

논문 17-3-3

솔더범프와 TiW/Cu/electroplating Cu UBM 층과의 금속간 화합물 형성과 범프 전단력에 관한 연구

A Study of the IMC Growth and Shear Strength of Solder Bump and TiW/Cu/electroplating Cu UBM

장의구^{1,a}, 김남훈¹, 김남규¹, 엄준철¹

(Eui-Goo Chang^{1,a}, Nam-Hoon Kim¹, Nam-Kyu Kim¹, and Joon-Chul Eom¹)

Abstract

The joint strength and fracture surface of Sn-Pb solder bump in photo diode packages after isothermal aging testing were studied experimentally. Cu/Sn-Pb solders were adopted, and aged for up to 900 hours at 120°C and 170°C to analyze the effect of intermetallic compound(IMC). In 900-hour aging experiments, the maximum shear strength of Sn-Pb solder decreased by 20% and 9%. The diffraction patterns of Cu₆Sn₅, scallop-shape IMC, and planar-shape Cu₃Sn were observed by Transmission Electron Microscopy(TEM).

Key Words : Flip-chip, Intermetallic compound, Aging, Shear test, TEM

1. 서론

광통신의 주파수 대역이 밀리미터파로 향함에 따라 신호의 왜곡이나 지연을 최소화하여 전기적인 성능을 향상시키기 위해, 범용 패키지(package)의 와이어 본딩(wire bonding)에 의한 전기적인 연결과는 달리 칩 패드(chip pad)에 솔더 범프(solder bump)등을 형성하여 칩과 기판을 직접 접합하는 플립칩 본딩(flip-chip bonding)기술이 이용된다[1-3]. 플립 칩 기술은 단지 범프의 높이인 20~120 μm 내외의 짧은 배선으로 기판과 전기적 연결이 가능하기 때문에 기존의 범용 패키지와 비교하면 배선에 의한 기생인자를 크게 줄일 수 있어 고주파 회로에서 사용될 때 큰 장점을 갖는다[4,5].

광소자의 플립칩 본딩에 있어서 고려해야 될 사항은 다음과 같다. 광 소자의 특성상 여러 단계의 리플로 솔더링 공정을 거치게 되는데, 이 공정 중

에 액상의 솔더와 UBM(under bump metallurgy)이 반응하여 금속간 화합물이 생성된다. 솔더의 신뢰성에 가장 큰 영향을 미치는 것이 금속간 화합물의 형태와 두께이며, 금속간 화합물은 기본적으로 솔더의 조성에 따라 각기 다른 종의 화합물을 형성한다. 솔더링 초기에 형성되는 금속간 화합물은 젖음 특성과 솔더링 특성에 많은 영향을 미치며, 솔더링시 생성된 금속간 화합물의 과도한 성장은 솔더 접합부의 수명을 단축시킬 수 있다. 따라서, 금속간 화합물 형성에 따른 신뢰성 저하를 고려해야 한다. 또한 상용화되어 있는 플립칩 본딩 기술은 실리콘을 소재로 한 소자의 접속 방식으로 형성된 볼의 크기나 볼간의 간격이 300 μm 수준이어서 화합물 반도체를 소재로 하는 광소자의 50 μm급의 볼 간격과 수십 μm급의 볼 높이와는 차이가 많다. 그러므로, 미세 크기에 대한 UBM 구조 및 이에 대한 신뢰성 검토가 이루어 져야 한다[6-8]. 상기한 바와 같이 범용 패키지의 경우와는 달리 광 모듈 개발에 제한 요소로 작용하는 항목들을 동시에 만족하는 재료 및 공정에 대한 연구가 선행되어야 광 소자의 모듈화 및 고속화에 따른 광 모듈의 분석이 진행될 수 있다. 하지만, 아직까지 이러한 연구가 부족한 실정이다.

