

NCF Trap이 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프의 Electromigration 특성에 미치는 영향 분석

류효동¹ · 이병록² · 김준범³ · 박영배^{1,†}

¹안동대학교 신소재공학부 청정에너지소재기술연구센터, ²㈜스태츠칩팩코리아, ³㈜하나마이크론

Effect of NCF Trap on Electromigration Characteristics of Cu/Ni/Sn-Ag Microbumps

Hyodong Ryu¹, Byeong-Rok Lee², Jun-beom Kim³, and Young-Bae Park^{1,†}

¹School of Materials Science and Engineering, Andong National University, 1375 Gyeongdong-ro, Andong-si, Gyeongsangbuk-do 36729, Korea

²STATS ChipPAC Korea Ltd., 191, Jayumyeok-ro, Jung-gu, Incheon 22379, Korea

³HANA Micron Inc., 35, Pangyo-ro 255 beon-gil, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do 13486, Korea

(Received November 25, 2018; Corrected December 20, 2018; Accepted December 21, 2018)

초 록: Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프 접합 공정후 Ni/Sn-Ag접합계면에 잔류한 비전도성 필름(non-conductive film, NCF) trap 형성이 전기적 신뢰성에 미치는 영향을 분석하기 위해 온도 150°C, 전류밀도 1.5×10^5 A/cm² 조건에서 electromigration (EM) 신뢰성 실험을 진행하였다. EM 신뢰성 실험 결과, NCF trap이 거의 없는 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프가 NCF trap 이 형성된 미세범프 보다 약 8배 긴 EM 수명을 보여주고 있다. 저항 변화 및 손상계면에 대한 미세구조 분석결과, Ni/Sn-Ag접합계면에 공정 이슈에 의해 형성된 NCF trap이 Ni-Sn 금속간화합물/Sn-Ag솔더계면에 보이드를 유발하여 EM 원자 확산을 방해하기 때문에 빠른 보이드 성장에 의한 전기적 손상이 일찍 발생하는 것으로 판단된다.

Abstract: The electromigration (EM) tests were performed at 150°C with 1.5×10^5 A/cm² conditions in order to investigate the effect of non-conductive film (NCF) trap on the electrical reliability of Cu/Ni/Sn-Ag microbumps. The EM failure time of Cu/Ni/Sn-Ag microbump with NCF trap was around 8 times shorter than Cu/Ni/Sn-Ag microbump without NCF trap. From systematic analysis on the electrical resistance and failed interfaces, the trapped NCF-induced voids at the Sn-Ag/Ni-Sn intermetallic compound interface lead to faster EM void growth and earlier open failure.

Keywords: non-conductive film, underfill, Cu/Ni/Sn-Ag microbump, intermetallic compound, electromigration

1. 서 론

전자 부품의 미세화, 경량화, 고성능화, 다기능화가 급속히 진행됨에 따라 전자 패키지는 기본적으로 다핀, 미세 피치화의 방향으로 진행 되고 있다. 따라서 여러 가지 기능의 칩을 통합할 수 있는 3차원 칩 적층기술이 활발히 연구되고 개발되고 있다.^{1,2)} 이러한 상호 연결 기술 중 특히 through silicon via(TSV) 통합 기술은 반도체 칩(chip)과 접속패드 간의 접속 거리가 짧아 신호의 지연과 전력 소비를 크게 줄일 수 있다.³⁾ 이러한 TSV 통합 기술은 미세범프와 TSV로 이루어져 있는데, 미세범프의 직경은 소형화 추세에 따라 약 10~20 μ m로 요구 되고 있다.⁴⁾ 범프 직경의 감소와 함께 범프의 전류밀도는 동일한 전력 수요에 따라 100배 이상으로 증가되며, electromigration

(EM)에 의한 전기적 단락을 발생시킨다.⁵⁻⁹⁾ 또한 미세범프의 직경 및 패드 피치가 감소하는 기술적인 발전과 동시에 솔더를 이용한 접합법의 한계가 나타나게 되었다. 범프의 구조가 미세 피치화 되면서, 범프와 범프 사이에 언더필(underfill)이 제대로 채워지지 않아 보이드가 생기는 현상, 이웃하는 범프에서 솔더가 빠져 나와 서로 맞닿는 현상 등이 발생하게 되었다.¹⁰⁻¹²⁾ 이러한 현상을 방지하기 위하여 접착제를 이용한 접합공정 기술이 발전하게 되었다.

