

Joule열이 Sn-3.5Ag 플립칩 솔더범프의 Electromigration 거동에 미치는 영향

이장희 · 양승택* · 서민석* · 정관호* · 변광유* · 박영배†
안동대학교 신소재공학부
*하이닉스 반도체 PKG 연구소

Effect of Joule Heating on Electromigration Characteristics of Sn-3.5Ag Flip Chip Solder Bump

Jang-Hee Lee, Seung-Taek Yang*, Min-Suk Suh*, Qwan-Ho Chung*,
Kwang-Yoo Byun* and Young-Bae Park†

School of Materials Science and Engineering, Andong National University, Andong 760-749, Korea
*Package R&D Division, Hynix Semiconductor Inc., Ichon 467-701, Korea

(2007년 1월 23일 받음, 2007년 2월 13일 최종수정본 받음)

Abstract Electromigration characteristics of Sn-3.5Ag flip chip solder bump were analyzed using flip chip packages which consisted of Si chip substrate and electroplated Cu under bump metallurgy. Electromigration test temperatures and current densities performed were 140~175°C, and $6\sim 9 \times 10^4$ A/cm², respectively. Mean time to failure of solder bump decreased as the temperature and current density increased. The activation energy and current density exponent were found to be 1.63 eV and 4.6, respectively. The activation energy and current density exponent have very high value because of high Joule heating. Evolution of Cu-Sn intermetallic compound was also investigated with respect to current density conditions.

Key words Electromigration, Joule heating, flip chip bonding, Pb-free, Sn-3.5Ag.

1. 서 론

최근 환경에 대한 관심이 높아지면서 패키지 접속재료로 많이 쓰였던 공정조성 SnPb 솔더의 대안으로 Sn계 무연 솔더에 대한 관심이 점점 높아지고 있다.¹⁾ 한편 제품의 경박단소화 및 고성능화의 추세에 따라 패키지에서의 실장면적 감소와 고집적화는 불가피한 상황이 되어가고 있다. 따라서 패키지 내 입출력 단자 수의 증가 및 솔더 범프에서의 피치, under bump metallurgy(UBM) 단면적의 감소로 인하여 각 회로단자에 걸리는 전류밀도가 점점 증가하고 있다. 이러한 전류밀도의 증가는 각 회로 배선 및 플립칩 솔더 범프에서의 electromigration에 의한 전기적 단락을 일으키기에 충분하다.^{2,3)} Electromigration은 높은 전류가 흐르는 반도체 배선 내의 막대한 양의 전자 흐름에 의한 운동량 전달효과에 의해 금속 배선을 구성하는 원자들이 전자의 흐름방향으로 이동하는 현상이다.⁴⁾ 실제로는 고체내의 열에너지로 인해 에너지적으

로 가장 안정한 격자점을 중심으로 항상 임의 방향의 운동을 계속하고 있는 원자에 대한 전자의 충돌이 전자의 이동방향으로 원자 확산 방향성을 주는 방식으로 이루어진다. 이러한 electromigration은 실제 칩 배선 및 플립칩 솔더 범프에서 주로 발생하고 있으며, 전류밀도 및 온도가 증가할수록 electromigration 현상은 가속화된다. 따라서 고집적화 및 고성능화를 위한 패키지의 기술적 발전을 위해서는 electromigration에 의한 솔더 범프에서의 파괴를 배제할 수 없으므로 무연솔더를 사용한 플립칩 솔더범프에서의 electromigration 현상이 매우 중요한 이슈가 되고 있다. 그 중 전기도금 Sn-3.5Ag 플립칩 솔더범프가 대표적으로 무연솔더로서 많이 사용되고 있는데, 이 범프에서의 electromigration 현상에 대해서는 많은 선행 연구 결과들이 있다.^{2,3,5)} 하지만 기 연구결과에서는 Si/Board 구조의 시편으로 인하여 칩과 기판 재료 사이의 매우 큰 열전도성 차이 때문에 솔더 범프내에 상당한 온도구배가 존재하게 된다. 이러한 온도구배로 인해 electromigration 이외에 thermomigration이 매우 크게 작용하고, 열팽창계수 차이에 의한 열응력도 영향을 줄 수 있기 때문에, 전류흐름에 의한 범프 손상 기구 규명이 매

†Corresponding author
E-Mail : ybpark@andong.ac.kr (Y.-B. Park)

우 복잡하고 어렵게 만드는 원인이 된다.

