

공정 조성의 SnPb 솔더에서의 Electromigration 거동

Electromigration Behavior of Eutectic SnPb Solder

최재영, 이상수, 주영창

(Jae-Young Choi, Sang-Su Lee, and Young-Chang Joo)

Abstract

Electromigration characteristics of eutectic SnPb solder were studied using thin stripe-type test structures. Significant changes in the microstructure were observed after electromigration test, in which the temperature and the current density were varied from 80 to 100 °C and from 4.6×10^4 A/cm² to 8.7×10^4 A/cm². While voids or local thinning were found near the cathode end, hillocks were mainly observed near the anode end. From resistance measurements, it was calculated that the activation energy of the eutectic SnPb solder for electromigration was 0.77 eV. The dominant migrating element along the electron flow at 100°C was Pb.

Key Words : Electromigration, SnPb solder, Activation energy

1. 서론

오늘날 집적 소자의 집적화, 소형화는 트랜지스터의 수와 칩에서의 전력 소모량의 급격한 증가를 통해서 이루어지고 있으며[1], 이에 따른 입출력 단자 수의 급격한 증가와 솔더 범프 크기의 감소는 필연적이다. 따라서 각각의 솔더 범프에 흐르는 전류밀도는 급격하게 증가하며 이는 반도체 배선에서 발생하는 electromigration에 의한 신뢰성 문제가 플립칩[2] 솔더 범프에도 발생할 수 있음을 뜻한다[3].

Electromigration은 고밀도의 전류가 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 초래한

다. 이 때 양극(+)방향으로 흐르는 원자의 유량은 운동량과 구동력의 곱으로 표현될 수 있으며 그 식은 다음과 같다.

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

여기에서 C는 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, E는 전기장, ρ는 비저항 그리고 j는 전류 밀도이다 [4]. 이러한 electromigration은 유동 분기점에 hillock 혹은 공공을 생성시키며 주로 양극방향 부분에 hillock을, 음극방향 부분에는 공공을 형성시킨다.

Electromigration은 지금까지 주로 소자의 배선의 신뢰성 평가의 주요한 부문이었다 [5]. 그러나 플립칩 솔더 범프에 흐르는 전류밀도가 증가함에 따라 electromigration 문제는 배선 뿐만 아니라 플립칩에도 발생 가능할 것으로 예견된다. 물론 배선

서울대학교 재료공학부
서울특별시 관악구 신림동 산 56-1,
Fax : 02-883-8197

Corresponding Author : ycjoo@plaza.snu.ac.kr

2002년 7월 31일 접수, 2002년 8월 12일 1차 심사완료,
2002년 9월 24일 최종 심사완료

의 electromigration과 플립칩의 electromigration은 유사하지만 몇 가지의 큰 차이점이 있다.

먼저 전류밀도의 측면에서 보면, 배선과 플립칩 솔더 범프에 흐르는 전류밀도 수준은 각각 10^6 A/cm², 10^4 A/cm²로 배선에 큰 전류밀도가 흐른다 [3,6]. 그러나 솔더 물질은 배선 물질에 비해 상대적으로 매우 낮은 용융점을 가지므로 플립칩의 작동 온도에서 솔더 물질은 높은 확산도를 가지게 된다. 따라서 솔더 물질에서 역시 electromigration 문제가 발생할 것으로 예견된다. 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 electromigration은 각각의 원소에 대한 확산도의 차이와 상호 작용 등에도 영향을 받는다.

본 실험에서는 공정 조성을 가지는 SnPb에서의 electromigration 거동을 살펴보았다. 본 연구에서는 플립칩 형태의 시편이 아닌 선형의 시편을 통하여 연구하였는데, 이는 비록 선형의 형태가 일반적인 플립칩 형태와 완전히 상이하지만, 선형의 형태를 통해서 공정 조성의 SnPb의 electromigration 물성값을 쉽게 얻을 수 있을 뿐만 아니라 joule 열의 발생과 전류밀도를 일정하게 할 수 있다는 장점을 가질 뿐 만 아니라 미세구조 변화양상과, 확산종의 분석도 용이하기 때문이다.