1. 중앙대학교 전자전기공학부
(서울시 동작구 흑석동 221)

a. Corresponding Author : changeg@cau.ac.kr

접수일자 : 2003. 9. 18

1차 심사 : 2003. 10. 27

심사완료 : 2003. 12. 16

본 연구에서는 기존의 상용화된 플립칩 접합부의 특성 평가와는 달리 실제 광모듈에 적용이 가능한 100 μm 이하의 전기 도금된 Sn-Pb 솔더볼을 사용하여 실험을 진행하여, 초고속 광 소자에서 플립칩 접합 시의 접합부 특성을 FIB(Focused Ion Beam) 기술 등을 적용하여 TEM으로 평가하였다.

2. 실험

범프 제작은 패드 크기를 80 μm 와 100 μm 로 웨이퍼를 분류하여 공정을 진행하였다. 그림 1은 솔더 범프 형성에 대한 개괄적인 공정 순서를 나타내었다. 공정 설계는 건식 산화막 2000Å 위에 Al1%Si / TiW(9:1) / Cu =1/ 0.2 / 0.4의 비율로 스퍼터 증착하고, 10 μm 의 Cu를 전기도금(electroplating) 하였다. 두께 30~50 μm 의 후막 포토 레지스트(PR)를 하드 베이킹하여 전기도금으로 솔더 범프를 형성한 후에 PR 스트립 및 UBM을 에칭하고 리플로우 공정으로 솔더 범프를 형성하였다.

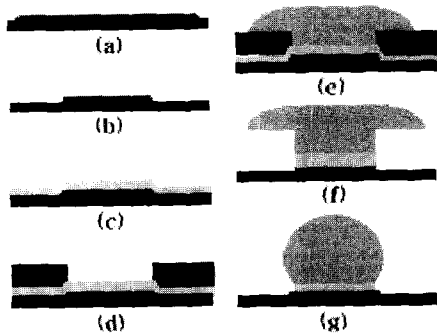


그림 1. 전기 도금법을 이용한 플립 칩 솔더 범프 형성 공정.

Fig. 1. The experimental procedure of the Flip chip solder bumping on electro-plating: (a) Al sputter deposition (b) Al patterning (c) UBM deposition (d) thick PR coating (e) solder electroplating (f) PR strip and UBM etching (g) reflow.

Sn-37wt%Pb공정 솔더로 형성한 범프는 패드 크기 80 μm 와 100 μm 에서, 범프의 평균 직경은 각각 93 μm 와 100 μm , 각 범프의 평균 높이는 83 μm 와 93 μm 이고 균일성은 1%를 얻었다. UBM은 알루미늄 패드와의 접착력을 높이기 위해 스퍼터링 방식으로 형성시킨 0.2 μm 두께의 TiW층과, 솔더로의 용융이나 금속간 화합물로부터 패드 금속의 완전한 소모를 막기

위한 10 μm 두께의 Cu층으로 구성되었다. 소모를 막기 위한 10 μm 두께의 Cu층으로 구성되었다.

