

覆晶鉚錫接點在通電下焦耳熱效應及熱遷移之研究  
**Investigation of Joule heating effect and thermomigration  
in flip-chip solder joints under current stressing**

研究生：蕭翔耀

Student : Hsiang-Yao Hsiao

指導教授：陳 智

Advisor : Chih Chen

國立交通大學

材料科學與工程學系



Submitted to Department of Materials Science and Engineering  
National Chiao Tung University  
in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Doctor of Philosophy  
in

Materials Science and Engineering

July 2009

Hsinchu 30050, Taiwan, ROC

中華民國九十八年七月

# 覆晶銲錫接點在通電下焦耳熱效應及熱遷移之研究

研究生：蕭翔耀

指導教授：陳智博士

國立交通大學

材料科學與工程系所

## 摘要

由於可攜式電子元件越做越小，銲錫接點的尺寸也因此縮小的特別快；也造成了各個銲錫接點內的電流密度快速增加。隨著電流的增加，造成銲錫接點內嚴重的焦耳熱效應(Joule heating effect)，接點內的溫度也快速上升。因此，真實的量測到銲錫接點內之溫度分布是很重要。但因為銲錫接點被矽晶片，高分子填充物(underfill)和基板所包圍；要直接量測到銲錫接點內的溫度是很困難的。本篇論文的主要主軸是利用紅外線熱像儀(thermal infrared microscopy)在不同的通電條件下，直接量測銲錫接點內的溫度分布情形。也因此可以發現銲錫接點內的一些熱特性，如溫度增加，溫度梯度(thermal gradient)和熱點(hot spot)溫度。我們主要是利用共晶錫銀(SnAg3.5)銲錫接點來做溫度分布的量測，發現在銲錫接點內有個熱點的存在；其一是在銲錫接點內部電流密度集中區(current crowding)，另一個則是在晶片端銲錫接點的邊緣靠近高分子填充物的地方。在通以電流密度  $1.06 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  下，銲錫接點內的平均溫度是  $150.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ；而兩個熱點的溫度分別是  $161.7 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $167.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 。另外，我們亦研究 under-bump-metallization (UBM)厚度的效應對銲錫接點內溫度分布的影響。由實驗結果可以發現，較薄的 UBM 厚度

會在鉚錫接點內產生較高的熱點溫度。

在電遷移(electromigration)的過程中，焦耳熱效應永遠扮演著很重要的角色。在不同階段的電遷移過程中，空孔(voids)的生成與延伸可能會影響到鉚錫接點內的焦耳熱效應。所以，我們利用凱文結構(Kelvin bump probes)和紅外線熱像儀來探討在電遷移的過程當中，空孔的生成與延伸和焦耳熱效應的關係。我們觀察到空孔的生成在鉚錫接點內的電阻上升到原來的 1.2 倍時；而當電阻增加時，空孔也隨之延伸。此外，隨著通電時間的增加造成鉚錫接點內的電阻也上升，因而發現鉚錫接點內的溫度也隨之上升。而在通電的後期，鉚錫接點因為電阻上升和焦耳熱效應的影響，使得接點內的溫度快速上升。

由於鋁導線在加速電遷移測試的過程中是主要的發熱源，它所造的焦耳熱效應讓鉚錫接點內產生了溫度不均勻的現象，在覆晶封裝鉚錫接點內創造了極大的溫度梯度。因此，我們利用交流電(alternate current)來減去通電時的電遷移效應，直接觀測鉚錫接點內的熱遷移效應(thermomigration)。因為在交流電的驅使下鉚錫接點內不受電遷移效應影響；而且所造成的焦耳熱效應是與通以直流電是相同的。我們利用共晶錫鉛(eutectic SnPb)和錫銀鉚錫接點來研究熱遷移效應，並利用聚焦式離子束(focus ion beam)在鉚錫接點內產生標記點(marker)來直接量測熱遷移通量(thermomigration flux)。研究發現當共晶錫鉛鉚錫接點在  $9.7 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$  電流密度下且加熱溫度為  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  時，可以產生很高的溫度梯度大約  $2143 \text{ }^\circ\text{C/cm}$ 。在熱遷移效應測試的前後，我們使用聚焦離子束來產生標記點，來計算鉚錫的熱

遷移速率。我們可以得到鉛錫熱遷移通量  $3.3 \times 10^{13}$  atoms/cm<sup>2</sup> 和鉛的熱傳送值 26.8 kJ/mole。

另外，在無鉛鉛錫熱遷移研究方面，本實驗是利用共晶錫銀鉛錫接(SnAg3.5) 在加熱板溫度為100 °C時，施加0.57安培的交流電，做熱遷移效應的觀察。在此電流下可以觀察到鉛錫接點內有大約2829 °C/cm的溫度梯度產生。實驗結果發現在熱遷移的效應下，錫是往鉛錫接點內較熱端即晶片端來移動。我們同時量測到錫的熱遷移通量和熱傳送量(molar heat of transport)分別是  $5.0 \times 10^{12}$  atoms/cm<sup>2</sup> 和 1.36 kJ/mole。



# **Investigation of Joule heating effect and thermomigration in flip-chip solder joints under current stressing**

Student : Hsiang-Yao Hsiao

Advisor : Chih Chen

Department of Materials Science and Engineering  
National Chiao Tung University

## **Abstract**

To meet the miniaturization trend of portable devices, the dimensions of the solder bumps continue to shrink, causing the current density in each solder joint to increase abruptly. With the increase of applied current, the temperature increased rapidly due to Joule heating. Therefore, temperature measurement in the solder joint becomes an important issue. Because the solder joints are completely surrounded by an IC chip, underfill and a substrate. Thus it is difficult to measure the temperature distribution around the solder joints. This dissertation focuses on the measurement of the temperature distribution in the solder bump at various stressing conditions by thermal infrared microscopy. It can also help us to explore the thermal characteristics in the solder joint, such as temperature increment, temperature gradient and hot spot temperature. We used eutectic SnAg3.5 solder joints with typical dimensions to measure the thermal characteristics in solder bump. Two clear hot spots are observed

in the bump. One is located at the region with peak current density, and the other one is at the bump edge under the current-feeding metallization on the chip side. Under a current stress of  $1.06 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ , the temperature in the two hot spots are  $161.7 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $167.8 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectively, which surpass the average bump temperature of  $150.5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

In addition, effect of under-bump-metallization (UBM) thickness on the hot spots is also examined. It indicates that the hot-spot temperature in the solder bump increases for the solder joints with a thinner UBM.

During electromigration test, Joule heating effect in the solder bump plays an important role. For this reason, the Joule heating effect at various stages of electromigration of flip-chip Sn3.5Ag solder joints was investigated under a current of 0.5 Amp at  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ . During various stages of electromigration, voids may form and propagate. Thus Joule heating effect may vary at different void sizes. To verify the void nucleation and propagation on Joule heating effect during electromigration process, the solder bump was stressed for different lengths of time and then examined by Kelvin bump probes and infrared microscopy. We found that voids started to form at approximately 1.2 times of the initial bump resistance. Then the voids propagated when the bump resistance increased. In addition, the temperature of the solder joints is also increased with the increase of bump resistance. In the last stage, the

temperature of the solder bump increased rapidly due to the dramatic increase in the bump resistance and local Joule heating effect.

Joule heating in the silicon chip generates a thermal gradient in a flip chip solder joint. Since Al traces serve as the major source of heat during accelerated electromigration tests, high current stressing also produces a non-uniform temperature distribution, creating a large thermal gradient in a flip chip solder joint.

Therefore, we used alternate current (AC) to the joint to decouple the thermomigration from electromigration effect, since there is no electromigration effect under the AC stressing. Yet the AC produces the same amount of Joule heating as the direct current dose. Eutectic SnPb and lead-free solders have been adopted by the microelectronics industry. To measure the thermomigration rate directly, markers fabricated by focus ion beam are employed. The thermomigration flux of Pb is measured to be  $3.3 \times 10^{13}$  atoms/cm<sup>2</sup>, when the solder bump was stressed by 0.55 Amp at 100 °C. With the known thermal gradient, the molar heat of transport of Pb can be obtained as 26.8 kJ/mole.

About the thermomigration in lead free solder joint, it is found that Sn atoms migrated toward the hot end. The thermomigration flux and molar heat of transport are measured to be  $5.0 \times 10^{12}$  atoms/cm<sup>2</sup> and 1.36 kJ/mole, respectively, when the solder bump are stressed by 0.57Amp at 100 °C.

## 誌謝

非常感謝陳智老師這四年來的辛勤指導，除了在專業能力上的授與外；在待人處事方面也教育了我許多事情。老師也給了我很多出國開會的機會，能更深入地了解國外的民情風俗，也透過學術會議的交流讓我的專業能力更上一層樓。接下來要感謝清華大學奈米工程與微系統所的饒達仁老師對本論文細心指教及所提供的紅外線熱像儀對本研究有非常多的幫助。也要謝謝高雄日月光部經理賴逸少博士，台灣大學材料所高振宏老師和本校的謝宗雍老師百忙之中抽空來指導學生的研究，讓學生的論文能夠更加嚴謹，在此獻上萬分感謝。

在來就是感謝實驗室的學長姐們，實驗室永遠的大哥大超哥，搞笑界的天王書宏，大掌櫃慶榮，還有用生命在打籃球的鈺庭，以及錫晶鬚的高手程昶；最重要的就是我的衣食父母、恩公，最挺我也最照顧我的聖翔大帥哥。還有就是青春美麗永遠的實驗室之花筱芸；和實驗室之寶陽光宅男詠湟。因為有你們先前的鋪路才有現在的實驗室。

另外就是對實驗是貢獻最多最厲害的世緯及阿丸(元蔚)，實驗室沒有你們，也不會有這麼好的一個規模。喜愛跑步的健民，相信你一定可以跟阿甘一樣厲害。實驗室的電腦和網路專家宗寬，感謝你把實驗室網路管的這麼好。實驗室的另一枝花佳凌學姊，去美國都是用美金的好嘛。實驗室的未來超級巨星 QQ，實驗室以後靠你了；還有就是上知飛機下知汽車的龍哥(瑋安)，我有這個榮幸跟你唱歌嗎？還有就是永遠都跟我一樣羞澀的岱霖；另外就是實驗室” ”最努力” ”的郭爽爽(建志)。以及綽號來源很不輸胡的菜頭(右峻)，他姓梁不姓蔡歐。還有就是實驗室的兩朵小花兒；過爽爽的接班人楊咩(若薇)和曉葳。因為有你們讓我這四年的博士班生活過的很快樂也很充實，真的很感謝你們。

最後要感謝我的家人們：爸爸、媽媽、乾爹、乾媽，老姊、老哥；謝謝你們在背後支持我，我才能無憂無慮的拿到博士學位，我愛你們。



# 目錄

摘要.....	I
Abstract .....	IV
誌謝.....	VII
目錄.....	VIII
圖目錄.....	X
第一章 研究動機.....	- 1 -
第二章文獻回顧.....	- 4 -
2-1 覆晶封裝技術簡介.....	- 4 -
2-2 無鉛鉅錫.....	- 7 -
2-3 鉅錫接點內的電遷移現象.....	- 8 -
2-3-1 電遷移效應理論.....	- 8 -
2-3-2 焦耳熱效應(Joule Heating Effect).....	- 13 -
2-3-3 電流集中效應(Current Crowding Effect).....	- 16 -
2-3-3 鉅錫接點內的熱點研究.....	- 18 -
2-3-4 無鉛鉅錫的電遷移.....	- 20 -
2-4 鉅錫接點內的熱遷移現象.....	- 21 -
2-4-1 熱遷移效應理論.....	- 21 -
2-4-2 共晶錫鉛鉅錫接點內的熱遷移.....	- 23 -
2-4-3 無鉛鉅錫接點內的熱遷移效應.....	- 31 -
第三章 實驗與方法.....	- 33 -
3-1 試片製備.....	- 33 -

3-2 溫度量測.....	- 35 -
3-3 以凱文結構來量測鉕錫接點電阻.....	- 43 -
<b>第四章 結果與討論.....</b>	<b>- 46 -</b>
<b>4-1 覆晶鉕錫接點內的焦耳熱效應.....</b>	<b>- 46 -</b>
4-1-1 直接量測鉕錫接點內的溫度分布.....	- 46 -
4-1-2 UBM 厚度對鉕錫接點內的溫度分布影響.....	- 54 -
4-1-3 電遷移下鉕錫接點內不同階段破壞對焦耳熱效應的影響.....	- 62 -
4-2 覆晶封裝共晶錫鉛鉕錫接點在交流電驅使下的熱遷移效應.....	- 76 -
4-2-1 鉕錫接點內溫度梯度之研究.....	- 76 -
4-2-2 電流密度與溫度梯度的關係.....	- 78 -
4-2-3 熱遷移效應之研究.....	- 80 -
4-2-4 熱遷移通量和熱傳送值的計算.....	- 82 -
4-3 無鉛鉕錫接點在交流電的驅使下的熱遷移行為.....	- 84 -
<b>第五章 結論.....</b>	<b>- 90 -</b>
5-1 鉕錫接點內溫度與溫度梯度之研究.....	- 90 -
5-2 覆晶鉕錫接點內熱遷移效應之研究.....	- 91 -
5-3 電遷移效應下錫銀鉕錫接點破壞模式與焦耳熱效應的關係.....	- 92 -
<b>參考文獻.....</b>	<b>- 93 -</b>

## 圖目錄

圖一：自動對位過程。.....	- 6 -
圖二：鋁導線通入高電流後，所產生的外型變化橫切面示意圖。在陰極有空孔生成，而陽極有突出物產生 <sup>7</sup> 。.....	- 10 -
圖三：125 MM 共晶錫鉛銲錫接點在 150 °C 下通入 $6.8 \times 10^3$ A/CM <sup>2</sup> 的電流密度，經過 100 小時後，電遷移破壞銲錫球接點。電子流動方向如箭頭所示 <sup>12</sup> 。.....	- 11 -
圖四：(A)通入 0.59 A 電流，以紅外線熱像儀觀測到的溫度分布。(B)通入電流時，銲錫接點內部溫度分布模擬 <sup>22</sup> 。.....	- 15 -
圖五：有限元素分析銲錫接點內部電流密度分布示意圖 <sup>23</sup> 。.....	- 17 -
圖六：模擬結果提出在鋁導線進入銲錫接點交界有熱點存在 <sup>22</sup> 。.....	- 19 -
圖七：錫鉛接點-A，歷過 16 小時、 $1.3 \times 10^{-4}$ A/CM <sup>2</sup> 電流密度之 SEM 圖 <sup>1</sup> 。.....	- 26 -
圖八：錫鉛接點-B，歷過 16 小時、 $1.3 \times 10^{-4}$ A/CM <sup>2</sup> 電流密度之 SEM 圖 <sup>1</sup> 。.....	- 27 -
圖九：在 1.0 安培電流負載下，有限元素分析結果 (A)錫鉛接點內部溫度分佈 (B)銲錫接點內垂直溫度分佈 <sup>1</sup> 。.....	- 28 -
圖十：複合錫鉛銲錫接點在熱遷移效應下的電子顯微鏡影像圖 <sup>32</sup> 。.....	- 29 -
圖十一：未通過電流之銲錫接點橫截面電子顯微鏡影像圖(A)通電前(B)通電後 <sup>33</sup> 。.....	- 30 -
圖十二：電流未通過之共晶錫銀銲錫接點橫截面電子顯微鏡影像圖(A)通電前(B)在 150 °C 下通以 0.55 安培之結果 <sup>36</sup> 。.....	- 32 -
圖十三：試片結構示意圖(A) 5 MM-CU UBM 銲錫接點(B) 5 MM-CU/3 MM-NI UBM 銲錫接點。.....	- 34 -
圖十四：銲錫接點內溫度量測裝置示意圖。.....	- 37 -
圖十五：紅外線熱像儀結構圖。.....	- 40 -
圖十六：交流電示意圖。.....	- 42 -
圖十七：(A) 凱文銲錫結構俯視圖(B) 凱文銲錫結構剖面側視圖。.....	- 45 -
圖十八：共晶錫銀銲錫接點在通以 0.2 安培的電流下溫度分布和溫度曲線圖(B) 水平分布於銲錫接點內(AH <sub>1</sub> ) (C)垂直分布於銲錫接點內(AV <sub>1</sub> )。.....	- 48 -
圖十九：共晶錫銀銲錫接點在通以 0.4 安培的電流下溫度分布和溫度曲線圖 (B) 水平分布於銲錫接點內(AH <sub>2</sub> ) (C)垂直分布於銲錫接點內(AV <sub>2</sub> )。.....	- 49 -
圖二十：共晶錫銀銲錫接點在通以 0.6 安培的電流下溫度分布和溫度曲線圖(B) 水平分布於銲錫接點內(AH <sub>3</sub> ) (C)垂直分布於銲錫接點內(AV <sub>3</sub> )。.....	- 50 -
圖二十一：銲錫接點內熱點 B 示意圖。.....	- 52 -
圖二十二：模擬銲錫接點內通以 0.6 安培的電性分布圖。.....	- 53 -
圖二十三：5 MM-CUUBM 共晶錫銀銲錫接點在通以 0.2 安培的電流下溫度分布和溫度曲線圖(B) 水平分布於銲錫接點內(BH <sub>4</sub> ) (C)垂直分布於銲錫接點內(BV <sub>4</sub> )。.....	- 55 -
圖二十四：5 MM-CUUBM 共晶錫銀銲錫接點在通以 0.4 安培的電流下溫度分布和溫度	

曲線圖(B) 水平分布於鉅錫接點內(BH <sub>5</sub> ) (C)垂直分布於鉅錫接點內(BV <sub>5</sub> )。 ....	- 56 -
圖二十五：5 MM-CUUBM 共晶錫銀鉅錫接點在通以 0.6 安培的電流下溫度分布和溫度	
曲線圖(B) 水平分布於鉅錫接點內(BH <sub>6</sub> ) (C)垂直分布於鉅錫接點內(BV <sub>6</sub> )。 ....	- 57 -
圖二十六：5 MM-CU 和 5 MM-CU/3 MM-NI 兩種不同 UBM 鉅錫接點內部平均溫度(A)	
和熱點溫度(B)的變化趨勢圖。 .....	- 59 -
圖二十七：兩種不同 UBM 鉅錫接點內在不同電流驅使下，電流與溫度梯度的關係曲	
線。 .....	- 61 -
圖二十八：100 °C 通 0.5 A 電流 (A) 未通電前 (B) 100.0 小時 (C) 544.2 小時 (D)	
1094.8 小時 (E) 1351.8 小時 (F) 1431.0 小時.....	- 64 -
圖二十九：通電 0 小時下，鉅錫接點內溫度分布圖 .....	- 66 -
圖三十：通電 100.0 小時下，鉅錫接點內溫度分布圖 .....	- 67 -
圖三十一：通電 1094.2 小時下，鉅錫接點內溫度分布圖 .....	- 68 -
圖三十二：通電 1351.8 小時下，鉅錫接點內溫度分布圖 .....	- 69 -
圖三十三：通電 1431.0 小時下，鉅錫接點內溫度分布圖 .....	- 70 -
圖三十四：通電 0 小時下，鉅錫接點內三個不同位置垂直溫度分布圖 .....	- 73 -
圖三十五：電阻上升 1.2 倍時，鉅錫接點內靠近空孔和遠離空孔垂直溫度分布圖 .	- 74 -
圖三十六：電阻上升 2.0 倍時，鉅錫接點內靠近空孔垂直溫度分布圖 .....	- 75 -
圖三十七：(A)鉅錫接點在通電前的溫度分布(B)鉅錫接點在通以 0.55 安培電流後的溫度	
分布(C)沿著(B)虛線的溫度分布曲線.....	- 77 -
圖三十八：鉅錫接點內電流與溫度梯度的關係圖 .....	- 79 -
圖三十九：通電前後鉅錫接點的背向散射掃描式電子顯微鏡影像 .....	- 81 -
圖四十：通電前後，含有標記點的鉅錫接點掃描式電子顯微鏡影像 .....	- 83 -
圖四十一：(A)共晶錫銀鉅錫接點在通電前溫度分布圖 (B)通以 0.57 安培交流電之溫度	
分布圖 (C)沿著圖(B)虛線之溫度分布圖 .....	- 85 -
圖四十二：共晶錫銀鉅錫接點橫截面電子顯微鏡影像圖(A)通電前；(B)通電後 800 小時	
.....	- 89 -

## 第一章 研究動機

由於鉛錫接點電遷移效應(electromigration)而造成電子元件的破壞，並有許多相關的研究證實了電遷移效應現象的存在，所以對電遷移效應的研究更是刻不容緩。目前大部分的研究都著重在電遷移效應破壞的模式及 mean-time-to-failure (MTTF)的一些研究。然而，伴隨著電子元件功能的大幅增加，尺寸相對的減少，而所承載的電流也相對的提高，再加上電流集中效應(current crowding effect)的影響，所以對於元件所產生的焦耳熱(Joule heating)勢必會相當的可觀。因此，此電熱效應的結合，在鉛錫接點通電後的破壞模式中，扮演很重要的角色。鉛錫接點內因通入高電流所造成的溫度梯度(thermal gradient)將會很大，故鉛錫接點內的熱遷移效應(thermomigration)不能輕忽。

在覆晶封裝元件中，因鉛導線長度較長及截面積較小，會具有較大的電阻值(約數十倍以上)，相對的會具有更大的焦耳熱效應，此效應會使得晶片端會有比較高的溫升，於是乎在通電時晶片端的鉛錫接點溫度較高，基板端的鉛錫溫度較低，所以產生一個明顯的溫度梯度，此溫度梯度將隨著外加電流的增加而增加，而這一溫度梯度提供了一個原子移動的趨動力，進而有淨原子流通量的產生。由於原子因為熱遷移而產生移動，所以空孔(voids)的擴散主導整個物質輸送過程，空孔傾向由低溫的地方遷移至高溫

處，相對的，原子會從溫度高的地方遷移至溫度低的地方，因此空孔就會形成。一旦空孔形成後，就會嚴重影響電流分佈及熱效應(電阻增加)；在通電的過程中，電流會傾向在低電阻的地方聚集，於是會造成電流分佈不均勻的現象，即電流集中效應產生。因為鉚錫接點內的電流集中效應，會造成鉚錫接點內有嚴重熱點的產生，因而加快鉚錫接點的破壞，使得電子元件的可靠度降低。

因此，如何去量測鉚錫接點內的溫度梯度，鉚錫接點內的溫度甚至是發現鉚錫接點內的熱點是有必要性的。Ye 等人<sup>1</sup>的研究裡提到，他們對於共晶錫鉛鉚錫接點施予電流密度  $1.3 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$  (1A)、持續 16 小時，並在陰極與陽極發現都有空孔產生，而他們提出的解釋是由於晶片端的溫度明顯高於基板端的溫度，於是形成一個很明顯的溫度梯度，助長了孔洞的產生；在他們的研究裡對此現象以電腦模擬晶片端與基板端的溫度梯度，令人訝異的是竟然高達  $1500 \text{ }^\circ\text{C/cm}$ ！如此高的溫度梯度對於電子元件裡可靠度將會是一個相當大衝擊。但是這畢竟還是電腦模擬的結果，目前尚無法有實際的量測來驗證這些數據。為了要量測到鉚錫接點內實際的操作溫度，本實驗將利用紅外線熱像儀來做分析，紅外線熱像儀量測主要利用紅外線感測器經紅外光透鏡量測離開待測物表面紅外光波段之輻射能量值後，經過加熱器溫控隔絕元件受表面環境輻射影響、發射率補償機制，最後計算處理後得到待測物真實之熱影像(thermogram)。由於紅外線熱像儀有此特性，所以本研究利用破壞性的橫截面技術將覆晶封裝內的鉚錫接點研磨到一


半，並使用紅外線熱像儀直接量測鉛錫接點內溫度的變化，進一步觀察鉛錫接點內是否有熱點和溫度梯度的產生。因為我們可以直接量測到鉛錫接點內的溫度，加上交流電可以消除通電時的電遷移效應，因此，我們利用這兩種儀器，可以直接來研究鉛錫接點內的熱遷移效應。