2. 실험

그림 1은 electromigration 실험에 사용되는 시편의 SEM(Scanning Electron Microscope) 이미지이며 자세한 시편 제작 과정은 그림 2에 명시되어 있다. 먼저 두께가 500 Å, 4500 Å인 Cr과 Cu 박막을 Si 웨이퍼에 thermal evaporator로 증착 후 사진 공정과 질산 에칭 공정을 통해 폭 100 μ m 길이 1000 μ m의 Cu 선을 제조하였다. 그리고 Cu 선 위에 resin flux와 크립 솔더를 바른 후 190°C 에서 10초간 시편을 reflow 후 사포와 입자의 크기가 0.06 μ m 인 SiO₂ 서스펜션과 연마천으로 시편을 갈아 reflow된 솔더의 두께를 줄였다. 결과적으로 그림 2에서 나타난 것처럼 시편은 그 두께가 500 Å, 4500 Å, 0.5 μ m~3.5 μ m 인 Cr/Cu/SnPb 층으로 구성된다.

다음으로 시편을 80°C, 90°C, 100°C 온도의 hot plate 위에 놓고, 2시간 동안 각 온도에서 열처리를

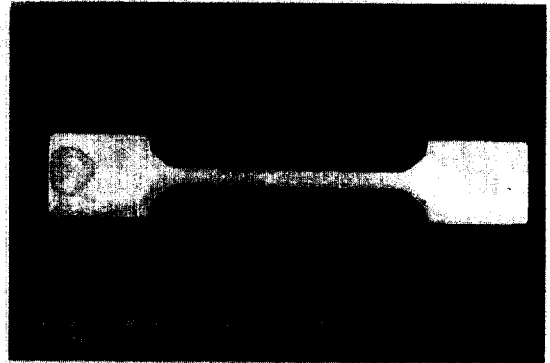


그림 1. Electromigration 시편의 SEM 이미지.
Fig. 1. SEM image of the electromigration specimen.

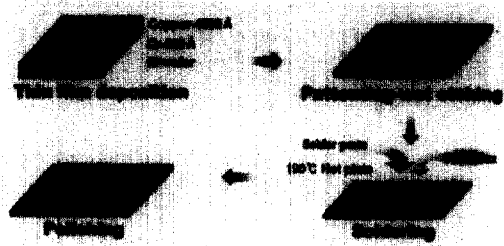


그림 2. 시편 제작 과정.
Fig. 2. Schematic fabrication process of the sample.

한 후 탐침으로 시편에 전류를 흘리며 시편의 저항을 측정하였다. 이 때 모든 전류가 SnPb층 뿐 아니라 아래의 Cr과 Cu층을 통하여서도 전류가 흐르기 때문에 각층의 물질의 비저항과 두께를 고려한 저항의 병렬 모델을 통해 실제 공정 조성의 SnPb 층으로 흐르는 전류의 크기를 예측하였다.

그리고 electromigration 실험이 끝난 후 시편의 미세 구조 변화와 조성변화를 SEM(JEOL ; JSM-5600), EDS (Energy Dispersive Spectrometer), EDX (Energy Dispersive X-ray) Mapping으로 관찰하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 미세 구조 변화 양상

그림 3은 electromigration 실험 전후의 선형 시

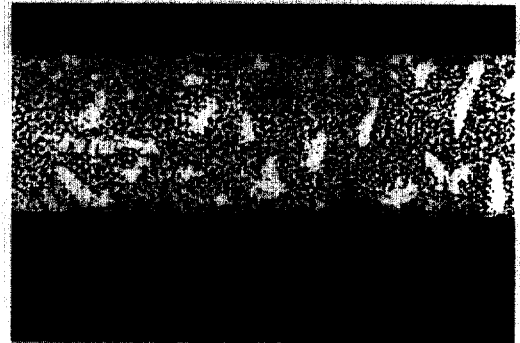
편들을 BSE(Back Scattered Electron) mode로 관측한 SEM 사진이다. 사진의 밝은 영역은 Pb-rich 영역이며, 어두운 부분은 Sn-rich 영역이다. 그림 3-(a)는 아무런 처리를 받지 않은 시편의 SEM 이미지이며 3-(b)는 4일간 100°C 온도에서의 열처리를 한 시편의 사진이고, 3-(c)는 100°C 온도에서 4일간 4.6×10^4 A/cm²의 전류 밀도를 가해준 시편의 사진이다. 3-(a)와 3-(b)에 비해 3-(c)는 미세 구조에 있어 큰 차이를 보인다.