전단강도 측정은 본딩 시험장치(PTR-1000)를 사용하였으며, 팁(tip)의 이동속도는 0.30mm/s, 팁의 높이는 UBM 표면에서부터 2.0 μm 로 하였다. 온도와 시간에 따른 금속간 화합물의 성장 변화를 분석하기 위해 등은 시효온도는 120 $^{\circ}\text{C}$, 170 $^{\circ}\text{C}$ 2종류로 구분하였고 0, 300, 600, 900 시간 동안 시효처리 한 후에 전단강도를 측정하였다. 전단강도 값은 조건마다 각 2개 시편에서 30개의 범프에 대한 실험 값 중에서 최대값과 최소값을 제외한 평균값을 사용하였다. 전단실험 후 과면의 형상을 SEM(Scanning Electron Microscopy)으로 관찰하였다. 금속간 화합물의 분석은 고 분해능 투과전자현미경(High Resolution Transmission Electron Microscopy; HRTEM)과 회절상(diffraction pattern)을 이용하여 그 구조 및 성분을 관찰하였다. 일반적인 TEM 관찰용 시료는 시편을 절단하여 기계적인 연마후에 이온밀링(ion milling)에 의해 0.1 μm 이하의 두께로 만들어진다. 그러나, 솔더 접합부의 IMC 부분이 매우 brittle하기 때문에 이와 같은 제조방법으로는 균일한 두께의 박막 시료를 만들기가 어렵다. 본 연구에서는 시편에 W를 증착하고, Ga⁺ 이온을 source로 한 가속전압 30keV FIB를 사용하여 가공하였으며, 100pA 빔 전류를 갖는 Ga⁺ 이온빔을 이용한 미세 밀링을 통하여 electron-transparency 한 시료를 제조하였다. 상기의 FIB 기술은 일반적인 TEM 관찰용 시편 준비의 단점을 보완한 것이기 때문에 미세 솔더 접합부의 TEM 관찰용 박막시료 제작에 매우 유용하다. 그림 2에 보인 것과 같은 FIB 가공은 MC-100(MICRION), TEM 관찰은 JEM-2010 (JEOL) 을 이용하여 가속전압 200kV에서 수행하였다.

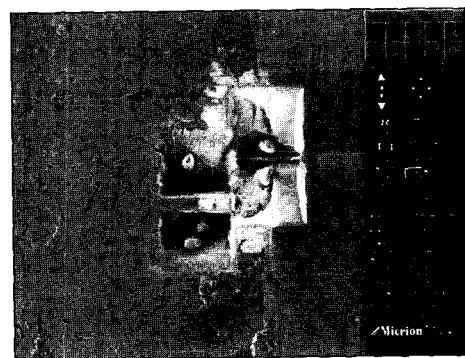


그림 2. FIB에 의한 솔더와 UBM간의 절단면.
Fig. 2. FIB incision in solder and the UBM.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 Sn-37wt%Pb 솔더에 대해 시효 온도와 시간에 따른 전단강도 값을 측정된 결과이다. 실험은 시효 온도와 시효처리 시간의 영향을 관찰하기 위해 120°C와 170°C에서 각각 0, 300, 600, 900 시간동안 시효처리를 하였고, 시효 처리된 시편의 전단강도와 형성된 불 크기와의 관계를 관찰하기 위해 패드 크기가 80 μm 와 100 μm 인 시편을 같은 조건으로 시효 처리하였다.

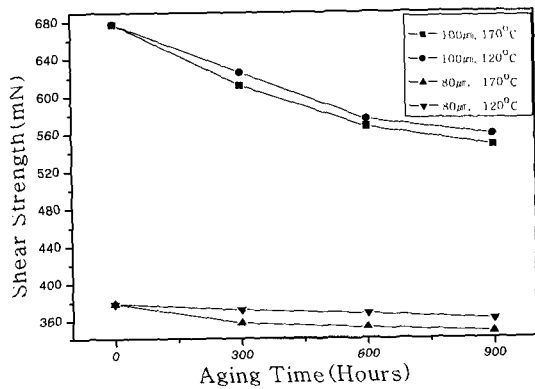


그림 3. 시효 처리 조건에 따른 전단 강도와 시효 시간의 관계.

Fig. 3. Relation between aging time and shear strength with the variable aging conditions.

