

MCP를 위한 Cu/Sn/Cu 범프의 계면미세구조가 신뢰성에 미치는 영향 Effect of Interfacial Microstructures on Reliability of Cu/Sn/Cu Bump for Multi-Chip Package

정명혁, 김재원, 곽병현, *박영배

Myeong-Hyeok Jeong, Jae-Won Kim, Byung-Hyun Kwak, and *Young-Bae Park
(ybpark@andong.ac.kr)

안동대학교 신소재공학부 청정소재기술연구센터

Key words : Multi-chip package, Cu/Sn/Cu bump, Intermetallic compound, electromigration

1. 서론

최근 전자제품의 소형화 및 고성능화의 추세에 따라 칩 제조 분야에서는 칩 자체의 미세화, 직접화가 진행되고 있으며 패키지 분야에서는 새로운 패키지 기술과 실장방법이 개발되고 있다.[1] 특히, Through Silicon Via (TSV)를 이용하여 여러 가지 기능의 칩을 3차원으로 적층 하는 Multi-chip package (MCP) 기술은 기존의 패키지에 비해 부피와 무게를 최소화 할 수 있고, 고성능 및 전력소모를 줄일 수 있는 장점이 있을 뿐만 아니라 고밀도와 고기능화 역시 이룰 수 있어 최근 활발히 연구 되고 있다. 3차원 MCP 구조에서 칩과 칩 또는 칩과 기관의 연결에 기존 플립칩 기술에 널리 이용 돼왔던 솔더범프가 활용 될 예정이었다. 하지만, 솔더범프는 리플로우 시 표면에너지를 최소화하기 위해서 구형의 형태를 가지게 되고 패드 피치(pitch)가 감소함에 따라 인접한 범프 간의 접합(bump bridging)을 유발하기 때문에 100 μm이하의 미세 피치를 적용하는데 한계가 있다. 또한 미세 패드 피치의 적용으로 인한 솔더범프의 직경 및 금속하부층(under bump metallurgy, UBM) 단면적의 감소는 패키지 내 전류밀도의 증가를 야기한다. 이러한 전류밀도의 증가는 electromigration에 의한 전기적 단락을 일으킬 수 있다.[2] 따라서 위와 같은 문제점들을 해결하기 위해서는 새로운 형태의 범프 구조가 필요하다.

특히, Cu pillar/솔더 구조의 범프는 두꺼운 Cu pillar 형태와 기존 솔더범프에 비해 상대적으로 적은 솔더의 양 때문에 인접한 범프 간의 접합이 발생하지 않아 미세 피치를 적용할 수 있을 뿐만 아니라 좋은 열·기계적 신뢰성을 가지므로써 솔더범프에 대한 대안으로 주목을 받고 있다. 또한 전기 전도도가 우수한 Cu pillar를 사용하기 때문에 높은 전류의 운반이 가능하여 electromigration에 의한 전기적 신뢰성 저하 문제도 해결 할 수 있다. 따라서 MCP 구조에서는 이러한 Cu pillar/솔더구조를 활용한 Cu/Solder/Cu 범프 구조가 칩과 칩의 연결에 제안되었다. 하지만 기존 솔더범프에 비해 상대적으로 적은 양의 솔더로 인하여 접합부 계면에 취성 특성이 있는 조대한 금속간화합물 (intermetallic compound) 및 커켄달보이드 (Kirkendall void)를 형성시켜 접합부의 전기적 및 기계적 신뢰성을 저하시킨다. 이처럼 Cu/Solder/Cu 범프 구조에서의 금속간화합물 형성 및 성장은 접합부 신뢰성에 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다. 현재 Cu/Solder/Cu 범프 구조에서의 금속간화합물의 형성 및 성장거동에 대한 연구는 기존 솔더범프 구조에서의 금속간화합물의 형성 및 성장거동에 대한 연구에 비해 많이 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 Cu/Sn/Cu 범프 구조에서 열처리 및 electromigration 실험을 실시하여 온도 및 전류인가에 따른 Cu/Sn/Cu 범프 내 금속간화합물의 성장거동을 비교 분석하였다.