접합공정 기술에 사용되는 접착제는 특성과 전도 방식에 따라 등방성 전도성 접착제(isotropically conductive adhesive), 이방성 전도성 접착제(anisotropically conductive adhesive), 비전도성 접착제(non-conductive adhesive)로 크게 3가지로 나눌 수 있다. 등방성 전도성 접착제는 20~35

[†]Corresponding author
E-mail: ybpark@anu.ac.kr

© 2018, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

volume %의 전도성 입자를 포함하는 접착소재로, 사용되는 전도성 입자로는 금속 필러 혹은 비금속인 탄소나 금속 코팅된 폴리머가 있다. 등방성 전도성 접착제는 모든 접속방향에 대해 전도성을 나타내는데 비해 이방성 전도성 접착제는 5~10 volume %의 전도성 입자를 포함, 수직방향으로는 전도성을, 수평으로는 부도성을 나타내는 재료이다.¹³⁾ 비전도성 접착제는 전도성 입자를 전혀 포함하지 않으며 범프와 패드가 압착 공정에 의해서 접합을 이루도록 한다.¹⁴⁾ 비전도성 접착제 중 비전도성 필름(non-conductive film, NCF)의 경우, 접합 전 금속하부층(under bump metallurgy, UBM)에 도포된 상태에서 솔더와 접합을 하게 되어, 기존 언더필 공정에서 발생하는 범프 사이의 보이드나 접합 시 미세 피치에 의해 솔더가 맞닿는 현상이 사라지게 되었다.¹⁵⁻¹⁷⁾ 하지만 NCF 기술은 패드와 직접 접촉하기 때문에 NCF의 일부가 솔더와 UBM 접합부에 남아 trap을 형성할 수 있다.

선행 연구 결과, 잔류한 비전도성 접착제는 Sn/Cu 범프 구조에서 열사이클 시험 중 팽창되어 범프와 패드 사이에서 저항의 증가를 야기한다고 보고되었다.¹⁸⁾ 또한, 전기도금 직후 플립칩 접합을 진행한 경우보다 추가 리플로우 공정 후 플립칩을 접합하면 잔류 비전도성 접착제의 형성이 억제된다고 보고되었으며, filler를 포함한 비전도성 적용은 잔류 비전도성 접착제의 양을 감소시킨다고 보고되었다.¹⁹⁾ 이처럼 많은 연구 그룹에서는 비전도성 접착제를 이용한 저온 플립칩(flip-chip) 패키지 기술의 개발과, 열충격 사이클과 항온항습 실험을 통한 신뢰성에 관한 연구 등 많은 연구가 보고되었으나²⁰⁾, NCF trap의 형성이 전기적 신뢰성에 미치는 영향 평가 및 분석에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프 접합 시 솔더와 하부 Ni 확산방지층의 접합계면에서 형성된 NCF trap이 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프의 전기적 신뢰성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 온도 150°C, 1.5×10^5 A/cm²의 전류밀도 조건에서 EM 신뢰성 실험을 진행 하였으며, 접합계면의 미세구조 분석을 통해 손상기구를 체계적으로 분석하였다.

2. 실험 방법

Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프에서 NCF trap의 형성이 EM 전기적 신뢰성에 영향을 알아보기 위하여 Fig. 1과 같이 두 가지 시편으로 제작하여 EM 신뢰성 실험을 진행하였다. Fig. 1(a)는 접합 직후 NCF trap이 형성된 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프 시편과 NCF trap이 형성되지 않은 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프 시편의 모식도이며, EM 전기적 신뢰성 실험을 위해 Fig. 1(b)와 같이 전류의 흐름이 교차되며 반복되는 daisy chain 구조로 제작하였다. EM 실험 시 칩과 기관용 재료에서의 열전도도 차이에 의한 범프 내부에서의 온도 구배를 최소화 하기 위하여 칩과 기관이 열전도성이 좋

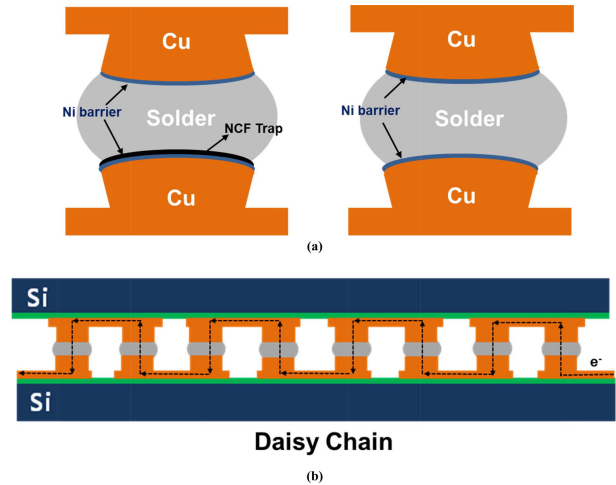


Fig. 1. Schematic diagrams of (a) Cu/Ni/Sn-Ag microbumps with and without NCF trap, (b) daisy chain structure for EM test.