따라서, 본 연구에서는 칩과 기판이 모두 실리콘으로 구성되고 구리 UBM을 사용한 플립칩 패키지 시편을 이용하여 솔더 범프 상하부의 온도구배를 최소화하여 Sn-3.5Ag 솔더 범프의 electromigration에 의한 수명평가 및 손상미세구조를 분석하였다.

2. 실험 방법

Sn-3.5Ag 솔더 범프에서의 수명평가를 위해 Fig. 1과 같이 특정 솔더 범프에서의 파괴를 유도할 수 있도록 양극 쪽에는 하나, 음극 쪽에는 세 개의 솔더 범프를 병렬로 연결하였다. 따라서 음극쪽에 세 개의 솔더 범프와 양극쪽의 솔더 범프는 세배의 전류밀도 차이를 가지게 되므로 모든 시편에서의 파괴시간은 양극쪽의 솔더 범프에서의 파괴시간이라고 볼 수 있다. 그리고 electromigration 실험 시 칩과 기판용 재료에서의 열전도도 차이에 의한 솔더 범프 내부에서의 온도구배를 최소화하기 위해서 칩과 기판이 열전도성이 좋은 실리콘 웨이퍼로 구성된 플립칩 패키지를 이용하여 정렬한 후 150°C에서 30초 동안 플럭스를 활성화시킨 뒤 250°C에서 1분간 리플로우하여 플립칩 본딩을 하였다. Isopropyl alcohol 용액에 시편을 넣고 40°C에서 1시간 동안 stirring하여 플럭스를 제거하

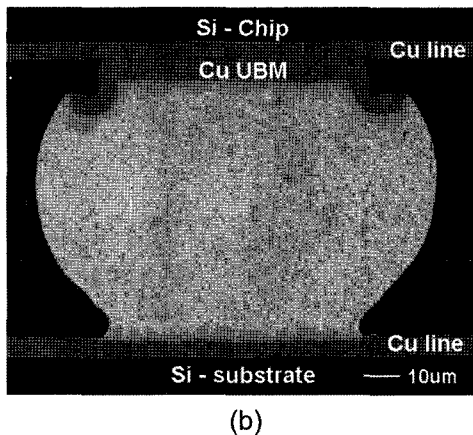
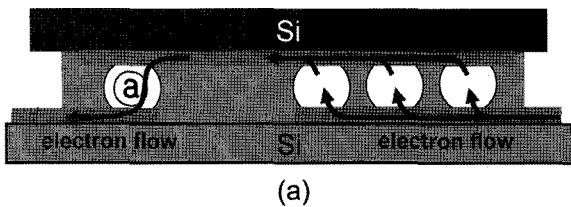


Fig. 1. (a) Schematic illustration, and (b) SEM image of the flip chip sample for electromigration test.

였다. 플럭스가 제거 된 시편을 80°C에서 underfilling한 후 170°C에서 두 시간 건조하여 electromigration 실험 시편을 제작하였다. 오븐 온도 140°C, 160°C, 175°C에서 시편의 pad에 전류를 인가하여 전류밀도 $6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$, $7 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$, $9 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 에서 Sn-3.5Ag 솔더 범프에서의 electromigration에 대한 수명평가를 실시하였다. 전류 밀도는 인가되는 전류에 솔더 범프에서의 패드부의 단면적으로 나누어 나타내었다. 실험 시 칩의 뒷면에 thermocouple을 부착하여 실험 시 발생하는 Joule 열에 의한 실제 칩에서의 온도를 측정하여 활성화에너지(activation energy) 및 전류밀도지수(current density exponent) 값을 평가하는데 적용하였다. 각 실험 시편에서 솔더 범프의 초기저항 대비 20% 저항 증가 시점을 솔더 범프에서의 파괴시간으로 정의하였고, 이러한 파괴시간을 바탕으로 log-normal 분포를 가정하여 각 조건에서 4개의 시편에 대한 평균파괴시간을 평가하였다. Sn-3.5Ag 솔더 범프의 electromigration 파괴기구를 분석하기 위해 Sn-3.5Ag 솔더 범프 시편을 #600~2000의 연마지와 1~3 μm 의 연마천을 이용하여 단면 폴리싱한 후, Scanning Electron Microscope(SEM) 및 Energy Dispersive Spectroscopy(EDS)로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Sn-3.5Ag 솔더 범프에서의 electromigration 수명을 평가하기 위해 온도 및 전류밀도를 변화하여 electromigration에 의한 파괴시간을 구하였다. 파괴시간은 전류인가 후 시편의 초기저항 대비 저항증가 20% 시점으로 나타내었으며, 175°C, $9 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 조건에서 4개의 시편에 대한 시간에 따른 저항 증가 변화거동을 Fig. 2에 나타내었다. 전류인가 후 시간이 지남에 따라 저항의 증가 폭이 점점 커지다가 저항증가 20% 시점을 전후하여 급격히 증

