

# 파워반도체용 Cu/Sn/Ag와 Ni/Sn/Ag 천이액상접합 최적 공정 조건과 전단강도

손성현\* · 김정아\*\* · 박유진\*\*\* · 조경목\*,† · 강남현\*,†

\*부산대학교 재료공학부

\*\*삼성전기 기판솔루션사업부

\*\*\*캘리포니아 대학교 샌디에이고 재료공학부

## Optimum Process Condition and Shear Strength of Transient Liquid Phase Bonded Cu/Sn/Ag and Ni/Sn/Ag Structures for Power Semiconductor Interconnect

Sunghyun Sohn\*, Jeonga Kim\*\*, Yujin Park\*\*\*, Kyung Mox Cho\*,† and Namhyun Kang\*,†

\*Department of Materials Science & Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

\*\*Substrate Solution, Samsung Electro-Mechanics, Busan, 46754, Korea

\*\*\*Department of Materials Science & Engineering, University of California at San Diego, CA 92093, USA

†Corresponding author : chokm@pusan.ac.kr, nhkang@pusan.ac.kr

(Received June 6, 2019 ; Revised July 5, 2019 ; Accepted July 11, 2019)

### Abstract

Transient Liquid Phase Bonding (TLPB) is one of the promising processes for interconnecting power semiconductors, which are usually used at high temperature. However, the TLPB process parameters needed to ensure robust interconnection have not been systematically studied. In this study, TLPB was conducted with various bonding temperatures and times. Sandwich structures made of Cu/Sn/Cu, Ag/Sn/Ag, and Ni/Sn/Ni were processed at 250 and 280 °C for 1, 2, and 3 h, respectively. The microstructure of the interconnections was analyzed with scanning emission microscopy equipped with energy dispersive spectroscopy. Then dissimilar metalized Cu/Sn/Ag and Ni/Sn/Ag sandwich structures processed at 280 °C for 1, 2, and 3 h. The fracture surface of Cu/Sn/Ag consisted of Ag<sub>3</sub>Sn with shear bands, and the shear strength was 30 MPa on average. The fracture surface of Ni/Sn/Ag consisted of Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> and Ag<sub>3</sub>Sn with shear bands, and the shear strength was 31 MPa on average. The minimum bonding time for reliable interconnection was 1 and 2 h for Cu/Sn/Ag and Ni/Sn/Ag, respectively.

Key Words : Transient liquid phase bonding, Metallization, Interconnect, Power semiconductor, Intermetallic compounds, Lap-shear test

### 1. 서 론

최근 넓은 에너지 밴드 갭을 가지는 SiC 혹은 GaN에 대한 수요가 증가하고 있다. 이러한 SiC, GaN 반도체 부품들은 높은 열전도도와 고온에서의 안정성 등이 큰 특징이며 특히 고온에서의 안정성으로 인해 높은 작동 온도를 요구하는 전자부품에 주로 사용된다<sup>1)</sup>. 따

라서 고온에서의 안정성 요구는 칩과 기판을 연결하는 접합부의 문제로 귀결된다. 상용화되고 있는 무연 고온 솔더 접합부의 재용점 온도는 250 °C 미만이며<sup>2,3)</sup> 사용 환경에 따라 최대 600 °C의 재용점 온도를 요구하는 파워반도체의 접합재료로 적합하지 않다<sup>4)</sup>.

천이액상접합(Transient Liquid Phase Bonding, TLPB)은 기존의 무연 솔더를 이용해 높은 재용점 온도를 갖는 금속간 화합물로 구성된 접합부를 얻는 공정

이다<sup>2)</sup>. TLPB의 재용점 온도는 칩 혹은 기판에 증착된 metalization의 종류와 솔더로 사용되는 interlayer의 종류에 의해 결정되는 금속간 화합물의 용점에 의존한다. 예를 들면, Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>, Ag<sub>3</sub>Sn, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Cu<sub>3</sub>Sn의 용점은 각각 800, 480, 415, 676 °C 이다. Cu, Ni, Ag 등의 metalization과 대표적 무연 솔더인 Sn으로 구성된 금속간 화합물 접합부는 기존의 무연 솔더로 이루어진 접합부의 용점보다 높으므로 파워반도체 환경에 적합하다.