은 실리콘 웨이퍼로 구성된 구조를 사용하였다.

Cu/Ni/Sn-Ag 시편의 제작 공정은 상부 칩은 Cu를 전기도금하여 4 μ m 두께의 pillar를 형성하고, 그 위 2 μ m 두께의 Ni과 14 μ m 두께의 Sn-Ag 층을 전기도금으로 형성하였다. 하부 칩은 4 μ m 두께의 Cu pillar에 2 μ m 두께의 Ni을 전기도금으로 형성하였으며, 이후 하부 칩에 NCF를 도포 후 240°C에서 60초 동안 열-압착 접합(thermo compression bonding)을 하여 시편을 제작 하였다. 접합계면인 솔더와 하부 Ni 확산방지층의 접합 계면에서 형성된 NCF trap을 확인하기 위하여 시편을 단면 연마 후 미세구조를 확인하였다.

또한, 접합 직후 접합계면에서의 NCF trap의 분포를 확인하기 위하여 상부 칩을 단면연마 후 CH₃OH 92%, HNO₃ 5%, HCl 3% 용액을 사용하여 약 40초간 솔더를 식각하였다.¹⁹⁾ 이후 주사현미경(scanning electron microscope, SEM) 및 에너지 분산형 X선 분광기(energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS)를 이용하여 NCF trap을 분석하였다.

Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프에서 NCF의 형성이 전기적 신뢰성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 다음과 같이 EM 실험 장치를 구성하였다. 150°C로 유지되는 열풍건조기(convection oven) 내부에서 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프 시편에 열전대와 전극을 부착시킨 후 Agilent 사의 E3648A power supply 장비를 사용하여 전류를 인가하면서 EM 실험을 실시하였다. 이때 가해지는 전류는 솔더 pad opening 단면적과 1.5×10^5 A/cm²의 전류밀도 조건을 계산하여 나온 값이다. EM 실험 시 실시간 저항 변화 측정은 Agilent 사의 37970A 장비를 이용하여 측정하였으며, EM 전기적 단락조건은 JEDEC-JEP 154 규격 조건에 따라 저항변화율이 20% 이상일 때 일어났다고 기준하였다.²¹⁾ NCF trap의 형성에 따른 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프의 EM 손상기구를

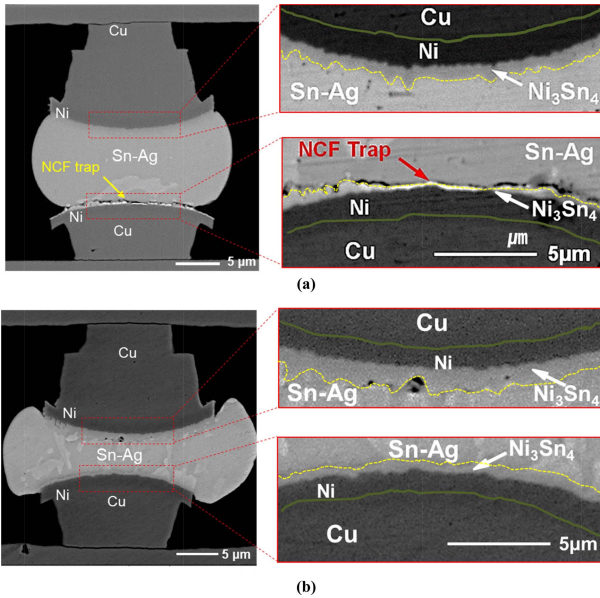


Fig. 2. As-bonded cross-sectional SEM images of Cu/Ni/Sn-Ag microbumps (a) with NCF trap and (b) without NCF trap.

