고전력 반도체 모듈 적용을 위한 마이크로 입자 구리 소결 접합부의 미세조직 및 기계적 강도에 미치는 소결 접합 조건의 영향

이 병 석* · 백 중 훈* · 윤 정 원*,**,†

*한국생산기술연구원 용접접합그룹

**과학기술연합대학원대학교 희소소재 및 반도체패키징공학

Effect of Sintering Conditions on Microstructure and Mechanical Strength of Cu Micro-Particle Sintered Joints for High-Power Semiconductor Module Applications

Byung-Suk Lee*, Jong-Hoon Back*, and Jeong-Won Yoon*,**,†

*Welding and Joining R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Incheon, 21999, Korea

**Critical Materials and Semiconductor Packaging Engineering, University of Science and Technology (UST), Daejeon, 34113, Korea

†Corresponding author : jwyoona@kitech.re.kr

(Received April 1, 2019 ; Revised April 11, 2019 ; Accepted April 15, 2019)

Abstract

In this study, the feasibility of low-cost micro-sized Cu-sintering technology for high-power semiconductor packaging has been evaluated. A Cu paste with micro-sized Cu powders and a metal content of approximately 76 % as a bonding material was fabricated. The sinter-bonding reactions and mechanical shear strengths of Cu-sintered joints were evaluated at different sinter bonding pressures and temperatures for 10 min during the sintering process. The thickness of the Cu sintered joints decreased with increasing sintering pressure and temperature. Good interfacial uniformity and stable metallurgical microstructures were observed in the Cu joints sintered at a sintering pressure of 10 MPa and a sintering temperature of 300 °C. It was confirmed that a pressure and temperature assisted sintering process could create relatively dense sintered layers and good interfacial uniformity in the Si chip/Cu-sintered layer/DBC joints. The die shear strength of the Cu-sintered joints increased with increasing sintering pressure and temperature. Despite a short sinter-bonding duration of 10 min, relatively good metallic bonding and dense sintered microstructures created by a sintering pressure of 10 MPa resulted in shear strength of approximately 20 MPa of the Cu-sintered joints.

Key Words : Cu paste, Cu sintering, Cu powder, Power electronics, Sinter-bonding, Shear strength

1. 서 론

최근 지구 환경오염 규제와 에너지 효율화 정책 등으로 친환경 자동차 및 태양광/풍력 발전 등 친환경 발전 및 전력전송에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 특히, 친환경 자동차인 하이브리드 자동차 (HEV), 전기 자동차 (EV) 및 수소연료전지 자동차 (FCEV)에 적용되는 전력모듈 (Power module)은 일반 전자제품보다

사용 온도가 높고 사용 시간이 길기 때문에 더욱 가혹한 환경하에서 높은 신뢰성이 요구된다¹⁾. 또한, 열전소자 패키지 및 우주 항공용 전자부품 등에 있어서 고온 작동 전자 분야에 대한 필요성이 증대됨에 따라 고온에서도 안정하게 작동하기 위한 반도체 부품의 접합 소재 및 접합 공정기술에 대한 필요성이 증대되고 있다. 이러한 고온 대응 접합 모듈의 응용에 있어서 대표적인 반도체 모듈이 전력을 변환하거나 고전력을 전송하기 위해 사용되는 전력 모듈이다. 이들 전력 모듈은 전력 반