另外，本實驗將會用另一個分析方法- 凱文結構(Kelvin bump probes)來量測對於鉛錫接點在通電過程中，電性的細微變化。早期，凱文結構是用來量測導孔(via)或是接觸電阻(contact resistance)已經有相當長的一段時間。利用凱文結構可以用來預測鉛錫內部如界面間的細微變化、介金屬化合物(Intermetallic Compound, IMC)的生成、或是內部的微結構遭到破壞，利用這種技術在電遷移效應產生期間對於整個系統的輕微的電性變化都可以量測出來，而準確值可以達到毫歐姆的等級。利用凱文結構可以量測一顆鉛錫接點的電阻值，而為小到0.1毫歐姆也可以量測出來。因此藉由此分析方法，可以輕易並且精確的觀測到鉛錫接點中的細微變化。再利用紅外線熱像儀來量測每一階段的溫度變化，來研究因電遷移效應鉛錫接點內破壞模式與焦耳熱效應的關係。

## 第二章 文獻回顧

由於本研究主要是以破壞模式來做銲錫接點內的電遷移跟熱遷移測試。並直接觀察銲錫接點內部通電時受到焦耳熱效應的影響所造成的溫度分布情形。所以本章主要內容會先對覆晶封裝技術做個簡單介紹；慢慢由外而內，介紹銲錫接點內的電遷移效應。並對因電遷移所產生的電流集中效應跟焦耳熱效應做回顧；最後在對覆晶封裝銲錫接點最不了解的熱遷移部分做回顧。

### 2-1 覆晶封裝技術簡介

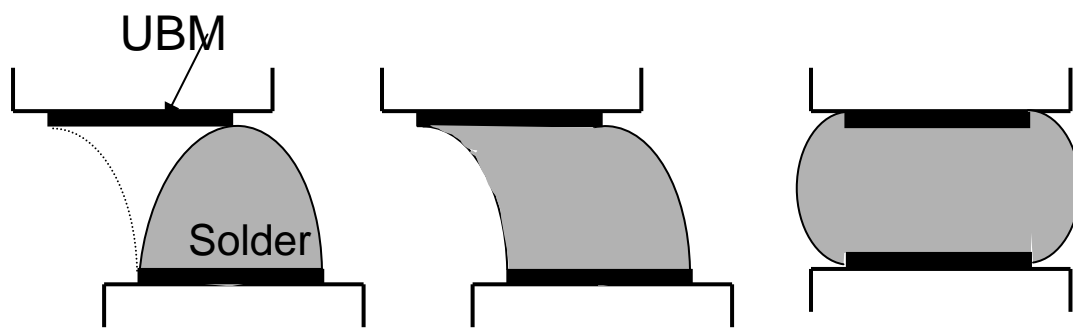


覆晶封裝(flip chip) 技術起源於1960年代，為IBM開發出之技術，覆晶封裝技術是在銲墊(pad)上沉積錫鉛球，然後將晶片翻轉及加熱利用熔融的錫鉛球與陶瓷機板相結合。目前覆晶接合主要應用於高時脈的中央處理器(CPU,Central Processing Unit)、圖形處理器(GPU,Graphic Processing Unit)及晶片組(Chipset) 等產品為主。此技術具較高密度的輸入/輸出接點，因為整個晶片的面積都可以被運用來設計做為接點。除了高密度輸入/輸出接點的優點外，覆晶封裝技術(Flip Chip technology)還有兩個重要的優點，一是所有的接點在一次的迴焊(reflow)同時完成。另一個優點是自動對位 (self-alignment)，如圖一所示因著熔融銲錫的表面張力以及銲錫只對 Under Bump Metallurgy(UBM)的金屬層有沾濕能力 (wetting ability)，因此，成百上千個接點可以同時自己完成對位，而使覆晶接合在晶片對位方面，較易完成，且在 Intel 大力推動覆晶技術的應用下，此種的封



裝技術方式是未來的潮流。

根據 Semiconductor Industry Association 出版的 1999 National Semiconductor Technology Roadmap<sup>2</sup>，對於高功能的晶片，在 2002 年需要 2380 個 I / O pads/cm<sup>2</sup>，而到 2011 年將需要 6844 個 I / O pads/cm<sup>2</sup>。以 BGA 為主體的覆晶封裝是目前唯一能達到此 I / O pads 要求的構裝技術。它發源於 IBM 傳統的“controlled collapse chip connection” technology，也就是簡稱“C4”的構裝技術<sup>3,4</sup>。IBM 從 1960 年代以來，就已經開始使用此技術將晶片接合到陶瓷基板上。若考慮 BGA 鉅錫球規則排列在 1cm × 1cm 的正方型晶片上，假設它們的間距(pitch)是 200 μm，也就是鉅錫接點的直徑是 100 μm，而且它們的間隔是 100 μm。則我們可在 1cm 的距離內置入 50 個鉅錫接點，也就是在 1cm × 1cm 的正方型晶片上有 2500 個鉅錫接點。依此類推，若我們使用直徑是 50 μm 的鉅錫接點，而間距是 50 μm (pitch 100 μm)，在 1cm × 1cm 的正方型晶片上，則可置入 10000 個鉅錫接點。



圖一：自動對位過程。



## 2-2 無鉛錒錫

含鉛錒錫的使用一直是造成鉛環境污染的一個重要原因之一。因此，美國、歐洲和日本已開始注重此問題。歐洲議會於 2002 年 10 月通過 RoHS 指(2003.2.13 正式公告)，2006.07.01 開始電子產品全面禁用包括鉛、鎘、汞、六價鉻、溴化耐燃劑等六種物質；此一指標性規定，已演變成全球性環保要求、也成為資訊電子產業基本技術門檻。其中電機電子產品錒鉛錒錫使用已有五十年歷史，替代性無鉛錒錫材料轉換將衍生組裝製程條件、設備、測試方法規範、產品品質與可靠度等議題重新檢討。對於以製造專業為主的國內電機電子產業「無鉛錒錫」要求勢將形成莫大衝擊。而日本方面，像是 NEC 於近年表發其今後所有製品無鉛化發展的具體計畫。該公司在 2003 年 3 月份之前，在日本國內生產的製品全部已達成無鉛化產品的目標，並計畫在 2005 年 3 月份之前，所有在海外生產的製品也都達成無鉛化，完全廢棄鉛、水銀、鎘、六價鉻的使用。NEC 於今後，在日本國內所新設計生產的電腦、通信產品全部都將無鉛化。印刷電路板零件構裝上使用錒錫也將適用無鉛焊接，所使用的錒料則以 Sn-Ag-Cu 系和 Sn-Ag 系為主。無鉛錒錫的使用，將可杜絕此效應。而台灣一直是全球最重要的電子組裝國家之一，因此為了將來要把電子產品銷售到這些國家，勢必要配合這些國家的政策，將電子產品無鉛化。

## 2-3 銲錫接點內的電遷移現象

### 2-3-1 電遷移效應理論

當銲錫接點的尺寸漸漸縮小，以便容納更多的 I/O 接點時，對其可靠度 (reliability) 有甚麼影響呢? 首先我們必須考慮的是銲錫接點的“電遷移”。

電遷移是一種由於電場和帶電載子所造成的質量移動<sup>5,6,7</sup>。此現象通常在微電子元件中有高電流密度的導線內發生。例如在一條 5 μm 寬，0.2 μm 厚的鋁導線，在室溫下通入 1 mA 的電流(電流密度為 10<sup>5</sup> amp/cm<sup>2</sup>)，則會造成一端有空孔 (void) 的生成，而另一端則有突出物(extrusion)的產生。如圖二所示。嚴重時會造成電路短路。它是在 1965 年被發現會對半導體產品的可靠度會有威脅。因此，在過去三十多年中，一直有許多學者在研究此問題，並已經研究出有效的防治之道，其中之一即在鋁線中加入 2-3% 的銅<sup>8,9</sup>，而使電遷移不致於危害到電子元件。

杜經寧教授在 1992 年曾對於電遷移的動力學(kinetics)作分析，其結果和短鋁線的實驗數據相吻合<sup>10</sup>。在此分析中，是以下的兩個方程式來描述電遷移：

$$J_m = -C(D/kT)(d\sigma\Omega/dx) + C(D/kT)Z^*eE \quad (2-1)$$

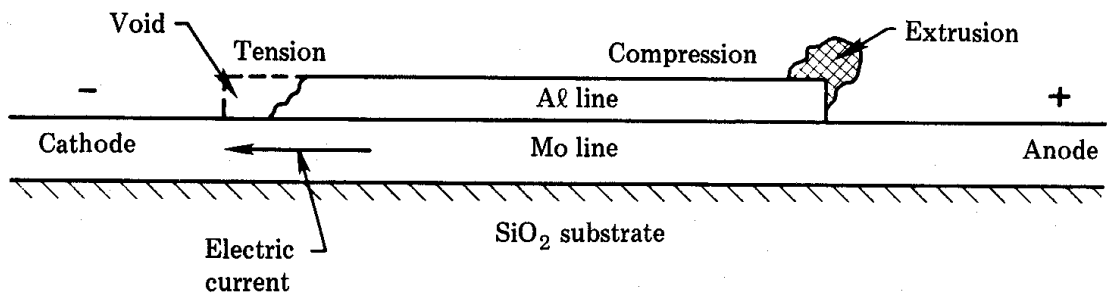
$$J_e = -L_{12}(d\sigma\Omega/dx) + n\mu_e eE \quad (2-2)$$

其中 C 是濃度，D 是擴散係數(diffusivity)，k 是 Boltzmann 常數，T 是溫度，σ 是應力，Ω 是原子體積，Z\* 是有效帶電數，E 是電場，L<sub>12</sub> 是現象學係數 (phenomenological coefficient)，L<sub>12</sub>=(1/σΩ)(dφ/dσ)，其中(dφ/dσ)是塑變位能

(deformation potential)。杜經寧教授也提出一個新的模型，以電流集中效應以及空孔的觀點來解釋電遷移現象<sup>11</sup>。

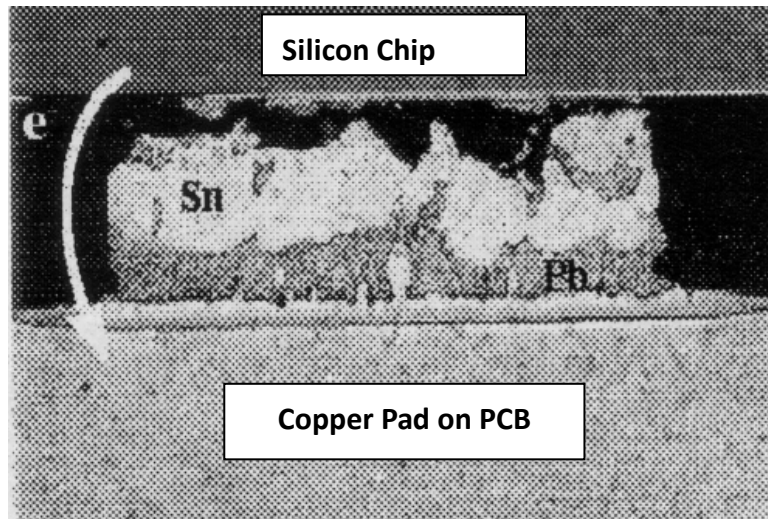
Brandenburg 等人指出<sup>12</sup>，在 150 °C 下通入  $6.8 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$  的電流密度，經過 100 小時後，電遷移會破壞鉅錫接點(見圖三)，所以當鉅錫接點的尺寸漸漸地縮小時，所通入的電流密度也跟著增加，電遷移對於元件的可靠性將會有很嚴重的影響。根據 1999 年的 International Technology Roadmap for Semiconductors, (ITRS) 在 2005 年，每個鉅錫接點(65  $\mu\text{m}$  opening, 150  $\mu\text{m}$  pitch)必須承受 65-95 mA 的電流，大約相當於  $5 \times 10^2 \text{ A/cm}^2$  的電流密度。而在 2011 年時，每個鉅錫接點必須承受的電流會增加 2.3 倍，大約相當於  $1.1 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$  的電流密度。因此，鉅錫接點的電遷移研究刻不容緩。





圖二：鋁導線通入高電流後，所產生的外型變化橫切面示意圖。在陰極有空孔生成，而陽極有突出物產生<sup>7</sup>。





圖三：125  $\mu\text{m}$  共晶錫鉛銲錫接點在 150 °C 下通入  $6.8 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$  的電流密度，經過 100 小時後，電遷移破壞銲錫球接點。電子流動方向如箭頭所示<sup>12</sup>。



在金屬與積體電路的研究中，杜經寧教授在2003年有系統的介紹電遷移的起源<sup>13</sup>。金屬部份的電遷移，則是由Paul S. Ho 與Thomas Kwok最先提出研究<sup>14</sup>。Seith 與Wever 也以定位點（marker）的運動，來量測遷移的位移量。此方式在測量電遷移上，後來成為標準的方法。H. Wang 與 C. Bruynseraede 等人在2004年提出，當電子聚集發生於電遷移在銅導線的鑲嵌結構(damascence) 當中，利用特殊結構加速了電子聚集效應，發現到有孔洞的產生，並藉由有限元素分析法，看到持續性的原子推動力是如何發生在特定的路徑上，以至於孔洞的生成，而原子流的發生也受到通電造成的焦耳熱效應溫度梯度影響<sup>15</sup>。

對於電遷移通量的計算，Nernst-Einstein 提出表示的關係式：

$$J = \frac{Ne\rho}{kT} Z^* jD = \frac{Ne\rho}{kT} Z^* jD_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \quad (2-3)$$

並在其相關研究中推導出Blech 結構在不同的線寬（10, 3, 1  $\mu\text{m}$ ）時的飄移速率分別為16、49、66 nm/h，而活化能為 $0.73 \pm 0.12 \text{ eV}$ <sup>16,17</sup>。



## 2-3-2 焦耳熱效應(Joule Heating Effect)

電子流經金屬內部時，因為電子震動導體內部原子促使溫升現象，即稱為焦耳熱效應。並且，在導體內因電流流動所產生的熱量，稱為焦耳熱。焦耳熱受電阻與電流影響，可表示如公式(2-4)。

$$J = IV = I^2R = \frac{V^2}{R} \quad (2-4)$$

其中 $I$ 代表電流(Ampere)、 $V$ 代表電壓(Voltage)、 $R$ 代表電阻(Ohm)、 $J$ 代表焦耳熱(J/s-W)，式中以SI公制單位表示。

此外，熱量因相鄰不同元件溫度不平衡而產生熱量傳遞之現象稱為熱傳導(Heat conduction)，可表示為

$$\dot{Q} = -\kappa \frac{dT}{dx} \quad (2-5)$$

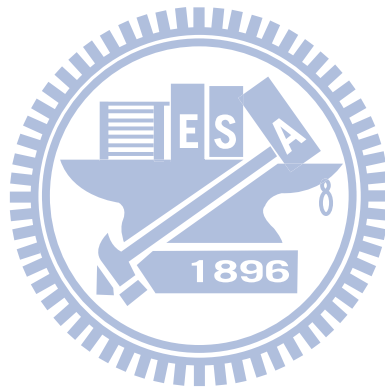
其中 $\dot{Q}$ 為單位面積與時間內所傳遞之總熱量(W/m<sup>2</sup>)、 $\kappa$ 為熱導係數(W/m·°C)、 $\frac{dT}{dx}$ 為x方向之溫度下降量(°C)，負號表示高溫往低溫傳遞。最終於特定溫度下達成熱平衡<sup>18,19,20,21</sup>。

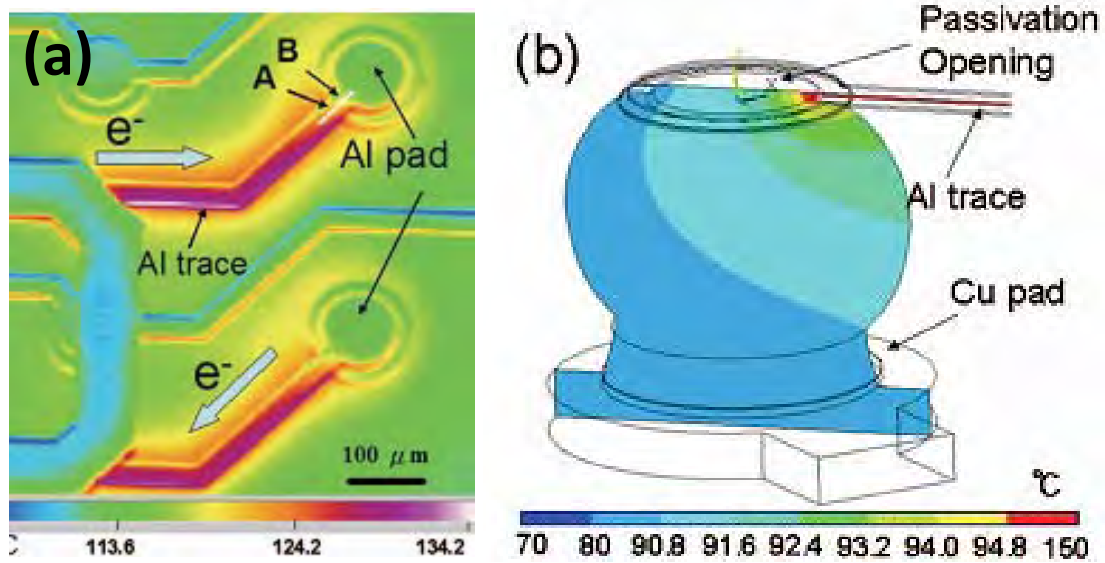
Chiu 等人<sup>22</sup>在2006年的文獻當中指出，鉛錫接點在通電作用下，產生的焦耳熱效應對鉛錫溫度的影響。提出利用紅外線顯像技術對通電的覆晶結構，驗證當熱點存在，由鋁導線進入鉛錫處，如圖四所示，而焦耳熱效應會進一步導致電阻的上升。稱為Temperature Coefficient of Resistance (TCR)。

$$TCR = \left[ \frac{R_1 - R_0}{R_0} \right] \left[ \frac{1}{T_1 - T_0} \right] \quad (2-6)$$

其效應的校正可以使得在前段落回顧中，推求Black's equation 的n與活化能Q

上，有需要溫度校正，讓其中的解更接近鉚錫真實的情況。





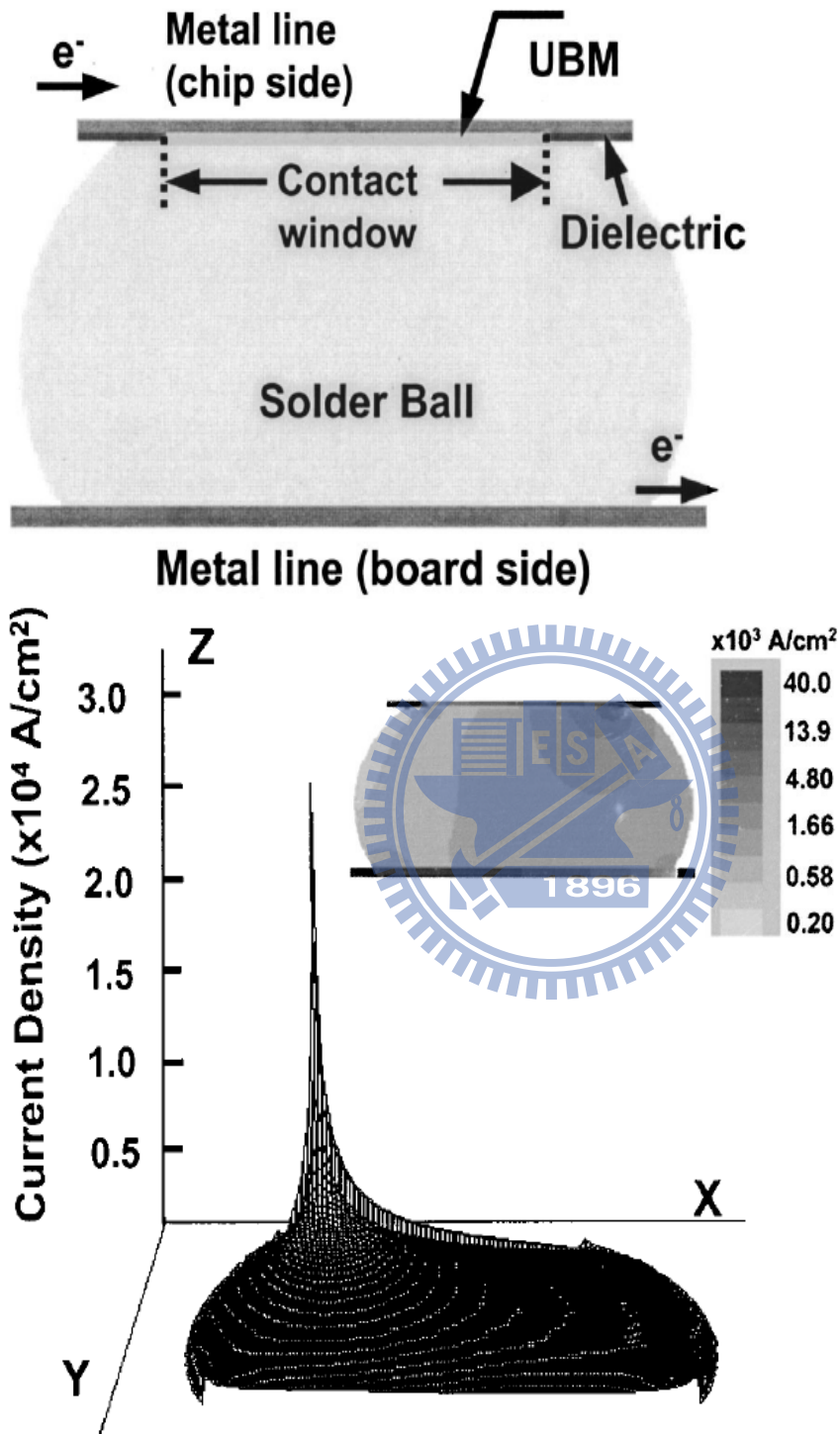
圖四：(a)通入 0.59 A 電流，以紅外線熱像儀觀測到的溫度分布。(b)通入電流時，鉅錫接點內部溫度分布模擬<sup>22</sup>。



### 2-3-3 電流集中效應(Current Crowding Effect)

覆晶鉅錫接點的結構為鉅錫接點連接到晶片端內連接線與基板端的導線，因為在內連接線的剖面面積比鉅錫接點小了兩個維度，加上同樣的電流流過，在鉅錫接點與內連接線接面會有很大的電流密度改變，這樣的改變造就了電流集中效應。另一方面，電遷移的作用機制是利用電子與原子間的碰撞所產生出來的效應，然而電子的行進路線會選擇最短或受最小阻礙的路徑來行走。若路徑為曲線（假設整個路徑為同材質），則因為最內側的路徑電阻較小，所以通過的電子數量較多，於是在彎角的地方也會出現電流聚集的情形。

在Everett 等人<sup>23</sup>的研究中，提及導線與鉅錫接點幾何形狀的差異造成鉅錫接點內部的電流集中情形，鉅錫內部電流密度分布分析結果如圖五所示，並由實驗的結果證實此現象會造成鉅錫接點中電流集中處有孔洞生成，且使鉅錫在電遷移可靠度測試的結果不如預期，結果推得如在設計中引入可減緩電流集中效應的方法，可以提高鉅錫接點的抗電遷移能力。



