

공정조성의 SnPb 및 SnAgCu 선형 솔더의 electromigration 특성 평가

(Electromigration characteristics of eutectic SnPb and SnAgCu thin stripe lines)

윤민승, 이신복, 주영창

Min-Seung Yoon, Shin-bok Lee, and Young-Chang Joo

서울대학교 재료공학부

School of Materials Science and Engineering, Seoul National University

Abstract

Electromigration characteristics of SnAg₃Cu_{0.7} and eutectic SnPb solder were studied using thin stripe-type test structures. Significant changes in the microstructure of two solders were observed after electromigration test, in which the temperature and the current density were varied from 90 to 110 °C and from 4.0×10^4 A/cm² to 9.2×10^4 A/cm². In SnAgCu solders, hillocks were mainly observed near the anode end. From resistance measurements, it was calculated that the activation energy of the SnAgCu solder for electromigration was 1.04 eV. And in eutectic SnPb without the effect of pads, while depleted region was found near cathode end, Sn-rich hillocks were observed near the anode end. During eutectic SnPb electromigration, it were observed that electromigration behavior had two migration modes.

1. Introduction

오늘날 집적 소자의 집적화, 소형화는 트랜지스터의 수와 칩에서의 전력 소모량의 급격한 증가를 통해서 이루어지고 있다. 이에 따른 입출력 단자 수의 급격한 증가와 솔더 범프 크기의 감소는 필연적으로 따라오게 된다. 따라서 각각의 솔더 범프에 흐르는 전류밀도는 급격하게 증가하며 이는 반도체 배선에서 발생하는 electromigration(EM)에 의한 신뢰성 문제가 플립칩 솔더 범프에도 발생할 수 있음을 의미한다 [1].

EM은 배선에 높은 전류밀도가 흐를 때 전자에서 원자로 운동량이 전달되어 이로 인해 도체의 원자가 양극방향으로 확산하는 현상이다. 즉 원자는 전자가 흐르는 양극(+)방향으로 이동하게 되며, 이것은 음극 쪽에 있는 원자의 고갈을 초래한다. 이 때 양극(+)방향으로 흐르는 원자의 유량은 운동량과 구동력의 곱으로 표현될 수 있으며 그 식은 다음과 같다.

$$J = C \left(\frac{D}{kT} \right) Z^* q \rho j = C \left(\frac{D_0}{kT} \right) \exp \left(-\frac{E_a}{kT} \right) Z^* q \rho j \quad (1)$$

여기에서 C는 원자 농도이고, D는 확산 계수, k는 Boltzmann 상수, Z*는 유효 전하수이며 이것은 전기장 속에서의 원자의 이동방향과 전자로부터 원자로의 유효 운동량 전달에 대한 정보를 제공한다. 그리고 q는 전자의 기본 전하량이고, ρ는 비저항 그리고 j는 전류 밀도이다[2]. 이러한 EM은 유동 분기점에 hillock 혹은 공공을 생성시키며 주로 양극방향 부분에 힐록을, 음극방향 부분에는 공공을 형성시킨다.

EM은 지금까지 주로 반도체 소자 배선의 신뢰성을 평가하는 주요한 부문이었다. 그러나 플립칩 솔더 범프에 흐르는 전류밀도가 증가함에 따라 EM 문제는 배선 뿐만 아니라 플립칩에도 발생하게 되었다[3, 4]. 물론 배선의 EM과 플립칩의 EM은 유사하지만 몇 가지의 큰 차이점이 있다.

먼저 전류밀도의 측면에서 보면, 플립칩 솔더 범프에 흐르는 전류밀도는 배선에 흐르는 전류밀도보다 훨씬 작다[3]. 그러나 솔더 물질은 배선 물질에 비해 상대적으로 매우 낮은 용융점을 가지므로 플립칩의 작동 온도에서 솔더 물질은 높은 확산도를 가지게 된다. 따라서 솔더 물질에서 역시 EM 문제에 더 취약한 상황에 놓이게 되는 것이다. 또한 배선은 주로 소량의 합금원소를 포함한 단일종의 물질(구리 혹은 알루미늄)로 구성되어 있지만 플립칩 솔더 범프를 이루는 대표적인 물질인 공정 조성의 SnPb 솔더는 양적으로 서로 비교할 만큼 충분한 Sn과 Pb의 두 가지의 물질로 구성되므로 EM은 각각의 원소에 대한 확산도의 차이와 상호 작용 등에도 영향을 받는다.

