, and Douglas Hopkins, "Thermomigration in Pb-Sn solder joints under joule heating during electric current stressing" Appl. phys. Lett. 82, 7 (2003).