플립칩 공정시 반응생성물이 계면반응 및 접합특성에 미치는 영향

하준석^{1,†} · 정재필² · 오태성³

¹전남대학교 응용화학공학부, ²서울시립대학교 신소재공학과, ³홍익대학교 신소재공학과

Effects of Intermetallic Compounds Formed during Flip Chip Process on the Interfacial Reactions and Bonding Characteristics

Jun-Seok Ha^{1,†}, Jae Pil Jung² and Tae Sung Oh³

¹Faculty of Applied Chemical Engineering, Chonnam National University

²Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul

³Department of Materials Science and Engineering, Hongik University

(2012년 3월 20일 접수: 2012년 5월 2일 수정: 2012년 6월 11일 게재확정)

초 록: 플립칩 접합시 발생하는 계면반응 거동과 접합특성을 계면에 생성되는 금속간화합물의 관점에서 접근하였다. 이를 위하여 Al/Cu와 Al/Ni의 under bump metallization(UBM) 층과 Sn-Cu계 솔더(Sn-3Cu, Sn-0.7Cu)와의 반응에 의한 금속간화합물의 형성거동 및 계면접합성을 분석하였다. Al/Cu UBM 상에서 Sn-0.7Cu 솔더를 리플로우한 경우에는 솔더/UBM 계면에서 금속간화합물이 형성되지 않았으며, Sn-3Cu를 리플로우한 경우에는 계면에서 생성된 Cu_6Sn_5 금속간화합물이 spalling 되어 접합면이 분리되었다. 반면에 Al/Ni UBM 상에서 Sn-Cu계 솔더를 리플로우한 경우에는 0.7 wt% 및 3 wt%의 Cu 함량에 관계없이 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물이 계면에 형성되어 있었으며, 계면접합이 안정적으로 유지되었다.

Abstract: We studied interfacial reaction and bonding characteristics of a flip chip bonding with the viewpoint of formation behavior of intermetallic compounds. For this purpose, Sn-0.7Cu and Sn-3Cu solders were reflowed on the Al/Cu and Al/Ni UBMs. When Sn-0.7Cu was reflowed on the Al/Cu UBM, no intermetallic compounds were formed at the solder/UBM interface. The Cu_6Sn_5 intermetallic compounds formed by reflowing Sn-3Cu solder on the Al/Cu UBM were spalled from the interface, resulting in delamination of the solder/UBM interface. On the other hand, the $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ intermetallic compounds were formed by reflowing of Sn-0.7Cu and Sn-3Cu on the Al/Ni UBM and the interfacial bonding between the Sn-Cu solders and the Al/Ni UBM was kept stable.

Keywords: Flip chip, intermetallic compound, UBM, Al/Cu, Al/Ni

1. 서 론

전자제품의 고성능화와 고집적화를 위하여 전자 패키지의 크기는 감소하고 있으나, 이와는 반대로 입출력 신호는 획기적으로 증가하고 있다. 이와 같은 요구를 만족시키기 위해 플립칩 패키징이 널리 사용되어 왔으며 앞으로 여러 형태로 계속해서 사용될 것으로 판단된다.¹⁾ 플립칩 공정은 반도체 칩에 형성한 솔더범프를 기판 패드에 배열한 후 리플로우 시켜 반도체 칩을 기판에 실장하는 방법으로서 미세한 피치를 가진 반도체 칩의 실장이 가능하다. 또한 반도체 칩의 점유면적을 최소화시킬 수 있어 전자제품의 소형화와 박판화가 가능하고, 반도체 칩과 기판과의 접속거리 감소에 따른 전기적 성질의 향상이 가능하기 때문에 최근 스마트폰을 비롯한 각종 휴대용 전자기기에 다양하게 적용되고 있다.^{2,3)}