TLPB의 중요성은 대두되고 있으나 압력, 온도와 시간에 따른 TLPB 특성과 이중 metalization에 따른 접합부의 분석 및 특성평가는 활발하게 이루어지고 있지 않다. 따라서 본 연구는 Sn을 interlayer, Cu, Ni, Ag를 metalization으로 하여 온도와 접합 시간에 따른 동종 접합부의 특성과 이중 metalization TLPB 접합부의 특성평가를 수행하였다. 이를 통해 최적의 TLPB 공정 조건과 접합부의 적용 가능성에 대해 논하였다.

## 2. 실험 방법

본 연구는 metalization /Sn interlayer/ metalization 샌드위치 구조를 TLPB 실험에 이용하였고, Fig. 1은 접합부의 구조 모식도를 나타내었다. Metalization으로는 5 mm (L) × 5 mm (W) × 1 mm (T) 크기의 Cu-(순도 99.99%), Ni-(순도 99%), Ag-(순도 99.95%) 시트를 사용하였다. Sn interlayer (순도 99.8%)는 5 mm (L) × 5 mm (W) × 50 μm (T) 크기의 thin foil을 사용하였다. 접합 시 접합면이 충분히 접촉할 수 있게 100 g 분동을 사용하여 약 0.04 MPa의 압력을 가하였다. Metalization으로 사용된 재료들은 1200 grit 까지 SiC paper로 연마 후 3 μm 다이아몬드 서스펜션을 이용하여 표면을 연마하였다. Sn interlayer는 표면 활성화를 위해 염산 9 vol%와 질산 4 vol%를 혼합한 에탄올 수용액에 산세처리를 진행하였다. 준비된 metalization 시트와 interlayer를 Fig. 1 과 같이 적층 후 진공분위기(10<sup>-1</sup> -torr)에서 접합 온도 250, 280 °C 그리고 각각 1, 2, 3시간 동안 접합하였다.

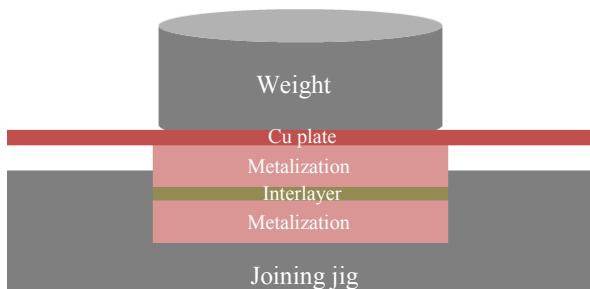


Fig. 1 Schematic diagram of sandwich structure for TLPB

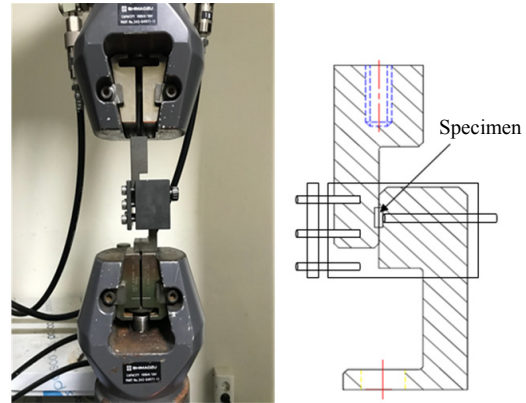


Fig. 2 Lap-shear test of TLPB specimens (left) and schematic diagram (right)

접합면 관찰을 위해 TLPB 시편은 구리 레진에 마운팅 후 1 μm 까지 연마하여 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM)으로 관찰하였다. 접합부의 기공률 분석은 Image analysis (Image Pro-Plus)를 이용하였다. 접합면의 기계적 성질은 Fig. 2와 같이 lap-shear test로 측정하였고, strain rate는 0.3 mm/min로 수행하였다. Lap shear test시 TLPB의 두께가 다른 점을 감안하여 볼트 체결을 통해 지그 내 시편의 위치를 조절하여 lap shear test 부분의 두께를 일정하게 하였다. 시편을 지그 안에 고정시키기 위해 최소한의 볼트 체결을 하여 시편을 고정하였다 (Fig. 2). Lap-shear test 후 전단파면은 SEM으로 관찰하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 동종 metalization TLPB