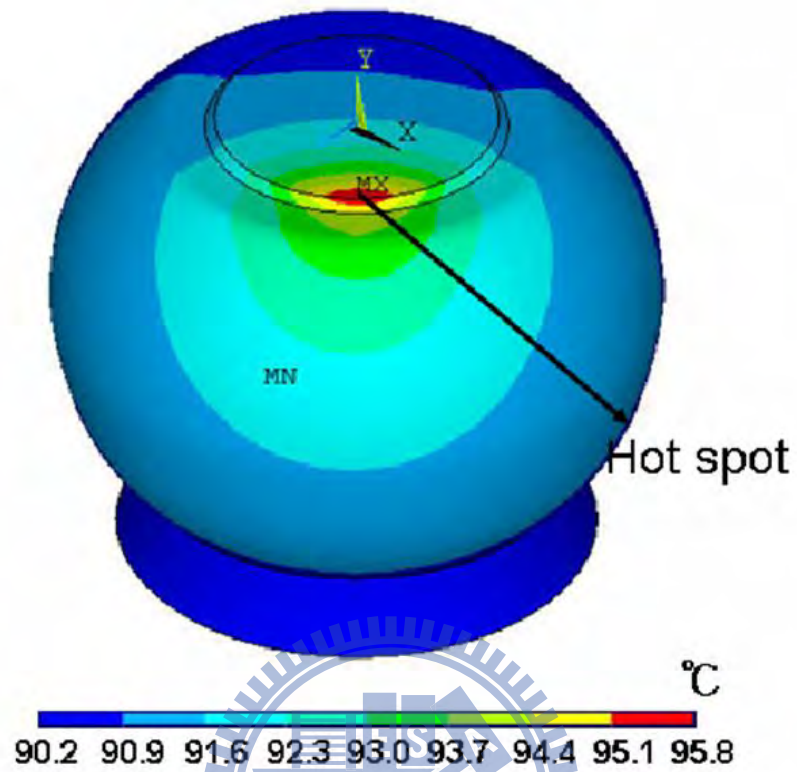
圖五：有限元素分析鉛錫接點內部電流密度分布示意圖<sup>23</sup>。

### 2-3-3 鐳錫接點內的熱點研究

由於鐳錫接點內受到電流集中效應跟焦耳熱效應的影響，讓鐳錫接點內有了熱點的存在。Chiu等人<sup>22</sup>由模擬結果提出由鋁導線進入鐳錫交界處有熱點存在，並利用紅外線顯像技術量測焦耳熱效應造成的溫升，發現主要發熱源的確來自於鋁導線，並且驗證熱點的存在，如圖六，此乃為目前最直接可以量測到鐳錫球在電遷移測試下的溫度，然而焦耳熱效應將進一步造成電阻上升<sup>23</sup>。

另外，也有許多模擬的結果發現鐳錫接點內並沒有熱點的存在。鐳錫接點內的溫度分布是均勻的，接點內的溫差差不到 $1^{\circ}\text{C}$ 左右。由於鐳錫接點內溫度對整個覆晶封裝的可靠度有非常大的影響。因此，鐳錫接點內的熱點存在與否有研究的必要性。





圖六：模擬結果提出在鋁導線進入鉅錫接點交界有熱點存在<sup>22</sup>。

#### 2-3-4 無鉛鉛錫的電遷移

隨著環保的意識抬頭，近年來許多人對無鉛鉛錫投入研究<sup>24,25,26</sup>。Yang 等人<sup>27</sup>利用 Sn3.5Ag1.0Cu 鉛錫接點在 125°C 下，通以  $2.3 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup> 的電流密度；在不同階段下觀察無鉛鉛錫接點的電遷移效應。他們觀察到隨著時間的增加孔洞的延伸長度也隨之增加；而鉛錫接點到了電遷移效應的後期，鋁導線的電遷移行為大大的影響鉛錫接點內的破壞模式。另外，由 Jen 等人<sup>28</sup>，也是利用不同階段來觀察無鉛鉛錫接點內受電遷移效應的破壞行為。他們是利用 Sn3Ag1.5Cu 無鉛鉛錫接點，但在基板端分別使用不同的金屬層 Cu-OSP 和 Cu/Ni/Au，在 150°C 下，施加  $1 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup> 的電流密度。他們觀察到在電子流向下的鉛錫接點內，主要的破壞模式是因為在 UBM 和鉛錫接點之間孔洞的形成與佔據；而孔洞的生成原因是因為鉛錫接點內在接近晶片端電流集中效應所造成的。



## 2-4 鉾錫接點內的熱遷移現象

### 2-4-1 熱遷移效應理論

在一個成分均勻的合金中，我們把它放在一個有溫度差的地方，而合金內的元素會因為此溫度差而產生擴散。首先發現此現象的是 Ludwig 與 Soret 兩位學者，他們觀察到鹽類濃度的增加或減少會隨著管內鹽水的冷熱端而有所改變。<sup>29,30</sup> 而 Soret effect 是發生在試片沒有組成濃度梯度的情況下。

我們描述一個間隙原子間的溫度梯度效應。考慮一個任意間隙原子在三維空間  $z$  方向空間的振動，如果跳動頻率可以被寫成下列：

$$\Gamma = z\nu \exp \frac{-\Delta G_m}{RT} \quad (2-7)$$

方程式中， $\nu$  是頻率， $\Delta G_m$  是間隙原子遷移的活化能。活化能是大的活化焓(enthalpy)和活化(entropy)的和。如果有溫度梯度存在時，原子的跳動頻率( $\Gamma$ ) 在較熱區比在較冷區域高。因此，隨著原子移動到合金區域的較冷端時，可以觀察到有擴散通量在溫度梯度下方。

事實上，熱遷移效應在空位機制下，可以隨著溫度梯度的方向發生向上或向下的質量傳送發生，因此熱遷移驅動力可以寫成以下式子：

$$F = \left[ \frac{Q^*}{N} \right] \frac{\nabla T}{T} \quad (2-8)$$

熱遷移的驅動力是類似電熱效應，溫度梯度可以驅動電子，進而驅動原子。在本質上，電子在高溫區有高能量在分散或是擴散原子界面在原子擴散的驅動力，我們稱為原子通量，主要是化學勢，可以表示為以下的式子：

$$J = C \langle v \rangle = CMF = C \frac{D}{kT} \left( -\frac{\partial \mu}{\partial x} \right) \quad (2-9)$$

$\langle v \rangle$  是飄移速率， $M = D/kT$  是遷移率， $\mu$  是化學位能。

由於熱遷移的產生與溫度差有關，因此，我們考慮溫度梯度，所以驅動力可以寫成：

$$J = C \frac{D}{kT} \frac{Q^*}{T} \left( -\frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2-10)$$

此時， $Q^*$  定義為熱傳送值(heat of transport)。比較以上兩個式子(2-9)(2-10)，我們可以發現  $Q^*$  與  $\mu$  有同樣的尺寸。所以熱傳送值的單位是每個原子所含的熱能。

關於熱傳送值，我們可以定義它是正或是負。在 Fe-C 系統中，文獻中發現 C 是往熱端的空隙來移動，因此我們可以得到負的熱傳送值。

在1982年Roush團隊<sup>31</sup>發現在鉛錫(Pb-In)凸塊合金中，凸塊內部溫度梯度高達1,200 °C/cm，並且鉛材料隨著溫度梯度由高溫到低溫質傳。

## 2-4-2 共晶錫鉛銲錫接點內的熱遷移

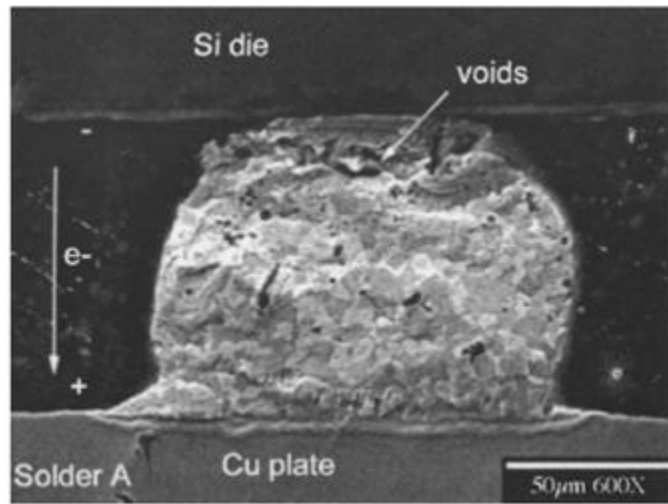
銲錫接點內部相關熱遷移效應則根據C. Q. Ru 文獻<sup>32</sup>中得知，封裝體內部的薄膜導體結構，常因電流集中效應誘生焦耳熱，造成局部溫度不平衡（即溫度梯度）而形成熱遷移效應。此外，熱遷移效應主宰導體中不穩定質量傳遞現象，其不穩定傳遞受到高電流密度與溫度梯度兩種參數影響。第一個在銲錫接點內部觀測到熱遷移是在2003年Hopkins 團隊提出錫鉛接點經歷電流負載 $1.3 \times 10^4$  A/cm<sup>2</sup>，在16小時，發現銲錫接點因熱遷移效應而加速破壞。文獻中可知其測試結構由上而下分別為矽晶片、鋁導線、錫鉛接點、銅襯墊、FR4 基板五層。結構中因鋁導線電阻值最高，依據焦耳熱效應與公式(2-5)可知鋁導線為封裝體主要發熱源。故此，與鋁導線緊連之矽基板則形成高溫區；反之，遠離鋁導線之FR4 基板則形成低溫區，因此上下兩區域之溫度梯度應造成通電錫鉛接點內部亦形成相當程度之溫度梯度，而產生熱遷移效應。圖七可發現電流向上的銲錫接點中，電遷移與熱遷移效應同方向時，錫原子往銅襯墊端(陰極)移動現象較劇烈；反之，電子流往下的銲錫接點中，則因為兩效應反向而減緩鉛原子往矽晶片(陽極)移動現象，如圖八。此外，電子流往下的銲錫接點中，如果以電遷移效應主導結構原子移動，其空缺應該發生於銅襯墊與接點交接區，但是，於圖八中發現空缺卻發生在矽基材與銲錫接點區域，故此，可以推論空缺位置變異應該是由熱遷移大於電遷移效應所致。由此可知，封裝體內接點區域確實有熱遷移效應產生現象。此外，熱遷移效應必須透過溫度梯度量值來量化其影響程度，故此，該文獻

中亦利用熱電有限元素分析，模擬1.0 A電流負載下，錫鉛接點內部溫度分佈結果，如圖九，此外，透過該圖計算出溫度梯度約為 $1,500\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}^1$ 。不過，該文獻仍無法透過實驗予以驗證溫度梯度之正確性，所以，本研究嘗試量測出鉚錫接點內部溫度梯度，可以驗證相關模擬之結果與熱遷移效應量化計算。

另外，由杜經寧教授實驗室也發現了共晶錫鉛鉚錫接點內有熱遷移的現象產生<sup>33</sup>。他們所使用的鉚錫接點是一種複合的鉚料。基板端是共晶錫鉛的鉚料(37Pb63Sn)而在晶片端占較多組成的是高鉛鉚料(97Pb3Sn)。他們所使用的UBM是Al (~0.3  $\mu\text{m}$ )/Ni(V) (~0.3  $\mu\text{m}$ ) /Cu (~0.7  $\mu\text{m}$ )。通電條件是在烘箱加熱 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下，通以 $1.6 \times 10^4\text{ A}/\text{cm}^2$ 的電流密度，以串連的方式來通電。在5小時的通電時間後，他們觀察到在沒有電流通過的鉚錫接點中可以發現到很明顯的熱遷移現象，如圖十所示。從圖中可以發現，錫完全往晶片端來移動，累積在晶片端；也是鉚錫接點內較熱的區域。而鉛則是往基板端累積，此時基板端是較冷的區域。會造成此現象是因為鉚錫接點內部產生溫度差的關係；因此，他們也預估了在大約 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 的溫度梯度下，可以在鉚錫接點內部觀察到熱遷移的現象。之後，他們利用一對共晶錫鉛鉚錫接點(37Pb63Sn)在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下通以 $1.6 \times 10^4\text{ A}/\text{cm}^2$ ，經過27小時20分鐘之後；也是發現未通電的鉚錫接點有熱遷移的現象，鉛相完全往基板端較冷端移動，如圖十一所示。另外，他們計算了鉛原子因為熱遷移所造成的熱遷移通量和熱傳送質(heat of transport)分別是 $4.26 \times 10^{14}\text{ atoms}/\text{cm}^2\text{sec}$ 和 $-25.3\text{ kJ}/\text{mole}$ <sup>34</sup>。

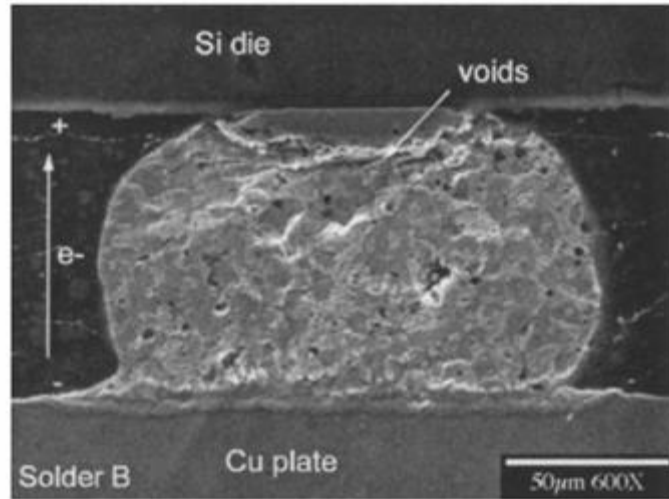
有其他文獻也計算出鉛的熱遷移通量和熱傳送值(heat of transport)分別是  $4.26 \times 10^{14}$  atoms/cm<sup>2</sup>sec和- 22.16 kJ/mole。但他們主要是利用共晶錫鉛銲料 (37Pb63Sn)的三明治結構，放在一個有高低溫差的環境當中。他們觀察到鉛原子會往合金內較冷的區域來移動<sup>35</sup>。但由於不是真正的覆晶銲錫接點結構；因此，所得到的熱遷移通量和熱傳送值(heat of transport)會有所差別。





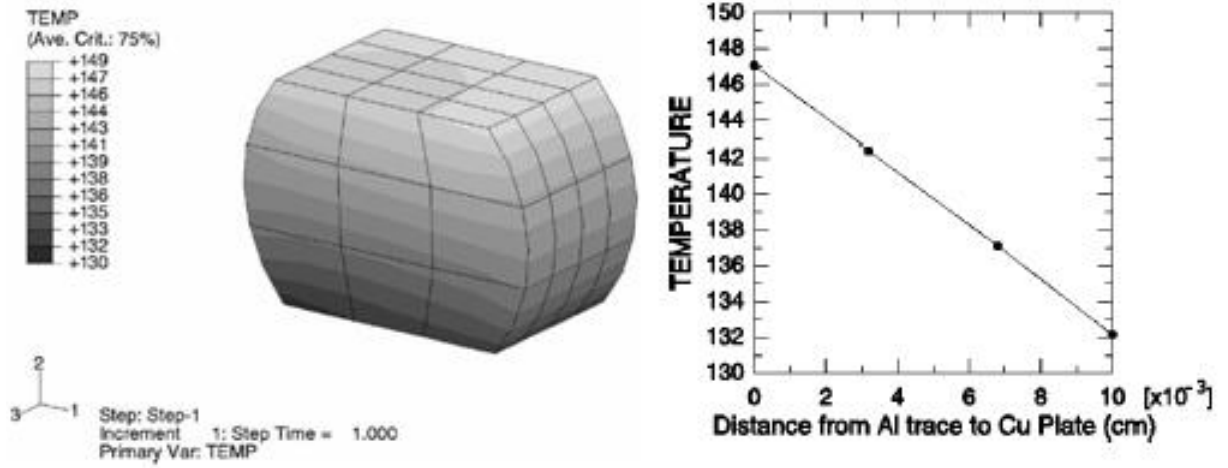
圖七：錫鉛接點-A，歷過 16 小時、 $1.3 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$  電流密度之 SEM 圖<sup>1</sup>。



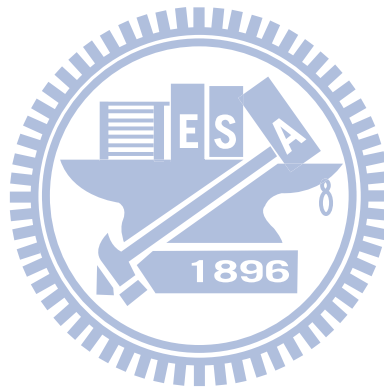


圖八：錫鉛接點-B，歷過 16 小時、 $1.3 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$  電流密度之 SEM 圖<sup>1</sup>。

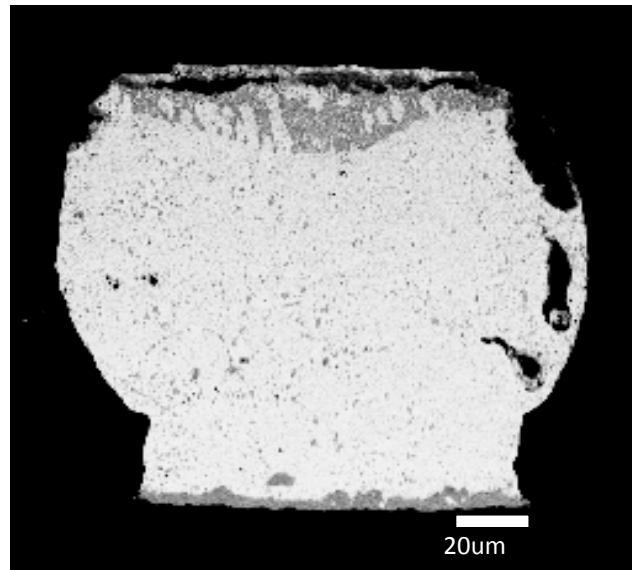




圖九：在 1.0 安培電流負載下，有限元素分析結果 (a)錫鉛接點內部溫度分佈 (b) 錫鉛接點內垂直溫度分佈<sup>1</sup>。

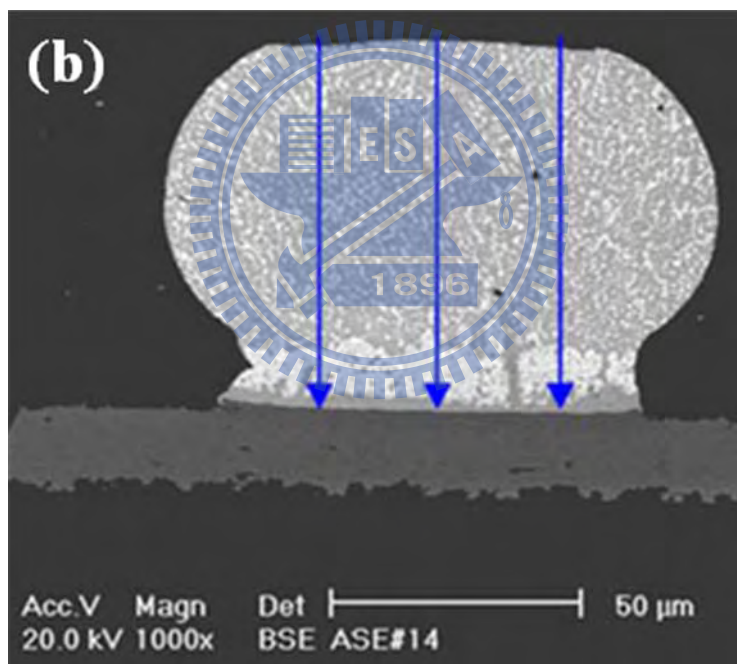
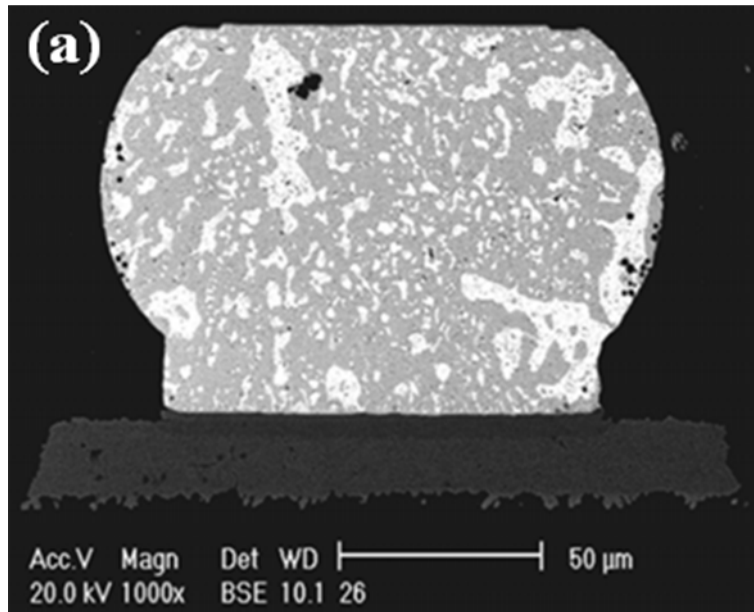






圖十：複合錫鉛鉍錫接點在熱遷移效應下的電子顯微鏡影像圖<sup>32</sup>。





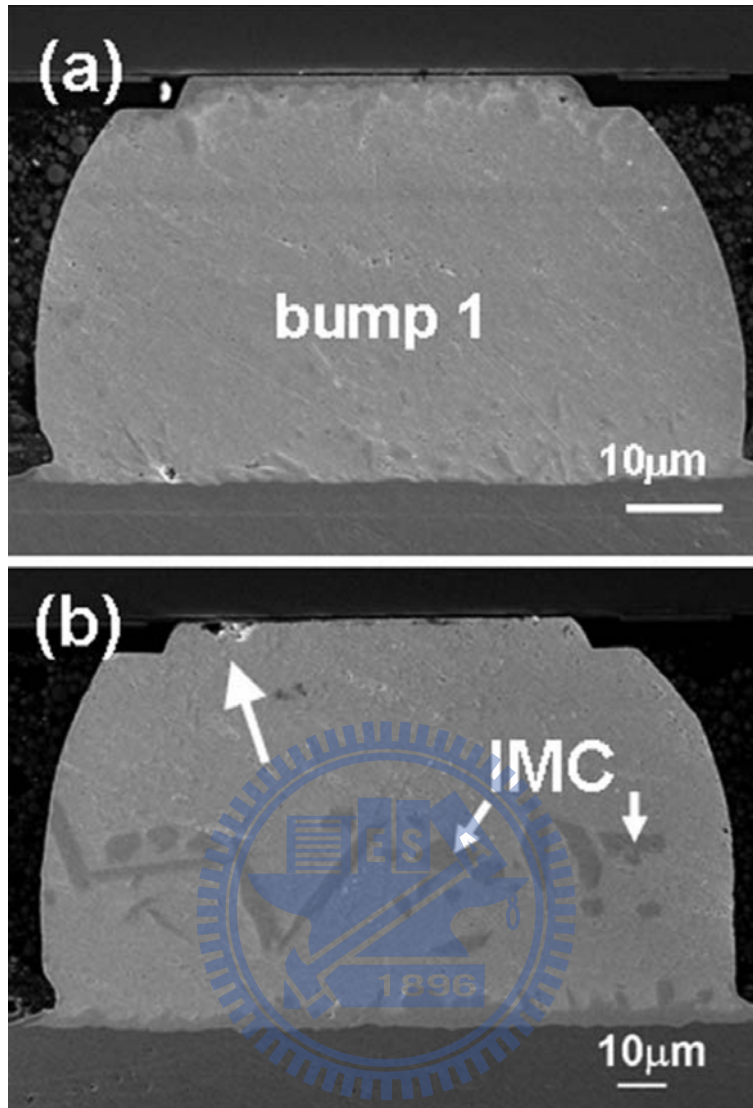
圖十一：未通過電流之鉅錫接點橫截面電子顯微鏡影像圖(a)通電前(b)通電後

### 2-4-3 無鉛鉛錫接點內的熱遷移效應

由於無鉛鉛錫為目前覆晶封裝發展的重點，但因為無鉛鉛錫料被使用的時間較晚，因此，無鉛鉛錫接點內的熱遷移現象被研究的較少。

Hsiao-Yun Chen等人<sup>36</sup>用無鉛鉛錫接點在150 °C下，通以電流密度 $9.7 \times 10^3$  A/cm<sup>2</sup>。他們發現在未通以電流的鉛錫接點內，因為UBM處的銅原子受到熱遷移的影響往鉛錫接點內較冷端移動，因此造成接近晶片端的鉛錫接點處有空孔的產生，如圖十二所示。他們也計算出如果銅原子在大於400 °C/cm的溫度梯度下，銅受熱遷移效應的影響會大於受到電遷移的影響。

另外，Abdulhamid等人<sup>37</sup>是利用SnAgCu鉛錫接點在室溫下通以電流，觀察到在有無通電的無鉛鉛錫接點內，發現到介金屬化合物(Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>)因熱遷移效應的影響；在較熱端有崩解的情形產生，而在冷端有積聚增厚的現象。因此，介金屬化合物(Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>)是往冷的方向來遷移。



