

초음파를 이용한 Sn-3.5Ag 플립칩 접합부의 신뢰성 평가 - Si웨이퍼와 Sn-3.5Ag 솔더의 접합 계면 특성 연구

김정모* · 김숙환 · 정재필*

*서울시립대학교 신소재공학과, 포항산업과학연구원

Flip Chip Solder Joint Reliability of Sn-3.5Ag Solder Using Ultrasonic Bonding - Study of the interface between Si-wafer and Sn-3.5Ag solder

Jung-Mo Kim*, Sook-Hwan Kim and Jae-Pil Jung*

*Department of materials science and engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Korea
RIST, Pohang 790-600, Korea

초 록: Si-웨이퍼와 FR-4 기판을 상온에서 초음파 접합한 후, 접합부의 신뢰성을 평가하였다. Si-웨이퍼 상의 UBM(Under Bump Metallization)은 위에서부터 Cu/ Ni/ Al을 각각 0.4 μm , 0.4 μm , 0.3 μm 의 두께로 전자빔으로 증착하였다. FR-4 기판위의 패드는 위에서부터 Au/ Ni/ Cu를 각각 0.05 μm , 5 μm , 18 μm 의 두께로 전해 도금하여 형성하였다. 접합용 솔더로는 Sn-3.5wt%Ag을 두께 100 μm 으로 압연하여 사용하였다. 시편의 초음파 접합을 위하여 초음파 접합 시간을 0.5초에서 3.0초까지 0.5초 단위로 증가시키면서 상온에서 접합하였으며, 이 때 출력은 1,400W로 하였다. 실험 결과, 상온 초음파 접합법에 의해 신뢰성 있는 'Si-웨이퍼/솔더/FR-4 기판' 접합부를 얻을 수 있었다. 접합부의 전단 강도는 접합 시간에 따라 증가하여 접합 시간 2.5초에서 65N으로 가장 높게 측정되었다. 이 후 접합 시간 3.0초에서는 전단 강도가 34N으로 감소하였는데, 이는 초음파 접합시간이 과도해지면서 Si-웨이퍼와 솔더 사이의 계면을 따라 균열이 발생되었기 때문으로 판단된다. 초음파 접합에 의해 Si-웨이퍼와 솔더 사이에서 생성된 금속간 화합물은 ((Cu,Ni)₆Sn₅)으로 확인되었다.

Abstract: Ultrasonic soldering of Si-wafer to FR-4 PCB at ambient temperature was investigated. The UBM of Si-substrate was Cu/ Ni/ Al from top to bottom with thickness of 0.4 μm , 0.4 μm , and 0.3 μm respectively. The pad on FR-4 PCB comprised of Au/ Ni/ Cu from top to bottom with thickness of 0.05 μm , 5 μm , and 18 μm respectively. Sn-3.5wt%Ag foil rolled to 100 μm was used for solder. The ultrasonic soldering time was varied from 0.5 s to 3.0 s and the ultrasonic power was 1,400 W. The experimental results show that a reliable bond by ultrasonic soldering at ambient temperature was obtained. The shear strength increased with soldering time up to a maximum of 65 N at 2.5 s. The strength decreased to 34 N at 3.0 s because cracks were generated along the intermetallic compound between Si-wafer and Sn-3.5wt%Ag solder. The Intermetallic compound produced by ultrasonic soldering between the Si-wafer and the solder was (Cu, Ni)₆Sn₅.

Key words: ultrasonic, lead free solder, intermetallic compound, joint strength, tin-3.5wt%silver

*Corresponding author
E-mail: jujung@uos.ac.kr

1. 서 론

Sn-3.5wt%Ag (이하 Sn3.5Ag) 솔더는 무연 솔더 중 가장 일반적으로 사용되는 솔더 중의 하나이다. 이 솔더는 Sn-37wt%Pb (이하 SnPb솔더) 공정솔더에 비해 인성, 크립(creep) 및 기계적 성질이 우수하고¹⁾, Cu와의 젖음성도 양호하여 플립칩 패키지에서 범프의 재료로 주목을 받고 있다. 그러나 Sn3.5Ag솔더의 용점은 221°C로서 SnPb솔더(183°C)에 비하여 38°C정도 높기 때문에, 일반적인 리플로 솔더링을 할 경우 IC (Integrated Circuit) 칩이나 PCB (Printed Circuit Board) 기판 등에 변형, 열 손상을 일으키거나 IMC(금속간 화합물; Intermetallic Compound)가 과도하게 성장할 수 있는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제들을 해결하기 위하여 플립칩 패키지에서 솔더링 온도가 낮은 접합 방법들이 사용되거나 연구되고 있다.