Fig. 3은 Cu/Sn/Cu의 접합 온도와 시간에 따른 접합부 미세조직을 나타낸다. 250 °C 1시간 조건에서 생성된 상은Cu-Sn 상태에에서와 같이 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>와 Cu<sub>3</sub>Sn이 형성되었다(Fig. 3a). TLPB 시 Cu와 Sn의 계면에

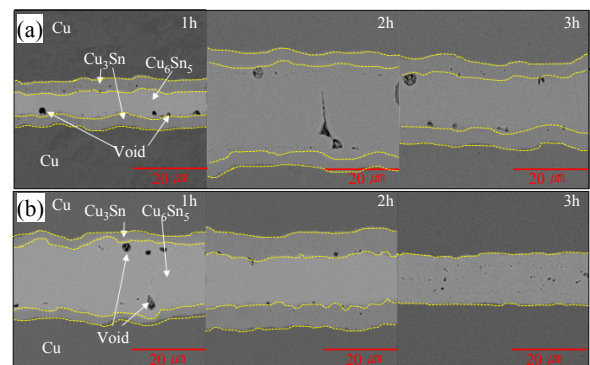


Fig. 3 Cross section images of Cu/Sn/Cu TLPB at various temperatures: (a) 250 °C and (b) 280 °C

서 우선적으로 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>이 형성된다. 이 후 Cu의 dissolution이 증가함에 따라 Cu와 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>의 계면에서 Cu<sub>3</sub>Sn이 형성된다. 접합 온도를 280 °C로 증가한 경우에도 Cu-Sn 금속간 화합물이 형성된다(Fig. 3b). 하지만 접합 시간이 증가함에 따라 접합부의 기공이 현저하게 감소하였으며, 3시간에서는 접합부가 완전히 Cu<sub>3</sub>Sn 단상으로 이루어졌다. 이는 온도가 증가함에 따라 Sn내에서 Cu의 확산계수가 증가하므로 금속간 화합물의 생성 속도가 증가하였기 때문이다. 접합층의 두께는 Fig. 3b가 Fig. 3a보다 평균적으로 5 μm 두꺼웠다. 두꺼운 접합부는 작동환경에서 칩과 기판의 열팽창 계수 차이에 의해 발생하는 응력 구배를 감소시킨다<sup>5)</sup>. 따라서 Cu/Sn/Cu TLPB 최적 온도 조건은 균일한 금속간 화합물 형성, 기공률 감소, 접합 두께가 증가하는 280 °C임을 확인하였다.

Fig. 4는 Ag/Sn/Ag의 접합 온도와 시간에 따른 접합부 미세조직을 나타낸다. Ag-Sn 상태를 따라 metalization으로 사용된 Ag가 액상의 Sn에 dissolution이 되면서 Ag와 Sn의 계면에서 Ag<sub>3</sub>Sn이 생성 되었다. 지난 연구에서 Ag<sub>3</sub>Sn의 형상은 주로 scallop type으로 형성되어, Ag<sub>3</sub>Sn 만나는 접합부 중간 계면에서 voids가 존재할 수 있다고 하였다<sup>6)</sup>. 이러한 경향은 Fig. 4에서도 확인할 수 있으며, 특히 접합 조건이 250 °C 1시간일 경우 두드러지게 나타났다. 기공 분율은 250 °C 접합온도에서 접합시간이 1-3시간으로 증가하면서 8%, 2%, 0.7%로 감소하였고, 280 °C 접합온도에서 기공 분율은 접합 시간이 증가함에 따라 7%, 0.3%, 0.3%로 감소하였다. 접합부의 두께는 평균적으로 280 °C 접합온도의 경우 10 μm 작았다. 따라서 Ag/Sn/Ag TLPB 최적 온도 조건은 균일한 금속간 화합물 형성과 기공률이 감소하는 280 °C 이다.