플립칩 패키지에 사용되는 반도체 칩의 알루미늄 패드는 무연솔더의 주성분인 Sn과 반응을 하지 않기 때문에 알루미늄 패드 위에 under bump metallization(UBM) 층을 형성하여 무연솔더와 반응시켜 접합을 이룬다.⁴⁾ 솔더와 UBM과의 반응에 의하여 생성되는 금속간화합물은 양호한 접합을 이루기 위해서는 꼭 필요한 존재이다.⁵⁻¹⁰⁾ 그러나 솔더와 UBM이 장시간 반응하여 금속간화합물이 과도한 성장을 할 경우 금속간화합물이 솔더 내부로 떠오르게 되는 spalling 현상이 발생하여 접합력이 급속히 악화되어 솔더/UBM 계면의 기계적 특성이 저하되는 것으로 보고되고 있다.^{5,7)} 이런 이유로 솔더와 UBM 사이의 계면에서 생성되는 금속간화합물은 꼭 필요하지만 너무 과도하게 성장해서는 안되는 양면성을 지니고 있다고 할 수 있다.

본 연구에서는 리플로우 공정을 이용한 플립칩 접합시

[†]Corresponding author

E-mail: jsha@jnu.ac.kr

발생하는 계면 반응거동과 접합특성을 계면에 형성되는 금속간화합물의 관점에서 살펴보고자 하였다. 이를 위하여 현재까지 박막 UBM으로 널리 사용되고 있는 Delko 사의 Al/Ni/Cu UBM을 기준으로 UBM 층을 Al/Cu와 Al/Ni로 변화를 주었다. 이와 같은 UBM에 Cu 함량이 서로 다른 Sn-0.7Cu와 Sn-3Cu 솔더를 반응시켜 형성되는 금속간화합물에 변화를 주었으며, 이에 따른 계면 반응거동과 접합특성을 분석하였다.

2. 실험방법

UBM과 반응시킬 Sn-0.7Cu와 Sn-3Cu 조성의 솔더 비드(bead)를 제작하기 위하여 우선 Sn과 Cu를 Sn-0.7Cu 또는 Sn-3Cu 솔더 조성에 맞추어 칭량한 후, 진공유도용해로를 사용하여 용해시켜 각기 Sn-0.7Cu와 Sn-3Cu 조성의 솔더 잉곳을 제작하였다. 이들 솔더 잉곳들을 압연하여 100 μm 두께의 박판으로 만든 후, 10 mg 크기의 작은 조각으로 절단하였다. 이들 솔더 조각들을 240°C로 유지하고 있는 RMA 플럭스 내에 떨어뜨려 용해시켜 Sn-0.7Cu와 Sn-3Cu 조성의 솔더 비드들을 제작하였다.

솔더와 반응할 UBM 층을 형성하기 위해 우선 4인치 크기의 p형 Si(100) 웨이퍼를 oxidation furnace 내에 장입하고 산화처리하여 표면에 SiO_2 층을 형성하였다. 이와 같은 Si 기판에 e-beam 증착법을 사용하여 400 nm 두께의 Al과 400 nm 두께의 Cu를 순차적으로 증착시켜 Al/Cu UBM을 형성하였으며, 400 nm 두께의 Al과 400 nm 두께의 Ni를 순차적으로 증착시켜 Al/Ni UBM을 형성하였다. Al/Cu와 Al/Ni UBM이 형성된 Si 웨이퍼를 dicing saw를 사용하여 10 mm×10 mm 크기로 절단하여 Si 기판을 형성하였다.

Fig. 1. Schematic illustration for the reflow experiments.