본 연구에서는 공정 조성을 가지는 SnPb와 그리고 최근에 환경 때문에 사용이 강요되고 있는 lead-free 솔더 중 SnAg₃Cu_{0.7}에서의 EM 거동을 살펴보았다. 본 연구에서는 플립칩 형태의 시편이 아닌 선형의 시편을 통하여 연구하였는데, 이는 비록 선형의 형태가 일반적인 플립칩 형태와 완전히 상이하지만, 선형의 형태를 통해서 각 솔더의 EM 물성값을 쉽게 얻을 수 있을 뿐만 아니라 joule 열의 발생과 전류밀도를 일정하게 할 수 있다는 장점을 가질 뿐만 아니라 미세구조 변화 양상과, 확산종의 분석도 용이하기 때문이다.

2. Experimental Procedure

두께가 200 Å, 250 Å인 Cr과 Ni 박막을 Si 웨이퍼에 thermal evaporator로 증착 후 사진 공정과 에칭 공정을 통해 폭 100µm 길이 1000µm의 Ni 선을 제조하였다. 그리고 Ni 선 위에 resin flux와 SnAg₃Cu_{0.7} 크림 솔더를 바른 후 230°C 에서 5초간 시편을 reflow 후 사포와 입자의 크기가 0.06µm 인 SiO₂ 서스펜션과 연마천으로 시편을 갈아 reflow된 솔더의 두께를 줄였다. 결과적으로 그림 1 에서 나타난 것처럼 시편은 그 두께가 200 Å, 250 Å, 2 µm~5 µm 인 Cr/Ni/SnAg₃Cu_{0.7} 층으로 선형 시편을 제작하였다. 다음으로 시편을 90°C~110°C 온도의 hot plate 위에 놓고, 4시간 동안 각 온도에서 열처리를 한 후 탐침으로 시편에 전류를 흘리며 시편의 저항을 측정하였다. 이때 모든 전류가 SnAgCu층 뿐 아니라 아래의 Cr과 Ni 층을 통하여서도 전류가 흐르기 때문에 각 층의 물질의 비저항과 두께를 고려한 저항의 병렬 모델을 통해 실제 공정 조성의 SnAgCu 층으로 흐르는 전류의 크기를 계산하여 원하는 전류밀도를 가하였다.

또한 패드의 영향을 제거하기 위해 패드와 선형 부분이 분리된 공정 조성의 SnPb의 시편을 제작하였다. 3000 Å 두께의 Cu 박막을 thermal evaporator로 증착한 후 위와 같은 방법으로 폭 100 µm, 길이 1000µm의 Cu 선과 패드를 제조하였다. 그리고 PECVD SiO₂를 약 1 µm 증착하고 다시 패터닝하여 패드 부분과 선형 부분을 각각 건식식각하여 Cu가 드러나게 하였다. 그 후 SnAgCu 시편 제작 공정과 마찬가지로 Cu 선 위에 resin flux와 공정 조성의 SnPb 크림 솔더를 바른 후 190°C에서 5초간 시편을 reflow 후 폴리싱하여 솔더의 두께를 줄였다. 결과적으로 그림 2 에 나타난 것처럼 시편은 SiO₂ 으로 패드와 선형 부분이 분리되고 두께가 3000 Å, 2 ~ 5 µm인 Cu/SnPb 층으로 된 선형 시편을 제작하였다. 그리고 SnAgCu에서와 같은 환경에서 EM 테스트를 수행하였다.