분석하기 위해 시편을 단면 연마 후, SEM 및 EDS를 이용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프의 접합 직후 단면 SEM 미세구조를 나타내고 있다. Fig. 2(a)는 접합 직후 NCF trap이 형성된 시편의 단면 SEM 미세구조인데, 상부는 Ni 확산방지층 위에 전기도금을 이용하여 솔더를 형성하였기 때문에 Ni 확산방지층과 솔더의 계면에서 NCF trap은 형성되지 않았으며, 열-압착 접합과정 중 높은 온도에 의해 Sn과 Ni이 반응하여 Ni_3Sn_4 상의 금속간화합물이 형성된 것을 확인하였다. 하지만 열-압착 접합계면인 하부 Ni 확산방지층과 솔더의 계면에서는 접합 시 빠져나가지 못한 NCF에 의해서 trap이 형성되었으며, trap은 아주 얇은 층으로 넓게 분포된 것을 확인하였다. 이로 인해 NCF trap이 하부 Ni 확산방지층과 솔더의 반응을 억제하여 상부 Ni_3Sn_4 금속간 화합물에 비해 얇은 Ni_3Sn_4 상의 금속간 화합물층이 형성되었다.²²⁾ Fig. 2(b)는 접합 직후 NCF trap이 형성되지 않은 시편의 단면 SEM 미세구조이며, NCF trap이 형성된 시편과는 달리 상-하부 Ni 확산방지층과 솔더의 계면에서 모두 비슷한 두께의 Ni_3Sn_4 상의 금속간 화합물층이 형성된 것을 확인하였다.

또한, NCF trap의 형성이 Ni 확산방지층과 솔더의 접합에 미치는 영향을 파악하기 위하여 접합 직후 NCF trap이 형성된 시편의 솔더를 CH_3OH 92%, HNO_3 5%, HCl 3% 용액을 이용하여 식각 후 관찰하였다. Fig. 3은 식각 후 NCF trap이 형성된 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프의 Ni 확산방지층과 솔더 접합부를 위쪽에서 관찰한 SEM 이미지를 나타

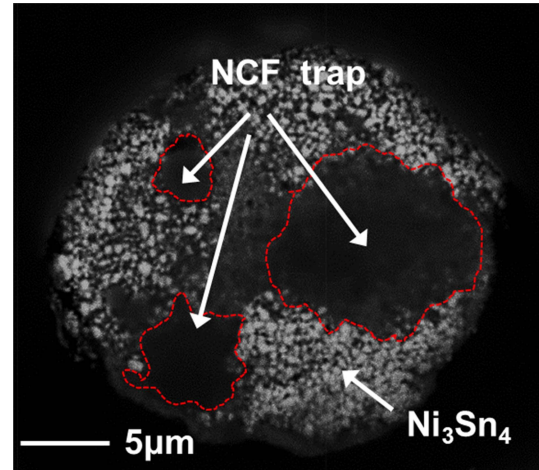


Fig. 3. As-bonded SEM image of bottom Cu/Ni surface after solder etching of Cu/Ni/Sn-Ag microbumps with NCF trap.

내며, EDS를 통하여 상을 분석 하였다. EDS 성분 분석 결과, 밝은 부분은 Ni_3Sn_4 상으로 Ni 43 at%, Sn 57 at%의 조성을 가지는 Ni_3Sn_4 상이 확인되었으며, 어둡고 흐린 부분은 NCF trap으로 C 56 at%, O 35 at%, Si 9 at%의 조성을 가지는 에폭시 레진과 SiO_2 필러(filler)로 이루어진 보편적인 NCF소재임을 확인하였다.²³⁾ 또한 접합계면의 NCF trap 형성으로 인해, 상부 Ni 확산방지층과 솔더계면의 면적과 접합계면인 하부 Ni 확산방지층과 솔더계면의 실제 접합면적은 서로 다르다. 따라서 NCF trap이 형성된 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프 시편의 실제 접합계면의 접합면적을 확인하기 위하여 image analyzer를 이용하여 면적분율을 계산하였다. NCF trap 차지하는 비율은 전체 접합부 면적의 약 30.7%를 차지하고 있었으며, 실제 접합면적은 NCF trap이 차지하고 있는 면적을 뺀 나머지 부분인 약 69.3%임을 확인하였다.

Fig. 4는 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프에서 NCF trap의 형성이 EM 전기적 신뢰성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 $150^\circ C$, $1.5 \times 10^5 A/cm^2$ 의 조건에서 NCF trap이 형성된 시편과 NCF trap 형성되지 않은 시편으로 EM 실험을 진행한 결과이다. Fig. 4(a)는 EM 실험 진행 시간에 따른 두 시편의 실시간 저항변화율을 나타낸 그래프이다. NCF trap이 형성된 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프의 경우, 60시간에서 전기적 단락이 일어났다. 하지만 NCF trap이 형성되지 않은 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프의 경우, NCF trap이 형성된 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프보다 약 8배 긴 500시간이 지난 후에 전기적 단락이 일어났다. Fig. 4(b)에서 보이듯이 NCF trap이 형성된 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프의 경우 크게 2가지의 저항변화율 구간을 가지는 것을 확인하였다. 초기에 저항이 서서히 증가하는 stage 1구간, 저항이 급격히 증가하기 시작하여 기울기가 변하는 stage 2구간으로 나누었다. 플립칩 솔더 범프의 EM에 관한 선행 연구결과에서도 이와 유사한 거동을 보이는데, stage 1 구간에서는 보이드 핵