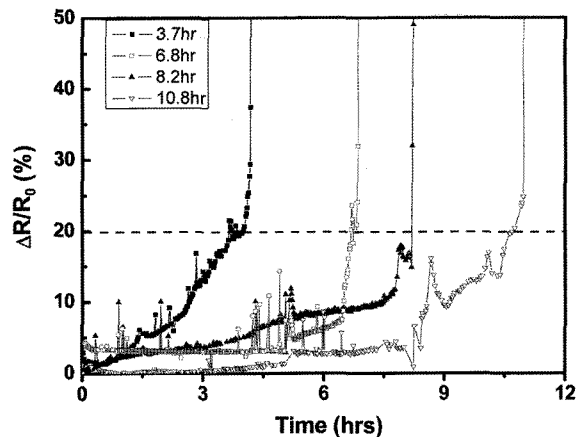


Fig. 2. Resistance increase ratio as a function of time at 175°C, $9 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$.

가하는 것을 볼 수 있다. 급격한 저항 증가의 원인은 전류인가 후 electromigration에 의해 솔더 범프가 파괴되어 전기적인 단락이 발생하였기 때문이라고 판단된다. Table 1은 Sn-3.5Ag 솔더 범프에서의 electromigration 수명평가 결과를 정리한 것인데, 각 실험조건에서의 평균파괴시간(t_{50}), 표준편차(σ), 및 Joule 열에 의한 시편 온도 증가를 나타냈다. 평균파괴시간 및 표준편차는 각 시편에서의 파괴시간을 바탕으로 log-normal 근사를 통해 평가하였으며, Joule 열 온도는 전류인가 후 시편에 부착된 thermocouple로 얻어진 온도에서 오븐의 온도를 뺀 값으로 나타내었다. 시편에 부착된 thermocouple로 얻어진 온도는 칩으로 사용된 실리콘의 높은 열전도 특성으로 인하여 실제 칩 내 솔더 범프의 온도와 유사하다고 생각된다. 측정된 Joule 열 온도는 가해주는 전류밀도 증가에 따라 거의 직선적으로 증가하는 거동을 보여 주었고, $9 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 의 전류밀도에서 대략 110°C 의 매우 높은 Joule 열 온도를 나타내었다. Fig. 3은 일정한 온도 및 전류밀도에서 조건에 따른 평균파괴시간의 변화를 log-normal 분포로 나타낸 그래프이다. 솔더 범프에서의 평균파괴시간이 온도 및 전류밀도가 증가함에 따라 순차적으로 감소하는 경향을 볼 수 있다. 하지만 일정한 전류밀도에서 온도변화에 의한 것 보다는 일정한 온도에서 전류밀도 변화에 의한 평균파괴시간의 변화 정도가 더 큰 것을 볼 수 있다. 따라서 솔더 범프에서의 평균파괴시간은 온도 및 전류밀도가 증가함에 따라 감소하지만 온도의 영향보다는 전류밀도가 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이는 매우 높은 전류밀도에 의한 Joule 열 및 국부적인 전류밀도 집중현상에 의한 melting이 주요 파괴 기구임을 의미한다고 생각한다.