플립칩 패키지에서 솔더, Au 등의 범프를 접합하는데 사용되는 방법으로서 열 압착법과 초음파와 열을 동시에 가하는 초음파 병용 열 압착법, 초음파 접합법 등이 있다.

열 압착 방법은 높은 온도에서 압력을 가하여 범프가 형성된 칩을 PCB기판에 접합 하는 방법이다. 접합조건에 예로서, 직경 12 μm , 높이 5 μm 의 Sn 도금된 Cu 범프를 열 압착법으로 접합할 경우 300°C의 온도에서 10초간 24.5N의 압력으로 접합을 한다²⁾. 이 방법은 칩과 PCB기판에 열 손상을 유발하는 문제점이 있다³⁾. 또한 열 압착 공정은 확산에 의해 접합되기 때문에 접합에 소요되는 시간이 다른 접합 공정에 비해 상대적으로 오래 걸린다⁴⁾.

초음파 병용 열 압착법은 솔더의 용점 보다 낮은 70-150°C의 온도에서 초음파와 압력을 가하여 솔더 범프가 형성된 칩을 PCB기판에 접합 하는 방법이다. 이 방법은 열 압착법 보다 좀 더 다양한 재료를 사용할 수 있다. 그리고 열 압착법보다 온도와 압력을 낮출 수 있으며, 접합 시간이 적게 소요된다는 장점이 있다⁵⁾.

초음파 접합은 상온에서 초음파와 압력을 가하는 방법으로, IC칩이나 PCB기판에 열 손상을 최소화시킬 수 있고 접합 시간이 짧은 장점이 있다. 또한 초음파 접합은 솔더 범프를 사용하는 일반적인 리플로 접합법에 비해서는 플럭스리스(fluxless) 접합법이다⁶⁻⁸⁾. 초음파는 솔더와 기재 금속표면의

산화막과 오염물을 제거하여 플럭스리스 접합이 가능하다^{9,10)}. 와이어 본딩에서는 Au 와이어를 이용한 상온 초음파 접합법에 대한 연구가 보고되었다¹¹⁾. 솔더 범프를 이용한 플립칩 패키지에서는 가열된 상태에서의 초음파 접합은 보고된 것이 있으나¹²⁾ 상온 접합은 그 적용 예를 찾아보기 어렵다. 특히, 접합시의 접합부의 온도변화, 접합 조건 등에 대해서는 연구가 보고된 예를 찾아보기 힘들다.

솔더 범프를 사용한 상온 초음파 접합을 위한 기초 연구로서, 압연된 Sn3.5Ag 솔더를 사용하여 Si-wafer와 PCB기판을 초음파 접합하였다. 본 연구에서는 ‘Si-웨이퍼/ Sn3.5Ag솔더’ 접합부의 특성을 관찰하고, 그 신뢰성을 평가하고자 하였다.

2. 실험 방법

실험을 위한 모재로는 10 mm \times 10 mm 크기의 Si 웨이퍼와 10 mm \times 15 mm 크기의 FR-4 PCB 기판을 사용하였다. Si 웨이퍼 상의 UBM(Under Bump Metallization)은 위쪽에서부터 Cu/ Ni/ Al를 각각 0.4 μm / 0.4 μm / 0.3 μm 두께로 전자빔 증착기(E-gun evaporator)를 이용하여 증착하였다. FR-4 기판의 패드(pad; 직경 300 μm)는 위에서부터 Au/ Ni/ Cu를 각각 0.05 μm / 5 μm / 18 μm 두께로 전해 도금하여 형성하였다. Si 웨이퍼와 FR-4 기판을 상온 초음파 접합하기 위해, 솔더로서 Sn 3.5Ag 솔더를 두께 100 μm , 크기 10 mm \times 10 mm 로 압연하여 사용하였다.