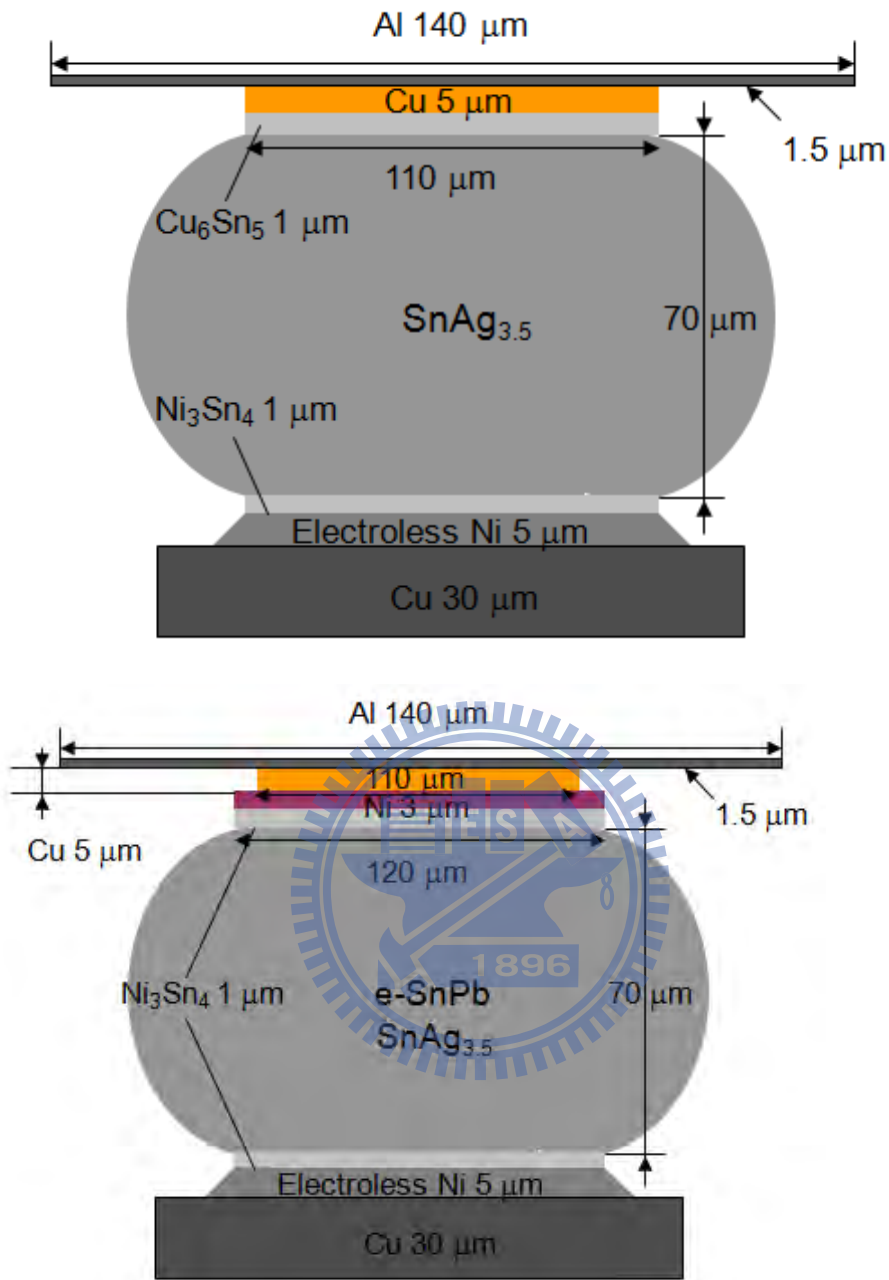
圖十二：電流未通過之共晶錫銀鉍錫接點橫截面電子顯微鏡影像圖(a)通電前(b)在 150 °C 下通以 0.55 安培之結果<sup>36</sup>。

### 第三章 實驗與方法

#### 3-1 試片製備

本論文實驗所使用的試片，主要是由米輯科技所提供的共晶錫鉛和共晶錫銀  
錒錫接點覆晶封裝試片，試片的結構分別如圖十三。所使用的 UBM (under-bump  
metallization) 種類也是有兩種分別為Ti /Cu /Cu /Ni，厚度為 0.5  $\mu\text{m}$  /0.5  $\mu\text{m}$  /5  $\mu\text{m}$   
/3  $\mu\text{m}$ ，和Ti /Cu /Cu，厚度分別為 0.5  $\mu\text{m}$  /0.5  $\mu\text{m}$  /5  $\mu\text{m}$ ，其中 Ti 與 0.5  $\mu\text{m}$  厚  
的 Cu 層是利用電子槍蒸鍍而成，5  $\mu\text{m}$  厚的 Cu 與 3  $\mu\text{m}$  厚的 Ni 則是電鍍而  
成。以黃光顯影的方式定義出開口大小，再用濕式蝕刻法，定出UBM opening 為  
110  $\mu\text{m}$ ，直徑125  $\mu\text{m}$ ，而contact opening 為85  $\mu\text{m}$ 。其中鋁導線寬為100 $\mu\text{m}$  厚1.5  
 $\mu\text{m}$ ，錒錫接點間pitch 為1 mm。

錒料則先利用電鍍將錒錫固定在UBM 所在，再以加熱爐加熱到220  $^{\circ}\text{C}$ 約1  
分鐘。基板的部份，使用FR5 基板，而其接著的銅墊層之上為5  $\mu\text{m}$  的無電鍍鎳、  
1  $\mu\text{m}$  金，下方銅墊層的直徑為280  $\mu\text{m}$ 。



圖十三：試片結構示意圖(a) 5  $\mu\text{m}$ -Cu UBM 錫錫接點(b) 5  $\mu\text{m}$ -Cu/3  $\mu\text{m}$ -Ni UBM 錫錫接點。

### 3-2 溫度量測

欲使用紅外線熱像儀觀察通電時覆晶封裝中不同鉛錫接點剩餘量的剖面溫度分佈過程中，因為紅外線熱像儀本身量測限制，導致無法直接透視晶片內鉛錫接點內剖面，故此，於溫度量測之前，必須進行試片破壞處理以取得鉛錫接點內剖面。過程如下：

1. 將完整的 flip chip 試片做研磨、拋光，研磨到鉛錫接點剩餘一半的質量；而晶片端鋁導線和基板端銅導線的寬度也為原尺寸的一半。
2. 將拋光面垂直朝向紅外線偵測器，如圖十四所示。
3. 將試片通電，分別通以直流電與交流電。
4. 利用紅外線熱像儀量測通電後鉛錫接點內部之溫度變化。

其中紅外線熱像儀測溫步驟為下：

1. 將待測物元件放置於儀器之加熱器上端。
2. 量測待測物所有能量值。
3. 假設穿透之輻射量( $Q_t$ )可忽略(因為加熱器控制在恆溫下，使該輻射量幾乎不發生)。
4. 隔絕與抵銷反射之輻射量( $Q_r$ )。
5. 計算每點發射率與該發射率矩陣求每點真實溫度。
6. 顯示出待測物表面真實溫度之熱影像。

校正步驟(真正量測之前處理)：

- a.找尋欲量測位置並對焦取得黑白紅外線影像；
- b.計算每點發射率；
- c.擷取未施加負載之參考溫度影像(如果量測溫度影像結果與加熱平板溫度相等，該影像即為基準影像)。

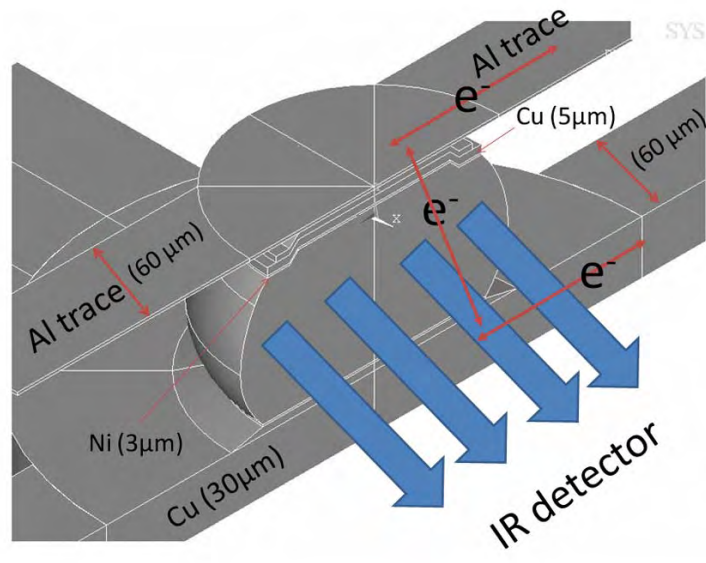
量測過程中，因為儀器屬於高精度與光學之輻射溫度量測系統。

故此，儀器對環境變化相當靈敏，以下幾點須特別注意：

- 1.試片表面高低起伏(影像有邊緣高溫效應)與擺設平整度(產生溫度誤差)；
- 2.試片發射率偏低時，需藉由特殊處理提高發射率(例如：噴漆)；
- 3.實驗人為因素影響，例如：儀器輕微搖晃、環境氣流急遽變化等。







圖十四：銲錫接點內溫度量測裝置示意圖。



本溫度量測實驗儀器為美國QFI(Quantum Focus Instrument)公司生產之第二代紅外線熱像儀(Infrascope II)，如圖十五。此外，該儀器屬於被動式紅外線溫度量測模式，意即元件本身所發射的熱幅射進行溫度量測。儀器大致分為三部份：量測區、後處理區、控制模組。量測區包含加熱平板、試片載台、紅外線鏡頭(倍率：1、5、15 倍三種)、反射鏡組、紅外線冷卻腔體、CCD 感測器；後處理區則透過CCD量測後，將訊號傳輸至電腦進行數值處理，輸出熱影像；控制模組包含X、Y、Z 三軸機械手臂與手動平臺X-Y 雙軸控制機制。

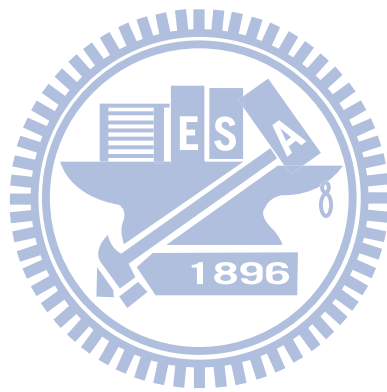
本儀器有別於一般溫度量測系統，以 $256 \times 256$  紅外線陣列CCD 感測模組形成單一熱影像(Thermomap)，並且可在影像中取得每點(Pixel-By-Pixel)之溫度值。儀器最大優點為可量測微小尺寸元件熱分佈，例如：電子電路中，熱點(Hot Spot)位置分析、量測焊錫接點通電時剖面與鋁導線溫度分佈等。此外，儀器溫度量測精確範圍約30至300 °C，精確度可達0.1 °C(加熱平板設定為80 °C 下)，鏡頭空間解析度可達2.8 微米(倍率為15 倍鏡頭)。

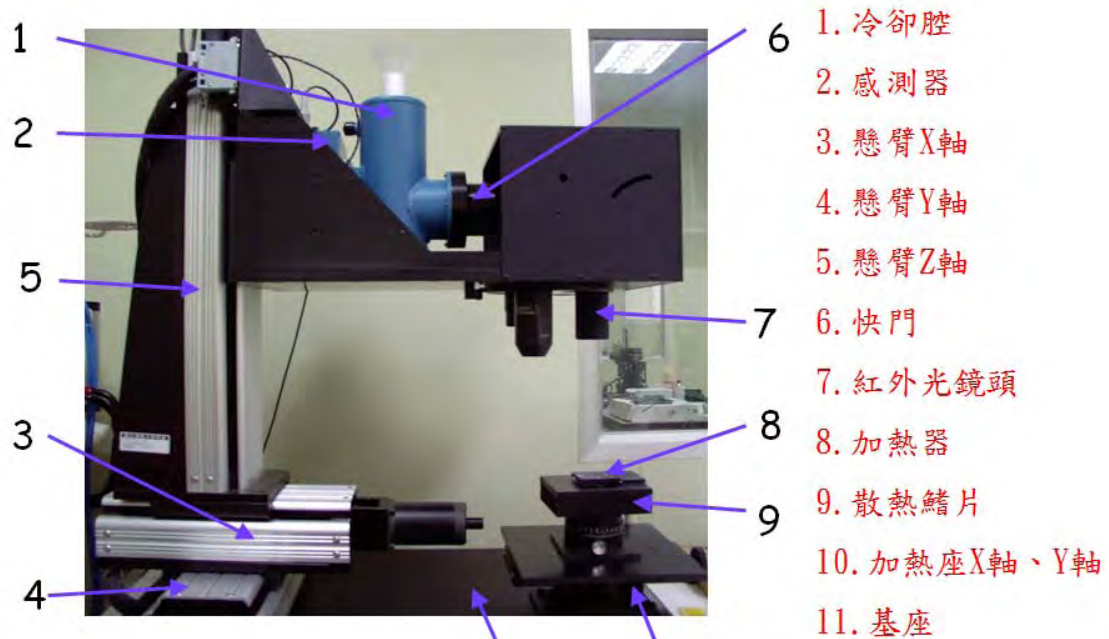
紅外線熱像儀具有以下特點：

- (1) 量測錒錫球受電負載下凸塊剖面與上視表面溫度分布。
- (2) 量測範圍達 300 °C，精確度最佳可達 0.1 °C，空間解析度最佳達 2.8 微米。
- (3) 須達熱穩定狀態才可量測。
- (4) 量測過程之微小震動即可影響輻射量變化並影響量測結果，所以試片在量

測過程中需保持靜止。

(5) IR 可以穿透矽晶片，所以可以透過矽晶片觀察到晶片底下之線路結構與溫度的分布。





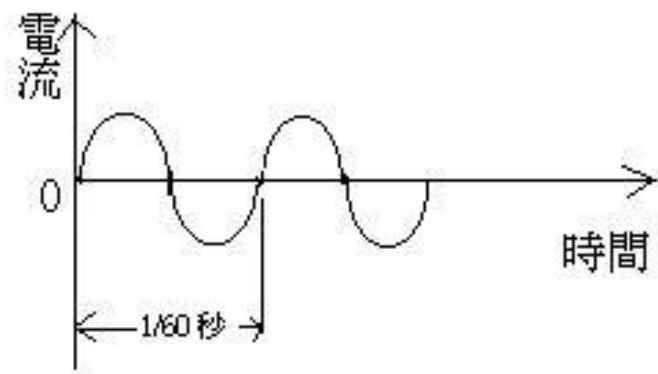
- 1. 冷卻腔
- 2. 感測器
- 3. 懸臂X軸
- 4. 懸臂Y軸
- 5. 懸臂Z軸
- 6. 快門
- 7. 紅外光鏡頭
- 8. 加熱器
- 9. 散熱鱗片
- 10. 加熱座X軸、Y軸
- 11. 基座



圖十五：紅外線熱像儀結構圖。

交流電 (Alternating Current) 是指大小和方向都發生週期性變化的電流，因為週期電流在一個週期內的運行平均值為零，稱為交變電流或簡稱交流電。不同於直流電，其方向都是一樣。通常波形為正弦曲線。交流電可以有效傳輸電力。但實際上還有應用其他的波形，例如三角形波、正方形波。生活中使用的市電就是具有正弦波形的交流電。因此電流的大小也會隨時間做規律性的變化，此種電源如圖十六所示。基於交流電的特性，倘若我們對於鉅錫接點施予交流電形式之電流，是否可以觀察到沒有所謂的電遷移的現象產生？如果這個方法是可行的，那在施予交流電的過程中，就只有單純熱量的產生，那對於鉅錫接點的一些相關特性是否就有影響呢，這是本實驗接下來想要作深入研究的領域。





圖十六：交流電示意圖。



### 3-3 以凱文結構來量測銲錫接點電阻

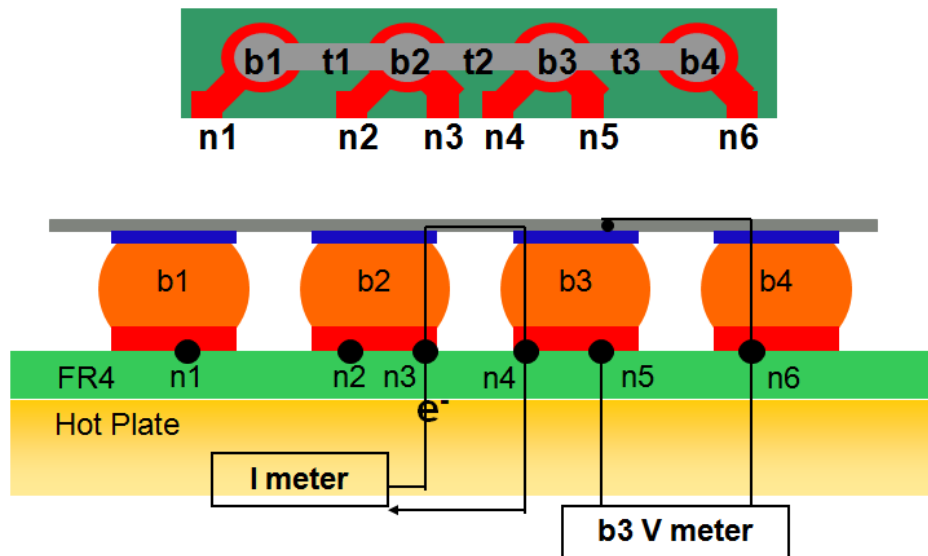
圖十七為本研究所指之凱文銲錫結構俯視圖，研究中將利用此結構觀測銲錫受電遷移影響時的變化。結構中共包含四顆銲錫球，此四顆銲錫球由一條 $3150\ \mu\text{m}$ 長的鋁導線連接四個鋁墊層，並標示為b1到b4 如圖十七(a)，鋁導線厚 $1.5\ \mu\text{m}$ 、寬 $100\ \mu\text{m}$ ，銲錫接點與銲錫接點的間隔為 $1\ \text{mm}$ ，此外如圖十七(a)所示，在FR4 基板上還有六條銅導線連接到此四顆銲錫球上，並標示為n1 到n6 銅導線厚 $30\ \mu\text{m}$ 、寬 $100\ \mu\text{m}$ ，b1 到b4 依序連接了1、2、2、1 條銅導線，導線的走向分別如圖十七(a)所示。利用六條銅導線不同的連接方式可以分別量測到b2、b3 的單顆銲錫電阻與中間的鋁導線電阻，不過在本研究中將著重在b3 的電性觀測。如圖十七(b)標註箭頭方向所示，在此研究中，由n3 及n4 通入電流，電子流在b2 中從基板端流向晶片端，在b3 中則相反方向。銲錫b2 的電壓降可以由n1 與n2 量測得到，而銲錫b3的電壓降則可利用n5及n6 量測得到，利用這樣的量測方式即可在發生電遷移的同時量測到兩個不同方向的銲錫電阻，因為電流集中效應，在以往的研究中大多顯示孔洞生成在銲錫球的晶片端，所以在本研究會將大部分的重心放在b3 的電阻以及微結構變化上。

在銲錫電阻變化的量測部分本研究中使用的電源供應器與量測儀器為電流源Keithley<sup>38</sup> 2400與資料交換器 (Data switch) Agilent<sup>39</sup>E34970A 配合有二十個獨立頻道的Agilent E34901A 模組，這兩組儀器在量測時間小於90 天、 $100\ \text{mV}$  的量測範圍下，電壓的量測精確度範圍約為 $5\ \mu\text{V}$ 。研究中所量測到的銲錫電阻值

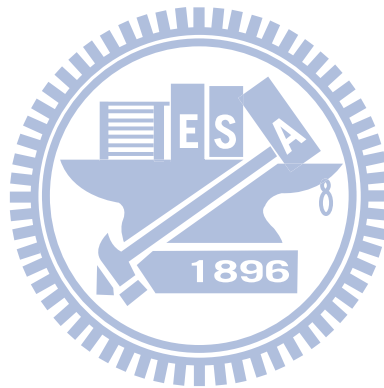
大小約在0.5 mV，亦即500  $\mu$ V；而在破壞產生之初始階段的銲錫電阻變化約為20  $\mu$ V，故此兩者儀器在本研究所需的量測範圍內可提供足夠的精確度。且上述兩儀器皆符合通用儀器通訊協定，同時支援序列阜與GPIB 控制介面，配合上適當的軟體便可利用在遠端對量測做穩定、長期、精確的連續控制，在本研究中即利用美國國家儀器公司(National Instruments, NI)<sup>40</sup>所開發的圖形化儀器控制軟體LabVIEW，作為資料擷取及儀器控制的工具。

利用在前文中所提及的覆晶錫銀銲錫接點試片，在100 °C通入0.5 A的電流，加熱的方式是將試片平貼於加熱墊表面，並用耐熱膠帶固定，靜置試片直到試片溫度到達平衡才開始量測，電流流經的迴路與量測的位置則如前所述。利用UBM半徑為60  $\mu$ m 為考量，0.5 A的電流，同時量測b3 的銲錫電阻與整個回路上的總電阻，在b3 銲錫電阻上升到b3 初始電阻的1.2、2.0、5.0、10.0、20.0 倍時停止通電，取下試片，並分別定義為階段1~5 與最後破壞階段 (Stage 1~Stage 5 and Stage final)，此外再定義未通電時的狀態為階段0 (Stage 0)。





圖十七：(a) 凱文鐳錫結構俯視圖(b) 凱文鐳錫結構剖面側視圖。



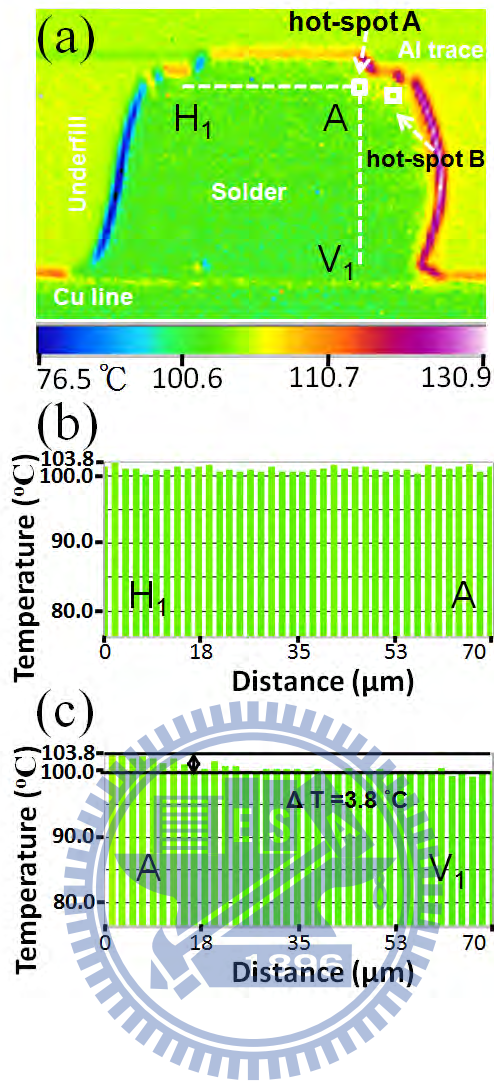
## 第四章 結果與討論

### 4-1 覆晶鉚錫接點內的焦耳熱效應

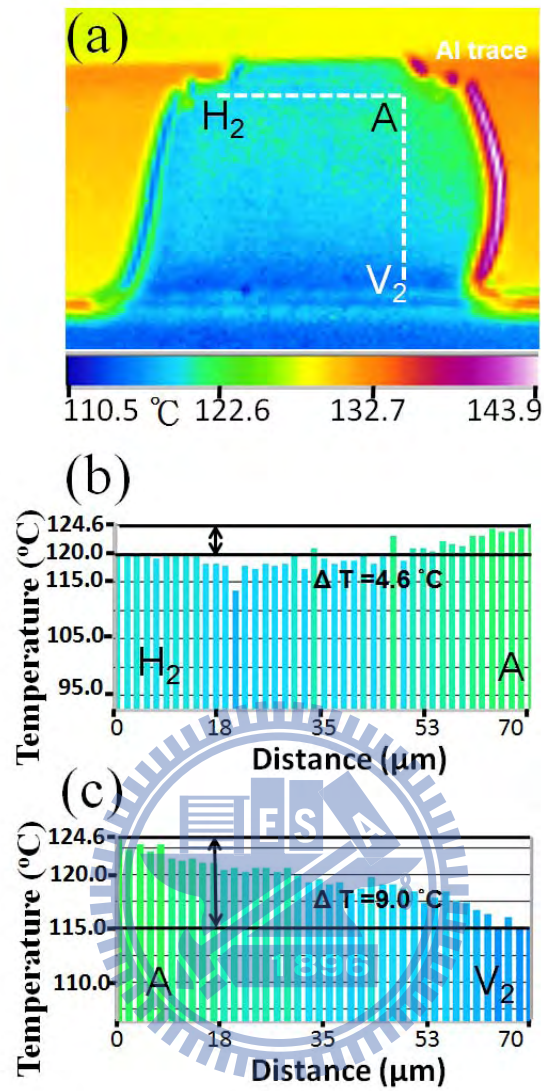
#### 4-1-1 直接量測鉚錫接點內的溫度分布

我們使用紅外線熱像儀在不同的電流驅使下來直接量測共晶錫銀鉚錫接點內部的溫度。我們可以直接觀察到在通以電流的情況下鉚錫接點內部有明顯的溫度增加，且有觀察到在鉚錫接點內部有熱點。圖十八是在通以0.2安培的電流下，共晶錫銀鉚錫接點內部的溫度分布圖；其中溫度的分布區間標示於圖的最下方X軸方向的位置。電子流是從晶片端鋁導線鉚錫接點的左上方進入之後經過鉚錫接點，最後從基板端銅導線的右邊離開。鋁導線的位置亦標示在圖上。因為紅外線熱像儀擷取影像的時間需要15秒，而擷取影像期間試片會有微小晃動的現象，因此，圖中在鉚錫接點左右兩端邊緣的溫度是不正確的。由溫度分布圖我們可以觀察到在此電流下，鉚錫接點內部的平均溫度是101.0 °C，所以鉚錫接點內部所受到的平均焦耳熱只有1.0 °C。然而，我們仍然可以發現有熱點存在於鉚錫接點內部。鉚錫接點內部的平均溫度是取鉚錫接點內部中心50 μm × 50 μm的方框內的平均值。另外，我們定義熱點的溫度是大於鉚錫接點內部平均溫度4 °C以上為鉚錫接點內部的熱點。此電流下的鉚錫接點內的熱點是位在晶片端電流進入鉚錫接點處，熱點的溫度大約是105.6 °C。我們定義此熱點為熱點A。圖十八(b)(c)是沿著圖十八(a)的水平線 $\overline{AH_1}$ 和垂直線 $\overline{AV_1}$ 的溫度分布取線圖。水平線 $\overline{AH_1}$ 的位置是位於介金屬化合物 $Ni_3Sn_4$ 的下方，我們可以發現此區域溫度分布均勻，並無溫