일반적으로 공정 조성의 SnPb의 미세 구조는 reflow 후 냉각 속도에 의해 크게 2가지의 미세 구조를 가지는 것으로 보고되었다. 서냉의 경우에는 공정 조성의 미세 구조는 Sn-rich 상과 Pb-rich 상이 번갈아 가면서 층을 이루는 라멜라 구조의 형태를 띄며 급냉의 경우에는 Sn이 기지상으로, 그리고 Pb상이 그 기지상에 미세한 결정립으로 이루어지는 형태의 구조를 띤다 [7].

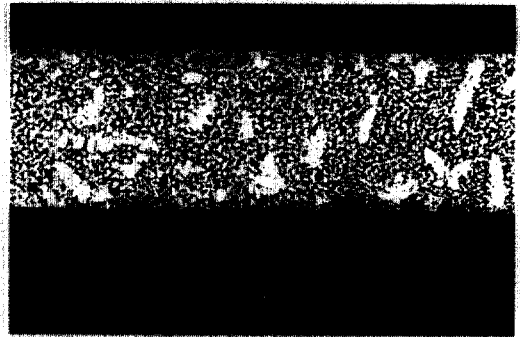
본 실험에 사용된 electromigration 실험 전의 선형 시편에서 탐침이 꽂히는 패드 부분은 주로 라멜라 구조를, 100 μ m 선폭의 배선 부위에서는 주로 미세 결정립 구조를 띄고 있었는데 그 이유는 위에서 언급한 reflow후의 냉각 속도 차이로 인해 발생된 것으로 예상된다. 그리고 선의 내부의 흰색의 미세 결정립은 그림 3-(b)에서 알 수 있듯이 시간이 지나면 침상 형태로 성장하게 된다. 그러나 4일간 100°C 열처리만으로는 3-(c)의 전류에 의한 미세 구조의 변화와 같은 심각한 미세 구조의 변화는 발견되지 않았다. 이와 달리 3-(c) 그림에서처럼 100°C 온도의 hot plate 위에서 4일간 4.6×10^4 A/cm²의 전류 밀도를 가해준 시편에서는 주로 양극 끝에는 힐록이 생성되지만 음극 끝에는 공공이 아닌 분지형태의 국부적인 고갈이나 전반적인 두께의 감소하는 것과 같은 심각한 미세 구조의 변화가 관측되었다. 그림 4는 5일간 100°C에서 8.7×10^4 A/cm²의 조건에서 5일간 test한 후의 사진이다. 그림 3과 비교하면 주로 양극 끝에 힐록이 생성되었으며 음극 끝에서는 공공이 형성되었다.

3.2 Electromigration에 의한 저항 변화

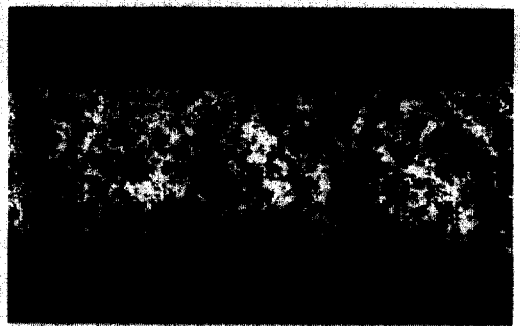
그림 5-(a)는 80°C, 90°C, 100°C의 온도에서 4.6×10^4 A/cm²의 같은 전류밀도 아래에 놓여진 시편들의 저항 증가율을 나타낸 그래프이다. 시간에 대한 저항 증가율은 초기에는 급격하게 증가하지만 특정시간이 지난 후에는 점점 감소하여 포화되는 경향을 보인다. 그리고 초기 직선 형태의 저항 증가율의 기울기는 80°C, 90°C, 100°C의 온도에서 각



(a)



(b)



(c)

그림 3. 선형 시편의 BSE 이미지 (a) 실험 전의 시편 (b) 96시간 동안 100°C의 열처리를 한 시편 (c) 96시간 동안 100°C 온도에서 4.6×10^4 A/cm²의 전류밀도를 가한 시편.