Fig. 1에는 초음파 접합 실험법의 개략도를 나타내었다. 접합 실험을 위하여 초음파 접합기의 출력은 1,400 W, 압력은 23 N/cm²로 하였으며, 초음

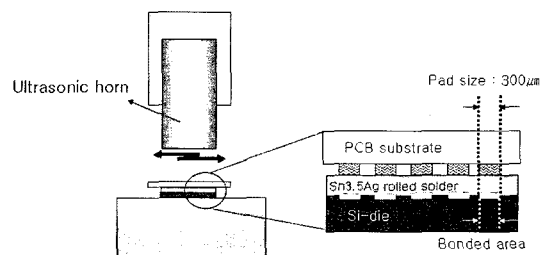


Fig. 1. Schematic diagram of the US soldering using Sn3.5Ag solder (US frequency : 20 kHz, power : 1400 W).

과 접합 시간은 0.5초에서 3초까지 0.5초 단위로 증가시켰다. 비교 자료로서 동일한 시편을 hotplate를 이용하여 2.5초간 250°C에서 솔더링한 후 미세조직을 비교하였다. 초음파 접합 계면의 온도는 K-type 열전대를 이용하여 측정하였다.

초음파 접합 시의 계면에 생성된 금속간 화합물을 조사하기 위하여, 접합된 시편의 단면을 주사전자 현미경(SEM, Scanning Electron Microscope)으로 관찰하였다. 'Si-웨이퍼/ Sn3.5Ag솔더' 계면에 형성된 금속간 화합물의 성분을 분석하기 위하여 EDS(Energy Dispersive Spectroscopy)를 사용하였다.

초음파 접합부의 접합 강도를 측정하기 위하여 전단강도 시험기(shear strength tester)를 이용하였다. Fig. 2에 전단 강도 시험 방법의 개략도를 나타내었다. 전단 팁의 너비는 시편의 직경과 동일한 10 mm 이다. 전단 속도는 200 $\mu\text{m/s}$, 전단 팁의 높이는 1.1 mm로 하였다. 각 조건 당 20회 이상 전단강도를 측정하여 평균값과 표준편차를 계산하였다. 전단 시험 후 전단 파면을 SEM과 EDS를 이용하여 관찰하였다.

3. 실험 결과

3.1 상온 초음파 접합

'Si 웨이퍼/ Sn3.5Ag솔더' 접합 계면에서의 접합

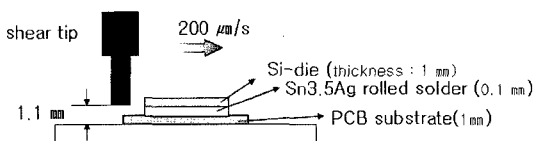


Fig. 2. Schematic diagram of shear test.

상태를 확인하기 위하여, 상온 초음파 접합한 시편의 단면을 주사전자현미경으로 관찰하였다. Fig. 3은 초음파 접합 시간 증가에 따른 접합 계면의 단면 사진이다. 접합 단면에서 접합 시간에 따른 접합부의 접합율을 측정하였다. 접합율(BR)은 $b/L \times 100(\%)$ 으로 계산하였다. 여기서 b 는 접합 단면에서 접합된 부분의 길이를 나타내고, L 은 패드의 직경 크기 300 μm 이다.

시험 분석 결과, 접합시간 1.0초에서 Si 웨이퍼와 솔더 사이의 접합율은 37%로 나타났다. 초음파 접합 시간 1.5초와 2.0초에서는 접합율이 각각 42.7%, 41.7% 으로 증가하였으나 이 조건으로는 충분한 접합이 이루어지지 않았다. 접합 시간 2.5초에서 Si 웨이퍼와 솔더 사이의 접합율이 100%로 양호한 접합을 나타내었다(Fig. 3 참조). 비교자료로 hotplate를 이용하여 250°C에서 2.5초간 솔더링한 시편에서도 접합계면에 균열이 없는 양호한 접합이 이루어졌다.