Fig. 4는 Sn-3.5Ag 솔더 범프의 electromigration에 대한 전류밀도지수와 활성화에너지를 나타낸 그래프이다. 활성화에너지 및 전류밀도지수는 평균파괴시간과 전류밀도 및 온도와의 관계를 나타낸 식 (1)의 Black equation을 통하여 구하였다.⁶⁾

$$t_{50} = A \cdot j^{-n} \cdot \exp\left(\frac{Ea}{kT}\right) \quad (1)$$

여기서, t_{50} 은 평균파괴시간이며, A는 상수, Ea는 electro-

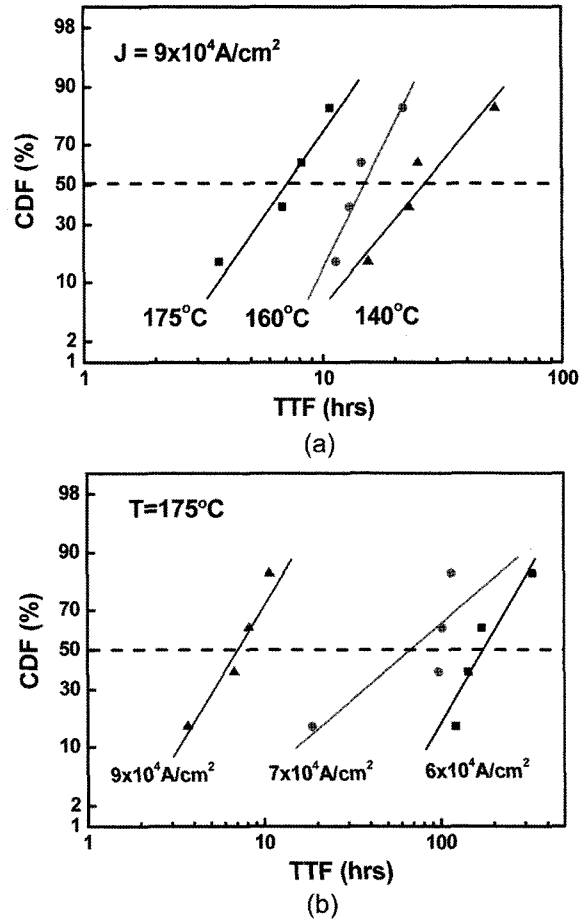


Fig. 3. Cumulative distribution function(CDF) plots of electromigration for Sn-3.5Ag solder bump (a) at constant current density of $9 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$, and (b) at constant temperature of 175°C .

migration에 대한 활성화에너지, n은 전류밀도지수, k는 Boltzmann 상수이다. 활성화에너지는 실험조건에서의 온도가 아닌 칩에 부착된 thermocouple로 측정된 온도를 이용하여 평가하였으며, 이를 Fig. 4에 표시하였다. 이것은 실제 electromigration 실험 시 시편에 가해지는 온도가 실험 조건에서의 온도뿐만 아니라 전류에 의한 Joule 열 온도가 함께 존재하기 때문이다.^{5,7)} 이러한 Joule 열에 의한 온도를 고려하여 전류밀도지수 및 활성화에너지

Table 1. Electromigration lifetime statistics of Sn-3.5Ag solder bump

Current density (A/cm^2)	T (oven $^\circ\text{C}$)	T (measured by T/C, $^\circ\text{C}$)	ΔT (T/C-oven, $^\circ\text{C}$)	Lifetime	
				t_{50} (h)	σ
6×10^4	175	226.3	51.3	177.4	0.48
	175	235.8	60.8	68.1	0.83
7×10^4	175	275	100	6.9	0.51
	160	265.4	105.4	14.7	0.31
9×10^4	140	254.6	114.6	26.2	0.57