Fig. 1과 같이 Si 기판을 260°C로 가열되어 있는 RMA 플럭스에 담구고 3분간 유지시켜 Si 기판의 온도를 260°C로 안정화 시킨 후, 기판 표면의 UBM 층에 Sn-0.7Cu 또는 Sn-3Cu 솔더 비드를 떨어뜨리고 30초간 유지하여 솔더비드를 리플로우 시켜 솔더범프를 형성하였다. 이와 같이 형성한 Sn-0.7Cu와 Sn-3Cu 솔더범프에 대해 불전단시험을 행하여 솔더/UBM 계면의 기계적 성질을 측정하였으며, 불전단시험에 의해 파단된 접합계면을 Philips XL30 Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)을 사용하여 관찰하였다. 리플로우한 솔더범프의 단면을 관찰하기 위하여 0.04 μm 크기의 알루미늄 페이스트를 사용하여 시편 연마를 한 후, 질산, 염산과 글리세롤을 1 : 1 : 4의 부피비로 혼합한 에칭액을 사용하여 80°C에서 에칭을 행하였다. 솔더와 UBM의 반응에 의해 형성된 금속간 화합물의 조성은 Energy Dispersive X-ray spectroscopy(EDS)를 사용하여 분석하였다.

3. 결과 및 토의

리플로우가 끝난 후 솔더와 UBM/Si 기판의 단면을 관찰한 결과를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다. 기판과 솔더의 계면에 수직한 방향으로 폴리싱을 실시한 후 계면관찰이 용이하도록 솔더를 에칭한 후 단면 SEM을 관찰하

Fig. 2. Scanning electron micrographs of the (a) Sn-0.7Cu and (b) Sn-3Cu solders reflowed on the Al/Cu UBM for 30 seconds.

Fig. 3. Scanning electron micrographs of the (a) Sn-0.7Cu and (b) Sn-3Cu solders reflowed on the Al/Ni UBM for 30 seconds.

였다. Fig. 2에 Al/Cu UBM과 Sn-0.7Cu 및 Sn-3Cu 솔더와의 반응계면의 미세구조를 나타내었으며, Fig. 3에는 Al/Ni UBM과 Sn-0.7Cu 및 Sn-3Cu 솔더와의 반응계면의 미세구조를 나타내었다. Fig. 2에서 보듯이 Al/Cu를 UBM으로 사용했을 때에는 Sn-0.7Cu와 Sn-3Cu 솔더의 경우 모두 솔더범프와 기판의 계면분리가 일어났다. 단, 두 솔더에서 발생하는 차이점으로는 Sn-0.7Cu 솔더의 경우에는 솔더범프가 접합되어 있던 계면이나 솔더범프 내에서 금속간화합물이 발견되지 않았으나, Sn-3Cu 솔더를 반응시킨 경우에는 계면에서 Cu_6Sn_5 금속간화합물의 형성되어 있다는 점이다. 이에 반해, Al/Ni UBM 상에서 리플로우시킨 Sn-0.7Cu 및 Sn-3Cu 솔더범프의 경우에는 Fig. 3과 같이 두 솔더 모두 UBM과의 계면에서 금속간화합물을 형성하였으며 솔더범프들이 기판에 잘 붙어 있음을 관찰할 수 있다. 이들 Fig. 2와 Fig. 3에서 관찰한 UBM과 솔더 조합에 따른 계면에서의 금속간화합물의 형성 유무 및 솔더범프와 기판의 분리 여부를 정리하여 Table 1에 나타내었다. Table 1에서와 같이 솔더/UBM 계면에서 금속간화합물의 형성 유무 및 계면 접합성은 사용된 UBM과 솔더의 조합에 의존함을 알 수 있다.

Al/Cu와 Al/Ni UBM에 형성한 솔더범프를 불전단시험한 후 기판의 계면 파단면을 주사전자현미경으로 관찰한 미세구조들을 각기 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었는데, 이들

Table 1. Behaviors of the intermetallic compound formation and interfacial delamination with the combination of the UBM and solder.