EM 테스트가 끝난 후 시편의 미세 구조 변화와 조성변화를 SEM(JEOL; JSM-5600), EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)으로 관찰하였다.

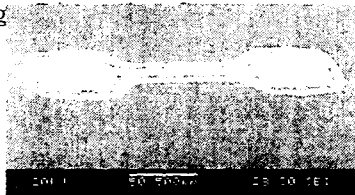


그림 1. EM 테스트용 SnAgCu 솔더의 선형 시편

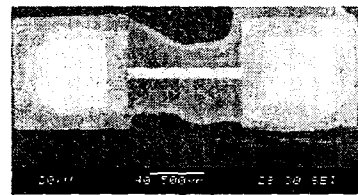


그림 2. EM 테스트용 패드의 영향을 제거한 공정 조성의 SnPb 솔더의 선형 시편

3. Results and Discussion

3-1. SnAg₃Cu_{0.7} 선형 솔더의 미세구조 변화

그림 3은 EM 실험 전후의 선형 시편의 SEM 사진이다. 그림 3-(a)는 아무런 처리를 받지 않은 시편의 SEM 이미지이며 3-(b)는 약 70시간 동안 120°C 온도에서 전류를 가하지 않고 열처리만 한 시편의 사진이고, 3-(c)는 100°C 온도에서 약 50시간 동안 $4.6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 의 전류 밀도를 가해준 시편의 사진이다. 3-(a)와 3-(b)에 비해 3-(c)는 미세 구조에 있어 큰 차이를 보인다.

약 70시간 동안 120°C 열처리만으로는 그림에서 볼 수 있듯이 미세 구조적인 변화가 거의 없다. 이와 달리 3-(c)의 전류에 의한 미세 구조의 변화와 같은 심각한 미세 구조의 변화는 발견되지 않았다. 이와 달리 3-(c) 그림에서처럼 100°C 온도의 hot plate 위에서 약 3-50 시간 동안 $4.6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 의 전류 밀도를 가해준 시편에서는 주로 양극 방향으로 힐록이 생성되는 것을 관찰할 수 있었다.

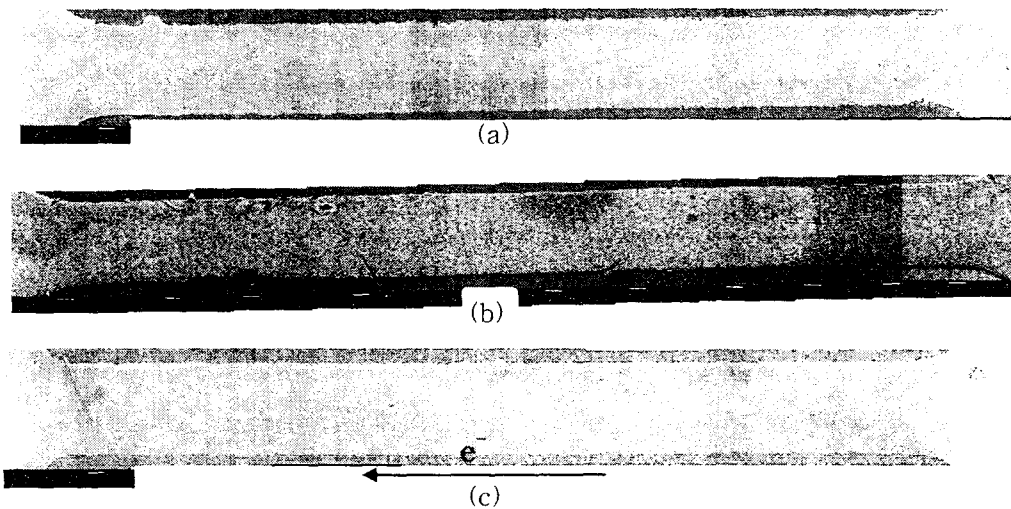


그림 3. 선형 시편의 BSE 이미지 (a) EM 전의 시편 (b) 약 70시간 동안 120°C의 열처리를 한 시편 (c) 약 50시간 동안 100°C 온도에서 $4.6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 의 전류밀도를 가한 시편