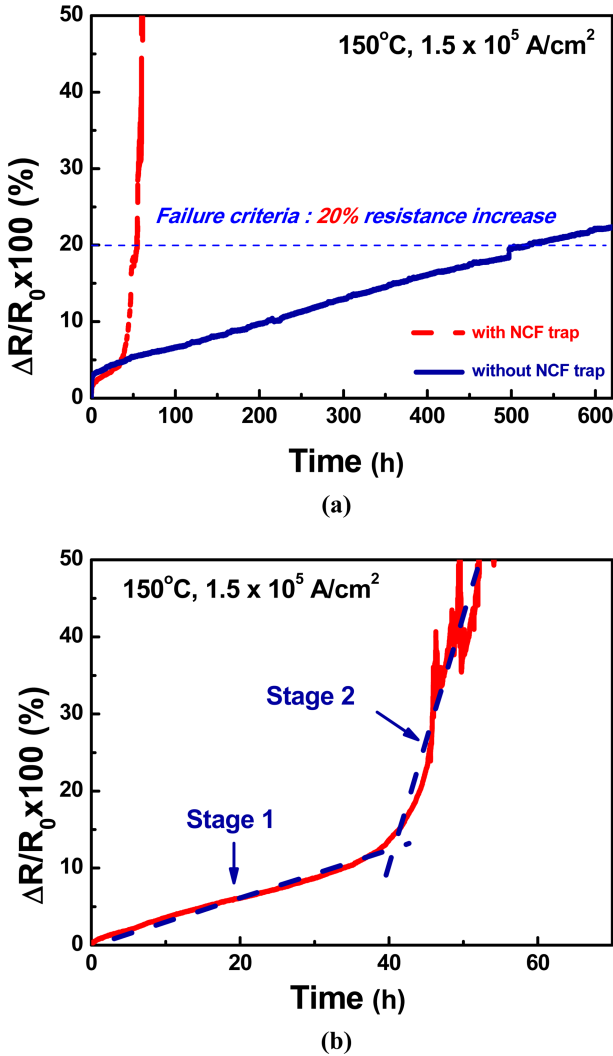


Fig. 4. Resistance change versus time curve of Cu/Ni/Sn-Ag microbumps for $1.5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ at 150°C : (a) with and without NCF trap, and (b) enlarged graph of Cu/Ni/Sn-Ag microbumps with NCF trap.

생성으로 인해 저항증가가 서서히 증가하는 구간이며, stage 2 구간에서는 보이드 성장으로 인해 급격한 저항증가를 보이는 구간이라고 보고되었다.²⁴⁾ 이처럼 NCF trap

이 형성된 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프의 저항변화율 그래프는 일반적인 미세범프의 저항 변화거동이 아닌 플립칩 솔더 범프의 저항 변화거동과 유사하다.^{25,26)} 이는 금속간화합물의 형성이 저항의 증가의 원인이 되는 일반적인 미세범프와는 달리 접합직후 NCF trap의 형성이 솔더 접합부의 접합면적을 줄여 전류밀도의 증가와 높은 Joule heating의 효과를 야기하는 것과 동시에,²⁷⁾ Ni 확산방지층과 솔더의 접합을 방해하기 때문에 보이드의 형성을 야기하며, 이로 인한 접합면적의 감소는 EM 원자의 확산을 방해하여 보이드 성장 및 저항증가의 원인이 된 것으로 생각된다.²⁸⁾ 이를 명확하게 규명하기 위하여 EM 실험 시간에 따른 NCF trap이 형성된 미세범프와 NCF trap이 형성되지 않은 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프 시편을 각각 단면 연마 하였으며, Fig. 5와 Fig. 6에 각각의 단면 SEM 이미지를 나타내었다. 손상기구는 동일 실험 조건에서 진행한 각기 다른 시편을 실험 진행시간에 따라 비교함으로써 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프의 전기적 단락이 일어나는 과정을 관찰하였다. Fig. 5는 EM 실험 동안 NCF trap이 형성된 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프의 손상기구를 분석한 단면 SEM 미세구조이며, 전기적 단락은 전자 이동 방향이 아래에서 위로 이동 할 때 전자 이동방향이 위에서 아래로 이동 할 때보다 먼저 발생하였다. 따라서 전자 이동 방향이 아래에서 위로 이동하는 시편의 손상기구를 분석하였다. 손상기구는 Fig. 5(a)와 같이 EM 실험 초기 단계인 10시간까지는 하부 Ni 확산방지층의 소모는 거의 발생하지 않고 30시간 후인 Fig. 5(b)에서 모두 소모되었으며 대부분의 Sn상이 (Ni,Cu)₃Sn₄ 상의 금속간화합물로 상변태 되었다. 이는 EM 실험이 진행됨에 따라 좁은 하부 접합면적으로 인한 전류밀도의 증가와 높은 Joule heating의 효과로 인해 하부 Ni 확산방지층이 소모되면서 Ni₃Sn₄ 금속간화합물이 성장하고, Ni 확산방지층이 모두 소모되어 Cu pillar의 Cu원자가 Ni₃Sn₄ 기지상으로 확산하여 (Ni,Cu)₃Sn₄의 금속간화합물이 형성된 것으로 판단된다.²⁷⁾ 또한, 하부 Ni 확산방지층의 소모로 인해 솔더와 하부 Cu pillar의 Cu 원자가 반응하여 Cu₃Sn 상과 (Cu,Ni)₆Sn₅ 상의 금속간화합물이 생성된 것을 확인하였다. EM 실험이 진행됨에