Fig. 3. BSE micrograph of the line (a) before test (b) after 96 hours, at 100°C (c) after 96 hours, at 100°C under the current density of 4.6×10^4 A/cm².

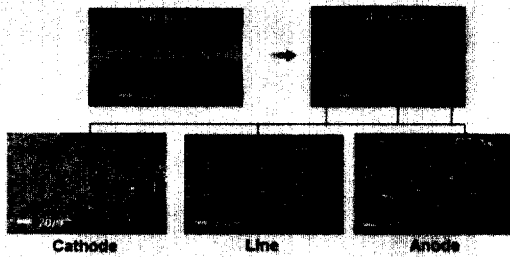


그림 4. 120시간 동안 100°C 온도에서의 $8.7 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 의 전류밀도를 가한 시편.

Fig. 4. SE micrograph of the line after 120hours, at 100°C under the current density of $8.7 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$.

각 0.30 %/hour, 0.57 %/hour, 1.10 % /hour이다. 세 가지 조건 모두에서 솔더 물질의 급격한 미세 구조 변화는 실험 초기에 현미경으로 관찰되었다. 그러나 저항 증가율이 둔화되는 경향을 보이는 시점에는 이미 솔더 물질이 양극으로 이동하여 많은 부분에서 고갈된 영역이 드러났으며, 시간이 지나더라도 더 이상의 급격한 미세 구조 변화는 관찰되지 않았다.

그림 5(b)는 100°C의 같은 온도에서 $4.6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 와 $8.7 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 의 다른 전류 밀도 아래에 놓인 시편들의 저항 증가율을 나타낸 그래프이며 각 초기 저항 증가율의 시간에 대한 기울기는 $4.6 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 와 $8.7 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 의 전류 밀도의 경우에 대해서 각각 1.10 %/hour, 2.30 %/hour 이다. 그리고 전류를 흘리지 않고 온도만 가해준 시편의 경우에는 초기 몇 시간을 제외하면 저항의 변화가 거의 없었다. 모든 electromigration 실험은 각 실험 온도에서 2시간 열처리 후 저항이 변하지 않는 시점에서 실시하였으므로 시편에서 관찰된 저항의 변화는 주로 electromigration에 의한 것을 알 수 있었다.

이 때 초기의 저항 증가가 electromigration에 의한 솔더 물질의 이동에 의해서만 일어난다고 가정하면 그림 5의 초기 저항 변화율(기울기)은 식(1)에서 나타난 electromigration flux와 비례할 것이다. 같은 온도, 두가지 다른 전류밀도에서 실험한 그림 5(b)의 각각의 경우에서 기울기 변화를 비교하면 전류밀도가 1.9배로 되었을 때 기울기의 변화

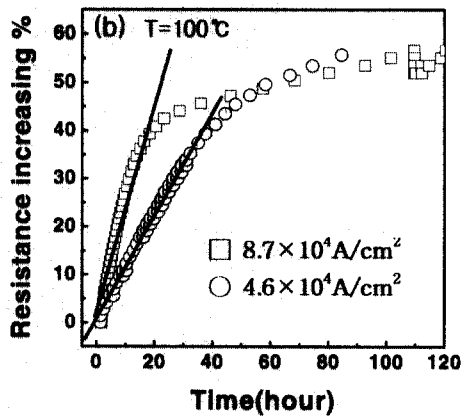
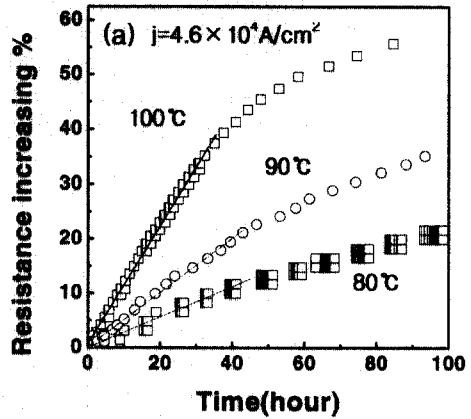


그림 5. 시간에 대한 저항 변화율의 변화 그래프 (a) 같은 전류 밀도일 때 (b) 같은 온도일 때.