전단강도는 시효 처리 시간의 증가에 따라 감소하는 경향을 보였는데, 시효온도 170°C에서 100 μm 시편의 전단강도 값은 시효처리 이전의 678mN에서 900 시간 시효처리 후에는 그 값이 547mN으로 약 20% 감소하였고, 80 μm 시편의 경우엔 378mN에서 336mN까지 감소해서 같은 시간의 시효 처리로 약 9%가 감소하는 것을 알 수 있었다. 120°C의 시효 처리 후 전단 강도 실험은 100 μm 시편의 경우 시효 처리 이전의 값과 비교해서 약 17%가 80 μm 시편의 경우에는 약 5%가 감소하였다. 즉, 시효 처리 시간이 길수록 강도 값이 낮아지는 경향을 보였으며, 시효 온도가 높을수록 강도의 저하가 크다는 것을 실험을 통하여 확인할 수 있었다. 또한 100 μm 와 80 μm 패드 크기의 시편에서의 전단 실험 값을 비교해보면 시효 처리 후 패드 크기가 큰 시편 쪽에서 전단 강도의 저하가 더 크게 나타난다. 이는 불 자체의 부피 차이로 초기 전단강도 값이

큰 차이를 보였지만, 시효에 따른 금속간 화합물이 비슷한 두께로 성장하여 오히려 초기 전단강도 값이 크게 나타났던 100 μm 패드 크기의 시편에서 저하가 더욱 현저히 보이는 것으로 판단된다[9].

그림 4는 시효 처리 이전의 전단실험으로 인한 파단을 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 바와 같이 시효처리 이전의 파면은 솔더와 UBM의 접촉 형태인 원형을 유지하는 것을 볼 수 있고, 파면을 확대한 형상에서 그 원인이 솔더 내의 납 성분에서 연성 파괴임을 알 수 있다.

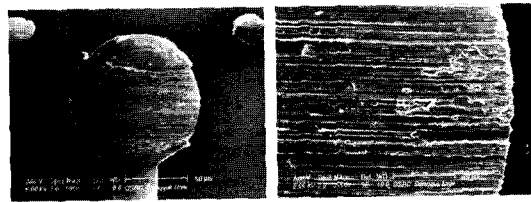
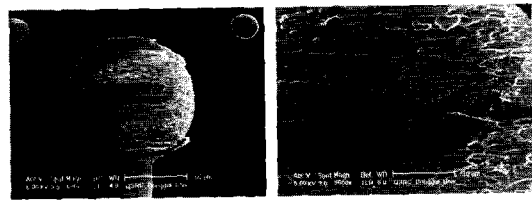
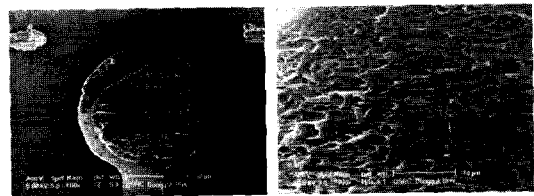


그림 4. 시효 처리 이전 전단실험으로 인한 파면.
Fig. 4. Fractured surface of sheared solder bump before aging.



(a)



(b)

그림 5. 시효 처리 후 전단실험으로 인한 파면.
Fig. 5. Fractured surface of a sheared solder bump (a) after 300 hours of aging and (b) after 900 hours of aging.

그림 5는 시효 처리된 시편의 파면으로, 시효전의 파면에서와 같이 연성파괴모드를 보이고 있다. 한편, 시효 시간이 길어질수록 연성파괴 뿐만 아니라 취성파괴 현상이 부분적으로 관찰되었다.

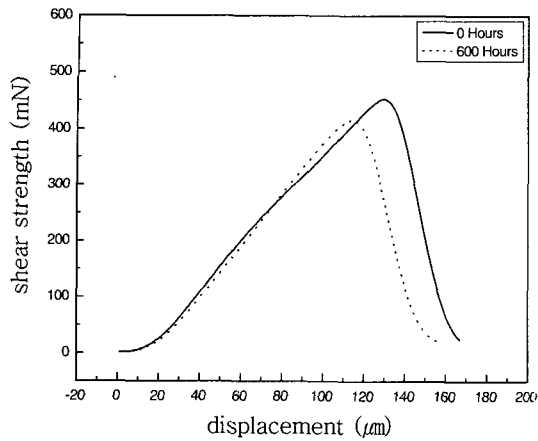


그림 6. 600시간 시효 후 측정된 전단강도와 변위의 관계.