접합 시간이 3.0초로 과다하게 길어진 경우에는 오히려 Si웨이퍼와 솔더와의 접합 계면에서 균열이 발생하여 (Fig. 4 참조) 접합율이 75.6%으로 감소하였다. 그 이유는 접합계면에 본딩시 형성된 IMC가 계속되는 초음파 진동에 의해 파괴되기 때문이라고 생각된다. 접합 시간 2.0초, 2.5초에서는 금속간 화합물이 발견되었으며, 접합 시간 3.0초에서는 금속간 화합물에서 균열이 관찰되었다 (Fig. 3, 4 참조). 즉, 과도한 초음파 인가 시간이 접합부에 오히려 균열을 발생시켜서 강도를 약화시키는 것으로 확인되었다.

3.2 접합부의 미세 조직

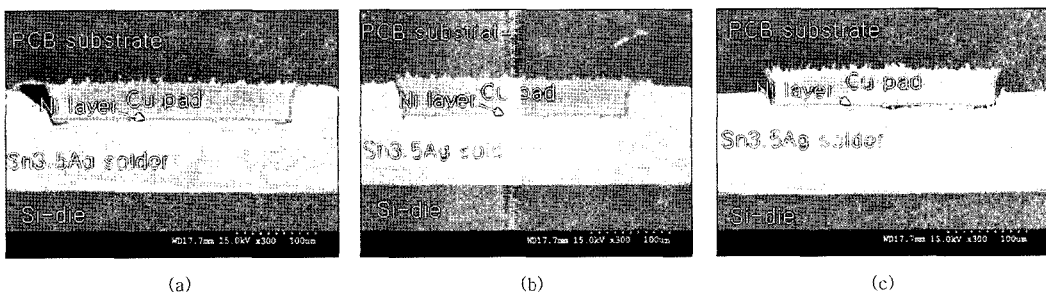


Fig. 3. Solder joints by US soldering at various soldering time : (a) 1.0 s (b) 2.5 s (c) 3.0 s (US frequency : 20 kHz, power : 1400 W).

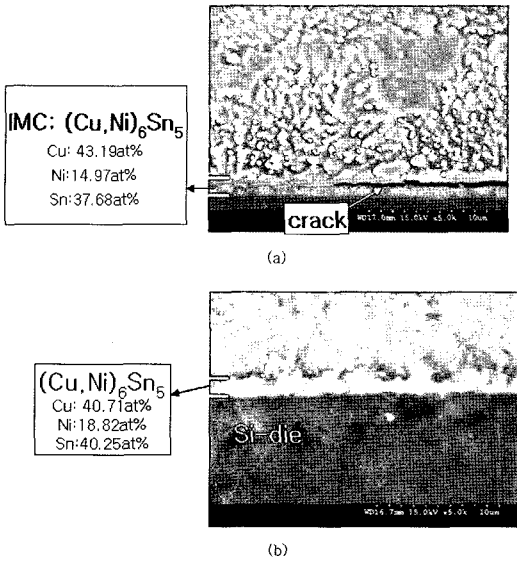


Fig. 4. IMCs between Sn-3.5Ag and Si-die (a) US soldering time of 3.0 s (US frequency : 20 kHz, power 1400 W) (b) Hotplate soldering for 2.5 s.

Fig. 5은 접합 시간 2.0초 동안 초음파 접합한 시편의 Sn3.5Ag 솔더 내부의 미세조직을 나타낸 것이다. 초음파 접합의 경우 접합부의 온도는 68°C 이었다. 일반적으로 리플로우 솔더링한 경우에서와 같이 솔더의 기지는 β-Sn상으로 되어 있었고 Ag₃Sn이 부분적으로 관찰되었다.