Fig. 5는 Ni/Sn/Ni TLPB 접합부 미세조직을 나타낸다. Ni/Sn/Ni에서 형성되는 금속간 화합물은 Ni-Sn 상태도에 따라 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>가 형성된다. Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>의 금속

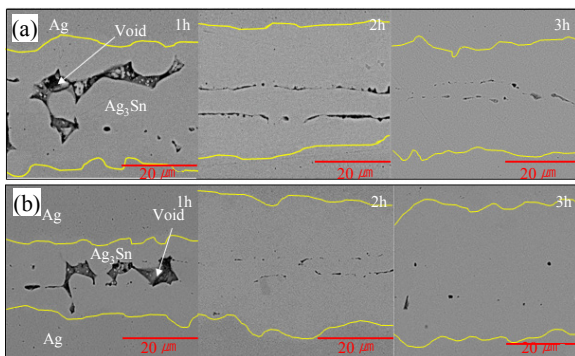


Fig. 4 Cross section images of Ag/Sn/Ag TLPB at various temperatures: (a) 250 °C and (b) 280 °C

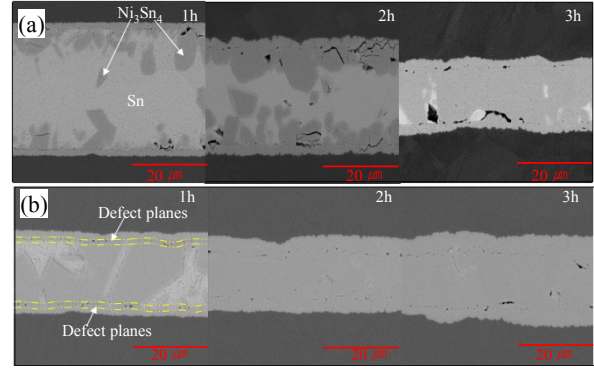


Fig. 5 Cross section images of Ni/Sn/Ni TLPB at various temperatures: (a) 250 °C and (b) 280 °C

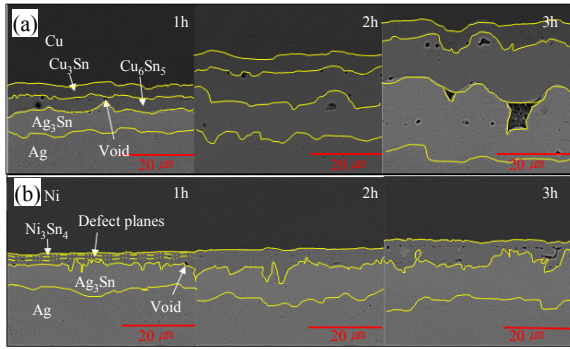
간 화합물은 Fig. 5에서와 같이 계면에서 성장하는 needle-like 형상의 IMC와 이로부터 떨어져 나온 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> island의 형태로 관찰됐다. Ni/Sn/Ni TLPB에서는 특징적으로 metalization에서 약 1 μm 떨어진 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>층에서 void가 발견되었고, voids는 계면에서 자라는 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>와 접합부의 중앙에서 자라는 detached Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> island가 만나는 지점에서평행하게 나열되는 defect planes가 나타났다<sup>7)</sup>. 그리고 다른 metalization과는 다르게 Ni/Sn/Ni TLPB 접합부의 중앙에는 void가 관찰되지 않았으며 350 °C 이상의 접합 온도에서 관찰됨이 알려져 있다<sup>7)</sup>. Ni/Sn/Ni TLPB에서는 Fig. 5a와 5b의 1시간 접합 사진에서 알 수 있듯이 반응하지 않은 Sn이 interlayer에 존재하는 것을 알 수 있다. 이는 Ni의 용점이 높고 또한 확산 계수가 낮으므로 다른 metalization에 비해 같은 공정 조건에서도 접합부가 전체적으로 금속간 화합물을 형성하지 못했기 때문이다. 250 °C 접합 온도에서는 3시간 접합 시간에도 반응하지 않은 Sn이 존재하므로, Ni/Sn/Ni의 최적 접합 온도는 균일한 금속간 화합물 형성과 기공률이 감소하는 280 °C이다.

Ag, Cu, Ni를 metalization으로 이용한 Sn sandwich structure TLPB에서 최적 온도조건이 280 °C임을 알아냈다. 동종 metalization의 최적 온도조건을 이용해 Cu/Sn/Ag와 Ni/Sn/Ag 이중 metalization TLPB 접합을 수행하였다.