Fig. 6. Shear strength vs. displacement curve after 600 hours of aging.

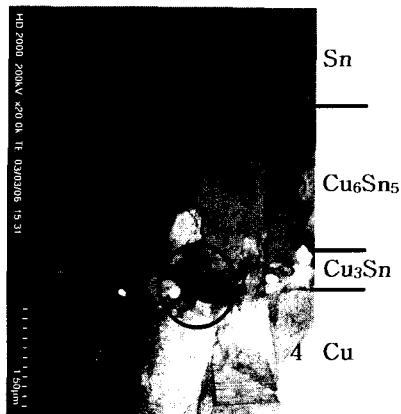


그림 7. 300시간 시효처리 후 UBM / 솔더 계면의 TEM 단면도.

Fig. 7. Typical cross-sectional TEM image of the interfaces between solder and UBM.

그림 6은 600시간 시효 후 측정된 전단강도와 변위의 관계를 나타낸 것이다. 시효처리 전에는 솔더내의 납 성분으로 인한 연성으로 변위량이 많이 발생하지만, 장시간 시효 후의 시편은 금속간 화합물의 과다 성장과 결정립의 조대화로 인해 부분적인 취성화가 진행되면서 시효처리 이전의 변위량과 비교해서 그 값이 상대적으로 감소함을 볼 수 있다.

그림 7은 300시간 시효처리 된 시편의 솔더/UBM 계면의 TEM관찰 결과를 나타낸 것으로, 솔더와 금속간 화합물층의 미세 조직상태가 명확히 관찰되었다. 그림 7의 영역 1은 Sn이 많은 Sn-rich상이다. 솔더의 미세조직인 Sn-rich와 Pb-rich는 시효시간의 경과에 따라 상의 크기가 증가한다. 또한 영역 2는 1.5~2.8 μm 두께로 성장한 Cu_6Sn_5 이고, 영역 3은 0.7~0.8 μm 의 두께로 성장된 Cu_3Sn 이다. 영역 4는 Cu로 확인되었다. 또한 부채꼴(scallops)을 형성하고 있는 Cu_6Sn_5 의 결정립(grain) 크기가 비교적 평탄한(planar) Cu_3Sn 의 결정립에 비해 상당히 큼을 알 수 있으며, 결정립계가 명확히 관찰되었다. 이와 같이 Cu_6Sn_5 가 부채꼴 형상을 보이는 것은 Cu가 솔더 쪽으로 침입형 확산을 하는 과정에서 그 빠른 확산 속도에 의해 불규칙적인 성장을 하기 때문이다. 솔더와 Cu 계면을 따라 밝게 보이는 작은 구멍은 kirkendall voids이다.[10] (b)와 (c)는 각각의 IMC 계면에서 확대 사진을 나타낸 것이다. 그림 8은 금속간 화합물층의 회절상을 나타내었다. 그림에서와 같이 계면에 형성된 Cu_3Sn 은 사방정(orthorhombic) 구조로서 등축 결정립을 이루고 있고, Cu_6Sn_5 는 육방정(hexagonal) 구조로서 육각형 프리즘 모양을 형성하고있다.

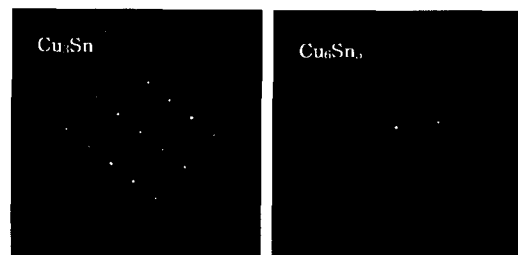
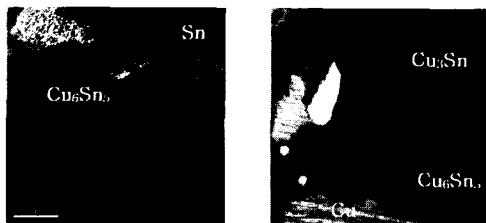


그림 8. 금속간 화합물층의 회절상.