2. 실험방법

열처리 및 electromigration에 따른 Cu/Sn/Cu 범프 내의 금속간화합물 형성과 성장거동을 실시간으로 연구하였다.

본 연구에 사용된 Cu/Sn/Cu 범프 구조는 다음과 같다. Si로 구성되어 있는 상부 칩의 Al 배선 위에 전기도금을 통하여 패드에 약 40 μm 두께의 Cu pillar를 형성하였고, 하부 칩도 동일 공정으로 형성하였다. 상부 칩과 하부 기관은 전기도금 된 약 1 μm 두께의 Sn 솔더를 사용하여 플립칩 본딩(bonding)하였고 접합후 Sn 솔더의 전체 두께는 약 2 μm였다. 열처리 및 electromigration에 따른 금속간화합물의 성장을 실시간으로 관찰하기 위해 2개의 시편을 #2000의 연마지와 1~3 μm의 연마천을 이용하여 단면 폴리싱한 후, 각각 125℃와 125℃, 3.5×10⁴ A/cm²의 조건에서 실험을 실시하였다. 열처리 및 electromigration에 따른 금속간화합물 형성과 성장은 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)의 BSE(back scattered electron)사진과 EDS(energy dispersive x-ray spectroscopy)를 이용하여 분석하였고, image analyzer를 이용하여 정량화한 결과를 온도 및 전류인가 시간에 따른 금속간화합물의 두께변화를 통해 열처리 및 electromigration에 따른 금속간화합물의 성장거동을 평가하였다.

3. 결과 및 토의

온도 및 전류인가에 따른 Cu/Sn/Cu 범프에서의 금속간화합물 형성과 성장거동을 관찰하기 위해 각각 125℃와 125℃, 3.5×10⁴ A/cm²의 조건에서 일정한 시간동안 열처리 및 electromigration 실험을 실시하였다. Fig. 1(a)에 리플로우 직후의 미세구조를 나타내었다. SEM과 EDS 분석 결과 초기 리플로우 후 두 시편은 Cu/Sn/Cu 범프 계면에서 Cu₆Sn₅와 Cu₃Sn이 관찰되었고, Sn상이 아일랜드 형으로 형성되어 있다. 이것은 Cu/Sn/Cu 구조에서 Sn층이 워낙 얇기 때문에 리플로우 공정 중 액상 솔더 내로 Sn-Cu 금속간화합물이 생성 및 성장하고 좁은 구간 내에서 맞게 되었기 때문이다. Sn내 미세 공공(void)이 약간 존재하였는데, 이러한 Sn상내 미세 공공의 형성은 플립칩 본딩 시 발생한 것으로 판단된다. Fig. 1(b)와 (c)에 온도 및 전류인가 시간이 경과함에 따라 Cu₃Sn이 Cu와 Cu₆Sn₅계면에서 급격히 성장하는데 반해, Cu₆Sn₅은 감소하는 경향을 보인다. 열처리의 경우 60시간 경과 까지 가운데 Sn상이 관찰되었지만, electromigration의 경우 40시간 이후부터 Sn상을 관찰할 수 없었다. 이를 통해 Cu와 Sn의 반응속도는 온도만 인가할 때 보다 온도와 전류를 함께 인가할 때 더 빠르다는 것을 알 수 있었다. 이는 electron wind force가 Cu와 Sn의 반응에 영향을 미쳤기 때문이라고 판단된다.[3] 또한 초기 Sn상내 존재하였던 미세 공공 역시 온도 및 전류인가 시간이 경과할수록 기존에 형성되어 있던 공공을 따라 진전하였다. 이는 Sn이 Cu와 반응하면서 금속간화합물을 형성하여 부피가 수축했기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 2은 온도 및 전류인가 시간에 따른 전체(Cu₆Sn₅ + Cu₃Sn)금속간화합물의 성장거동을 나타낸 그래프이다. 열처리의 경우 Fig. 2(a)와 같이 Cu₃Sn 금속간화합물의 성장거동은 열처리 시간이 경과함에 따라 시간의 제곱근에 직선 형태로 증가하는 경향을 보였다. 이는 Cu와 Sn사이의 금속간화합물 성장이 확산에 의해 지배되어졌기 때문이라 판단