UBM	Solder	Sn-0.7Cu solder		Sn-3Cu solder	
		IMC formation	Interfacial adhesion	IMC formation	Interfacial adhesion
Al(400 nm)/Cu(400 nm)		Yes	No	Yes	No
Al(400 nm)/Ni(400 nm)		No	Yes	Yes	Yes

미세구조는 Table 1에 나타난 솔더와 UBM의 조합에 따른 금속간화합물의 생성 유무 및 기판과의 접합성과 일치하는 결과를 나타내고 있다. Fig. 4에 나타난 것과 같이 Al/Cu UBM의 경우에는 Sn-0.7Cu 솔더와 Sn-3Cu 솔더에 대해서 모두 계면에서 금속간화합물이 전혀 관찰되지 않아 두 솔더에 대해서 모두 접합이 잘 이루어지지 않은 것을 확인할 수 있었으며, EDS를 사용하여 계면조성을 분석한 결과 파단면에서 Cu가 검출되지 않았으며, Al과 Si만 검출되었다. 반면에 Al/Ni UBM을 사용한 경우에는 Fig. 5와 같이 불전단시험한 계면 파단면에서 금속간화합물이 관찰되어, 솔더와 UBM의 반응에 의해 금속간화합물이 형성되며 이들 금속간화합물이 계면에 잘 접합되어 있다는 것을 유추할 수 있다. 이들 파단면에 있는 금속간화합물의 조성을 EDS를 사용하여 분석한 결과 Cu와 Ni, 그리고 Sn으로 구성되어 있음을 확인하였다.

이제까지의 결과에서와 같이 솔더/UBM 계면에서 금속간 화합물의 형성 유무 및 계면 접합성이 UBM의 종류 및 Sn-Cu 솔더내 Cu 함량에 크게 의존하는 것을 관찰할 수 있었는데, 이와 같은 원인으로는 UBM 재료인 Cu와 Ni이 Sn-Cu 솔더 내로 용출(dissolution) 되는 정도의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. UBM 층이 솔더내로 용출되는 것은 최근 플립칩 패키지에 사용되는 기판 제조공정에서 이슈가 되고 있다. 특히 전기도금을 이용하여 형성한 후막 UBM의 경우보다는 스퍼터링이나 진공증착법으로 제작된 박막 UBM의 경우에 심각한 문제로 작용할 수 있다고 보고되고 있다.⁶⁾ 본 실험에서도 Sn-0.7Cu 솔더를 Al/Cu UBM에서 리플로우시 Al/Cu UBM의 Cu가 모두 솔더내로 용출하기 때문에 계면에서 금속간화합물이 형성되지 못하는 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 2 참조).

Sn-Cu의 상태도를 보면, 240°C에서 Sn에 대한 Cu의 고용 한도는 약 2 wt%이며, Sn-Pb 공정솔더에 대한 Cu의 고용 한도가 220°C에서 0.18 wt%인 것에 비하면 상당히 높은 값이다. 본 실험에서 사용된 Al/Cu UBM에 있는 Cu막이 모두 솔더 내로 용출된다고 가정하면 솔더 내의 Cu의 농도는 약 1.1 wt%가 된다. 따라서 Al/Cu UBM 상에서 Sn-0.7Cu 솔더를 리플로우한 경우에는 UBM의 모든 Cu가 용융 상태인 솔더 내로 용출되었기 때문에 Fig. 2(a)와 같이 계면에서 금속간화합물을 형성하지 못하였을 것으로 판단된다. 반면에 Al/Cu UBM 상에서 Sn-3Cu

(a)

(b)

Fig. 4. Scanning electron micrographs observed on the fractured interfaces formed between the Al/Cu UBM and (a) Sn-0.7Cu solder and (b) Sn-3Cu solder.

솔더를 리플로우 한 경우에는 솔더 내의 Cu 함량이 이미 고용한도보다 많은 과포화 상태이기 때문에 UBM의 Cu 층이 솔더내로 용출되지 않고 제 자리에서 Sn과 반응하여 Fig. 2(b)와 같이 계면에서 금속간 화합물이 형성되었다고 판단된다. Fig. 2(b)에서 Sn-3Cu 솔더범프와 기판의 분리가 발생한 것은 계면에서 금속간화합물이 모두 spalling 되어 접합력을 잃고 난 후에 발생하는 현상이라 할 수 있다. 이는 Ti/Cu(100 nm/870 nm) UBM 상에서 SnPb 공정솔더를 리플로우 했을 경우 10분만에 금속간화합물의 spalling이 일어나서 계면이 완전히 분리되었다는 보고와⁷⁾ 유사한 결과라고 생각된다.