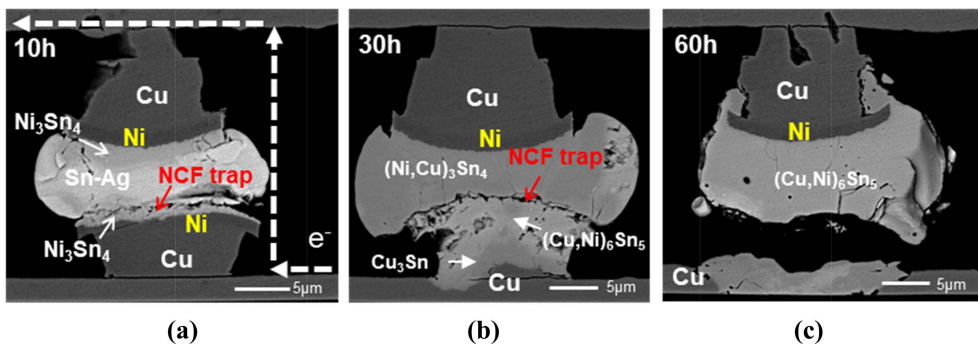


Fig. 5. Sequential SEM micrographs of Cu/Ni/Sn-Ag microbumps with NCF trap during current stressing at 150°C , $1.5 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$: (a) 10h, (b) 30h, (c) 60h.

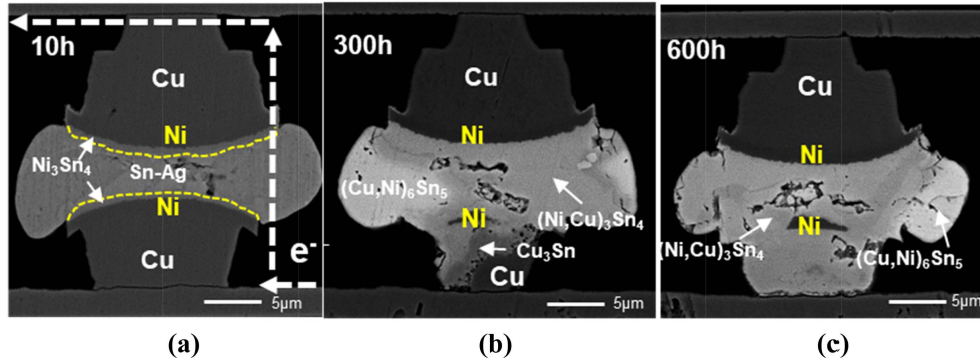


Fig. 6. Sequential SEM micrographs of Cu/Ni/Sn-Ag microbumps without NCF tarp during current stressing at 150°C, 1.5×10^5 A/cm²: (a) 10h, (b) 300h, (c) 600h.

따라 NCF trap의 영향이 실험 초기에서 보다 더욱 명확하게 나타나며, Fig. 5(c)에서 보이는 바와 같이 60시간 후에는 결국 NCF trap에 의해 형성된 보이드로 인해 완전한 전기적 단락을 야기하는 것을 확인하였다.