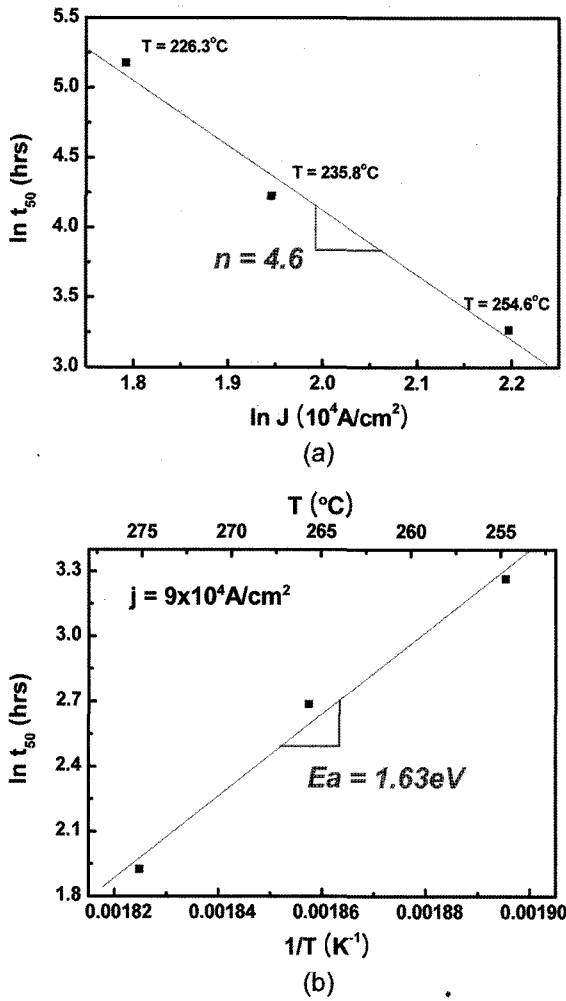


Fig. 4. (a) current density exponent(n), and (b) activation energy(Ea) of Sn-3.5Ag electromigration.

를 평가한 결과, 전류밀도지수는 4.6, 활성화에너지는 1.63 eV로 매우 높은 값을 나타내었다. 이러한 높은 값의 전류밀도지수 및 활성화에너지의 원인은 가혹한 실험 조건으로 인한 매우 높은 Joule 열 효과에 의한 것으로 판단된다. 또한, 솔더재료 내에 존재하는 원자의 확산경로에는 표면, 결정립계, 상계면, 격자내 등이 있는데, 1.63 eV의 매우 큰 활성화에너지는 높은 Joule 열에 의해 원자의 확산경로가 결정립계에서 격자내로 전환된 것을 의미한다고 판단된다.⁸⁻¹⁰⁾ Fig. 5는 160°C, 9×10^4 A/cm²의 조건에서 electromigration 실험 후 파괴가 발생한 시편의 단면 SEM back scattered electron (BSE) 사진이다. 상부 칩의 구리 배선이 대부분 녹아서 없어졌고, 하부 기판의 구리배선도 상당부분 금속간화합물로 바뀌어서 상당한 금속간화합물 형성을 위한 계면 반응이 있었음을 알 수 있었다. EDS 분석 결과 솔더 범프의 대부분 영역이 Cu₃Sn으로 이루어진 것으로 나타났으며 솔더 범프 내부에 부분적으로 Sn과 Cu₆Sn₅가 분포되어 있는 것을 확인

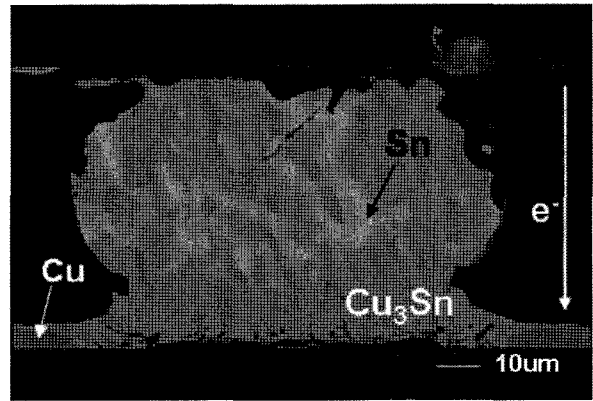


Fig. 5. SEM BSE image of electromigration induced failure sample at 175°C, 9×10^4 A/cm².