된다. 하지만 60 시간이 지난 후에 Cu_3Sn 금속간화합물의 성장거동 기울기는 변하였다. 반면 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 electromigration의 경우 Cu_3Sn 금속간화합물의 성장거동은 전류인가 시간이 경과함에 따라 시간에 직선적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 Cu와 Sn 사이의 금속간화합물 성장이 반응에 의해 지배되어졌기 때문이라 판단된다. 하지만 40 시간이 지난 후에는 열처리의 경우와 마찬가지로 Cu_3Sn 금속간화합물의 성장거동 기울기는 변하였다.

열처리 및 electromigration 실험 중 위와 같이 특정한 시간에서 Cu_3Sn 금속간화합물 성장거동의 변화가 일어나는 원인을 파악하기 위해 Fig. 2(a)와 (b)에서 Cu_6Sn_5 와 Sn의 성장거동에 대하여 분석하였다. 열처리와 electromigration 조건 모두에서 Cu_6Sn_5 와 Sn은 감소하는 경향을 보인다. 열처리의 경우 초기 리플로우 때와 비교하여 60 시간이 경과된 후에는 거의 Sn 상은 관찰되지 않았고 계면에 Cu_6Sn_5 와 Cu_3Sn 만이 관찰되었다. electromigration의 경우 역시 40 시간이 경과한 후에 Sn 상이 관찰되지 않았고 Cu_6Sn_5 와 Cu_3Sn 만이 관찰되었다. 이를 통해 Cu_6Sn_5 와 Cu_3Sn 금속간화합물의 성장거동 변화는 Cu/Sn/Cu 범프 내 Sn이 Cu와 반응하여 완전히 소모되는 시점부터 더 이상의 금속간화합물 성장은 발생하지 않고, Cu_6Sn_5 가 Cu pillar에서 무한히 공급된 Cu 원자와 반응하여 Cu_3Sn 으로 변하는 상변태만 일어나기 때문인 것으로 판단된다.

Cu/Sn/Cu 범프 구조에서 Cu_3Sn 상은 계속 성장하는데 반해 Cu_6Sn_5 와 Sn은 감소하는 거동을 보인다. Sn의 소모는 Cu의 확산에 의해 금속간화합물의 생성에 의한 것으로 이해할 수 있다. 반면, Cu_3Sn 의 성장은 Cu_6Sn_5 내로 Cu의 확산이 되어와 상전이가 일어남으로써 나타나게 된다. 보통의 경우 Sn의 소모와 더불어 Cu_3Sn 과 Cu_6Sn_5 은 같이 성장하는 거동을 보이는데, [3] 본 실험에서는 감소하는 경향을 보인다. 이것은 Sn 양의 차이로 인한 현상으로 초기 리플로우공정에서 Sn내로 대부분의 금속간화합물이 생성이 되었기 때문에 Sn-Cu의 직접적이 반응보다는 Cu_6Sn_5 에서 Cu_3Sn 로의 상전이 반응이 우세하였기 때문이라 판단된다.

Cu/Sn/Cu 범프 내 Sn의 완전한 소모로 인한 금속간화합물 성장거동의 변화는 electromigration의 경우가 열처리의 경우보다 훨씬 빠르게 나타났다. 이는 electron wind force가 금속간화합물의 생성을 촉진하여 Cu/Sn/Cu 범프 내 Sn이 완전한 소모되는 시간에 영향을 미쳤기 때문이라 판단된다.

4. 결론

열처리 및 electromigration에 따른 Cu/Sn/Cu 범프 내의 금속간화합물의 성장거동을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다. Cu_3Sn 금속간화합물의 성장거동은 열처리의 경우 시간이 경과함에 따라 시간의 제곱근에 직선 형태로 증가하였고, electromigration의 경우 전류인가 시간이 경과함에 따라 시간에 직선적으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 Cu와 Sn 사이의 금속간화합물 성장이 열처리와 확산, electromigration는 반응에 의해 지배되어졌기 때문이라 판단된다. 또한 Cu_3Sn 금속간화합물의 성장거동은 Cu/Sn/Cu 범프 내 Sn이 모두 소모될 때 변화하였고, electromigration의 경우가 열처리의 경우보다 훨씬 빠르게 나타났다. Sn이 얇은 구조에서 Cu_6Sn_5 에서 Cu_3Sn 로의 상전이 반응이 우세하게 이루어졌다.