3-2. SnAg₃Cu_{0.7} 선형 솔더에서 Electromigration에 의한 저항 변화

그림 4는 100°C, 110°C의 온도에서 $4.6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 의 같은 전류밀도 아래에 놓여진 시편들의 저항 증가율을 나타낸 그래프이다. 시간에 대한 저항 증가율은 초기에 직선적인 형태를 가지며 증가한다. 그리고 초기 직선 형태의 저항 증가율의 기울기는 100°C, 110°C의 온도에서 각각 0.032 %/hour, 0.073 %/hour이다. 초기의 저항 변화가 EM에 의한 것이라고 판단하기 위해 전류를 흘리지 않고 120°C의 온도만 가해준 시편의 경우 약 70시간 동안 저항 변화가 거의 없었다. 모든 EM 실험은 각 실험 온도에서 4시간 열처리 후 미세구조가 안정화 된 시점에서 실시하였으므로 시편에서 관찰된 저항의 변화는 주로 EM에 의함을 알 수 있었다.

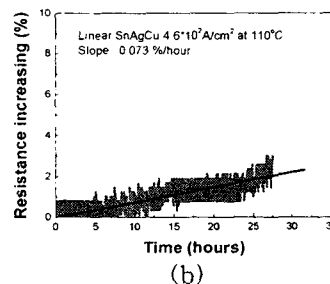
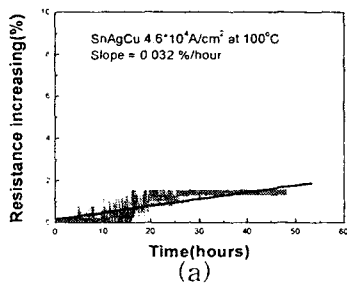


그림 4. $4.6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 의 전류밀도에서 시간에 따른 저항 변화 (a) 100°C (b) 110°C

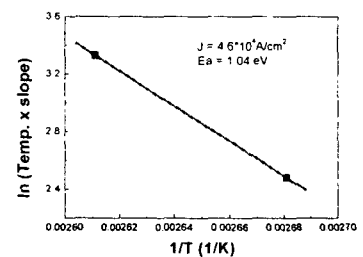


그림 5. SnAgCu의 EM 활성화 에너지 값의 계산

이 때 초기의 저항 증가가 EM에 의한 솔더 물질의 이동에 의해서만 일어난다고 가정하면 그림 4의 초기 저항 변화율(기울기)은 식(1)에서 나타난 EM flux와 비례할 것이다. 이 식을 같은 전류 밀도가 같으나 온도가 다른 조건을 적용하면 식(2)의 관계를 얻을 수 있으며 이로부터 EM에 필요한 활성화 에너지를 계산할 수 있다.[5]

$$\ln(T \cdot Slope) = -\frac{E_a}{kT} + const \quad (2)$$

식 (2) 와 그림 5 에서 SnAgCu의 EM 활성화 에너지 값은 1.04 eV로 계산된다. 이 값은 S. Brandenbrug[6]가 직접 flip chip solder ball을 이용하여 구해낸 평균 파괴 시간(MTTF)으로부터 얻어진 0.8 eV의 공정 조성의 SnPb 활성화 에너지, 그리고 본 그룹에서 같은 선형 시편에서 얻어진 0.77 eV의 활성화에너지[5]보다 약 0.2 eV 이상 큰 값을 가진다. Tu. et al. 그룹에서 발표한 플립칩 솔더 볼에서 SnAgCu 솔더의 EM 결과[7]를 보면 SnAgCu 물질은 공정 조성의 SnPb 보다 훨씬 더 큰 EM 저항성을 보임을 알 수 있다.