Fig. 8. Diffraction patterns of the IMC layers.

4. 결 론

초고속 광통신 모듈에 사용되는 포토 다이오드의 패드 표면에 3개의 솔더 범프를 형성시켜 범프/UBM의 접합강도와 등은 시효처리에 따른 시효강도를 진단실험을 통해 측정하였고, IMC 성장을 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 진단 강도 값은 패드의 크기와 무관하게 시효 시간과 시효 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 감소하는 정도는 시효 온도가 높을수록, 패드의 크기가 클수록 더 크게 나타났다. 진단강도의 저하 원인인 금속간 화합물의 성장을 TEM으로 관찰한 결과, 300시간의 시효처리 과정을 거치면서 부채꼴 형태의 금속간 화합물 ($Cu_6Sn_5 + Cu_3Sn$)이 3~3.5 μm 의 두께로 성장한 것을 확인할 수 있었다. 그리고, 금속간 화합물의 성장과 함께 Kirkendall void의 형성도 솔더의 접합 강도 저하 원인 중 하나임을 실험을 통해 확인할 수 있었다. 또한, FIB 기술은 솔더 접합부의 TEM 관찰용 박막시편 가공에 매우 유용한 기술임을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

참고 문헌

[1] N. Koshoubu, S. Ishizawa, H. Tsunetsugu, and H. Takahara, "Advanced flip chip bonding techniques using transferred microsolder bumps", IEEE Trans. on Components & Packaging Technologies, Vol. 23, No. 2, p. 399, 2000.

[2] 주철원, 김성진, 백규하, 이희태, 한병성, 박성수, 강영일, "플립칩용 웨이퍼레벨 Fine pitch 솔더범프 형성", 전기전자재료학회논문지, 14권, 11호, p. 874, 2001.

[3] R. Tummala, "Fundamentals of Microsystems Packaging", McGraw-Hill, p. 361, 2001.

[4] 최재영, 이상수, 주영창, "공정 조성의 SnPb 솔더에서의 Electromigration 거동", 전기전자재료학회논문지, 16권, 1호, p. 19, 2003.

[5] K. N. Tu and K. Zeng, "Tin-lead (SnPb)

solder reaction in flip chip technology", Materials Science and Engineering: R: Reports, Vol. 34, No. 1, p. 1, 2001.

[6] C. B. Lee, S. B. Jung, Y. E. Shin, and C. C. Shur, "Effect of isothermal aging on ball shear strength in BGA joints with Sn-3.5Ag-0.75Cu solder" Mater. Trans., Vol. 43, No. 8, p. 1858, 2002.

[7] 신영의, 황성진, "P의 함량에 따른 Sn-Ag-Cu 및 Sn-Cu 무연솔더의 특성평가", 전기전자재료학회논문지, 16권, 6호, p. 549, 2003.

[8] Pang JHL., Chong DYR, and Low TH, "Thermal cycling analysis of flip-chip solder joint reliability", IEEE Trans. on Components & Packaging Technologies, Vol. 24, No. 4, p. 705, 2001.

[9] B. Salam, N. N. Ekere, and D. Rajkumar, "Study of the interface microstructure of Sn-Ag-Cu lead-free solders and the effect of solder volume on intermetallic layer formation", 2001 Electronic Components and Technology Conference Proceedings, 51st, IEEE, p. 471, 2001.

[10] M. T. Sheena, C. M. Changa, "The influence of thermal aging on joint strength and fracture surface of Pb/Sn and Au/Sn solders in laser diode packages", J. Electr. Mater., Vol. 31, No. 8, p. 895, 2002.