초음파 접합 시간 2.5초 동안 접합부의 온도를 측정 한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 초음파 접합 시간 0.5초인 경우 온도는 최대 32°C이었다. 초음

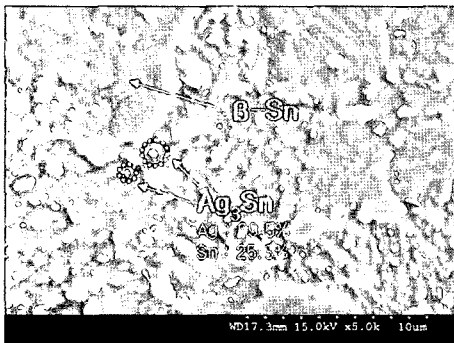


Fig. 5. Sn-3.5Ag solder bulk structures of 2.0 s US soldering time (US frequency : 20 kHz, us power : 1400 W)

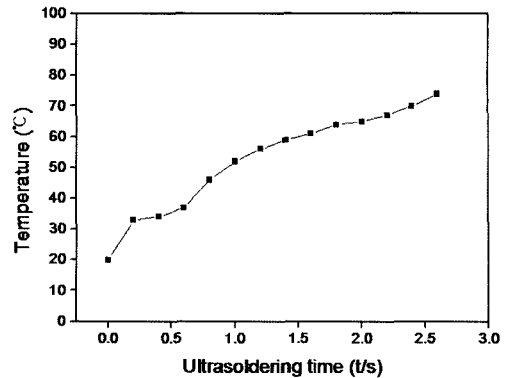


Fig. 6. Temperature profile of the US soldering (US frequency : 20 kHz, power : 1400 W)

파 접합 시간 1.0초, 1.5초, 2.0초, 2.5초, 3.0초일 때 최대 온도는 각각 41°C, 54°C, 68°C, 74°C, 80°C으로 측정 되었다. 기존의 와이어 본딩에서의 접합부의 온도를 측정 한 연구는 있었지만¹³⁾, Sn3.5Ag 솔더를 사용한 상온 초음파 접합부의 실제 온도는 본 연구에서 처음으로 확인되었다.

초음파 접합 시간 2.5초에서 Si웨이퍼(Cu/ Ni/ Al)와 Sn3.5Ag솔더 사이의 금속간 화합물의 조성을 EDS를 이용하여 분석하였다. 그 결과 Cu, Ni, Sn이 각각 48.10at%, 9.44at%, 40.31at%으로 금속간 화합물은 (Cu,Ni)₆Sn₅로 사료된다.

초음파 솔더링부의 이 IMC는 기존의 리플로 솔더링에서 Sn3.5Ag솔더를 사용한 이전의 연구 결과들¹⁴⁾에서 나타나는 (Cu,Ni)₆Sn₅와 동일하다. 일반적으로 솔더링에서 솔더링 초기에는 Cu₆Sn₅가 나타나는게 일반적인데, (Cu,Ni)₆Sn₅은 솔더링 중 솔더/UBM 반응이 진행되면서 Cu 아래쪽의 Ni 이 Cu 입계를 통해 확산되어 나오면서 형성된다¹⁵⁾. 그런데, 본 초음파 솔더링에서는 솔더가 액체 상태인 일반적인 리플로 솔더링과 달리 솔더와 UBM이 고체 상태이고, 솔더링 온도가 최고 80°C 정도로 낮다. 이 경우, Ni이 Cu의 입계 등을 통해 확산되어 나오는 것이, 250°C에서 수행되는 일반적인 리플로, 플로우 솔더링에 비해 떨어질 것으로 사료된다. 그럼에도 불구하고, Ni 이 포함된 (Cu,Ni)₆Sn₅이 형성된 이유는 Si-웨이퍼의 UBM의 Cu층 두께가 0,4 μm으로 얇았기 때문이다. Sn와 Cu의 계면 반응에서 Cu층이 고갈된 후, 형성된 IMC층과 그 밑의 Ni 층이 반응한 것으로 판단된다.

Si웨이퍼와 Sn3.5Ag솔더 사이의 IMC층의 두께를 접합 시간의 증가에 따라 측정하였다. 초음파 접합시간 1.0초, 1.5초에서 금속간 화합물 두께가 각각 0.632 μm , 0.596 μm 이었다. 접합 시간 2.0초에서는 0.843 μm 까지 증가한 후, 접합 시간 2.5초, 3.0초에서는 금속간 화합물의 두께가 각각 0.782 μm , 0.793 μm 으로 더 이상 금속간 화합물이 성장하지 않았다. 이는 Si 웨이퍼의 UBM (Cu/ Ni/ Al)의 두께가 0.4 μm / 0.4 μm / 0.3 μm 으로 얇아서 초음파 솔더링 중에 Cu층과 Ni층이 대부분 소진되어 접합 시간 2.0초 이후에서는 금속간 화합물이 더 이상 성장하지 않은 것으로 사료된다.