할 수 있었다. Cu UBM을 이용한 플립칩 패키지 시편에서의 electromigration에 대한 기 보고에 의하면 무연 솔더에서의 electromigration 파괴현상은 Cu UBM 층이 솔더 내 Sn과 반응하여 매우 큰 Cu₆Sn₅를 형성하여 Cu UBM의 고갈로 인하여 전기적인 단락을 유발한다고 알려져 있다.³⁾ 또한, Bandyopadhyay 등은 Cu/Sn bimetallic couple에서 Cu₆Sn₅는 상온에서 쉽게 형성되며, 고온에서 어닐링 시 보다 많은 Cu와 Cu₆Sn₅의 반응으로 인하여 Cu₃Sn이 형성된다고 보고하였다.¹¹⁾ 이러한 결과와 비교 하였을 때 솔더 범프 내부에 존재하는 대부분의 Cu₃Sn은 실험 초기에 Cu UBM과 Sn이 반응하여 매우 큰 Cu₆Sn₅를 형성한 뒤, 극심한 Joule 열에 의한 electromigration 및 확산의 가속화로 인하여 Cu 배선까지 반응에 상당히 많이 참여하여 발생한 결과라고 생각된다. 매우 높은 Joule 열에 의한 솔더 범프에서의 손상미세구조를 규명하기 위하여 단면 폴리싱한 시편을 SEM 내부에 넣고 140°C, 6×10^4 A/cm²의 조건에서 80시간동안 electromigration 실험한 결과 미세구조의 변화가 미비하여 전류밀도를 9×10^4 A/cm²로 올린 후 추가로 37시간동안 실험을 하면서 실시간 미세구조를 관찰하였다. Fig. 6(a)는 140°C, 6×10^4 A/cm²의 조건에서 63시간 후 관찰한 단면 BSE 사진이다. Electromigration에 의한 전자의 이동방향에 따라 양극 부근에서 힐록이 관찰되었다. 그리고 금속간화합물의 형성에 극성을 띄게 되는 polarity effect가 없이 칩과 기판부 사이 전 면적에 걸쳐서 광범위한 Cu₆Sn₅가 형성된 것을 볼 수 있다.^{12,13)} 이러한 원인은 UBM부근에서의 매우 큰 Joule 열로 인한 온도 상승에 의해 칩과 기판부 UBM 계면 모두에서 금속간화합물의 성장이 가속화된 것이라고 판단된다. Fig. 6(b)는 140°C, 9×10^4 A/cm²의 조건에서 electromigration 117시간 실험 후 관찰한 단면 BSE 사진이다. 140°C, 9×10^4 A/cm²의 조건에서 37시간 실험 후 상부 칩 UBM 계면 부근에서 보이드 진전에 의한 단면적 감소가 극심한 전류밀도집중