### 3.2 이중 metalization TLPB

Fig. 6은 Cu/Sn/Ag와 Ni/Sn/Ag의 280 °C에서 TLPB 접합부 미세조직을 나타낸다. 동종 접합에서 최적 조건을 선정한 결과로서 Figs. 6a와 6b에서 잔류하는 Sn은 발견되지 않았다. Fig. 6a의 Cu metalization 계면에서는 Cu-Sn 금속간 화합물이 형성되었고, Ag metalization 계면에서는 Ag-Sn 금속간 화합





**Fig. 6** TLPB images produced at 280 °C for dissimilar metalizations: (a) Cu/Sn/Ag and (b) Ni/Sn/Ag

물이 형성되었다. 두 종류의 금속간 화합물이 핵생성 후 성장하면서 계면에서 만나게 되고 모두 scallop 형상의 금속간 화합물이므로 Fig. 6a의 3시간 접합 사진처럼 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>와 Ag<sub>3</sub>Sn의 계면에서 void가 형성될 수 있다. Cu-Sn 금속간 화합물과 Ag-Sn 금속간 화합물의 두께는 Cu-Sn 금속간 화합물이 평균적으로 0.5 μm 두꺼웠지만 큰 차이는 없었다. 이것은 Cu의 Sn 내에서 Cu의 D<sub>0</sub> (D<sub>0</sub>(Cu in Sn)=1.8 × 10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>)와 Ag의 D<sub>0</sub> (D<sub>0</sub>(Ag in Sn)=2.60 × 10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>)가 유사하며 또한 확산에 대한 활성화 에너지(Q<sub>(Cu in Sn)</sub>=Q<sub>(Ag in Sn)</sub>=4200 cal/mole)도 같기 때문이다<sup>8)</sup>. Fig. 6b에서는 Ni metalization 계면에서 Ni가 Sn내로 dissolution 되면서 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>가 형성되고 Ag metalization 계면에서는 Ag<sub>3</sub>Sn이 형성된다. Ni/Sn/Ag에서는 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>의 두께가 Ag<sub>3</sub>Sn의 두께보다 작았다. 이는 Ag의 확산계수 (D<sub>0</sub>(Ag in Sn)=2.60 × 10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>)와 Ni의 확산계수 (D<sub>0</sub>(Ni in Sn)=2.30 × 10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>)가 유사하지만 확산에 대한 활성화 에너지는 Ni(Q<sub>(Ni in Sn)</sub>=4530 cal/mole)가 Ag보다 크기 때문이다<sup>8)</sup>. 이에 대한 내용을 Table 1에 정리하였다. Ni/Sn/Ag 접합과 마찬가지로 Ni metalization 부근에서 평행하게 정렬된 defect planes이 나타났다.

### 3.3 Lap-shear test

Cu/Sn/Ag 와 Ni/Sn/Ag를 280 °C에서 1, 2, 3시

**Table 1** Values of D<sub>0</sub> and Q for the diffusion of silver, copper, and nickel in tin<sup>8)</sup>

Element	D <sub>0</sub> (m <sup>2</sup> /sec)	Q(cal/mole)
Ag	2.6 × 10 <sup>-8</sup>	4200
Cu	1.8 × 10 <sup>-8</sup>	4200
Ni	2.3 × 10 <sup>-8</sup>	4530

**Table 2** Shear strength values for each condition

Metalization	1 h		2 h		3 h	
	Strength (MPa)	Std. (MPa)	Strength (MPa)	Std. (MPa)	Strength (MPa)	Std. (MPa)
Cu/Sn/Ag	31	2.1	28	1.4	30	1.4
Ni/Sn/Ag	28	3.5	32	4.9	32	4.2

간 접합한 시편을 lap-shear test를 수행하였고, Table 2에 측정한 lap-shear test 결과를 나타내었다. Fig. 6과 같이 접합부의 두께는 각 조건마다 상이하지만 ultimate shear strength에는 무관함이 알려져 있다<sup>9)</sup>. 전단 강도는 평균 30 MPa로 기존의 솔더를 이용한 접합부보다 높은 강도값을 나타냈다<sup>10)</sup>. 보통 TLPB 이후 작동 환경에서의 aging 시험을 시행하게 되면 aging 시간이 증가함에 따라 전단강도가 약간 상승하게 된다<sup>11)</sup>. 이는 TLPB의 접합부가 고온 환경에서 균질화 단계에 이르게 되기 때문이다. 충분한 균질화 과정을 거치게 되면 접합부는 궁극적으로 metalization으로 이루어진 고용체가 된다<sup>12)</sup>. 하지만 본 연구에서의 시간은 단순 접합 공정에 소요된 시간으로서 aging에 의한 고용강화 효과를 기대하기는 어렵다. 따라서 접합 시간에 따라 전단강도가 소폭 증가하거나 오히려 소폭 감소하였다. 전단강도의 감소는 접합 시 생성되는 기공의 영향이 지배적이므로 최대의 전단강도를 갖는 접합 시간이 최적의 공정 조건이라 할 수 있다. 따라서 Table 2에 의하면 280 °C에서 TLPB 최소 요구 접합 시간은 Cu/Sn/Ag은 1시간이고 Ni/Sn/Ag은 2시간이라고 판단할 수 있다.