3-3. 공정 조성의 SnPb의 electromigration에 의한 미세구조 변화

패드의 영향이 없는 선형 부분이 분리된 공정 조건의 SnPb의 선형 시편을 만들어서 EM 테스트를 수행하였다. 그림 6는 100°C에서 4.0×10^4 A/cm²의 전류밀도에서 약 70시간 EM 테스트를 한 후에 SEM 사진이다. 음극부에서는 물질 이동이 일어나서 고갈된 양상을 보여주고, 양극 끝에서는 힐리가 발생한 결과를 볼 수 있다. Sn과 Pb의 물질 이동 양상을 살펴보기 위해서 BSE 모드와 EDS 분석을 실시하였다.

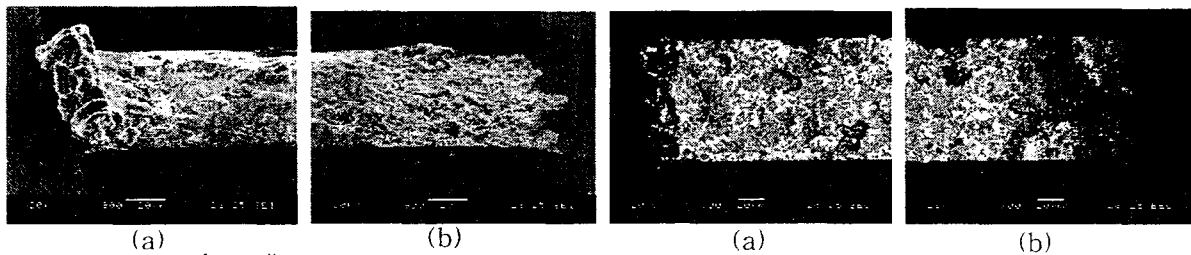


그림 6. 4.0×10^4 A/cm²의 전류밀도에서 EM 테스트 후의 SEM 그림(60° 기울임) (a) 양극 부분 (b) 음극 부분

그림 7. 4.0×10^4 A/cm²의 전류밀도에서 EM 테스트 후의 BSE 그림 (a) 양극 부분 (b) 음극 부분

그림 7은 BSE 모드로 관찰한 SnPb 선형 솔더의 상태를 보여주고 있다. 밝은 부분은 Pb-rich grain, 어두운 부분은 Sn-rich grain을 의미한다. 그림에서 볼 수 있듯이 음극에 고갈된 부분은 대부분 어두운데 이것은 Pb가 거의 없고 Sn만 남아있다는 것을 의미하고 양극에 힐리도 대부분 어두운데 이것은 힐리가 대부분 Sn-rich grain으로 이루어졌다는 것을 의미한다. 그림에서 볼 수 있듯이 음극 부분에서는 Pb의 양이 현저하게 적게 나타나고 양극 부분에서는 Pb 양이 많은 것을 알 수 있다. 이는 Pb가 주된 확산 원소로 Sn보다 먼저 이동하여 Sn-rich grain을 밀어내어 힐리를 발생했다는 것을 의미한다.[4]

3-4. SnPb의 electromigration에 의한 시간에 따른 변화

SnPb의 EM 테스트의 중간 변화 양상을 살펴보기 위해 테스트 진행 도중에 SEM 분석을 실시하였다. 테스트 시작후 5, 15, 30시간이 지난 후에 테스트를 중단하고 SEM 분석을 실시한 결과가 그림 8에 나타나 있다. 그리고 테스트 중에 발생하는 저항 변화 양상도 그림 9에 나타나 있다. 저항 변화 곡선을 보면 두 단계의 저항 변화가 나타남을 알 수 있다. 첫 번째 저항 변화 직선의 기울기는 0.41%/hour, 두 번째 저항 변화 직선의 기울기는 1.40%/hour이다. 첫 번째 저항 변화 직선 구간이 끝난 후 SEM 사진(그림 8(a))을 보면 음극부분의 고갈이 아직 발생하지 않은 상황임을 알 수 있다. 그리고 두 번째 저항 변화 직선구간 중간에서 관찰한 SEM 결과(그림 8(b))를 보면 drift