후기

본 연구는 지식경제부, 산업기술연구회의 협동연구사업 일환인 "차세대 반도체 MCP 핵심기술 개발 사업"의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. K. N. Chiang, C. C. Lee, C. C. Lee, and K. M. Chen, "Current crowding-induced electromigration in SnAgCu microbumps", *Appl. Phys. Lett.* **88**, 072102 (2006).
2. M. Ding, G. Wang, B. Chao, P. S. Ho, P. Su and T. Uehling, "Effect of contact metallization on electromigration reliability of Pb-free solder joints", *J. Appl. Phys.* **99**, 094906 (2006).
3. G. T. Lim, B. J. Kim, K. W. Lee, M. J. Lee, Y. C. Joo, and Y. B. Park, "Study on the Intermetallic Compound Growth and Interfacial Adhesion Energy of Cu Pillar Bump", *J. Microelectron. Packag. Soc.*, **15**(4), 17-24 (2008).

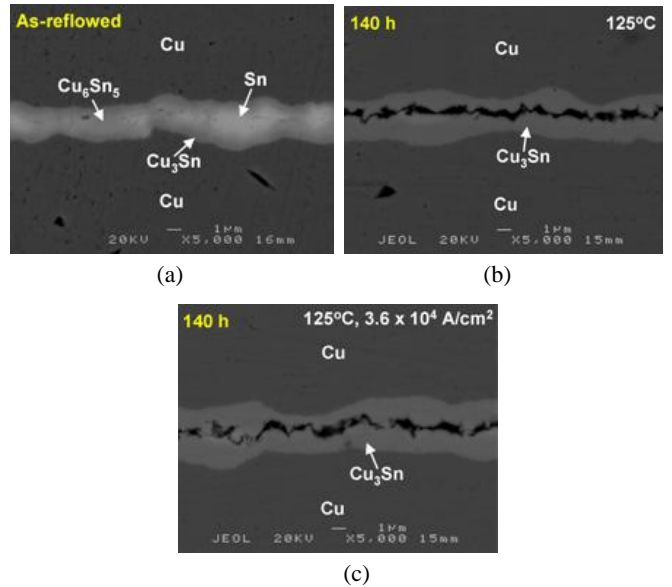


Fig. 1 BSE micrographs of the cross-sectioned Cu/Sn/Cu bump; (a) as-reflowed, (b) 125°C, and (c) 125°C, 3.6×10^4 A/cm²

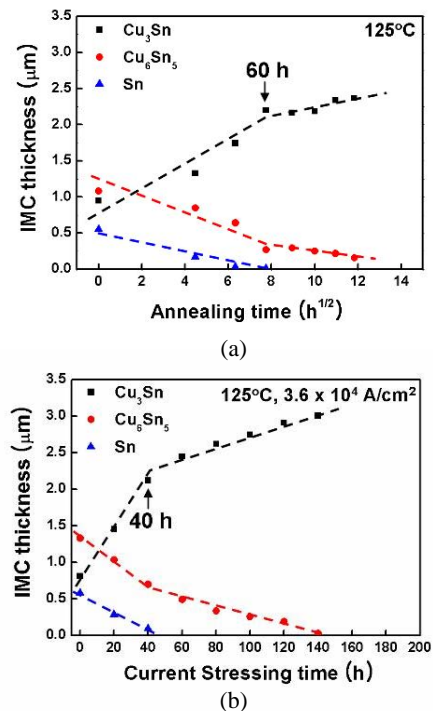


Fig. 2 Intermetallic compound layers thickness during annealing and current stressing; (a) 125°C and (b) 125°C, 3.6×10^4 A/cm²