2.5초 동안 초음파 접합한 경우, IMC층의 두께는 0.782 μm 으로 같은 시간 동안 hotplate에서 솔더링한 경우에서의 1.267 μm 보다 약 40% 정도 얇은 것으로 관찰되었다. 초음파 솔더링시 솔더와 Cu 층 사이에 IMC는 솔더와 Cu 층간의 상호 혼합 및 상호 확산에 의해 형성될 것이다. 확산에 의한 IMC 형성 두께는 확산 반응에 필요한 온도에 영향을 받는다. 일반적으로 리플로 솔더링시 확산에 의해 Sn3.5Ag 솔더와 Cu패드 사이에서 형성되는 Cu₆Sn₅와 활성화에너지는 409(단위 없음) 정도로 알려져 있다¹⁶⁾. 본 실험 결과로 유추해 본다면, 초음파 솔더링시 얇은 IMC 두께 형성에 낮은 초음파 솔더링의 온도가 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

3.3 솔더 접합부의 전단 강도

Fig. 7는 초음파 접합 시간에 따른 접합부의 전

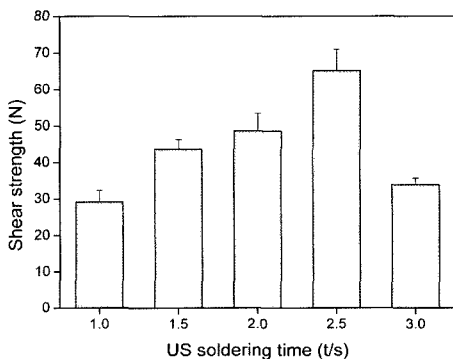


Fig. 7. Shear strengths of Sn-3.5Ag solder joint by US soldering.

단 강도를 나타낸다. 전단 파괴는 접합시간 1초에서 2.5초까지 ‘Si-웨이퍼/ Sn3.5Ag솔더’ 계면에서 일어났고, 접합 시간 3.0초에서는 전단 파괴가 ‘Sn 3.5Ag솔더/ FR-4 기판’ 계면에서 일어났다. 접합 시간 1.0, 1.5, 2.0초에서 전단 강도는 각각 29, 44, 49N으로 접합 시간 증가에 따라 증가하였으며, 접합 시간 2.5초에서 65N으로 최대 전단 강도를 나타내었다. Hotplate를 이용하여 2.5초 동안 접합한 시편의 전단 강도 시험에서는 98N에서 Si웨이퍼가 파괴되는 결과를 나타내었다.

접합 시간이 3.0초로 더 길어지면 강도는 34N으로 감소하였다. 한편 초음파를 이용한 Au 와이어 볼 본딩에서도 초음파 접합시간에 따른 접합강도 변화가 유사하게 보고된 연구¹⁷⁾가 있다. 즉, 100kHz의 초음파를 사용하여 Si 웨이퍼 칩 상에 볼 직경 100 μm 의 Au 와이어 접합을 행하였다. 초음파 접합 시간이 증가함에 따라 전단강도가 증가하다가 12ms 이후 전단강도가 감소하는 결과를 보였다.

본 연구에서 접합시간 증가에 따라 접합강도가 증가한 이유는 3.1절에서 전술한 접합율의 증가 때문인 것으로 믿어진다. 즉, 접합시간이 1.0, 2.0, 2.5초로 증가함에 따라, 접합율은 37, 41.7, 100% 증가하였다. 또한, 접합시간 3.0초인 경우, Si 웨이퍼와 솔더 사이의 접합율은 75.6%로 감소하였다. 이 때 Si 웨이퍼와 솔더 사이의 접합율은 약 24% 정도 감소하였지만, FR-4 기판과 솔더 사이의 접합율은 57.9%로 감소한 것으로 관찰되었다. 따라서 접합 시간 3.0초에서는 FR-4 기판과 솔더 사이의 낮은 접합율이 접합강도의 급격한 감소에 영향을 미친 것으로 판단된다.