도체 (Power semiconductor), 칩 접합 재료 (Die-attach material), 세라믹 기판 혹은 리드 프레임 (Lead-frame), 인터커넥션 소재 (Interconnection material)와 몰딩 및 케이스 소재 등으로 구성되며, 최근에는 소형화와 함께 높은 구동 전압 및 고밀도화가 필요함에 따라 이에 관한 연구개발이 활발히 진행 중에 있다¹⁻³⁾. 이들 구성 요소 가운데, 구동 중 전력 반도체 소자에서 발생하는 높은 열을 효과적으로 방출하며 모듈의 신뢰성 및 수명을 결정하는 가장 중요한 부분이 칩 접합 재료 및 공정이다. 현재까지 전력 모듈의 칩 접합에는 High-Pb 솔더 및 Pb 성분이 없는 무연 솔더를 주로 사용해 왔다. 하지만 이러한 High-Pb 솔더합금은 환경오염의 이슈가 있으며, 또한 무연 솔더 합금은 낮은 용점 및 신뢰성으로 인해 고온에서 장기간 사용에는 한계가 있다⁴⁻⁶⁾. 또한, 실리콘 카바이드 (SiC) 및 갈륨 나이트라이드 (GaN)와 같은 와이드 밴드갭 (Wide Band Gap) 반도체 소자는 구동 시 높은 구동 전압 하에서 작동하므로, 더욱 높은 고온 신뢰성이 요구된다⁷⁾. 따라서, 전 세계적으로 200~300℃ 이상의 온도에서 장기간 안정적으로 동작이 가능한 칩 접합 기술을 개발하기 위한 많은 연구 개발이 수행 중에 있다⁸⁻¹⁰⁾. 이러한 전력반도체 모듈의 칩 접합 소재로서 기존의 솔더 합금을 대체하기 위한 가장 대표적인 방법이 은 (Ag) 및 구리 (Cu) 페이스트를 이용한 소결 (Sintering) 기술이다. 은 소결 기술은 나노 혹은 마이크로 크기의 입자를 이용한 접합방법으로, 우수한 고온 안정성, 열/전기 전도도 및 장기 신뢰성을 가지고 있다¹¹⁻¹³⁾. 하지만, 솔더 합금에 비해 높은 가격이 현장 적용에 있어서 단점으로 지적되고 있다. 이러한 은 소결법의 단점을 극복하기 위한 대안으로 최근에는 구리를 이용한 소결 접합 방법에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다^{14,15)}. 따라서 본 연구에서는 기초 연구로서 구리 마이크로 입자를 이용한 페이스트를 제작한 후, 소결 공정 조건의 변화에 따른 구리 소결 접합부의 미세구조의 변화 및 접합부 기계적 강도 변화를 관찰하였으며, 그 상관관계에 대하여 고찰하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서는 마이크로 사이즈의 구리 분말을 소결 접합 소재로 사용하였다. 사용된 분말은 일본 미츠이 (Mitsui) 금속에서 제조한 약 0.5~1.5 μm 입도 사이즈의 분말로 Fig. 1(a)에 나타내었다. 구리 페이스트 제조를 위해 사용된 구리 금속의 함량은 약 76 wt.%였으며, 덕산하이메탈 (DUKSAN Hi-Metal, Korea)에서 제작한 구리 페이스트 전용 바인더 (binder)를

Fig. 1 SEM images of (a) Cu powders and (b) fabricated Cu paste

혼합하여 제조되었다. 제조된 구리 페이스트를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 전력반도체 소자 소결 접합 공정을 위해 사용된 기판은 10 × 10 × 0.98 mm 크기의 DBC (direct bond copper) 세라믹 기판으로, Cu/96% Al₂O₃/Cu가 적층 접합된 sandwich 구조의 기판이 사용되었다. 세라믹 층과 구리 층의 두께는 각각 380 μm 와 300 μm 였으며, 구리 층 위에는 약 0.3 μm 의 은 (Ag)이 코팅되었다. 50 μm 두께의 304 스테인리스 스틸 마스크 (Mask)를 이용하여 제조된 구리 페이스트를 DBC 기판상에 스크린 프린팅 (screen-printing)하였다. 이때 사용된 마스크의 opening 사이즈는 3 × 3 mm였다. 구리 페이스트가 프린팅된 DBC 기판이 진공오븐 안에서 약 150℃ 온도에서 약 5분 동안 pre-drying되었다. 순차적으로, 0.1 μm Ti\0.1 μm Al\1 μm Ni\0.2 μm Ag 층이 증착된 Si dummy chip (3 × 3 mm)이 프린팅된 구리 페이스트 층 위에 올려졌다. 그 다음으로 구리 소결 접합 공정이 진공 가압 소결 장치 (SJCWD-100, SJ Co. Ltd., Korea)를 이용하여 수행되었다. 사용된 소결 접합 온도는 각각 250, 280, 300℃였으며, 소결 압력은 각각 1.5, 5, 10 MPa하에서 약 10분간 소결 접합 공정이 수행되었다. 본 연구에 사용된 소결 접합 공정 순서의 모식도 및 구리 소결 공정 메커니즘 모식도를 Fig. 2에 나타내었다. 또한, DBC 기판상에 프린팅된 구리 페이스트 및 소결 접합 공정 후 접합 시편 사진 및 모식도를 Fig. 3에 나타내었다.