Fig. 6은 NCF trap이 형성되지 않은 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프 시편의 전자 이동 방향이 위쪽에서 아래쪽으로 이동할 때의 EM 실험 후 손상기구를 분석한 단면 SEM 미세구조이다. Fig. 6(a)와 같이 실험 초기단계인 10시간에서의 미세구조는 NCF trap이 형성된 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프와 유사하게 하부 Ni 확산방지층의 소모는 거의 발생하지 않았다. Fig. 6(b)와 같이 300시간 후에도 하부 Ni 확산방지층은 일부 소모되지 않고 남아있으며, Sn과 Cu pillar가 반응하여 Cu₃Sn 상과 (Cu,Ni)₆Sn₅ 상의 금속간 화합물이 형성된 것을 확인하였다. 이후 Fig. 6(c)에서 보이는 바와 같이 실험진행시간 600시간이 지나서야 대부분의 하부 Ni 확산방지층은 소모되었으며, Cu₃Sn 상과 (Cu,Ni)₆Sn₅ 상의 금속간화합물 또한 더욱 성장한 것을 확인하였다.

따라서, NCF trap이 형성된 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프와 NCF trap이 형성되지 않은 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프는 EM 실험 동안 서로 다른 저항변화를 거동을 보이며, 손상기구 분석을 통하여 NCF trap이 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프의 EM 특성을 크게 저하시키는 요인이 되는 것으로 판단되어, 전기적 신뢰성 향상을 위해서는 NCF trap에 대한 철저한 관리가 필요함을 알 수 있다.

4. 결 론

150°C, 1.5×10^5 A/cm²의 조건에서 NCF trap이 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프의 EM 특성에 미치는 영향을 저항변화를 거동과 단면 미세구조 분석을 통해 체계적으로 분석하였다. NCF trap이 형성된 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프의 경우 NCF trap이 형성되지 않은 경우 보다 약 8배 빨리 전기적 단락이 발생하였다. 이는 접합계면인 하부 Ni 확산방지층과 솔더 접합부에 잔류한 NCF trap이 계면 보이드를

를 유발하고 이로 인해 접합면적이 크게 감소됨으로 EM 전류 인가에 의해 보이드 부근의 국부적인 전류밀도가 급속히 증가되어 Cu/Ni/Sn-Ag 미세범프의 EM 특성을 크게 저하시키는 것으로 판단된다. 그러므로 전기적 신뢰성 향상을 위해서는 NCF trap에 대한 철저한 관리가 필요함을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문은 SK 하이닉스 산학과제 및 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(2016R1D1A3B03933937)이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

1. D. W. Kim, R. Vidhya, B. Henderson, U. Ray, S. Q. Gu, W. Zhao, R. Radojicic, and M. Nowak, "Material innovation opportunities for 3D integrated circuits from a wireless application point of view", Proc. 63rd Electronic Components and Technology Conference, Las Vegas (2013).
2. Y. Liu, N. Tamura, D.W. Kim, S. Q. Gu, and K. N. Tu, "A metastable phase of tin in 3D integrated circuit solder microbumps", Proc. 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), San Diego, CA (2015).
3. S. Q. Gu, P. Marchal, M. Facchini, F. Wang, M. Suh, D. Lisk, and M. Nowak, "Stackable Memory of 3D Chip Integration for Mobile Applications", Proc. Int. El. Devices Meet, IEEE, San Francisco (2008).
4. M. Liebens, J. Slabbekoorn, A. Miller, E. Beyne, M. Stoerring, S. Hiebert, and A. Cross, "Defect earning methodology applied to microbump process at 20 µm pitch and below", Proc. 29th Annual SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, New York (2018).
5. J. H. Lee, G. T. Lim, S. T. Yang, M. S. Suh, Q. H. Chung, K. Y. Byun, and Y. B. Park, "Electromigration and Thermo-migration Characteristics in Flip Chip Sn-3.5Ag Solder Bump", J. Kor. Inst. Met. & Mater., 46(5), 310 (2008).
6. V. S. Rao, V. Kripseph, S. W. Yoon, D. Witorsa, and A. A.