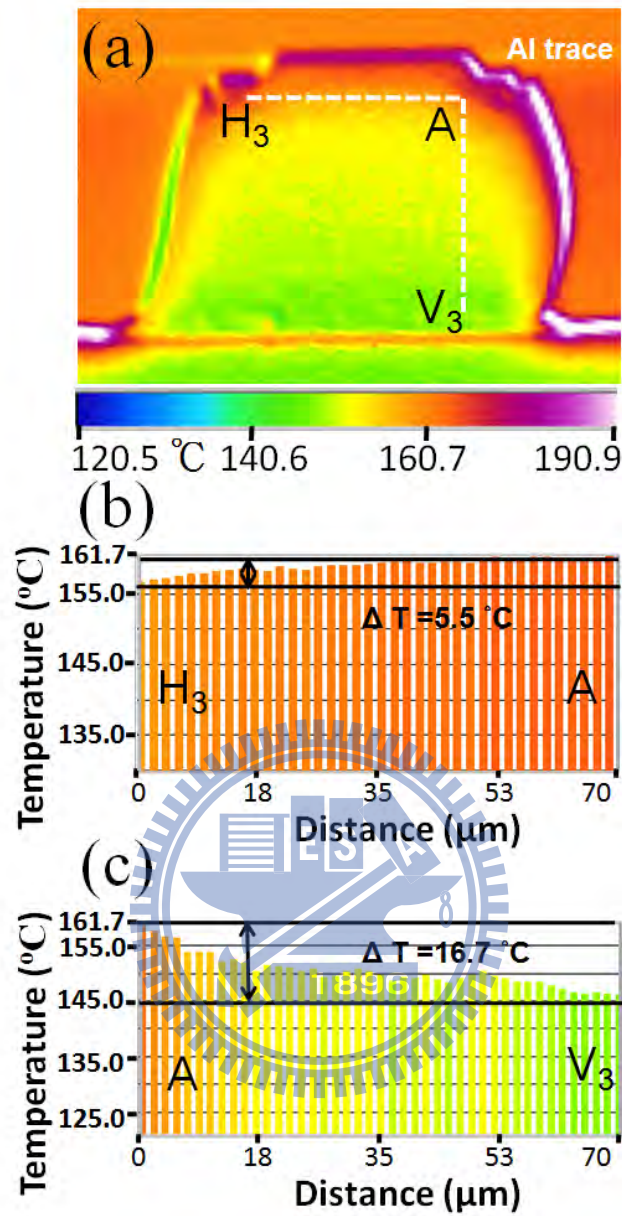
度差。但在垂直線 $\overline{AV_1}$ 的位置就可以發現有大約 $3.8\text{ }^\circ\text{C}$ 的溫度差存在。因此，造成的垂直溫度梯大約是 $543\text{ }^\circ\text{C}/\text{cm}$ 。我們定義溫度梯度是圖中虛線的兩端溫度差，除以虛線的長度；虛線長度大約是 $70\text{ }\mu\text{m}$ 。當外加電流增加時，我們可以觀察到鉚錫接點內部的熱點溫度有變明顯的現象。圖十九是鉚錫接點在通以 $0.4\text{ A}$ 培時的溫度分布圖。我們可以發現在晶片端電流進入鉚錫接點處有很明顯的熱點存在。此電流下的熱點溫度是 $124.6\text{ }^\circ\text{C}$ ，而平均溫度大約是 $115.0\text{ }^\circ\text{C}$ 。圖十九(b)(c)是沿著圖(a)的水平線 $\overline{AH_2}$ 和垂直線 $\overline{AV_2}$ 的溫度分布曲線圖。我們可以觀察到當電流增加時，水平區域和垂直區域的溫度差有增加的趨勢；水平溫差增加到 $4.6\text{ }^\circ\text{C}$ ，垂直溫差則上升為 $9\text{ }^\circ\text{C}$ 。因此，在鉚錫接點內部同時產生了水平跟垂直的溫度梯度。我們繼續施加電流到 $0.6\text{ A}$ 培時，熱點也更加明顯，且因為受到焦耳熱的影響，熱點的溫度也隨之增加，如圖二十所示。此時，熱點溫度增加到 $161.7\text{ }^\circ\text{C}$ ，平均溫度也提升到度。另外，垂直溫度差也增加到 $16.7\text{ }^\circ\text{C}$ ，也因此鉚錫接點內部產生了大約 $2392\text{ }^\circ\text{C}/\text{cm}$ 的垂直溫度梯度。如此大的溫度梯度，會造成鉚錫接點內部有熱遷移效應，減少接點的使用壽命減少。在鉚錫接點水平區域方面，我們可以觀察到溫度差上升的幅度非常的小，大約只有 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 左右。但還是在鉚錫接點內部產生了大約 $786\text{ }^\circ\text{C}/\text{cm}$ 的水平溫度梯度。



圖十八：共晶錫銀鉛錫接點在通以 0.2 安培的電流下溫度分布和溫度曲線圖(b) 水平分布於鉛錫接點內(AH<sub>1</sub>) (c)垂直分布於鉛錫接點內(AV<sub>1</sub>)。



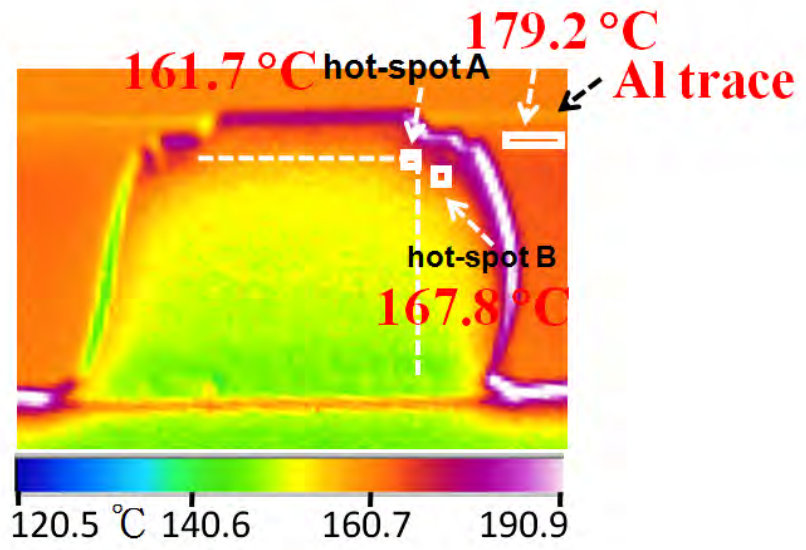
圖十九：共晶錫銀鉛錫接點在通以 0.4 安培的電流下溫度分布和溫度曲線圖 (b) 水平分布於鉛錫接點內(AH<sub>2</sub>) (c)垂直分布於鉛錫接點內(AV<sub>2</sub>)。



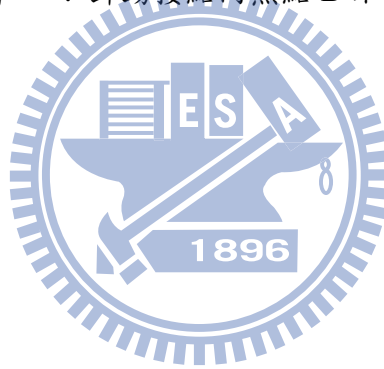
圖二十：共晶錫銀鉛錫接點在通以 0.6 安培的電流下溫度分布和溫度曲線圖(b) 水平分布於鉛錫接點內(AH<sub>3</sub>) (c)垂直分布於鉛錫接點內(AV<sub>3</sub>)。

另外，我們可以發現在鉚錫接點內部有另一個熱點，它發生在較低的電流密度區，但此熱點的溫度卻比熱點A的溫度還高；此熱點是位於熱點A的右邊且接近高分子填充物的區域，此區域我們在此稱做熱點B，如圖二十一所示。我們從3-D電性模擬結果可以發現，如圖二十二所示。靠近電流集中區域，電流密度是 $2.46 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 是鉚錫接點內最大的電流密度；而我們發現熱點B區域的電流密度是 $2.17 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 。

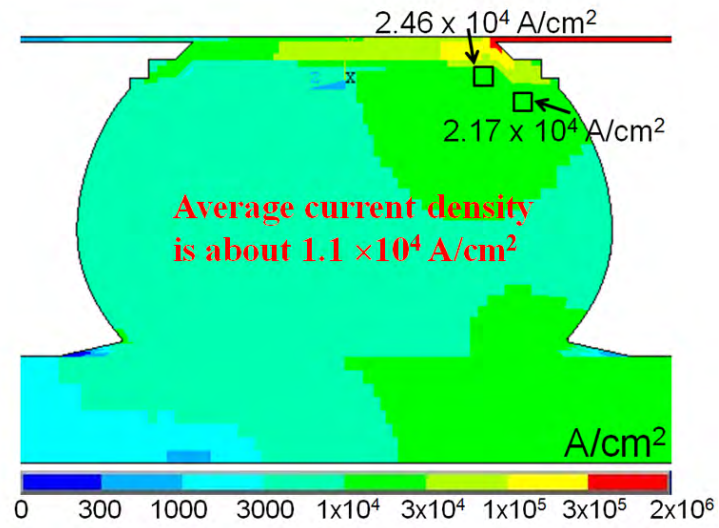
但我們可以觀察到熱點B的溫度高達 $167.8^\circ\text{C}$ ，比熱點A最大電流密度區的溫度還高。在鉚錫接點內部發現第二個熱點有兩個原因；由於鋁導線是主要的發熱源，此區域非常接近鋁導線，因此，會產生較高的溫度。另外，因為高分子填充物在封裝中是一種很難散熱的材料，因此在高分子填充物的區域有較高的溫度大約是 $179.2^\circ\text{C}$ ；由於熱點B非常接近此兩個區域，所以我們可以在鉚錫接點內觀察到第二個熱點。



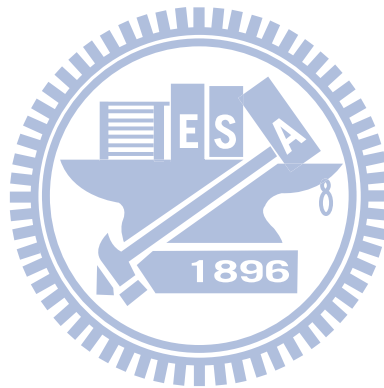
圖二十一：銲錫接點內熱點 B 示意圖。





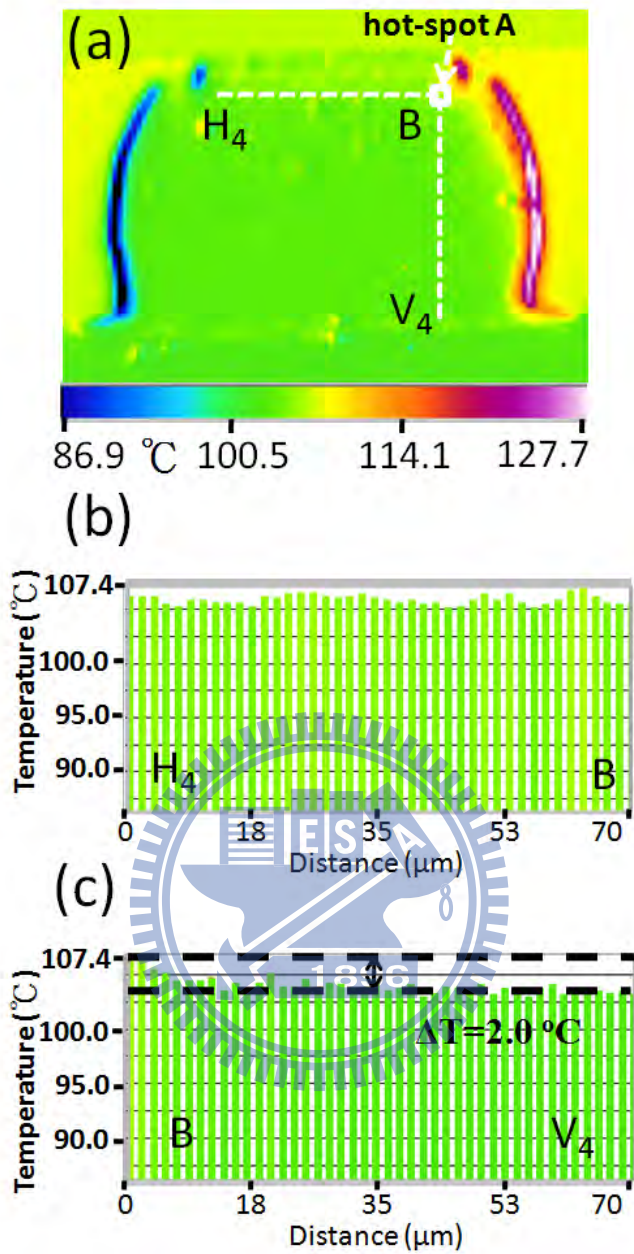


圖二十二：模擬鉚錫接點內通以 0.6 安培的電性分布圖。



#### 4-1-2 UBM 厚度對鉛錫接點內的溫度分布影響

另外，我們要觀察不同 UBM 厚度對鉛錫接點內部溫度的影響。實驗中，我們利用共晶錫銀鉛錫接點 UBM 為 5  $\mu\text{m}$  厚度的銅和 UMB 為 3  $\mu\text{m}$  的鎳和 5  $\mu\text{m}$  的銅做比較。圖二十三到圖二十五為鉛錫接點 UBM 為 5  $\mu\text{m}$  厚度銅在通以 0.2, 0.4, 0.6 安培的溫度分布圖。我們可以發現鉛錫接點內部的溫度都比 UMB 為 3  $\mu\text{m}$  的鎳和 5  $\mu\text{m}$  的銅的鉛錫接點的溫度還要高。電子流是從鉛錫接點右上方進入然後從左下方離開鉛錫接點。在通以 0.2 安培的電流下，鉛錫接點內平均溫度跟熱點的溫度是和 107.4  $^{\circ}\text{C}$ 。和 UMB 為 3  $\mu\text{m}$  的鎳和 5  $\mu\text{m}$  的銅的鉛錫接點相比差距大約 1-2  $^{\circ}\text{C}$  左右。而所觀察到的水平溫度差和垂直溫度差都和 UMB 為 3  $\mu\text{m}$  的鎳和 5  $\mu\text{m}$  的銅的鉛錫接點趨勢相近。當通以 0.4 安培時，焦耳熱效應也增加，因此，鉛錫接點內部的熱點和平均溫度也隨之上升，熱點和平均溫度都增加約 2  $^{\circ}\text{C}$  左右。另外和 UMB 為 3  $\mu\text{m}$  鎳和 5  $\mu\text{m}$  銅的鉛錫接點比較溫度差距也幾乎不變。但當電流加大到 0.6 安培時，我們可以觀察到鉛錫接點內部的熱點溫度增加到 190  $^{\circ}\text{C}$  而平均溫度也上升到度。與 UMB 為 3  $\mu\text{m}$  鎳和 5  $\mu\text{m}$  銅的鉛錫接點的溫度差異也隨之增大。兩個不同 UBM 的熱點溫度相差大約 30  $^{\circ}\text{C}$ 。因此我們可以發現當電流增加時，由於焦耳熱效應的影響增加，UBM 厚度的效應也隨之增大。而 UBM 層越薄，所受到的焦耳熱效應會越嚴重；因此會更快的消耗 UBM 層，造成鉛錫接點加速的破壞，讓封裝的可靠度變差。



圖二十三：5 μm-CuUBM 共晶錫銀鉛錫接點在通以 0.2 安培的電流下溫度分布和溫度曲線圖(b) 水平分布於鉛錫接點內(BH<sub>4</sub>) (c)垂直分布於鉛錫接點內(BV<sub>4</sub>)。

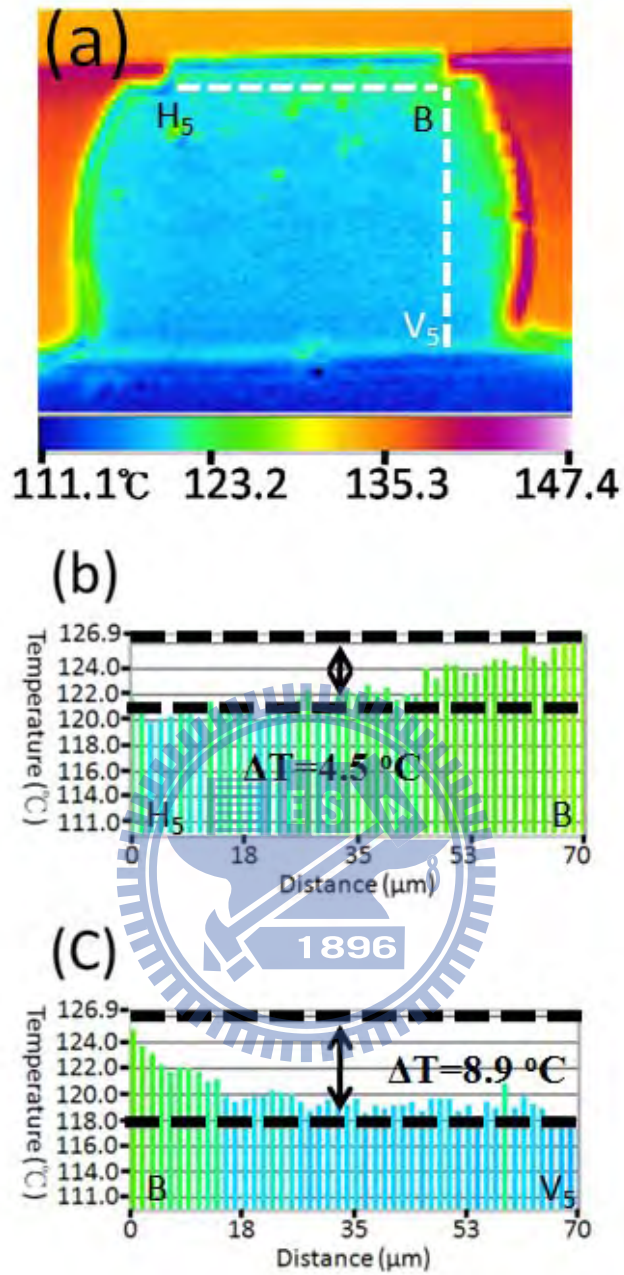
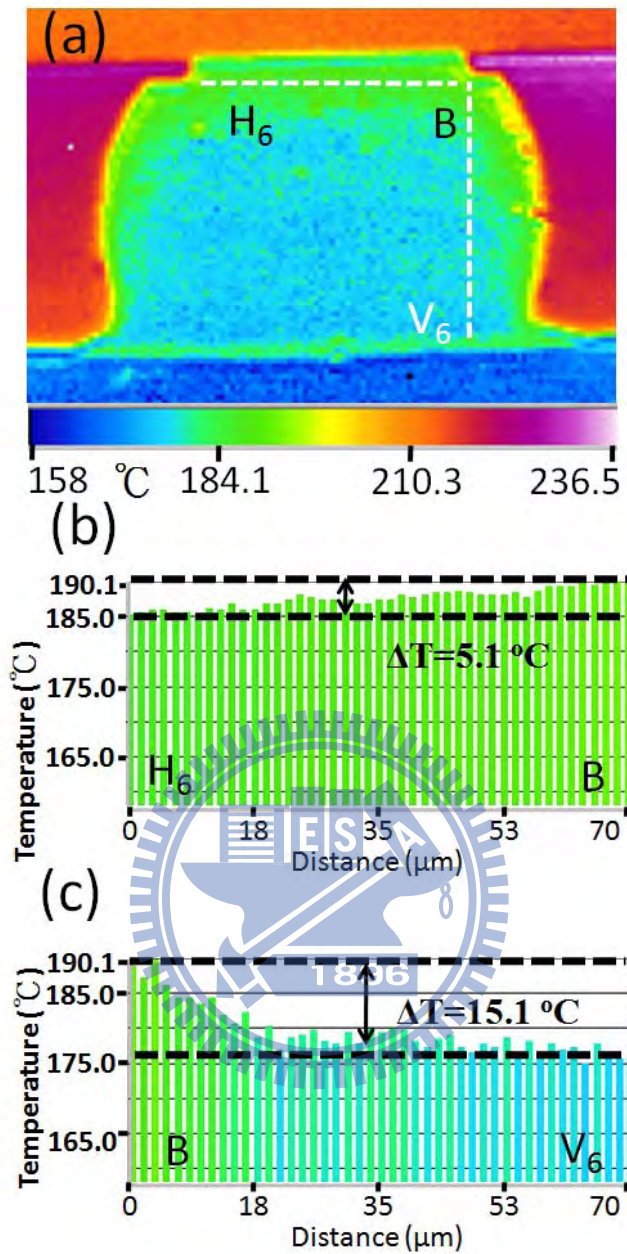


圖 二十四：5  $\mu\text{m}$ -CuUBM 共晶錫銀鉛錫接點在通以 0.4 安培的電流下溫度分布和溫度曲線圖(b) 水平分布於鉛錫接點內(BH<sub>5</sub>) (c)垂直分布於鉛錫接點內(BV<sub>5</sub>)。