가 발생하여 음극 부분에 물질이 고갈되고 있다는 것이 보여진다. 그리고 저항이 급격히 증가하고 난 후(약 30시간 후) SEM 결과(그림 8(c))를 보면 음극 부분에 고갈된 지역이 더 커진 것을 알 수 있다. 지금까지의 SnPb의 EM 결과들을 보면 모두가 파괴 시간, 즉 EM의 마지막 부분만을 관찰했기 때문에 중간에 어떠한 양상으로 SnPb가 EM 현상을 일으키는 지 알 수 없다. 본 결과에 따르면 두 단계의 EM 단계를 거치면서 SnPb가 물질 이동을 하는 것으로 판단된다. 이것은 각 단계에서 확산 경로, 혹은 확산 물질의 양상이 달라지기 때문이라 생각된다.

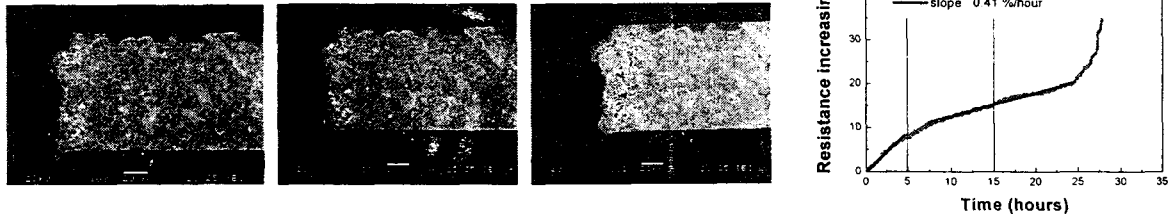


그림 8. 100°C, $4.0 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ 의 전류밀도에서 EM 테스트 과정 중의 SEM 그림 (a) 5시간 후 (b) 15시간 후 (c) 30시간 후
 그림 9. 100°C, $4.0 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ 의 전류 밀도에서 시간에 따른 저항 변화

4. Conclusion

SnAg₃Cu₀₇와 공정 조성의 SnPb 솔더를 선형 시편의 형태로 EM 특성 평가를 하였다.

SnAgCu의 경우 힐록은 주로 양극 편에 발생하였고 $4.6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ 의 같은 전류 밀도의 조건 아래에서 100°C, 110°C 두 온도에서 실험한 시편의 초기 저항 변화율의 시간에 대한 기울기로부터 계산한 SnAgCu의 EM 활성화 에너지는 1.04eV 이었다. 이는 공정 조성의 SnPb에 비해 SnAgCu 솔더의 경우 EM에 대한 저항성이 뛰어난 것을 알 수 있었다.

패드의 영향을 배제한 공정 조성의 SnPb의 EM 테스트에서 음극에서는 물질이 고갈되고 양극에서는 Sn-rich grain 힐록이 발생함을 알 수 있었다. EM이 발생하는 중간 과정을 살펴본 결과 물질 이동이 두 단계로 나뉘는 것을 알 수 있었고 그 단계마다 저항 변화가 다른 기울기로 나타나고 물질 이동 현상이 다르게 나타나기 때문이라 사료된다.

References

- [1] International Technology Roadmap for Semiconductors 1999 Edition, Semiconductor Industry Association, 2000.
- [2] J. R. Lloyd, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 32, pp. R109-R118. (1999).
- [3] C. Y. Liu, Chih Chen, and K. N. Tu, J. Appl. Phys., Vol. 88, No. 10, p. 5703 (2000).
- [4] T. Y. Lee, K. N. Tu, S. M. Kuo, and D. R. Frear, J. Appl. Phys., Vol. 89, No. 6, p. 3189 (2001).
- [5] J. -Y. Choi, S. S. Lee, and Y. C. Joo, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 41, p. 7487 (2002).
- [6] S. Brandenburg, and S. Yeh, Proceedings of the Surface Mount International Conference and Exposition, p. 337 (1998).
- [7] T. Y. Lee, K. N. Tu, and D. R. Frear, J. Appl. Phys., Vol. 90, No. 9, p. 4502 (2001).