Al/Cu UBM을 사용한 경우와는 달리 Al/Ni UBM 상에서 리플로우 한 경우에는 Sn-0.7Cu와 Sn-3Cu 솔더에서 모두 계면 금속간화합물이 안정적으로 형성되어 계면 접합이 잘 유지되고 있는 것을 관찰되었다. Ti/Ni(50 nm/200 nm) UBM 상에서 SnPb 공정솔더를 리플로우 했을 때 40분이 지나서야 spalling이 일어나기 시작한다고 보고되었다.⁸⁾ SnPb 공정솔더를 리플로우시 Ti/Cu UBM에서는 10분만에 금속간화합물의 spalling이 발생하나, Ti/Cu UBM의 Cu 층의 두께보다 1/4 이상 더 얇은 Ni 층으로 구성된 Ti/Ni UBM을 사용한 경우에는 40분 이상 리플로우

시에도 spalling이 일어나지 않았다는 보고^{7,8)}들을 본 실험의 결과와 비교시, Al/Cu와 Al/Ni UBM에서 금속간 화합물의 형성거동의 차이는 Cu와 Ni의 Sn-Cu 솔더에 대한 반응성의 차이에 기인한다고 판단할 수 있다.

Fig. 5에서 관찰된 금속간화합물의 조성이 Cu, Ni 그리고 Sn을 포함하고 있다는 EDS 결과는 Cu와 Ni이 동시에 Sn과 반응할 때, 일반적으로 Cu와 Sn의 반응시 형성되는 것으로 알려진 Cu_6Sn_5 가 아닌 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 상이 형성된다는 보고들과 잘 일치하는 결과이다.^{9,10)} 솔더와 UBM 계면에 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 상이 형성시 접합성이 높아지며, spalling 현상의 진행을 억제시켜서 계면 신뢰성이 우수하여진다고 보고되고 있다.⁹⁾

본 실험의 결과들로부터 플립칩 공정에 적용하기 위한 솔더재료와 박막 UBM을 선정함에 있어서, Ni이 포함되는 금속간화합물을 성장시킴으로써 금속간화합물의 spalling과 계면분리를 억제하도록 하는 솔더-UBM 시스템을 새로이 제안할 수 있다. 이와 같은 시스템으로는 일반적으로 사용되고 있는 Al/Ni/Cu의 3층 구조의 UBM이 아닌 Al/Ni 2층 구조의 UBM에 Sn-Cu계 솔더를 사용하거나, 아니면 반대로 Al/Cu UBM에 Sn-Ni계 솔더를 사용한 조합도 가능할 것이다. Sn-Ni계 솔더의 경우에는 일반적으로는 사용되지 않는 솔더 조성이지만, 용해온도 이

(a)

(b)

Fig. 5. Scanning electron micrographs observed on the fractured interfaces formed between the Al/Ni UBM and (a) Sn-0.7Cu solder and (b) Sn-3Cu solder.