- O. Tay, "Bed of nails-100 microns pitch wafer level interconnections process", Proc. 5th Electronics Packaging Technology Conference(EPTC), Singapore (2004).
7. S. H. Kim, G. T. Park, B. R. Lee, J. M. Kim, S. H. Yoo, and Y. B. Park, "Effects of PCB Surface Finishes on in-situ Intermetallic Growth and Electromigration Characteristics of Sn-3.0Ag-0.5Cu Pb-free Solder Joints", J. Microelectron. Packag. Soc., 22(2), 47 (2015).
 8. B. J. Kim, G. T. Lim, Kim, J. D. Kim, K. W. Lee, Y. B. Park, H. Y. Lee, and Y. C. Joo, "Intermetallic Compound Growth and Reliability of Cu Pillar Bumps Under Current Stressing", J. Electron. Mater., 39(10), 1007 (2010).
 9. B. J. Kim, S. H. Kim, and Y. B. Park, "Intermetallic Compound Growth Characteristics of Cu/Ni/Au/Sn-Ag/Cu Microbump for 3-D IC Packages", J. Microelectron. Packag. Soc., 20(2), 59 (2013).
 10. H. Peng, and R. W. Johnson, "Underfilling Fine Pitch BGAs", IEEE, T. Electron. Pa. M., 4, 293 (2001).
 11. M. J. Yim, and K. W. Paik, "Design and understanding of anisotropic conductive films (ACFs) for LCD packaging", IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol., Norrkoping (1998).
 12. S. T. Lu, Y. M. Lin, C. C. Chuang, T. H. Chen, and W. H. Chen, "Development of a Novel Compliant-Bump Structure for ACA-Bonded Chip-on-Flex (COF) Interconnects with Ultra-Fine Pitch", IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol., 1, 33 (2011).
 13. D. T. Hsu, H. D. Dim, F. G. Tong, S. Chungpaiboonpatana, C. Davison, and J. M. Adams, "Curing Dinetics and optical cure schedules for underfill materials", Microelectronics Journal, 31, 271 (2000).
 14. L. K. Teha, E. Antoa, C. C. Wonga, S. G. Mhaisalkara, E. H. Wongb, P. S. Teob, and Z. Chena, "Development and reliability of non-conductive adhesiveflip-chip packages", Thin Solid Films, 462, 446 (2004).
 15. C. Feger, N. LaBianca, M. Gaynes, S. Steen, Z. Liu, R. Peddi, and M. Francis, "The over-bump applied resin wafer-level underfill process: Process, material and reliability", Proc. 59th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), San Diego (2004).
 16. K. Honda, T. Enomoto, A. Nagai, and N. Takano, "NCF for wafer lamination process in higher density electronic packages", Proc. 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Las Vegas (2010).
 17. S. Kawamoto, M. Yoshida, S. Teraki, and H. Iida, "Effect of NCF design for the assembly of flip chip and reliability", Proc. 62nd Electronic Components and Technology Conference (ECTC), San Diego (2012).
 18. B. G. Kim, S. C. Kim, W. G. Dong, and Y. H. Kim, "The Effect of Fillers in Nonconductive Adhesive on the Reliability of Chip-on-Glass Bonding with Sn/Cu Bumps", J. Jpn. I. Met., 52(11), 2106 (2011).
 19. S. M. Lee B. G. Kim, and Y. H. Kim, "Non-Conductive Adhesive (NCA) Trapping Study in Chip on Glass Joints Fabricated Using Sn Bumps and NCAs", T. Jpn. I. Met., 52(11), 2106 (2011).
 20. S. C. Kim, and Y. H. Kim, "Low temperature chip on film bonding technology for 20um pitch applications", J Mater Sci: Mater Electron., 27, 3658 (2015).
 21. Joint Electron Device Engineering Council, "Guideline for Characterizing Solder Bump Electromigration under Constant Current and Temperature Stress", JEDEC Standard, JEP154, USA (2008).
 22. K. N. Tu, and R. D. Thompson, "Kinetics of interfacial reaction in bimetallic CuSn thin films", Acta Metall., 30(5), 947 (1982).
 23. Henkel Corporation, Loctite underfill material technical data sheet form <http://www.underfill.net/wp-content/uploads/2016/02/Loctite-underfill-3505-tds.pdf>
 24. W. J. Choi, E. C. C. Yeh, and K. N. Tu, "Mean-time-to-failure study of flip chip solder joints on Cu/Ni(V)/Al thin-film under-bump-metallization", J. Appl. Phys., 94, 5665 (2003).
 25. J. H. Lee, G. T. Lim, and Y. B. Park, "Electromigration Characteristics of Flip Chip Sn-3.5Ag Solder Bumps under Highly Accelerated Conditions", J. Korean Phys. Soc., 54(5), 1784 (2009).
 26. G. Kim, K. Son, G. T. Park, and Y. B. Park, "Effect of Current Densities on the Electromigration Failure Mechanisms of Flip-Chip Sn-Ag Solder Bump", Korean J. Met. Mater., 55(11), 798 (2017).
 27. J. H. Lee, G. T. Lim, and Y. B. Park, "Size Effect on Electromigration Reliability of Pb-free Flip Chip Solder Bump", Proc. 58th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Lake Buena Vista (2008).
 28. H. Y. Chen, M. F. Ku, and C. Chen, "Effect of under-bump-metallization structure on electromigration of Sn-Ag solder joints", Adv. Mater. Res-ger., 1, 83 (2012).