Fig. 8은 전단 강도 시험한 후 Si 웨이퍼 상의 파면을 관찰한 것이다. 제일 윗 줄의 저배율 사진에서 접합시간에 따른 접합면의 파단 흔적을 볼 수 있다. 이 파단면을 더욱 확대하여 고배율 사진을 관찰하면, 파단 흔적은 A, B 두 부분으로 좀 더 명확히 구분된다. 초음파 접합 시간 2.5초 파면을 EDS로 성분 분석한 결과, A부분은 Sn 94.80%로 Sn3.5Ag솔더(백색), B부분은 Cu 72.03%, Ni 26.02% 성분의 UBM층(진한 회색)으로 확인되었다.

A부분은 솔더를 따라 파괴된 연성파단부, B부분은 UBM층을 따라 파단된 취성파단부를 나타낸

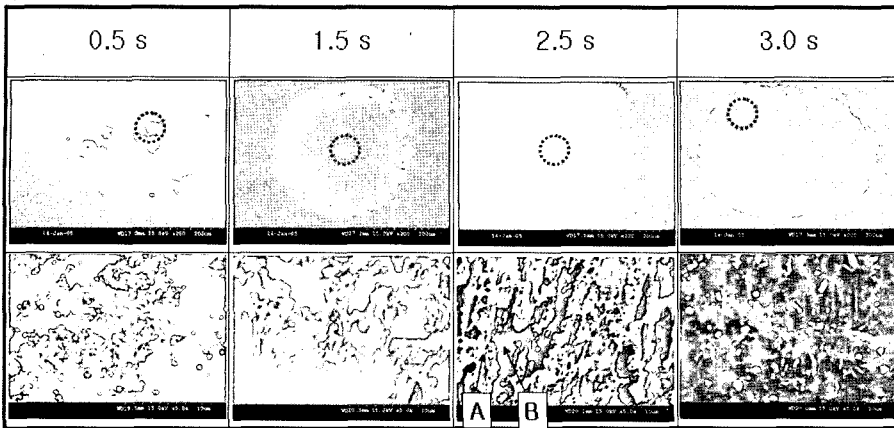


Fig. 8. Bonding areas of Si-wafer fracture surfaces at various US soldering times (US frequency : 20 kHz, power : 1400 W).

다. 이로부터, 접합시편의 파단은 강도가 가장 높은 2.5초의 경우 Sn3.5Ag솔더 부분의 연성파단이 대부분인 것으로 확인되었다.

4. 결 론

상온 초음파 접합의 플립칩 패키지에 적용 가능성을 평가 하였다. Cu/ Ni/ Al (0.4 μm / 0.4 μm / 0.3 μm)를 증착한 Si웨이퍼 와 Au/ Ni/ Cu (0.05 μm / 0.5 μm / 18 μm)를 도금한 PCB 기판 패드를 솔더를 사용하여 상온 초음파 접합하였다. 접합재로는 100 μm 두께의 Sn3.5Ag 압연 솔더를 사용하였으며, 초음파 주파수는 20 kHz, 출력은 1400 W, 압력은 23 N/cm² 이었다. 접합 시간에 따른 초음파 접합부 특성을 관찰하고 신뢰성 평가를 하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 초음파 접합 시간 2.5초에서의 접합 온도는 74°C이었다. 이 때, 'Si-웨이퍼/솔더' 접합 단면에서의 접합율은 100%로 양호한 접합계면이 관찰되었다.

2) 초음파 접합 시 Si 웨이퍼와 솔더 사이의 IMC는 (Cu,Ni)₆Sn₅ 으로 일반적인 리플로우 솔더링에서의 IMC와 성분이 같았다. 하지만, 초음파 접합 시간 2.5초에서의 IMC두께는 0.782 μm 으로 같은 시간동안 hotplate 솔더링하여 생성된 IMC 두께 1.267 μm 보다는 약 40% 정도 얇게 관찰되었다.

3) 접합 시간이 증가함에 따라 전단 강도가 증가하였다. 접합 시간 2.5초에서 65N으로 최대값을

나타내었다. 접합 시간 3.0초에서는 전단 강도가 34N으로 감소하였다. 이는 접합 계면에서 발생된 균열 때문으로 판단된다.