Fig. 5. Time-resistance curves under thermal and current stressing (a) under constant current density (b) under constant temperature.

는 2.1배로 증가하므로 본 가정이 성립함을 알 수 있다. 이 식을 같은 전류 밀도가 같으나 온도가 다른 조건을 적용하면 식(2)의 관계를 얻을 수 있으며 이로부터 electromigration에 필요한 활성화 에너지를 계산할 수 있다.

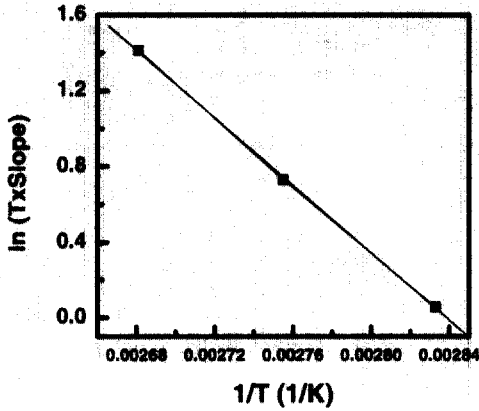


그림 6. 공정 조성 SnPb의 electromigration 활성화 에너지 값의 계산.

Fig. 6. Calculation of the activation energy for electromigration of the eutectic SnPb solder.

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

식 (2) 와 그림 6 에서 공정 조성의 SnPb의 electromigration 활성화 에너지 값은 0.77 eV로 계산되며, 이 값은 S.Brandenbrug[8]가 직접 flip chip solder ball을 이용하여 구해낸 평균 파괴 시간(MTTF)으로부터 얻어진 0.8 eV의 공정 조성의 SnPb 활성화 에너지와 유사한 값을 가진다. 이는 본 실험에서와 같이 간단한 구조의 실험을 통해서도 실제 flip chip에서 생기는 electromigration의 활성화 에너지 값을 얻을 수 있다는 것을 보여준다.

3.3 주요 확산 원소

Electromigration은 전기장의 존재할 때 전자에서 원자로 운동량이 전달되어 이로 인해 원자가 양극방향으로 확산하는 현상이다. 단원소로 구성된 계에서의 electromigration 양상과는 달리 이종 혹은 그 이상의 원소들로 구성되어진 계에서의 electromigration에 의한 확산 양상은 더욱 많은 변수에 의해 제어된다. 그 중 온도에 따라 주요한 확산 원소가 달라질 수 있다는 사실은 단원소계의 electromigration과 가장 큰 차이점을 보이는 부분

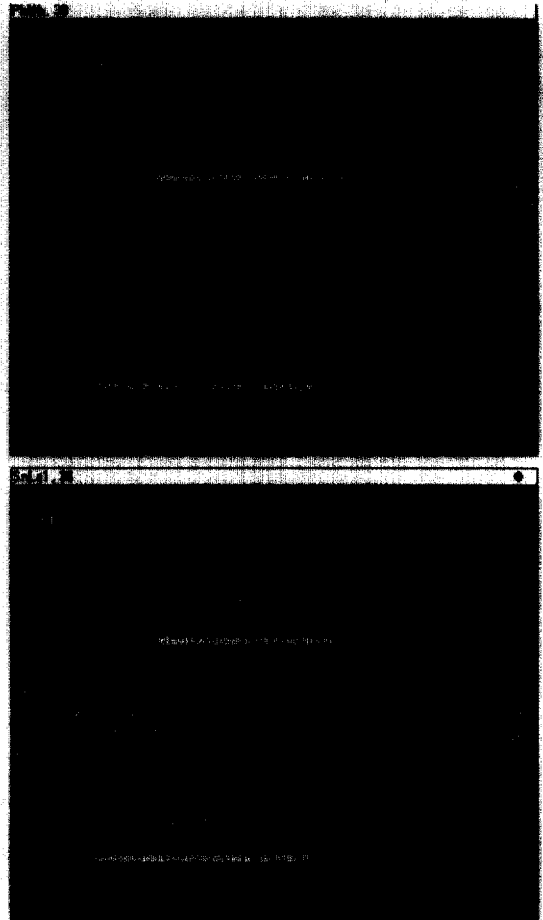


그림 7. 96시간 동안 100°C 온도에서의 열처리 & $4.6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ 의 전류밀도를 가한 시편의 EDX mapping (a) Pb (b) Sn.