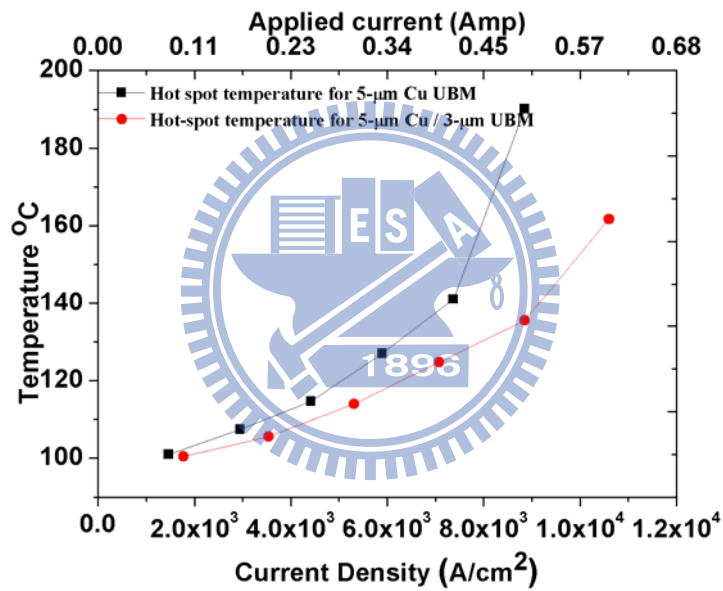
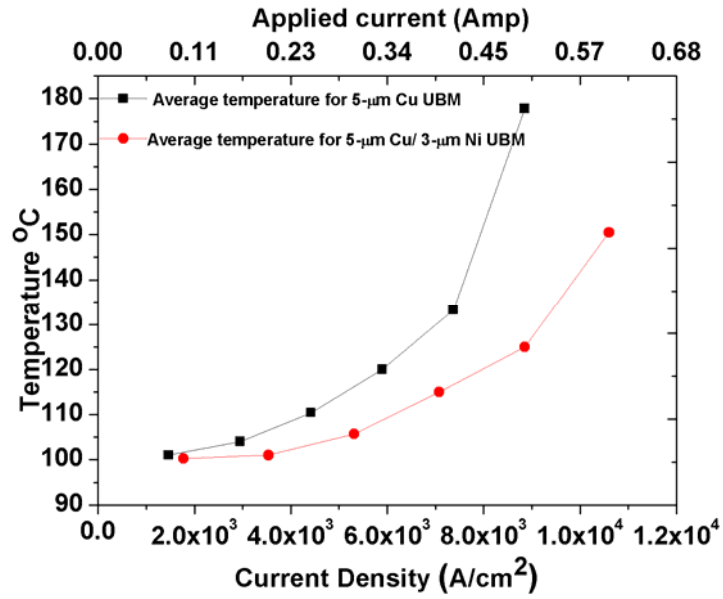
圖二十五：5 μm-CuUBM 共晶錫銀鉍錫接點在通以 0.6 安培的電流下溫度分布和溫度曲線圖(b) 水平分布於鉍錫接點內(BH<sub>6</sub>) (c)垂直分布於鉍錫接點內(BV<sub>6</sub>)。

圖二十六是隨著電流上升時，兩種不同UBM鍍錫接點內部平均溫度和熱點溫度的變化趨勢圖；施加電流範圍是從0.1安培到0.6安培。我們觀察到曲線是呈現拋物線的行為，並且與焦耳熱效應有絕對的關係。

$$P = I^2 R = j^2 \rho V \quad (4-1)$$

其中 $P$ 為焦耳熱能量、 $I$ 為電流值、 $R$ 為電阻值、 $j$ 為局部電流密度、 $\rho$ 為電阻率、 $V$ 為材料體積。

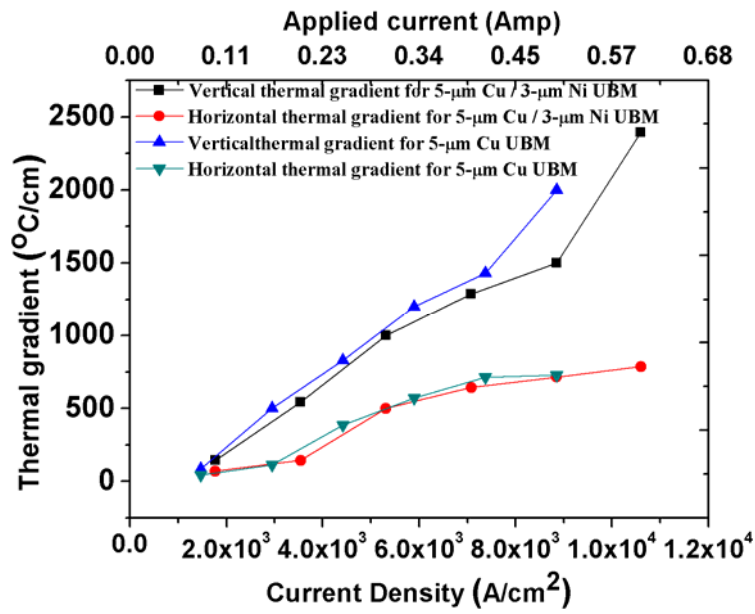
在低電流密度時，我們可以從圖中發現，鍍錫接點所受到的焦耳熱效應影響不大，而且UBM厚度效應也不明顯。因此，兩種UBM的鍍錫接點平均溫度和熱點溫度並沒有太大的溫度差。然而，在施加更高的電流時，兩者的溫度差也因此變明顯了。在通以0.6安培電流時，較薄的UBM鍍錫接點的平均溫度跟熱點溫度分別比較厚的UBM鍍錫接點溫度高 $27^\circ\text{C}$ 和 $29^\circ\text{C}$ 。因此，結果顯示UBM的厚度越厚，所受到焦耳熱效應的影響也越小。另外我們也可以觀察到，隨著電流密度的增加，鍍錫接點內部的熱點溫度和平均溫度差也隨之增加，也是因為焦耳熱效應的影響。因此，鍍錫接點在通電的情況下，焦耳熱效應所扮演的角色是非常重要的。



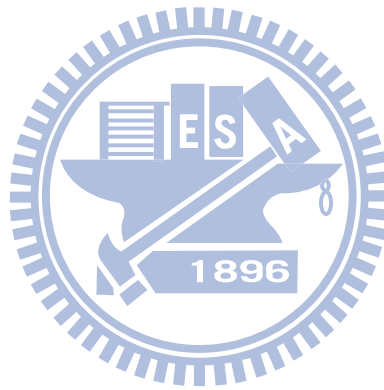
圖二十六：5 μm-Cu 和 5 μm-Cu/3 μm-Ni 兩種不同 UBM 鐳錫接點內部平均溫度 (a)和熱點溫度(b)的變化趨勢圖。

因為鐳錫接點內部有熱點的存在，造成整個接點內部有溫度差，因此，在鐳錫接點內部我們可以觀察到溫度梯度。圖二十七是鐳錫接點在不同電流驅使下，電流與溫度梯度的關係曲線。由關係圖可以觀察到不論電流高低垂直溫度梯度一直大於水平溫度梯度。而垂直溫度梯度會隨著電流的增加也會隨之提高；然而水平溫度梯度雖然也有增加的趨勢，但是增加幅度並不大，反而有趨於平緩的趨勢。有可能是因為晶片端有矽晶片幫助散熱，使得鐳錫接點水平區域溫差不會太大。另外在UBM厚度效應方面，我們發現UBM厚度對水平溫度梯度並不會有太大的影響。因為溫度梯度與溫差和長度有關，由實驗結果發現改變UBM厚度雖然鐳錫接點內部溫度有所不同，但兩者鐳錫接點內的溫差並沒有太大的差別，且亦不會造成鐳錫接點高度的差別；因此，水平溫度梯度並沒有太大的差距。但在垂直溫度方面，薄的UBM還是大於厚的UBM。根據分析，在電遷移的過程當中若想在鐳錫接點內部觀察到熱遷移的現象，必須要在鐳錫接點內部產生大於1000 °C/cm的溫度梯度。從圖中我們可以發現水平溫度梯度是低於1000 °C/cm。因此，還未有論文報導有水平熱遷移效應發生在鐳錫接點內。另一方面，垂直溫度梯度是隨著電流增加而增加，因此有許多有關垂直熱效應的論文發表。





圖二十七：兩種不同 UBM 鍍錫接點內在不同電流驅使下，電流與溫度梯度的關係曲線。

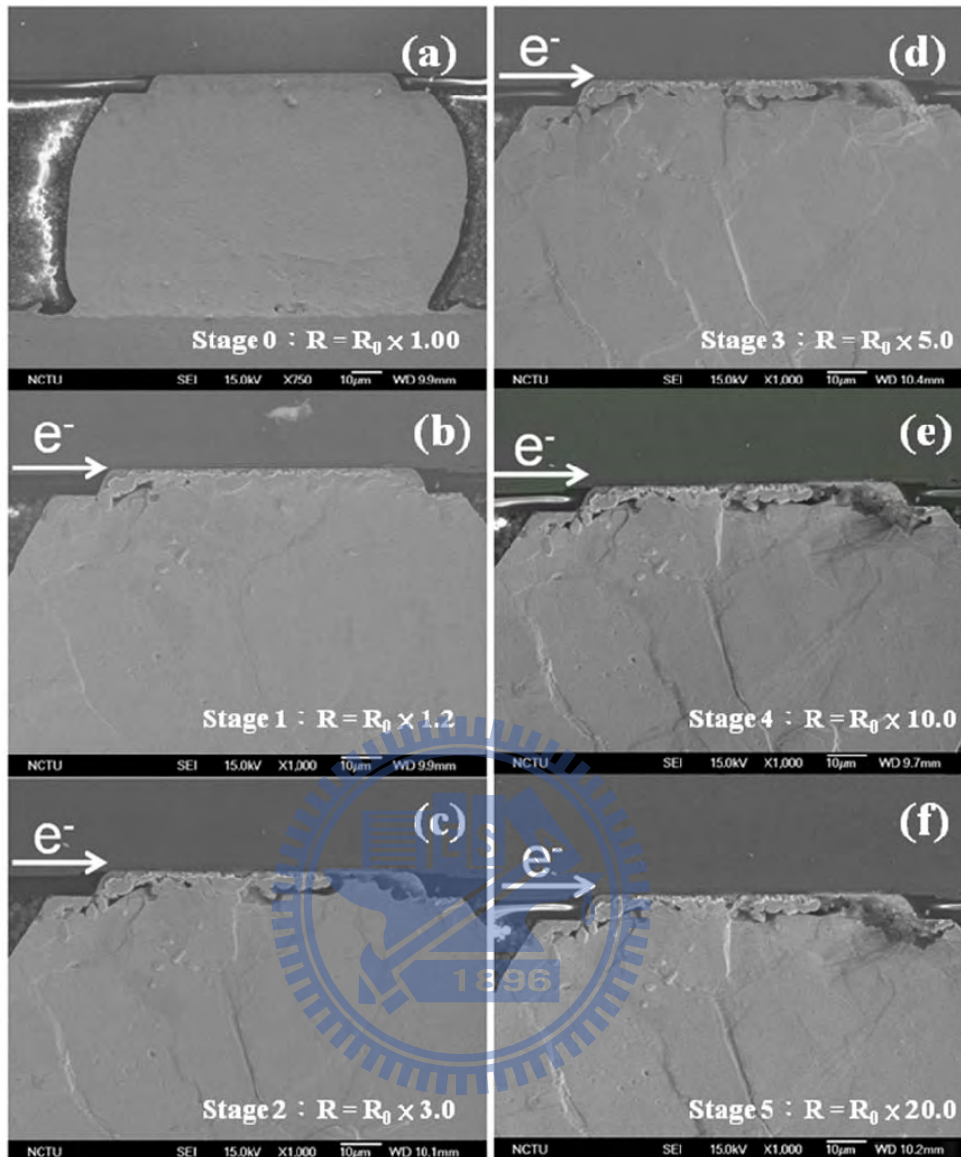


### 4-1-3 電遷移下鉅錫接點內不同階段破壞對焦耳熱效應的影響

我們想進一步了解在電遷移過程中，鉅錫接點內孔洞形成和延伸與焦耳熱效應的關係。因此，我們把鉅錫接點研磨到試片的一半位置，之後利用凱文結構來量測鉅錫接點在通電時的電阻變化情形，並利用紅外線熱像儀來量測每一階段的溫度分布情形。我們所使用的鉅錫接點是含有5  $\mu\text{m}$ 銅UBM的共晶錫銀鉅錫接點。圖為鉅錫接點在加熱板100  $^{\circ}\text{C}$ 下，通以0.5安培的直流電，各個不同階段的電子顯微鏡影像圖。當電阻上升到原來的1.2倍，3倍，5倍，10倍和20倍時，所需的時間分別為100.0, 544.2, 1094.8, 1351.8 和 1431.0小時。由實驗結果可以發現，當通電時間加長，較大的孔洞也隨之形成；並且孔洞會由左邊電子流進入鉅錫接點端慢慢的向鉅錫接點的右邊延伸。圖二十八(a)為共晶錫銀鉅錫接點在通電前橫截面電子顯微鏡影像圖。一層薄薄的介金屬化合物在銅UBM與鉅錫接點之間形成。在通電在100小時之後，最初孔洞的形成發生在電流進入端鉅錫接點的左邊，介於介金屬化合物與鉅錫接點之間，如圖二十八(b)所示。由結果發現孔洞最初形成的地方也是嚴重的電流集中區域，熱點發生的地方。當電阻上升到原來的1.2倍時，孔洞所延伸的長度大約是10.0  $\mu\text{m}$ 。圖二十八(c)是鉅錫接點在通電544.2小時之後，鉅錫接點的微結構圖。我們可以發現孔洞已經延伸到UBM開口的中心區域；而孔洞延伸的長度也增加到71.3  $\mu\text{m}$ 長。此時的電阻上升到原來電阻兩倍多，所上升的電阻量是很合理的。在通電1094.8小時之後，我們發現孔洞從鉅錫接點的右邊延伸到左邊；而且慢慢的加深，如圖二十八(d)所示。而孔

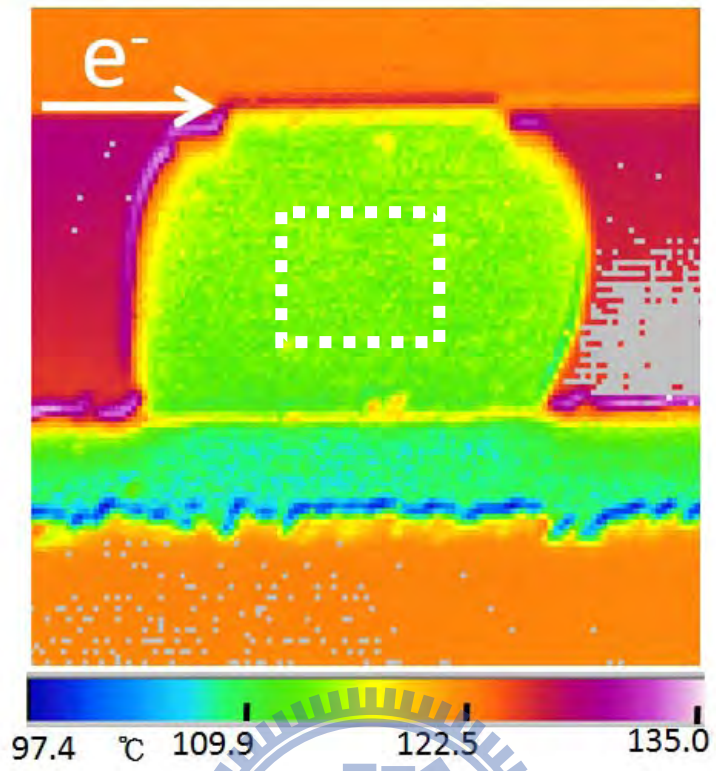
洞所延伸的長度也增加到 $80.0\ \mu\text{m}$ 。實驗結果可以發現不只孔洞有橫向延伸的現象產生，而且鉛錫有往內消耗的情形。此時的電阻增加率到達原來電阻的5倍。當通電時間增加到1351.8和1431.0小時，鉛錫接點內的微結構變化可以在圖二十八(e)和(f)觀察到。我們發現孔洞已經沒有橫向延伸的現象，反而，是往鉛錫接點靠近晶片端裡面和下方延伸。此時的迴路並沒有斷路，只是電阻上升的幅度很大。



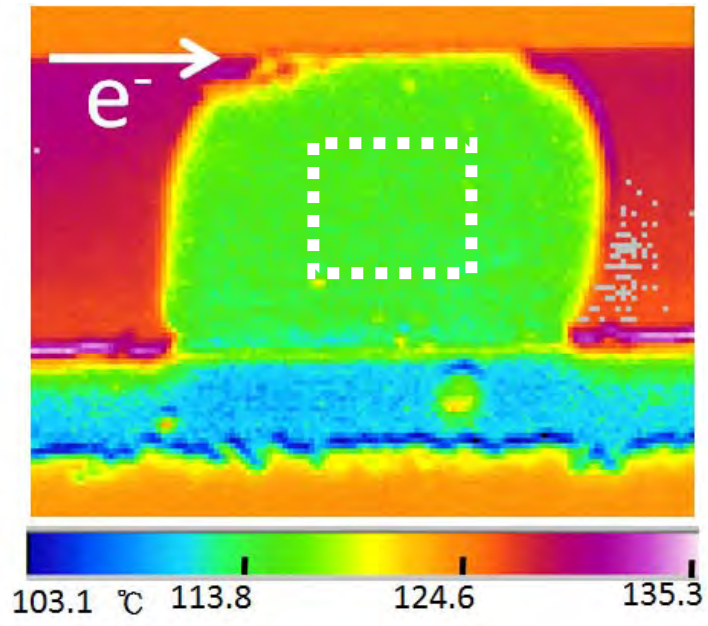


圖二十八：100 °C 通 0.5 A 電流 (a) 未通電前 (b) 100.0 小時 (c) 544.2 小時 (d) 1094.8 小時 (e) 1351.8 小時 (f) 1431.0 小時

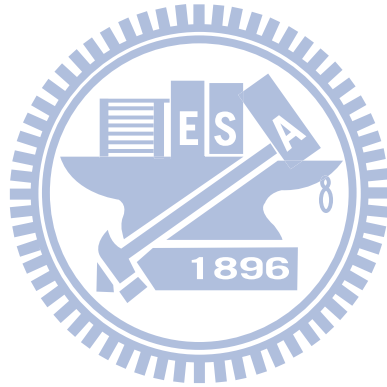
為了要觀察鉚錫接點在電遷移過程中，接點內受到焦耳熱效應下溫度的分布情形。因此，我們利用紅外線熱像儀直接來觀測鉚錫接點內的溫度分布。紅外線熱像儀在通以0.5安培，100 °C的加熱板下，量測鉚錫接點內的溫度分布。圖二十九是鉚錫接點在電遷移測試之前的溫度分布圖。我們可以觀察到鉚錫接點在0.5安培電流驅使下，在電遷移初期起始的階段；整個鉚錫接點內的平均溫度大約是113.3 °C。此時的平均溫度是取接近鉚錫接點內部中心 50 μm × 50 μm 大小的方塊內的溫度取平均。當電阻上升到原來的20%時，我們可以發現鉚錫接點內的平均溫度並沒有很明顯的增加，雖然有孔洞的生成，但是並沒有提升焦耳熱效應對鉚錫接點的影響。所以上升的溫度是少於1 °C，此時的平均溫度大約是113.9 °C，如圖三十所示。當鉚錫接點內部電阻上升到原始電阻的5倍時，我們可以從圖三十一觀察到，鉚錫接點的平均溫度仍然沒有上升得很明顯。只上升大約1 °C左右。此階段的平均溫度是114.8 °C。圖三十二是電阻上升到原來的10倍時，整個鉚錫接點內的平均溫度；此時接點內的平均溫度可以上升到3 °C左右，鉚錫接點內的平均溫度變為117.6 °C，焦耳熱效應因電阻的增加而變嚴重；此時由電子顯微鏡影像圖可以發現，鉚錫接點的消耗已經從側向慢慢的往鉚錫接點裡面消耗。而電阻上升到原來的20倍時，我們發現平均溫度已經增加13 °C，從圖三十三可以明顯的觀察到。而鉚錫接點往裡面消耗的情形也越來越嚴重。因此，造成電阻的急遽上升；所以會產生嚴重的焦耳熱效應，進而使鉚錫接點內的平均溫度有很大幅度的上升，平均溫度為127.6 °C。