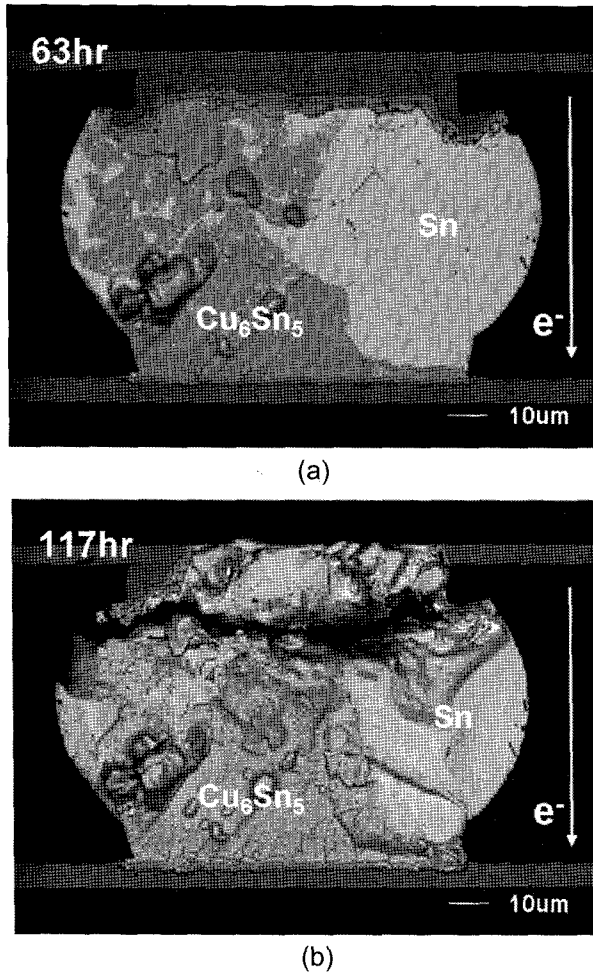


Fig. 6. SEM BSE image of electromigration induced failure samples (a) at 140°C, 6×10^4 A/cm² and (b) at 140°C, 9×10^4 A/cm².

현상을 유발하여 급격한 온도상승으로 솔더가 녹아나는 것을 관찰할 수 있었다. 따라서 140°C, 6×10^4 A/cm²의 조건에서는 높은 Joule 열로 인해 칩과 기판부 UBM 계면에서 금속간화합물의 성장이 가속화 되어 솔더 범프 전면에 걸쳐 충분한 금속간화합물이 형성되었으며, 140°C, 9×10^4 A/cm²의 조건에서는 너무 높은 전류밀도로 인하여 이미 솔더 범프 전면에 충분히 형성된 금속간화합물의 추가 성장은 둔화되고, UBM부근 계면에서의 보이드 형성 및 진전으로 인한 전류집중으로 온도가 급격히 상승하여 국부적으로 솔더가 녹아서 솔더 범프의 파괴를 초

래한 것으로 판단된다.

4. 결 론

높은 전류밀도가 Sn-3.5Ag 플립칩 솔더 범프의 electromigration 거동에 미치는 영향을 분석하기 위해 높은 전류밀도 및 온도 범위에서의 평균과피시간, 활성화에너지, 및 전류밀도지수를 구했다. 평균과피시간은 온도 및 전류밀도가 증가함에 따라 감소하였으며, Joule 열에 의해 전류밀도의 영향이 더욱 큰 것으로 나타났다. 활성화에너지는 1.63 eV, 전류밀도지수는 4.6의 매우 높은 값을 나타내었으며 이러한 원인은 가혹한 실험 조건으로 인한 매우 높은 Joule 열이 주요 원인인 것으로 생각된다. 전류밀도가 증가할수록 솔더범프 전 영역에 걸쳐 Cu-Sn 금속간화합물이 형성되고, 결국에는 UBM 계면에서의 국부적인 Joule열에 의한 보이드 진전 및 솔더가 녹아서 파괴가 일어나는 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. A. T. Huang and K. N. Tu, J. Appl. Phys, **100**, 033512 (2006).
2. S.-H. Chae, X. Zhang, H.-L. Chao, K.-H. Lu and P. S. Ho, in Proceedings of 56rd ECTC, 650 (2006).
3. M. Ding, G. Wang, B. Chao and P. S. Ho, J. Appl. Phys, **99**, 094906 (2006).
4. J. R. Lloyd, J. Phys. D. Appl. Phys, **32**, R109-R118 (1999).
5. T. L. Shao, Y. H. Chen, S. H. Chiu and Chih Chen, J. Appl. Phys, **96**(8), 4518-4524 (2004).
6. Black, J.R. IEEE trans. Electron Devices, **ED-16**(4), 338 (1969).
7. S. H. Chiu, T. L. Shao and Chih Chen, Appl. Phys. Lett., **88**, 022110 (2006).
8. Y.-C. Hsu, C.-K. Chou, P. C. Liu and C. Chen, J. Appl. Phys, **98**, 033523 (2005).
9. T. Y. Lee and K. N. Tu, J. Appl. Phys, **90**(9), 4502-4508 (2001).
10. W. J. Choi, E. C. C. Yeh and K. N. Tu, J. Appl. Phys, **94**(9), 5665-5671 (2003).
11. A. K. Bandyopadhyay and S. K. Sen, J. Appl. Phys, **67**(8), 3681-3688 (1990).
12. J. W. Nah, Fei Ren and K. N. Tu, J. Appl. Phys, **99**, 023520 (2006).
13. H. Gan and K. N. Tu, J. Appl. Phys, **97**, 063514 (2005).