Fig. 7. EDX maps of (a) Pb and (b) Sn atoms in the specimen tested at 100°C under the current density of $4.6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ for 96hours.

이다. 물론 공정 조성의 SnPb의 경우에서도 Sn과 Pb 각각의 Z^* 값과 특정 온도에서의 각각의 원소의 확산도가 다르므로 온도에 따라 주요한 확산 원소가 달라진다고 보고되고 있다. 따라서 특정 온도에서 주요 확산 원소를 알아내는 것은 공정 조성의 SnPb의 경우뿐만 아니라 이종 혹은 그 이상으로 이루어진 계에서의 electromigration에 의한 파괴 기구를 이해하는 중요한 지표가 될 것이다.

공정 조성의 SnPb에서 electromigration에 의한

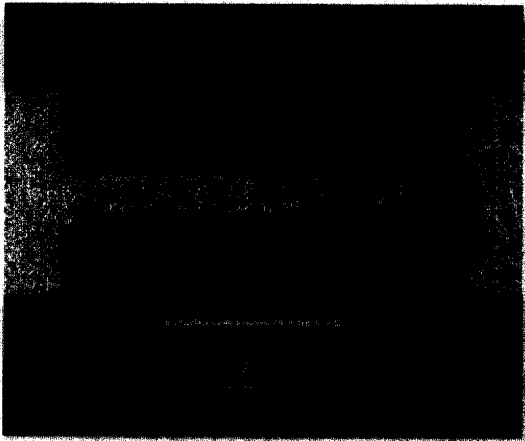


그림 8. 96시간동안 100°C온도에서 $4.6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ 의 전류밀도를 가한 시편의 BSE 이미지.
 Fig. 8. BSE micrograph of the specimen at 100°C under the current density of $4.6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ for 96hours.

주요 확산 원소를 알아내기 위해서 양극과 음극을 연결하는 선의 각각의 부분에서 BSE, EDX mapping 분석을 하였다. 그리고 그 상대적인 분포량을 비교하기 위하여 EDS(Energy Dispersive Spectrometer) 분석을 실시하였다. 100°C에서 전류밀도가 $4.6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ 인 조건에서 4일간 실험한 시편의 EDX mapping 결과는 그림 7에 나타나 있다. 그림 7-(a)에서 알 수 있듯이 Pb는 음극 편보다 양극 편에 더 집중적으로 분포한다. BSE 검출기로 관찰한 시편의 이미지인 그림 8의 경우에서도 양극 편에 주로 Pb-rich 영역인 흰 부분으로 이루어져 있으며, 음극 편에 Sn-rich 영역인 검은 부분으로 이루어진 사실을 알 수 있다. 그리고 100°C에서 전류밀도가 $8.7 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ 인 조건에서 4일간 실험된 시편에서의 상대적인 정량분석 결과인 그림 9에서도 역시 Pb가 음극 편보다 양극 편에 더 많이 존재한다.

이 모든 결과들을 종합하면 Pb가 100°C의 electromigration 실험에서 주요 확산 원소임을 나타낸다. 물론 시편에서 원자들의 소스와 싱크로 작용할 수 있는 패드 영역이 선과 연결되어 있지만, 주요한 확산 경향에는 큰 영향을 주지 않을 것으로 보인다. Tu et al.은 120°C 플립칩 형태의 시편의 electromigration 결과에서 주요한 확산 원소가 Pb로 보고하였고 [9], 선형 형태의 상은 실험에서는 Sn이 주로 확산한다고 보고하였다 [10]. 본