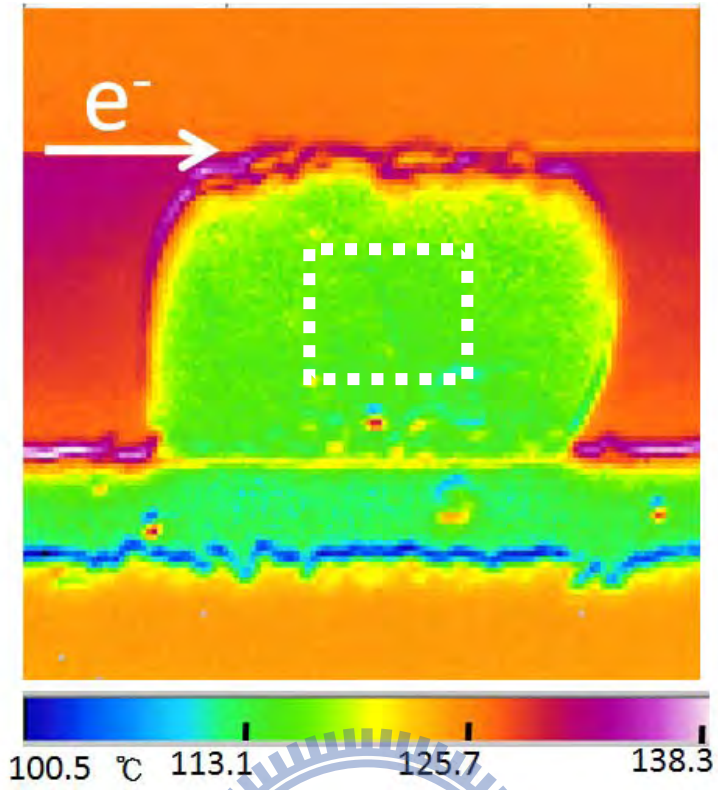


圖二十九：通電0小時下，鉛錫接點內溫度分布圖



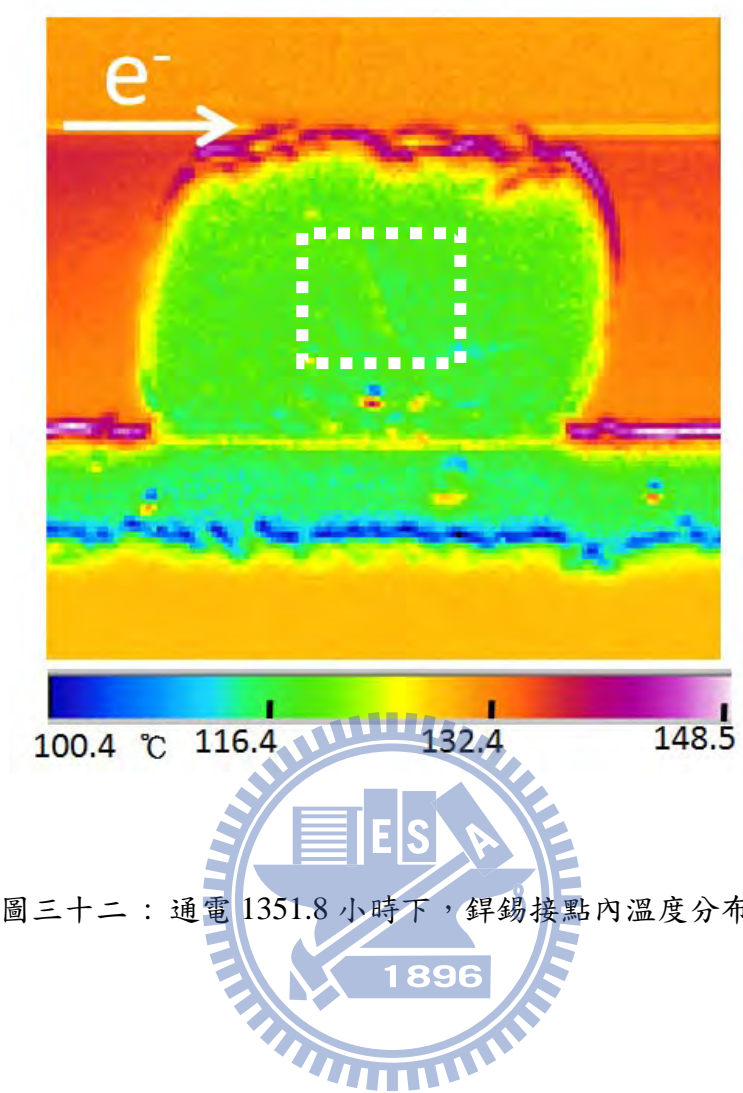
圖三十：通電 100.0 小時下，銲錫接點內溫度分布圖



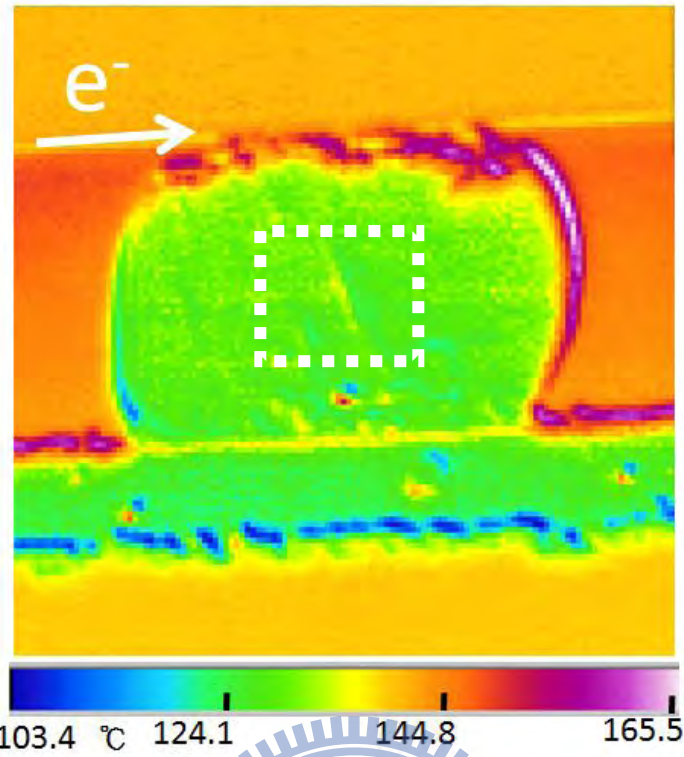


圖三十一：通電 1094.2 小時下，鉅錫接點內溫度分布圖





圖三十二：通電 1351.8 小時下，銲錫接點內溫度分布圖



圖三十三：通電 1431.0 小時下，鐳錫接點內溫度分布圖

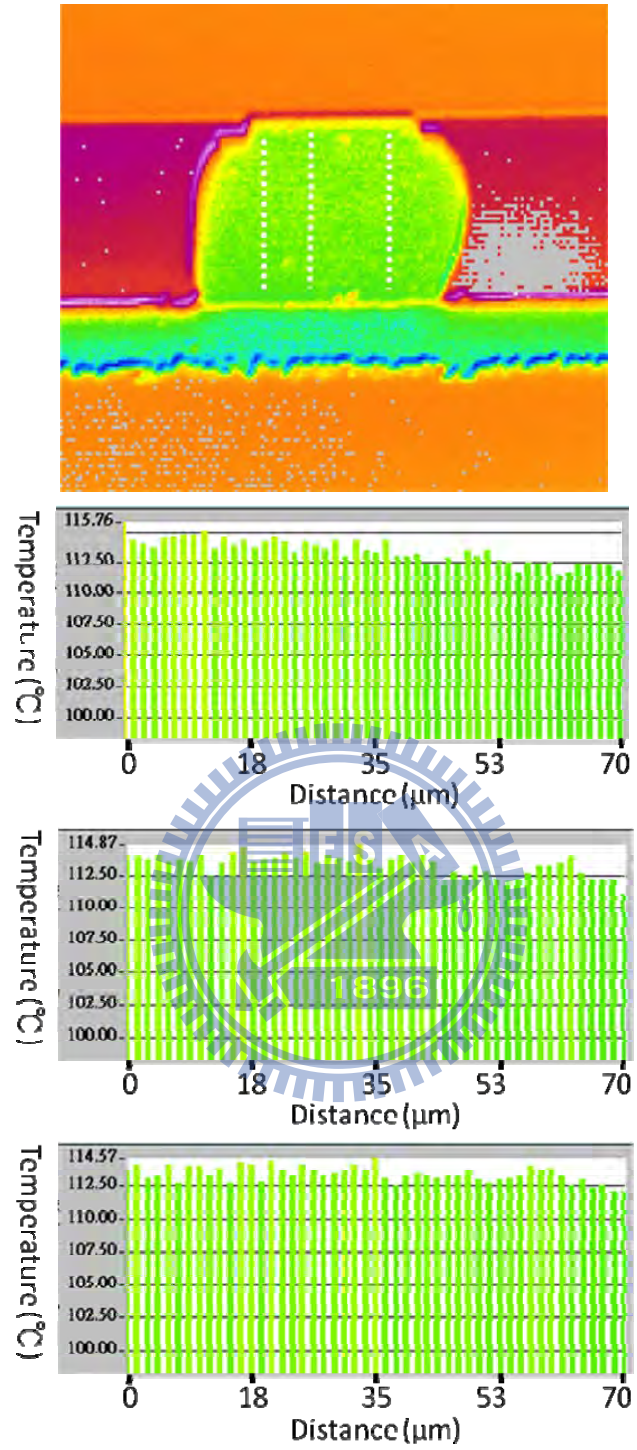


另外，我們有興趣的是鐳錫接點內的熱點會不會因為孔洞的生成與延伸而有所改變或移動。因為鋁導線主要發熱源，因此靠近鋁導線的鐳錫接點會有較高的平均溫度；因此，我們取鐳錫接點接近晶片端的區域，來觀察熱點是否有移動的現象。

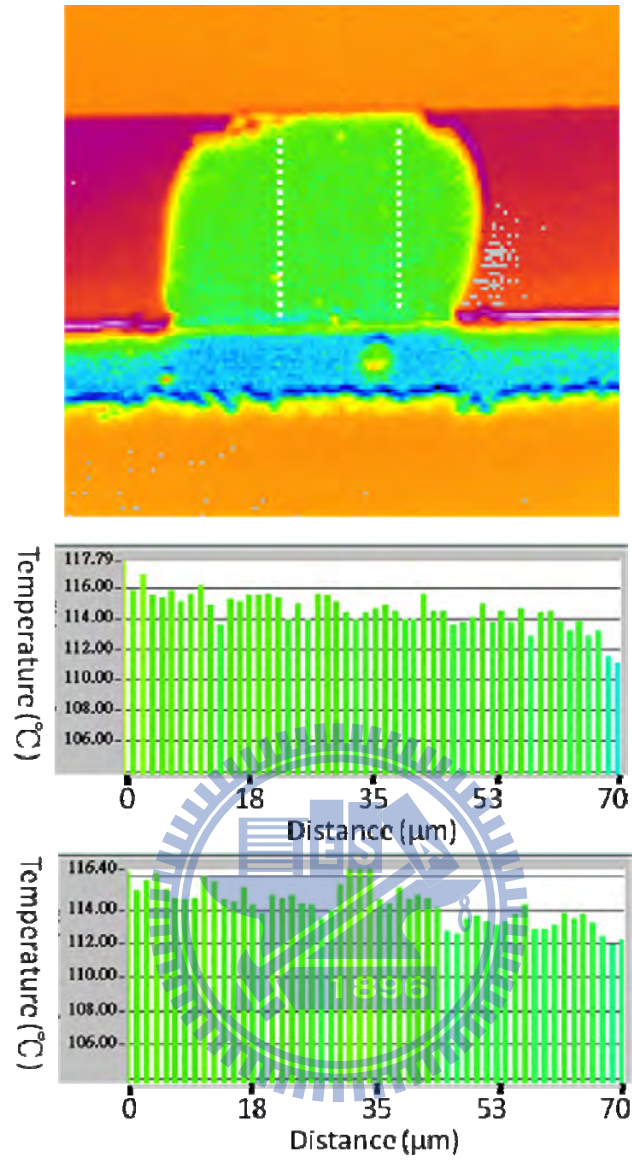
圖三十四(a)-(d)為在電遷移過程前，沿著UBM端不同位置向下垂直延伸的溫度分布曲線圖。在圖三十四(b)我們取靠近電流進入端電流集中區，也是熱點初期的產生處。此處的平均溫度大約是 $115.8^{\circ}\text{C}$ ；沿著此處的垂直線大約 $3.2^{\circ}\text{C}$ 的溫度差。圖三十四(c)是取靠近鐳錫接點中間上方的位置，此區域的平均溫度大約是 $114.9^{\circ}\text{C}$ ；因為漸漸遠離電流密度集中區和主要發熱源，因此溫度比較低。但由於仍然比較靠近上方鋁導線；因此，此處的溫度還是比在基板端的鐳錫接點溫度高。在取鐳錫接點最遠離電流密度集中區的垂直溫度分布，此時靠近接點晶片端的溫度就更低溫大約是 $114.6^{\circ}\text{C}$ 。圖三十五為(e)-(g)在電流驅使100小時之後，鐳錫接點內垂直分部曲線圖。此時的鐳錫接點在接近的左上方有孔洞的形成；從圖三十五(e)的溫度分布圖可以觀察到。此時鐳錫接點的電阻上升為原來的20%。我們取最靠近孔洞處右端的鐳錫接點，觀察此處的溫度變化情形；此處的平均溫度大約是 $117.8^{\circ}\text{C}$ 。之後我們取靠近鐳錫接點邊緣處，遠離孔洞的區域觀察其溫度變化，此處的溫度約 $116.4^{\circ}\text{C}$ ；我們可以發現鐳錫接點內接近孔洞的溫度大於遠離孔洞的溫度。所以我們可以發現當孔洞生成時，熱點會被推向遠離孔洞處。當鐳錫接點電阻上升到原來的100%時的溫度分布曲線圖，如圖三十六

(h)-(i) 所示。因為孔洞的延伸減少了鉚錫與UBM的接觸面積，因此電阻也增加了，伴隨著焦耳熱效應也更嚴重了。所以熱點溫度也因此上升。此時孔洞延伸到接觸區域最右邊的位置，整個鉚錫接點與鋁導線接觸面積只剩1-2  $\mu\text{m}$ ；而電流仍經由此區流向鉚錫接點內。因此，我們取此區域的溫度分布，可以觀察到此點的溫度大約是118.4  $^{\circ}\text{C}$ 。所以，在孔洞未生成前，熱點發生在接近電流集中區；電流流入鉚錫接點處。而當孔洞生成時，電流會跨過孔洞再流經鉚錫接點內。因此，我們就觀察到鉚錫接點內的熱點有偏移的現象。

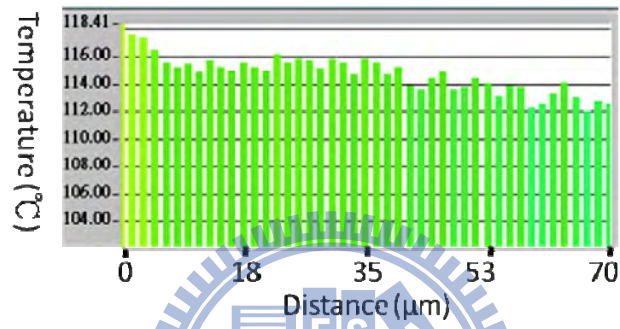
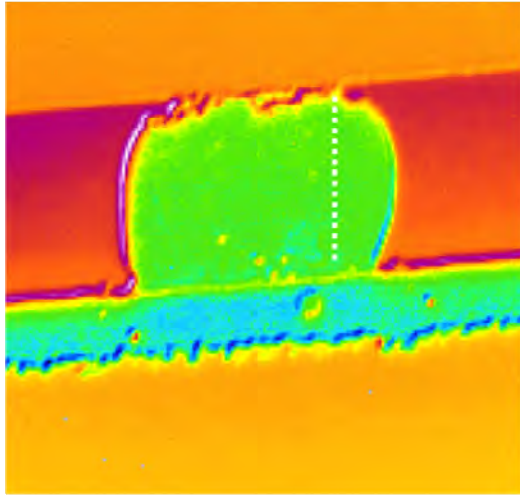




圖三十四：通電 0 小時下，銲錫接點內三個不同位置垂直溫度分布圖



圖三十五：電阻上升 1.2 倍時，錫錫接點內靠近空孔和遠離空孔垂直溫度分布圖



圖三十六：電阻上升 2.0 倍時，銲錫接點內靠近空孔垂直溫度分布圖

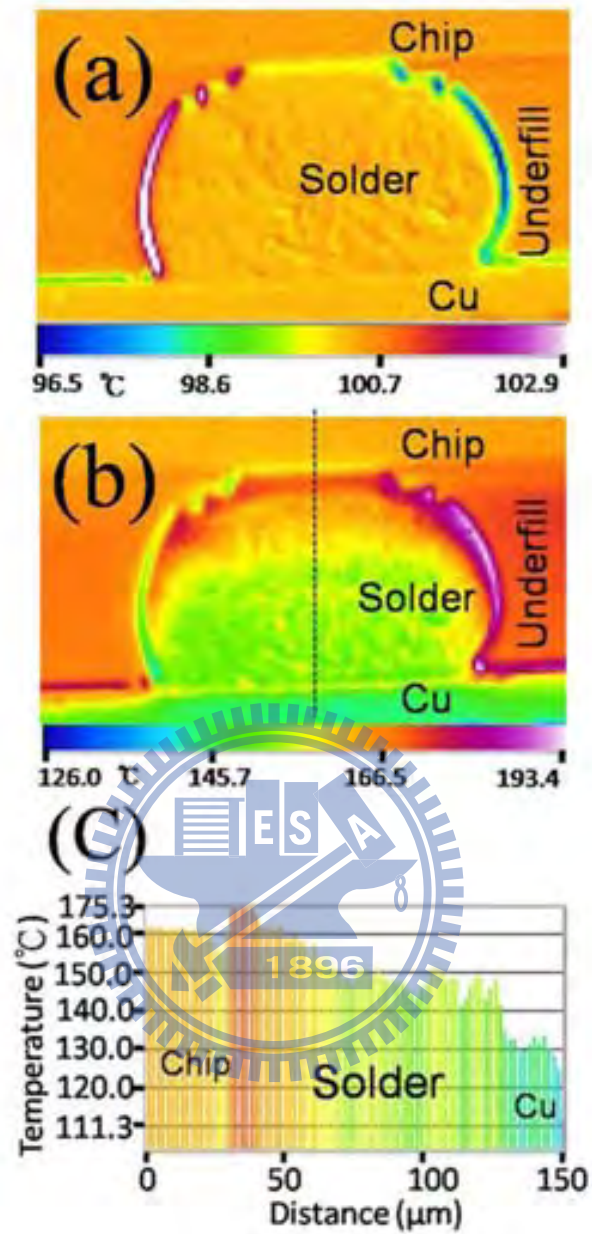
## 4-2 覆晶封裝共晶錫鉛錫接點在交流電驅使下的熱遷移效應

### 4-2-1 錫錫接點內溫度梯度之研究

真實的錫錫接點在通以高電流密度下，可以產生高於 $2000\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 的溫度梯度。通電之前的錫錫接點內部溫度分布如圖三十七(a)所示。除了錫錫接點左右兩端的邊緣外，錫錫接點內的溫度分布相當均勻。因為紅外線熱像儀在擷取影像的時間太長，造成試片的晃動，因此兩端的溫度可能不太準確。

如圖三十七(b)所示，當錫錫接點通以 0.55 安培的電流時，錫錫接點內的溫度是不均勻上升。因為施以電流，造成錫錫接點內的平均溫度增加約  $55.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因為在晶片端的鋁導線是主要的焦耳熱效應的來源，所以在接近晶片端的錫錫是比基板端的錫錫還熱。因此，就在錫錫接點產生了溫度梯度。所以我們定義溫度梯度是錫錫接點接近晶片端的平均溫度和基板端的平均溫度差除以錫錫接點的高度。圖三十七(c)是沿著圖三十七(b)虛線的溫度分布，接近晶片端錫錫的平均溫度高於基板端錫錫的平均溫度約  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此時可以得到  $2143\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  的溫度梯度。





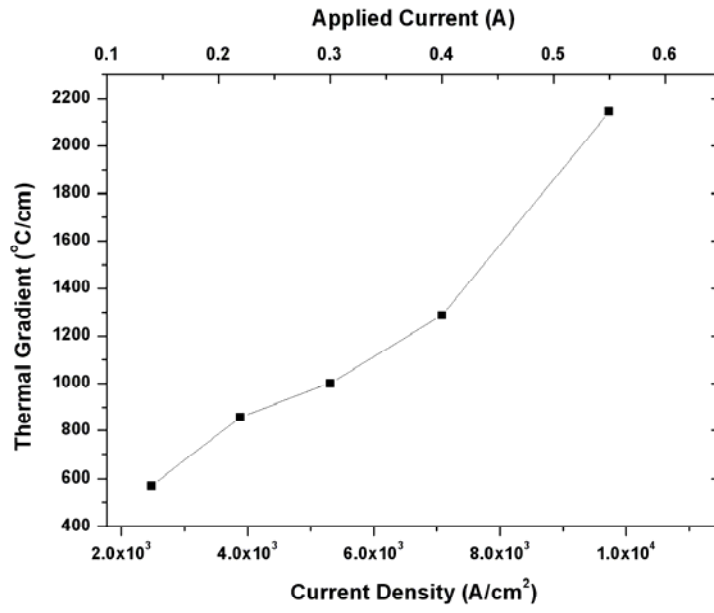
圖三十七：(a)錐錫接點在通電前的溫度分布(b)錐錫接點在通以 0.55 安培電流後的溫度分布(c)沿著(b)虛線的溫度分布曲線

#### 4-2-2 電流密度與溫度梯度的關係

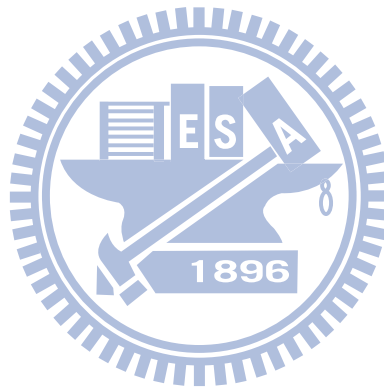
如圖三十八所示，鉍錫接點在不同的電流情況下所得到的溫度梯度。當電流密度增加時，我們發現所量測到鉍錫接點內的溫度梯度也跟隨著增加。

當通以0.55安培的電流時，可以產生2143 °C/cm的溫度梯度；我們也將利用在鉍錫接點內有如此大的溫度梯度，來做熱遷移的破壞試驗，測試看在如此大的溫度梯度下，鉍錫接點會產生什麼樣的結果。我們若只是通以0.14安培電流，只會在鉍錫接點內產生大約571 °C/cm的溫度梯度。如果要得到文獻中所推估的產生熱遷移效應所需的1000 °C/cm的溫度梯度，電流密度大概需要 $5.3 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ 。





圖三十八：鉈錫接點內電流與溫度梯度的關係圖

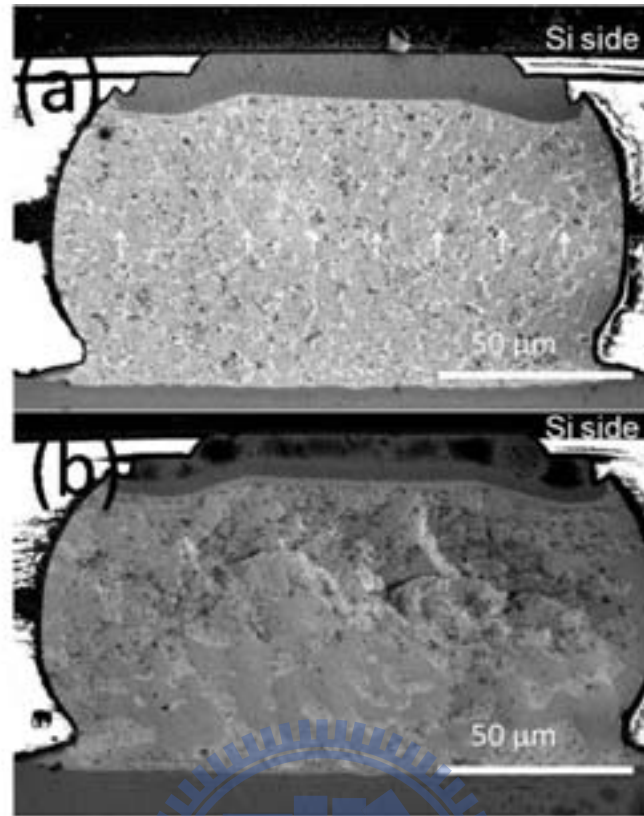


### 4-2-3 熱遷移效應之研究

當鉛錫接點得到一個很大的溫度梯度時約 $2571\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ ，熱遷移效應行為變得非常嚴重。鉛錫接點在通電前的掃描式背向電子顯微鏡影像，如圖三十九(a)所示。圖中鉛錫接點內較亮的部分為富鉛相，而較暗的部分為富錫相；我們從圖中觀察到在未施加電流的情況下鉛錫接點內的錫鉛相分布的非常均勻。

在 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下通以 $0.55$ 安培的交流電 $108$ 小時後，熱遷移效應可以被觀察到，如圖三十九(b)所示。由實驗結果可以發現在通電之後UBM的部分並沒有消耗及損壞，依然保持完整；而銅UBM有一些較暗的地方，是因為試片放在空氣中，造成銅氧化的結果，並不影響實驗結果。另外，我們觀察到鉛錫接點內因為熱遷移的效應富鉛相有粗化聚集的現象產生；但我們並沒有觀察到如文獻所發現的，大部分的富鉛相往鉛錫接點內較冷端的區域來累積<sup>33</sup>。有可能的原因是因為我們是將鉛錫接點做破壞性的量測及觀察，與完整的鉛錫接點做熱遷移測試的條件會有所差異。經過破壞性測試的鉛錫接點熱的路徑會與完整組裝於試片的鉛錫接點有所不同，可能是造成無法觀察到明顯相分離的原因。

雖然我們無法直接觀察到明顯的富鉛相往較冷端區域來移動的現象；但我們仍然可以觀察到鉛錫接點受到熱遷移效應的結果。我們發現在接近晶片端的鉛錫因為熱遷移的效应有明顯消耗的情形；整個鉛錫接點上半部有往內凹陷的現象產生。如圖三十七(b)所示，鉛錫接點在通電之後所造成的平均溫度大約是 $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，此時鉛原子是主要擴散物質。因此，較多的鉛原子往基板端移動比錫原子往反方向遷移通量多很多。



圖三十九：通電前後鉛錫接點的背向散射掃描式電子顯微鏡影像

#### 4-2-4 熱遷移通量和熱傳送值的計算

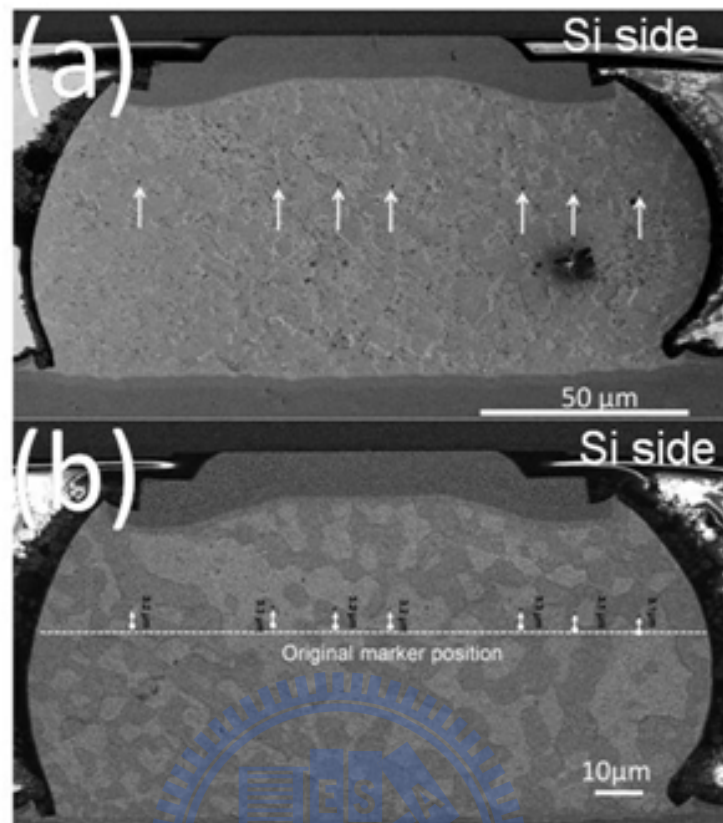
為了量測在特殊的溫度梯度下的熱遷移通量，我們使用聚焦離子束在另一個鉍錫接點表面上用 Ga 離子蝕刻七個 0.1  $\mu\text{m}$  的洞。洞的深度大概 200 nm 深。在熱遷移效應下，洞被當成標記點使用。通電前後有標記點的鉍錫接點掃描式電子顯微鏡影像，如圖四十(a)所示。鉍錫接點在 0.55 安培的通電下可以量測到 2143  $^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  的溫度梯度。在通電 96 小時之後，七個標誌都往上移動約 3.2  $\mu\text{m}$ 。原來的標誌位置展示在圖四十(b)。根據量測標誌的平均移動距離，我們可以使用方程式(4-1)來計算熱遷移通量( $J_{TM}$ )<sup>41</sup>。

$$J_{TM} = \frac{(A\Delta X)\rho N}{MA t} \quad (4-2)$$

$\rho$  是鉍鉛焊錫的密度(8.11  $\text{g}/\text{cm}^3$ )， $M$  是鉍鉛錫的平均原子量(136.39  $\text{g}/\text{mole}$ )， $A$  是鉍錫接點的截面積， $t$  是通電時間。量測到的平均移動距離約 3.2  $\mu\text{m}$ 。因此，我們可以計算出熱遷移通量約  $3.3 \times 10^{13} \text{ atoms}/\text{cm}^2$ 。此外，在溫度梯度下，一維的熱遷移通量可以被表示成方程式(4-3)。

$$J_{TM} = \frac{nD_A(Q^* / N)}{kT^2} \left( \frac{dT}{dx} \right) \quad (4-3)$$

$n$  是原子密度， $D_A$  是擴散系數， $k$  是波茲曼常數， $N$  是亞佛加厥常數， $dT/dx$  是溫度梯度， $T$  是溫度， $Q^*$  是熱傳送常數。 $D_A$  是根據 Gupta 所報導的值<sup>42</sup>。因此，我們可以得到熱傳送值為 26.8  $\text{kJ}/\text{mole}$ 。和 Chuang 等人的數值<sup>36</sup> 作比較，我們的研究所得的熱傳送值似乎比較大。他們測試的條件是用鉍鉛共晶合金，在 80-110  $^{\circ}\text{C}$  條件下做實驗。他們所得到的熱傳送值為 22.16  $\text{kJ}/\text{mole}$ 。