4) 전단 강도가 가장 높은 접합시간 2.5초에서 전단 파면을 관찰한 결과, 접합부에서 연성 파괴가 대부분 일어난 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2004-000-10572-0)지원으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. I. Shohji, T. Yoshida, T. Takahashi, S. Hioki, "Tensile properties of Sn-Ag based lead-free solders and strain rate sensitivity", Mater. Sci. and Eng., A366, 50-55(2004).
2. Y. Tomita, M. Tago, Y. Nemoto, K. Takahashi, "Cu bump interconnections in 20 μm pitch utilizing electroless tin-cap on 3D stacked LSP", Electronic Materials and Packaging, EMAP 2001. Advances in 19-22 Nov., 107 - 114(2001).
3. P. H. Lawyer, D. Choudhury, M. D. Wetzel, D. B. Rensch, "Thermosonic bonding of high-power semiconductor devices for integration with planar microstrip circuitry", Electronics Manufacturing Technology Symposium., Twenty-Third IEEE/CPMT, 19-21 Oct., 390 - 393(1998).

4. B. C. Kim, J. H. Kim, J. H. Lee, C. D. Yoo and D. S. Choi, "Longitudinal Ultrasonic Bonding of Strip-type Au Bumps", *J. Kor. Wel. Soc.*, 22, 258-264 (2004).
5. S. Y. Kang, P. M. Williams and Y. C. Lee, "Modeling and Experimental Studies on Thermosonic Flip-Chip Bonding", *IEEE Trans. Comp. Pack. Technol.*, 18, 728-733(1995).
6. H. R. Faridi, J. H. Develletian and H. P. Le, "A New Look at Flux-Free Ultrasonic Soldering", *Welding Journal Sep.*, 41-45(2000).
7. S. Y. Kang, P. M. Williams, T. S. McLaren and Y. C. Lee, "Studies of thermosonic bonding for flip chip assembly", *Mater. Chem. and Phy.*, 42, 31-37(1995).
8. S. Y. Kang, P. M. Williams and Y. C. Lee, "Modeling and Experimental Studies on Thermosonic Flip-Chip Bonding", *IEEE Trans. on CPMT B*, 18, 728-733 (1995).
9. R. W. Woodgate, *The Handbook of Machine Soldering-SMT and TH*, 3rd edn, John Wiley & Sons, New York, 306(1996).
10. C. J. Chen and K. L. Lin, "The reaction between electroless Ni-Cu-P deposit and 63Sn-37Pb flip chip solder bumps during reflow", *J. Electro. Mater.*, 29, 1007-1014(2000).
11. I. Lum, N. J. Noolu, Y. Zhou, "Gold ball bonding on copper substrates at ambient temperatures", *Global SMT and Packaging*, 4(1), 16-19(2004).
12. S. M. Hong, C. S. Kang, J. P. Jung, "Fluxless Sn-3.5mass%Ag Solder Bump Flip Chip Bonding by Ultrasonic Wave", *Material Trans.*, 43(6), 1336-1340 (2002).
13. J. Falk, "Thermodynamic aspect of the wire-bonding process", *Microelectronics International*, 15(1), 23-31 (1998).
14. C. S. Huang, J. G. Duh, Y. M. Chen, "Metallurgical Reaction of the Sn-3.5Ag Solder and Sn-37Pb Solder with Ni/ Cu Under-Bump Metallization in a Flip-Chip Package", *Journal of Electronic Materials*, 32(12), 1509-1514(2003).
15. T. Laurila, V. Vuorinen, J. K. Kivilahti, "Interfacial reactions between lead-free solders and common base materials", *Materials Science and Engineering R: Reports*, 49(1-2), 1-60(2005).
16. W. K. Choi and H. M. Lee, "Prediction of primary intermetallic compound formation during interfacial reaction between Sn-based solder and Ni substrate", *Scripta Materialia*, 46, 777-781(2002).
17. M. Mayer, O. Paul, D. Bolliger and H. Baltes, "Integrated temperature microsensors for characterization and optimization of thermosonic ball bonding process", *IEEE Trans. Comp. Pack. Technol.*, 23, 393-398(2000).