Fig. 7은 lap-shear test 후 파단면을 나타낸다. Fig. 7a와 같이 Cu/Sn/Ag TLPB 접합부의 파단은 Ag<sub>3</sub>Sn 금속간 화합물 층 내에서 발생하였다. Fig. 7a의 Area 1은 Ag<sub>3</sub>Sn과 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 사이에 기공이 존재했음을 의미하며 Area 2은 Ag<sub>3</sub>Sn 층내에서 파단이 발생하였으며 응력 방향으로의 shear band를 나타낸다. Fig. 7b는 Ni/Sn/Ag TLPB 접합부 파단면을 나타낸다. 파단은 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>와 Ag<sub>3</sub>Sn의 경계면에서 발생하였다. Fig. 7b의 Area 3은 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>를 나타내고 취성이 강하므로<sup>13)</sup> shear band를 관찰 할 수 없었지만 Area 4는 상대적으로 연한 Ag<sub>3</sub>Sn이며 shear band를 관찰할 수 있었다. 따라서 Cu/Sn/Ag의 경우 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>보다 상대적으로 연한 Ag<sub>3</sub>Sn 층에서 파단이 발생하였고<sup>14)</sup> 이로 인해 취성이 강한 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>와 연결인 Ag<sub>3</sub>Sn이 공존하는 파단면을 가진 Ni/Sn/Ag 접합부보다 전단 강도가 낮게 측정되었다.

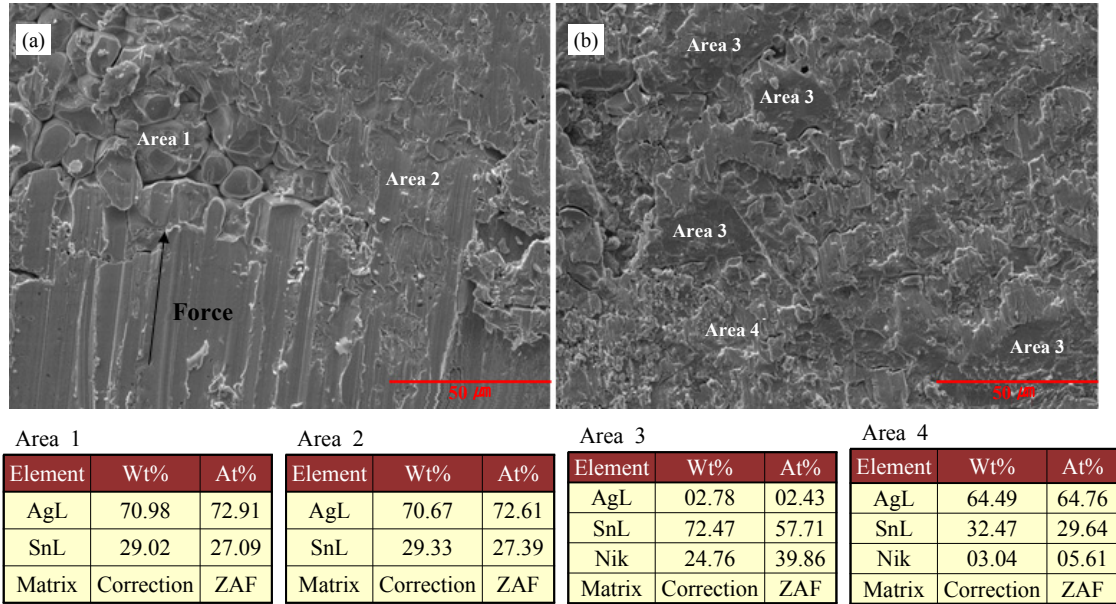


Fig. 7 Fracture surfaces after lap-shear test for dissimilar TLPBs: (a) Cu/Sn/Ag and (b) Ni/Sn/Ag