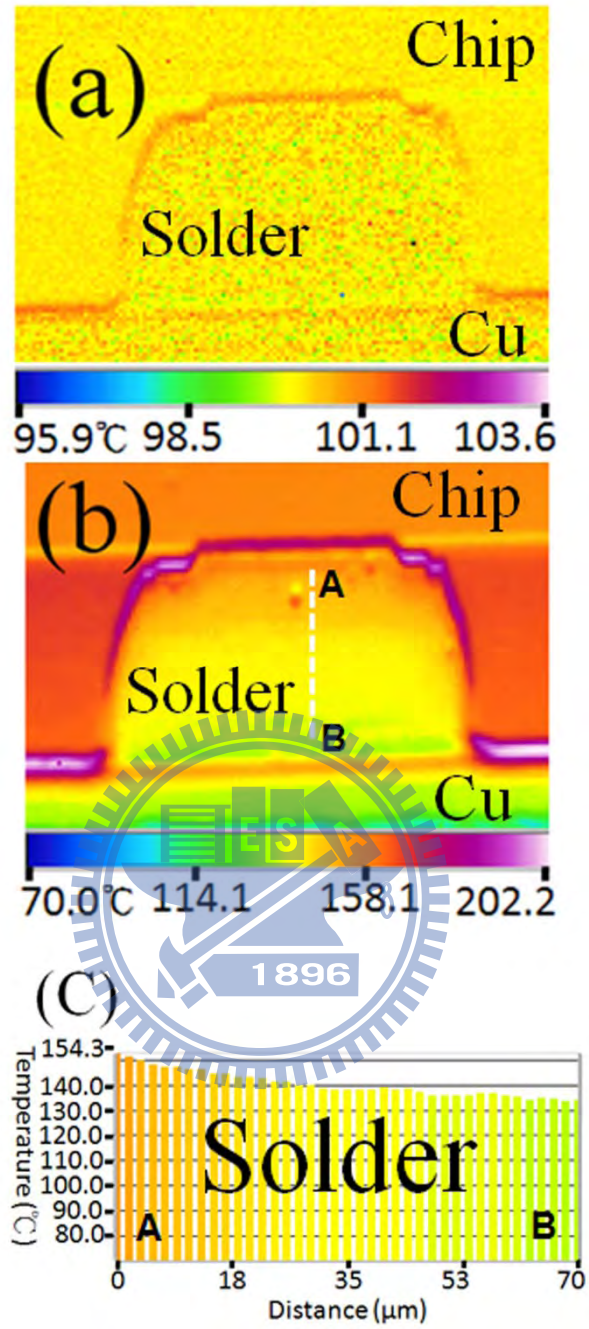


圖四十：通電前後，含有標記點的鉍錫接點掃描式電子顯微鏡影像

### 4-3 無鉛鉛錫接點在交流電的驅使下的熱遷移行為

接下來我們要來探討無鉛鉛錫的熱遷移行為，我們同樣是利用交流電來分開電對鉛錫接點的電遷移行為。我們亦將共晶錫銀鉛錫接點(SnAg3.5)磨開到中間的位置，然後利用紅外線熱像儀來量測接點通電前的溫度分布，了解整個鉛錫接點內在通電過程中的溫度梯度。圖四十一(a)為在100 °C加熱板下，未通以電流的鉛錫接點溫度分布圖；在未通電的環境下，鉛錫接點內部溫度是非常均勻。當鉛錫接點施以0.57安培的交流電時，鉛錫接點內因受到焦耳熱效應的影響，造成整個鉛錫接點內和環境的溫度有上升的趨勢，如圖四十一(b)所示。整個鉛錫接點內的平均溫度因為通以電流的關係，平均溫度增加37.8 °C。而周圍環境高分子填充物的溫度也因此增加了61.5 °C。由圖四十一(c)可以觀察到，鉛錫接點內在晶片端(A點)到基板端(B點)之間產生大約20 °C的溫度差。鉛錫接點內的溫度梯度我們之前已經定義過了，在此電流密度下的溫度梯度是2829 °C/cm。根據文獻此溫度梯度足夠在鉛錫接點內部產生熱遷移效應。因此，我們使用此電流跟溫度梯度來做共晶錫銀鉛錫接點內的熱遷移研究。





圖四十一：(a)共晶錫銀鉛錫接點在通電前溫度分布圖 (b)通以 0.57 安培交流電之溫度分布圖 (c)沿著圖(b)虛線之溫度分布圖

為了量測鉛錫接點在如此大的溫度梯度下，接點內錫原子因為熱遷移所造成的熱遷移通量。我們利用聚焦離子束在鉛錫接點內產生標記點，進而觀測標記點的移動來計算錫原子的遷移通量。我們使用Ga離子在鉛錫接點表面產生兩行0.1  $\mu\text{m}$ 的洞，一排標記點在接近晶片端的鉛錫接點位置；另一排則位於靠近基板端的鉛錫接點處。圖四十二(a)為通電前鉛錫接點內各個標記點分布圖，每個標記點的深度大約是100 nm深，而每個標記點的面積大約是 $10^4 \text{ nm}^2$ 。在通以交流電之後，我們可以很明顯的觀察到因為熱遷移所造成錫原子遷移。在通電800小時之後，我們可以從圖四十二(b)晶片端看到有許多突出物(hillock)產生。我們用EDX可以檢測出，突出物主要的成分都為錫。這些突出物是因為鉛錫接點內錫原子因熱遷移現象推動鉛錫的質量傳送。由於鉛導線為主要發熱源，所以造成晶片端的溫度大於基板端的溫度；因此在鉛錫接點內部晶片端與基板端之間有溫度梯度的產生。此溫度梯度造成鉛錫接點內錫原子從底部較冷的區域，傳送到晶片端較熱的地方。此外，由圖四十二(b)可以觀察到鉛錫接點內標記點在通電後的移動情形。標記點的移動是與錫原子的移動方向是相反的；標記點是往基板端來移動。我們使用晶片端矽晶片的底部來做為固定的參考平面。由以上兩個現象可以證明，錫原子因為熱遷移效應所以是往較熱端的區域來移動。之前的文獻都只是推論說，錫往熱端移動有可能是受到鉛原子往冷端的影響進而造成錫原子往熱端移動。另外，我們也發現在突出物生成的地方也發現有孔洞的形成，在圖中我們也可以發現到。為什麼會有空孔生成在與突起物同地方是個很有趣的問題。

Lu 報導說,銅和鎳原子在錫內的擴散速率是沿著錫原子c軸的擴散速率比在沿著a軸和b軸快許多<sup>43</sup>。因此可能在接近銅或鎳UBM區形成一些孔洞。未來會繼續做研究來證明此論點,或是更進一步解釋為什麼孔洞和突起物會生成在同一個方向。

接下來,我們要來分析共晶錫銀鎘錫接點內的錫原子受到熱遷移效應影響所產生的熱遷移通量(thermomigration flux)到底會有多大。我們利用文獻上算原子遷移通量最基本的方法來計算;利用標記點的移動來推估。我們先使用靠近晶片端的標記點來計算熱遷移通量。計算錫熱遷移通量的方程式主要是跟之前計算鉛熱遷移通量的方程式相同。

$$J_{TM} = \frac{CD_A(Q^*/N)}{\kappa T^2}(-dT/dx), \quad (4-3)$$

C為濃度,  $D_A = D_0 \exp(-Q/kT)$ 是自主擴散的擴散係數, k和N分別是波茲曼常數和亞弗加厥常數,  $dT/dx$ 是溫度梯度, T是鎘錫接點內的溫度, 而 $Q^*$ 是錫的熱傳送值。另外, 由於我們知道標記受熱遷移影響的時間和移動的距離和鎘錫接點的面積; 因此, 我們可以利用以下式子來計算熱遷移通量:

$$J_{TM} = \frac{(A\Delta X)\rho N}{MA t} \quad (4-2)$$

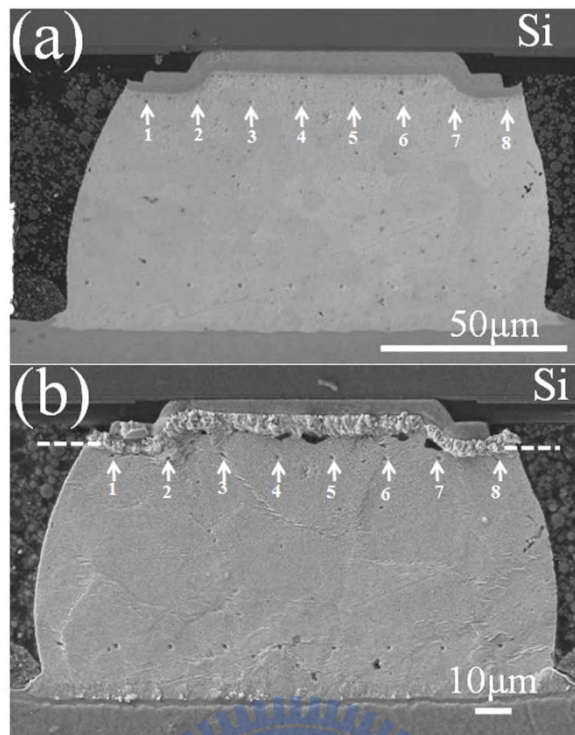
我們把共晶錫銀的密度( $7.42 \text{ g/cm}^3$ ), 分子量( $118.33 \text{ g/mole}$ ), 時間800小時以及標記點的平均移動距離 $3.8 \text{ }\mu\text{m}$ 。帶入上式, 我們就可以得到錫原子在此條件下的熱遷移通量大約是 $5.0 \times 10^{12} \text{ atoms/cm}^2$ 。有了熱遷移通量我們在用文獻上所發表的 $DA$ 值<sup>44</sup>, 和用紅外線熱像儀所得到的溫度梯度帶到式中, 我們就可以計算

出錫的平均熱傳送值為1.36 kJ/mole。

另外，我們也利用相同的方法來計算接近鉛錫接點基板端標記點的移動所造成的熱遷移通量。此處的標記點也是往基板端來移動，但移動的平均距離只有2.2  $\mu\text{m}$ ，是比在靠近晶片端的標記點還短。

有如此差異可能是因為鉛錫接點內上下兩端的區域性溫度差異所造成的結果。由紅外線熱像儀溫度分布圖圖四十一可以發現，在鉛錫接點內上下端的溫度分別為148 °C和132 °C，而且我們計算原子遷移通量所用的方程式是與溫度有相對關係。我們考慮溫度梯度是相同的情況下，純錫原子的活化能是11700 cal/mol<sup>45</sup>，帶入我們先前所使用的熱遷移通量方程式，可以計算出鉛錫接點內上下兩端的熱遷移通量的比值為1.6。此值非常接近鉛錫接點內上下標記點移動距離的比值3.8/2.2(1.7)。

由Kuz'menko等人發表的論文所求得的錫之熱傳送值為3.58 kJ/mole<sup>45</sup>；他們所使用的是鉍-錫液態合金在450 °C下所求得的結果。由於我們測試的條件是利用交流電通以 $1.01 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$  在加熱溫度為100 °C時的結果，此時的鉛錫接點還是固態；因此，所求得的錫之熱傳送值會比液態下的還小。但重要的是我們可以直接利用紅外線熱像儀來量測到合金內的溫度梯度，而文獻中的溫度梯度則是假設的結果。另外，我們也發現錫原子的熱遷移通量是比共晶錫鉛內鉛原子的熱遷移通量還小十倍；因此，我們可以觀察到在共晶錫鉛鉛錫接點內在熱遷移的影響下，鉛原子為主要的擴散原子。



圖四十二：共晶錫銀錫接點橫截面電子顯微鏡影像圖(a)通電前；(b)通電後  
800 小時

## 第五章 結論

本論文使用紅外線熱像儀(Infrascop II)溫度量測系統，透過鉚錫接點(SnAg3.5)之破壞性試片處理後，已成功獲得通電狀態下鉚錫接點剖面溫度分佈。且發現鉚錫接點有熱點的產生因而造成鉚錫接點內部有溫度梯度產生。當觀察到溫度梯度存在時，在利用交流電的特性，直接觀察到鉚錫接點內的熱遷移現象，並計算出鉚錫接點內錫原子因熱遷移所造成的物理量，可以做為日後研究鉚錫接點受熱遷移效應的參考依據。本實驗並利用凱文結構(Kelvin bump probes)來量測鉚錫接點因電遷移所造成的電阻變化，並利用紅外線熱像儀來擷取每階段的溫度變化，進而了解鉚錫接點電阻上升對焦耳熱效應的影響。對相關實驗結果統整如下：

### 5-1 鉚錫接點內溫度與溫度梯度之研究：

1. 我們利用共晶錫銀鉚錫做破壞性接點試片溫度量測實驗，發現隨著電流增高，其接點內的溫度成拋物線隨之升高，。我們也可以觀察到在通以 $3.5 \times 10^3$  A/cm<sup>2</sup>電流密度以上，可以發現鉚錫接點內有兩個熱點產生，一個發生在靠近晶片端鉚錫接點內電流密度最大的區域；另一個則是發生在晶片端靠近高分子填充物和鋁導線的區域。鉚錫接點內的熱點溫度也會隨著電流密度增加而增加。另外由於熱點的關係，讓鉚錫接點內有溫度差的產生，進而造成鉚錫接點內有溫度梯度；而溫度梯度也會因電流密度提高而隨之大。最大可以在鉚錫接點內部產生

2000° C/cm以上的溫度梯度。

2. 另外我們用不同UBM來做鉚錫接點內部溫度量測，我們觀測到不同的UBM厚度會造成不同的焦耳熱效應。實驗觀察到較薄的UBM厚度所產生的焦耳熱效應較大；因此，不論是鉚錫接點內的溫度分布，熱點或是溫度梯度較薄UBM的鉚錫接點都比較厚UBM的鉚錫接點來的嚴重。

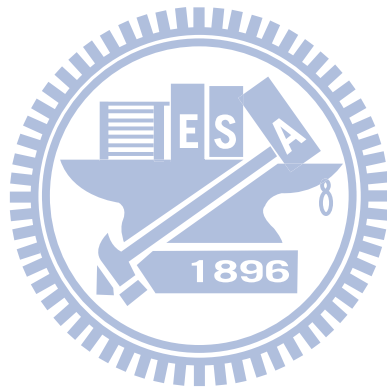
## 5-2 覆晶鉚錫接點內熱遷移效應之研究：

1. 使用交流電可以完全獨立研究熱遷移效應。紅外線測溫儀可以直接量測到在高電流密度下共晶錫鉛鉚錫接點的溫度梯度大約是2143 °C/cm。另外，研究中發現當鉚錫接點通以0.55安培的電流時，鉛原子會擴散到冷端。從標記點的移動距離，我們可以計算出熱遷移的通量約 $3.3 \times 10^{13}$  atoms/cm<sup>2</sup>。再根據量測的通量和溫度梯度，我們可以計算出鉛的熱傳送值約26.8 kJ/mole.

2. 我們利用共晶錫銀鉚錫接點在100 °C下，同樣是利用交流電來觀察無鉛鉚錫接點受熱遷移的影響。在此時的通電條件下，我們可以利用紅外線熱像儀觀察到鉚錫接點內有大約2829 °C/cm的溫度梯度產生。如此大的溫度梯度也造成了鉚錫接點內有熱遷移現象。我們觀察到錫原子因熱遷移效應的關係往晶片端較熱的地方移動。也利用標記點的移動計算出錫的熱遷移通量跟熱傳送值分別是 $5.0 \times 10^{12}$  atoms/cm<sup>2</sup> 和1.36 kJ/mole。

### 5-3 電遷移效應下錫銀鉛錫接點破壞模式與焦耳熱效應的關係：

我們利用研磨後的共晶錫銀鉛錫接點加上凱文結構來直接觀察每階段因為電遷移效應所造成的破壞情形。我們可以很明確的觀察到因電阻上升，鉛錫接點內孔洞的生成與延伸。並利用紅外線熱像儀觀察到因電阻上升時所造成的溫度上升；也發現到鉛錫內的熱點會因為孔洞的延伸而位置也跟著移動。





## 參考文獻

- 
- <sup>1</sup> H. Ye, C. Basaran, and D. Hopkins, *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 1045 (2003).
  - <sup>2</sup> The International Technology Roadmap for Semiconductors, Semiconductor Industry Association, San Jose, CA (1999).
  - <sup>3</sup> P. A. Totta and R. P. Sopher, *IBM J. Res. Dev.*, **13**, 226 (1969).
  - <sup>4</sup> B. S. Berry and I. Ames, *IBM J. Res. Dev.*, **13**, 286 (1969).
  - <sup>5</sup> I. A. Blech, *J. Appl. Phys.*, **47**, 1203 (1976).
  - <sup>6</sup> H. B. Huntington and A. R. Grove, *J. Phys. Chem. Solids*, **20**, 76 (1961).
  - <sup>7</sup> K.N. Tu, "Electronic Thin Film Science for Electrical Engineers and Materials Scientists", New York, Macmillan, (1992).
  - <sup>8</sup> F. M. d'Heurle and P. S. Ho, "Electromigration in thin films," in "Thin film; Interdiffusion and reactions," (p. 243), edited by J. M. Poate, K. N. Tu, and J. W. Mayer, Wiley-Interscience, New York (1978).
  - <sup>9</sup> F. M. d'Heure and R. Rosenberg, "Physics of Thin Films, **7**, 257 (1973).
  - <sup>10</sup> K. N. Tu, *Phys. Rev.*, **B45**, 1409 (1992).
  - <sup>11</sup> K. N. Tu, C. C. Yeh, C. Y. Liu, and C. Chen, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 7 (2000).
  - <sup>12</sup> S. Brandenburg and S. Yeh, *Electromigration Studies of Flip Chip Bump Solder Joints*, Delphi Delco Electronics Systems Kokomo, IN46904-9005.
  - <sup>13</sup> K. N. Tu, *J. Appl. Phys.*, **94**, 5451 (2003).
  - <sup>14</sup> P. S. Ho and T. Kwok, *Electromigration in metals*, *Rep. Prog. Phys.*, **52**, 301 (1989).
  - <sup>15</sup> H. Wang, C. Bruynseraede, and K. Maex, *Appl. Phys. Lett.*, **84** 517 (2004).
  - <sup>16</sup> I. A. Blech and C. Herring, *Appl. Phys. Lett.*, **29**, 131 (1976) .

- 
- <sup>17</sup> T. L. Shao, S. W. Liang, T. C. Lin, and C. Chen, "3-D simulation c3. European Union Waste in Electrical and Electronic Equipment ( WEEE ) Directive", 3rd Draft, May (2000).
- <sup>18</sup> T. F. I. Jr, and Y. I. Cho, "Handbook of Heat Transfer," McGraw-Hill, 21 (1998).
- <sup>19</sup> V. V. Calmidi and R. L. Mahajan, presented at Electronic Components and Technology Conference, ECTC 97 Proceedings, (1997).
- <sup>20</sup> J. W. Mayer and S. S. Lau, Electronic Materials Science: For Integrated Circuits in Si and GaAs: Prentice Hall, (1989).
- <sup>21</sup> A. D. Kraus and A. B. Cohen, Thermal Analysis and Control of Electronic Equipment: Hemisphere, Hemisphere, W. A., 81 (1983).
- <sup>22</sup> S. H. Chiu, T. L. Shao, and C. Chen, Appl. Phys. Lett., **88**, 022110 (2006).
- <sup>23</sup> E. C. C. Yeh, W. J. Choi, K. N. Tu, P. Elenius, and H. Balkan, Appl. Phys. Lett., **80**, 580 (2002).
- <sup>24</sup> B. Chao, S. H. Chae, and P. S. Ho, J. Appl. Phys., **100**, 084909 (2006).
- <sup>25</sup> M. Ding, G. Wang, B. Chao, and P. S. Ho, J. Appl. Phys., **99**, 094906 (2006).
- <sup>26</sup> Y. C. Hsu, D. C. Chen, P.C. Liu, and C. Chen, J. Mater. Res., **20**, 2831 (2005).
- <sup>27</sup> D. Yang, Y. C. Chan, and K. N. Tu, Appl. Phys. Lett., **93**, 041907 (2008).
- <sup>28</sup> M.H. R. Jen, L.C. Liu, and Y. S. Lai, Microelectronics Reliability **49**, 734 (2009).
- <sup>29</sup> C. Ludwig, Sitzungsber. Akad. and Wiss. Wien, Math.-Naturw., **Kl. 20**, 539 (1856).
- <sup>30</sup> C. Soret, Arch. Sci. Phys. Nat., **Geneve 3**, 48 (1879).

- 
- <sup>31</sup> W. Roush and J. Jaspal, presented at Proceedings of the Electron. Compon. 32nd Conference, San Diego, CA, (1982).
- <sup>32</sup> C. Q. RU, *Acta Materialia*, **47**, 3571 (1999).
- <sup>33</sup> A. T. Huang, A. M. Gusak, and K. N. Tu, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 141911, (2006).
- <sup>34</sup> F. Y. Ouyanga, K. N. Tu, Y. S. Lai and A. M. Gusak, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 221906 (2006).
- <sup>35</sup> Y. C. Chuang, and C. Y. Liu, *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 1741105 (2006).
- <sup>36</sup> H. Y. Chen, C. Chen and K. N. Tu, *Appl. Phys. Lett.*, **93**, 122103 (2008).
- <sup>37</sup> M. F. Abdulhamid, C. Basaran and Y.-S. Lai. Thermomigration versus electromigration in microelectronics solder joints. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, in press
- <sup>38</sup> 關於吉時利科技公司相關資訊請參閱其官方網頁，網址：  
<http://www.keithley.com/>.
- <sup>39</sup> 關於安捷倫科技公司相關資訊請參閱其官方網頁，網址：  
<http://www.home.agilent.com/>.
- <sup>40</sup> 關於美國國家儀器公司相關資訊請參閱其官方網頁，網址：<http://www.ni.com/>
- <sup>41</sup> Y. Adda and J. Philibert, *Solid State Physics* **22** 409 (1986).
- <sup>42</sup> D. Gupta, K. Vieregge, and W. Gust, *Acta Mater.*, **5** 47 (1999).
- <sup>43</sup> M. Lu, D. Y. Shih, P. Lauro, C. Goldsmith, and D. W. Henderson, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 211909 (2008).
- <sup>44</sup> P. H. Sun and M. Ohring, *J. Appl. Phys.*, **47**, 478 (1976).
- <sup>45</sup> P. P. Kuz'menko and L. P. Golovinskiy, *Fiz. Metal. Metalloved.*, **30**, 1304 (1970).