하에서 솔더링을 행하는 부분용융 솔더링 공정(partial melting soldering process)의 가능성과 이들의 실제 적용에 대한 연구들이 진행되어 왔다.^{10,11)} 본 실험의 결과들로부터 제안하는 솔더-UBM 시스템을 사용하면 UBM 형성공정을 간소화시킬 수 있으며, $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물을 형성하여 spalling을 억제시킴으로써 계면안정성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 Al/Ni/Cu UBM 시스템과는 달리 단일 젖음층을 갖는 Al/Cu와 Al/Ni UBM에 Sn-0.7Cu와 Sn-3Cu 조성의 솔더를 리플로우시 발생하는 계면 반응거동과 접합상태를 계면에서 생성되는 금속간화합물의 관점에서 접근하고자 하였다. Al/Cu UBM 상에서 Sn-0.7Cu 솔더를 리플로우한 경우에는 UBM의 Cu 층이 모두 솔더 내로 용출되어 계면에서 금속간화합물이 형성되지 않았으며, Sn-3Cu를 리플로우한 경우에는 계면에서 생성된 Cu_6Sn_5 금속간화합물이 spalling 되어 접합면이 분리된 상태를 보이고 있었다. 그러나 Al/Ni UBM 상에서 Sn-Cu계 솔더를 리플로우한 경우에는 0.7 wt% 및 3 wt%의 Cu 함량에 관계없이 $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ 금속간화합물이 계면에 형성되어 있었으며, 이에 의해 계면접합이 안정적으로 유지되고 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같이 UBM에 따른 계면 반응거동과 접합상태의 차이는 UBM의 젖음층으로 사용된 Cu와 Ni 층과 Sn-Cu 무연솔더내 Sn과의 반응성의 차이와 생성된 금속간화합물의 종류에 따른 결과라고 생각된다. 본 연구의 결과를 바탕으로 계면접합성이 우수한 계면 금속간화합물을 생성시킬 수 있는 UBM과 솔더 조성의 조합을 제시함으로써, 박막 UBM을 적용한 플립칩 공정에서 계면접합성을 향상시킬 수 있는 방안을 제시하였다는데 의의가 있다고 하겠다.

감사의 글

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로

한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2011-0023668)

참고문헌

1. M. Y. Kim, S. K. Lim and T. S. Oh, "Thermal Cycling and High Temperature Storage Reliabilities of the Flip Chip Joints Processed Using Cu Pillar Bumps", J. Microelectro. Packag. Soc., 17(3), 27 (2010).
2. J. Y. Choi, M. Y. Kim, S. K. Lim and T. S. Oh, "Flip Chip Process for RF Packages Using Joint Structures of Cu and Sn Bumps", J. Microelectro. Packag. Soc., 16(3), 67 (2009).
3. J. Y. Choi and T. S. Oh, "Flip Chip Process by Using the Cu-Sn-Cu Sandwich Joint Structure of the Cu Pillar Bumps", J. Microelectro. Packag. Soc., 16(4), 9 (2009).
4. S. M. Hong, J. Y. Park, C. B. Park, J. P. Jung and C.-S. Kang "A Study on the Wetting Properties of UBM-Coated Si-wafer", J. Microelectron. Packag. Soc., 7(2) 55 (2000).
5. J. S. Ha, T. S. Oh and K. N. Tu, "Effect of Super-saturation of Cu on Reaction and Intermetallic Compound Formation between Sn-Cu Solder and Thin Film Metallization", J. Mater. Res., 18(9), 2109 (2003).
6. M. Lia, F. Zhanga, W. T. Chena, K. Zenga, K. N. Tu, H. Balkana and P. Elenius, "Interfacial Microstructure Evolution between Eutectic SnAgCu Solder and Al/Ni(V)/Cu Thin Films", J. Mater. Res., 17(7), 1612 (2002).
7. K. N. Tu and K. Zeng, "Tin-lead (Sn-Pb) Solder Reaction in Flip Chip Technology", Mater. Sci. Eng. 38(1) 6 (2001).
8. P. G. Kim, J. W. Jang, T. Y. Lee and K. N. Yu, "Interfacial Reaction and Wetting Behavior in Eutectic SnPb Solder on Ni/Ti Thin Films and Ni Foils", J. Appl. Phys., 86(12), 6746 (1999).
9. C. E. Ho, R. Y. Tsai, Y. L. Lin and C. R. Kao, "Effect of Cu Concentration on the Reactions between Sn-Ag-Cu Solders and Ni", J. Electron. Mater., 31(6), 584 (2002).
10. J. S. Ha, "A Study on Partial Melting Soldering Process and Reliability for Pb-Free Flip Chip Package", Doctorial Thesis, Seoul National University, Seoul (2002).
11. J. Y. Park, "Study on the Analysis of Wetting Forces in the Wetting Balance Curve and Application to the Prediction of Solder Joint Geometry", Doctorial Thesis, Seoul National University, Seoul (2000).