#### 4. 결 론

본 연구는 Sn을 interlayer로 하는 Cu, Ag, Ni metalization TLPB 동종 접합 공정 변수에 대한 특성 평가를 시행하였다. 동종 접합 실험에서 결정된 최적 공정 변수를 이용하여 Cu/Sn/Ag, Ni/Sn/Ag 이종 metalization TLPB를 분석 하였고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 접합 온도 250 °C에서 TLPB를 수행한 경우 Cu/Sn/Cu 접합부는 접합 시간이 증가할수록 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>보다 Cu<sub>3</sub>Sn의 분율이 증가하였다. 그리고 250 °C 3시간 접합부에서는 Cu<sub>3</sub>Sn과 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>가 공존하는 접합부가 형성됐으나 280 °C, 3시간에서는 Cu<sub>3</sub>Sn 단상으로 존재하였다. 이는 온도가 증가함에 따라 Cu의 확산계수가 증가하기 때문이다. 또한 250 °C에서는 접합부의 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> 층에서 큰 기공들이 존재하였으나 280 °C에서는 기공 분율이 현저히 감소하였다. 따라서 접합온도 280 °C가 최적 공정 온도이다.

2) Ag/Sn/Ag 접합부는 Ag<sub>3</sub>Sn 단상으로 구성되었다. 기공 분율은 접합 시간에 따라 250 °C에서 8%, 2%, 0.7%이고, 280 °C에서는 7%, 0.3%, 0.3%로 현저하게 감소하였다. 이러한 기공 분율의 감소는 확산계수의 온도의존성에 의한 것으로 판단된다. 따라서 280 °C에서의 가장 건전한 접합부를 형성하였으며 최적 공정 온도로 결정하였다.

3) Ni/Sn/Ni의 접합부는 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> 혹은 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>와 Sn으로 구성되었다. 250 °C에서 1, 2, 3시간 모두 잔류 Sn이 존재하였다. 이는 Ni의 확산계수가 Cu, Ag보다 낮기 때문이다. 하지만 280 °C 2, 3시간에서 접합부는

Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub> 단상으로 이루어졌다. 따라서 Ni/Sn/Ni의 건전한 접합부는 280 °C에서 형성됨을 확인하였다.

4) 동종 접합에서 결정된 접합 온도 280 °C를 Cu/Sn/Ag와 Ni/Sn/Ag에 1, 2, 3시간동안 접합하였다. 모든 접합시간에서 접합부는 금속간 화합물로 구성되었다. Cu/Sn/Ag는 Cu<sub>3</sub>Sn, Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>, Ag<sub>3</sub>Sn으로 존재하였고 Ni/Sn/Ag는 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>, Ag<sub>3</sub>Sn으로 존재하였다. Cu/Sn/Ag에서 Cu-Sn 금속간 화합물과 Ag-Sn 금속간 화합물의 두께가 비슷하였다. 이는 Cu와 Ag의 확산 계수가 유사하기 때문이다. 하지만 Ni/Sn/Ag에서 Ag-Sn 금속간 화합물이 Ni-Sn 금속간 화합물 두께보다 더 두꺼웠다. 이는 Ag의 D<sub>0</sub> (D<sub>0</sub>(Ag in Sn)=2.60 × 10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>)와 Ni의 D<sub>0</sub> (D<sub>0</sub>(Ni in Sn)=2.30 × 10<sup>-8</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>)가 유사하지만 확산에 대한 활성화 에너지는 Ni (Q<sub>(Ni in Sn)</sub>=4530 cal/mole)가 Ag(Q<sub>(Ag in Sn)</sub>=4200 cal/mole)보다 크기 때문이다. Lap-shear test 결과 Cu/Sn/Ag는 최소 1시간 Ni/Sn/Ag의 경우 최소 2시간의 접합 시간이 요구됨을 전단 강도 값을 통해 판단하였다. Ni/Sn/Ag의 접합부 파단면은 shear band가 관찰되는 Ag<sub>3</sub>Sn과 취성이 강한 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>로 확인되었다. Cu/Sn/Ag의 접합부 파단면은 Ag<sub>3</sub>Sn으로만 구성되었으며 shear band가 관찰되었다. 따라서 취성이 강한 Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>와 상대적으로 연한 Ag<sub>3</sub>Sn이 공존하는 층에서 파단이 발생하는 Ni/Sn/Ag 접합부가 Cu/Sn/Ag 접합부보다 더 높은 강도값을 나타내는 경향을 보였다.