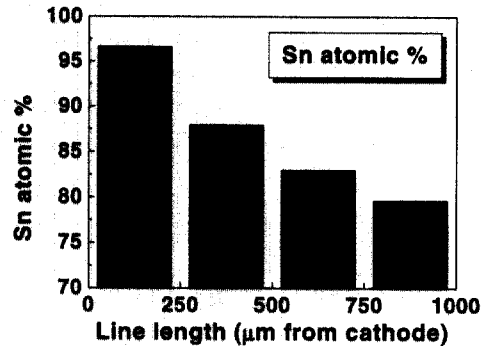
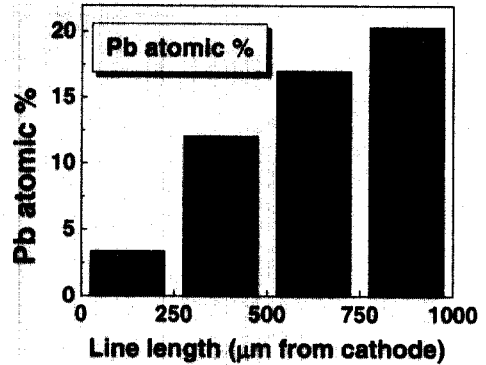


그림 9. 120시간 동안 100°C온도에서 $8.7 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ 의 전류밀도를 가한 시편의 EDS 결과.
 Fig. 9. EDS analysis of the specimen at 100°C under the current density of $4.6 \times 10^4 \text{A/cm}^2$ for 120 hours.

실험 결과는 100°C의 경우 Sn 대신 Pb가 주로 확산함을 보여주고 있다.

4. 결 론

공정 조성의 SnPb 솔더를 선형 시편의 형태로 electromigration 특성 평가를 하였다.

hillock은 주로 양극 편에 그리고 공공은 주로 음극 편에 생성되었다. 그리고 같은 시간동안 전류밀도를 줄인 조건에서 실험한 결과 시편의 양극에는 hillock이 생성되었지만 음극 편에는 공공이 아닌 국부적인 분지형으로 고갈된 부분과 전반적인 두께의 감소 현상이 관찰되었다. 그리고 4.6×10^4

A/cm² 의 같은 전류 밀도의 조건 아래에서 80°C, 90°C, 100°C 세 온도에서 실험한 시편의 초기 저항 변화율의 시간에 대한 기울기로부터 계산한 SnPb의 electromigration 활성화 에너지는 0.77eV 이었으며 100°C electromigration 실험에서 우세한 확산종은 Pb이다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단 지원 전자패키지 재료 연구 센터의 지원과 2002년도 서울대학교 반도체 공동 연구소의 공동 시설 이용 지원 프로그램 (Share-ISRC)의 지원을 받아 연구되었음.

참고 문헌

- [1] 박기천, 오용호, 임성우, 고춘수, 이재철, "0.12 μ m 설계 규칙을 갖는 DRAM 셀 주요 레이어의 OPC 및 SPM", 전기전자재료학회논문지, 14권, 1호, p. 6, 2001.
- [2] 김경섭, 장의구, 신영의, "와이어 본딩시 본딩 패드 리프트 불량에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 11권, 12호, p. 1079, 1998.
- [3] International Technology Roadmap for Semiconductors 1999 Edition, Semiconductor Industry Association, 2000.
- [4] J. R. Lloyd, "Electromigration in integrated circuit conductors", J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 32, p. R109, 1999.
- [5] 이은주, 황용림, 오재용, 김정식, "MOCVD 방법으로 증착된 TaN와 무전해도금된 Cu 박막 계면의 열적 안정성 연구" 전기전자재료학회 논문지, 11권, 12호, p. 1091, 1998.
- [6] C. Y. Liu, Chih Chen, and K. N. Tu, "Electromigration in Sn-Pb solder strips as a function of alloy composition", J. Appl. Phys., Vol. 88, No. 10, p. 5703, 2000.
- [7] J. W. Morris, Jr., "The microstructure and properties of solder joints", J. Korean. Phys. Soc., Vol. 35, p. S335, 1999.
- [8] S. Brandenburg and S. Yeh, Proceedings of the Surface Mount International Conference and Exposition, p. 337, 1998.
- [9] T. Y. Lee, K. N. Tu, S. M. Kuo, and D. R. Frear, "Electromigration of eutectic SnPb

- interconnects for flip chip technology", J. Appl. Phys., Vol. 89, No. 6, p. 3189, 2001.
- [10] C. Y. Liu, Chih Chen, C. N. Liao, and K. N. Tu, "Microstructure-electromigration correlation in a thin stripe of eutectic SnPb solder stressed between Cu electrodes" Appl. Phys. Lett., Vol. 75, No. 1, p. 58, 1999.