#### 후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의

하여 연구되었습니다.

ORCID: Sunghyun Sohn: <http://orcid.org/0000-0001-8722-3407>

ORCID: Kyung Mox Cho: <http://orcid.org/0000-0001-5317-2365>

ORCID: Namhyun Kang: <http://orcid.org/0000-0002-9460-5128>

## References

1. A. Drevin-Bazin, F. Lacroix, and J. -F. Barbot, SiC Die Attach for High-Temperature Applications, *J. Electron. Mater.* 43(3) (2014) 695-701.  
<https://doi.org/10.1007/s11664-013-2718-5>
2. H. Zhang, J. Minter, and N. -C. Lee, A Brief Review on High-Temperature, Pb-Free Die-Attach Materials, *J. Electron. Mater.* 48(1) (2019) 201-210.  
<https://doi.org/10.1007/s11664-018-6707-6>
3. J. H. Bang, D. Y. Yu, Y. H. Ko, J. H. Kim and C. W. Lee, Joint Property of Sn-Cu-Cr(Ca) Middle Temperature Solder for Automotive Electronic Module, *J. Weld. Join.* 31(5) (2013) 54-58.  
<https://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2013.31.5.54>
4. P. G. Neudeck, R. S. Okojie and L. -Y. Chen, High-temperature electronics - a Role for wide bandgap semiconductors?, *Proc. IEEE.* 90(6) (2002) 1065-1076.  
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2002.1021571>
5. T. Hu, H. Chen and M. Li, Die attach materials with high remelting temperatures created by bonding Cu@Sn microparticles at lower temperatures, *Mater. Des.* 108(10) (2016) 383-390.  
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.099>
6. H. Shao, A. Wu, Y. Bao and Y. Zhao, Elimination of pores in Ag-Sn TLP bonds by the introduction of dissimilar intermetallic phases, *J. Mater. Sci.* 52(6) (2016) 3508-3519.  
<https://doi.org/10.1007/s10853-016-0645-6>
7. A. Lis and C. Leinenbach, Effect of Process and Service Conditions on TLP-Bonded Components with (Ag,Ni)-Sn Interlayer Combinations, *J. Electron. Mater.* 44(11) (2015) 4576-4588.  
<https://doi.org/10.1007/s11664-015-3982-3>
8. C. H. Ma and R. A. Swalin, A study of solute diffusion in liquid tin, *Acta Mater.* 8(6) (1960) 388-395.  
[https://doi.org/10.1016/0001-6160\(60\)90008-0](https://doi.org/10.1016/0001-6160(60)90008-0)
9. Y. L. Shen, N. Chawla, E. S. Ege and X. Deng, Deformation analysis of lap-shear testing of solder joints, *Acta Mater.* 53(9) (2005) 2633- 2642.  
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2005.02.024>
10. W. S. Hong and C. M. Oh, Degradation Behavior of Solder Joint and Implementation Technology for Lead- free Automotive Electronics, *J. Weld. Join.* 31(3) (2013) 22-30.  
<https://dx.doi.org/10.5781/KWJS.2013.31.3.22>
11. Q. Guo, S. Sun, Z. Zhang, H. Chen and M. Li, Microstructure evolution and mechanical strength evaluation in AgSnCu TLP bonding interconnection during aging test, *MICROELECTRON RELIAB.* 80(2018) 144-148.  
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.12.001>
12. N. S. Bosco and F. W. Zok, Critical interlayer thickness for transient liquid phase bonding in the Cu-Sn system, *Acta Mater.* 52(10) (2004) 2965-2972.  
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.02.043>
13. R. J. Fields and S. R. Low and G. K. Lucey, Physical and mechanical properties of intermetallic compounds commonly found in solder joints, *Metal Science of Join. Proceedings of TMS Symposium*, Cincinnati, USA (1991).
14. R. R. Chromik, R. P. Vinci, S. L. Allen and M. R. Notis, Measuring the mechanical properties of Pb-free solder and Sn-based intermetallics by nanoindentation, *JOM.* 55(6) (2003) 66-69.  
<https://doi.org/10.1007/s11837-003-0144-5>