소결 접합 공정이 완료된 시편에 있어서 접합부에 생성된 보이드 등의 결함을 측정하기 위해서 X-ray 장비 (XSCAN-H160-OCT, XAVIS, KOREA)를 이용하여 비파괴 (non-destructive) 분석이 수행되었다. 다양한 접합 공정 변수에 따른 소결 접합부 미세구조 변화 및 접합 계면을 분석하기 위해 접합 시편을 연마한 후, 주사전자현미경 (Scanning Electron Microscopy, SEM, Inspect F, FEI, USA), EDX (Energy-Dispersive X-ray spectroscopy) 및 FIB (focused ion beam, NOVA-

Fig. 2 (a) Sample fabrication steps used in this study and (b) schematic of Cu sintering process

Fig. 3 OM images and their corresponding schematics of (a) Cu paste printed on DBC substrates and (b) Cu sintered samples

600, FEI, USA) 장비를 사용하여 분석되었다. 접합 계면 층의 두께 측정은 이미지 프로그램을 이용하여 접합부 층의 전체 면적을 먼저 측정한 후 SEM 이미지의 가로 길이로 나누어 평균 층의 두께를 측정하였다. 구리 소결 접합 시편의 기계적 강도를 평가하기 위해 전단 시험장비 (Dage4000, Nordson DAGE, UK)를 사용하여 칩 전단 시험이 수행되었다. 본 실험에서 사용된 전단 시험 조건으로 전단 속도는 $167 \mu\text{m/s}$, 전단 높이는 $180 \mu\text{m}$ 였다. 접합 강도를 측정하기 위해 총 10개의 소결 접합 시편에 대한 전단 강도 시험이 수행되었으며, 전단 시험 후 파단면이 분석되었다.

3. 실험 결과

제조된 구리 페이스트의 소결 접합 특성을 평가하기 위해 다양한 접합 공정에서 소결 접합이 수행되었다. Fig.

Fig. 4 X-ray images of Cu sintered joints under various sintering conditions

4는 다양한 소결 접합 조건하에서 접합된 구리 소결 접합부의 비파괴 X-ray 분석 결과 이미지를 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이, 소결 접합부 계면에 특이할 만한 큰 접합부 계면 박리 (delamination)나 보이드는 관찰되지 않았다. 이들 비파괴 분석 결과로부터, 구리 소결 접합부가 큰 결함 없이 양호한 접합부를 형성하였음을 확인할 수 있었다. Fig. 5는 250 °C 온도에서 다양한 소결 압력하에서 접합된 구리 소결 접합부 전체 및 계면 SEM 사진을 보인 것으로, 단면 분석 결과에

Fig. 5 Cross-sectional SEM images of Si chip/sintered Cu layer/DBC joints at different sintering pressures at 250 °C

서도 모든 시편에서 큰 접합부의 결함 없이 양호한 접합부를 형성하였음을 확인할 수 있었다. 1.5 MPa에서 10 MPa로 접합 압력이 증가함에 따라, 접합부 두께가 감소하였으며, 또한, 구리 소결 접합부의 치밀도가 향상됨을 확인할 수 있었다. 소결 공정 후, 접합 압력에 상관없이 Si chip 및 DBC 기판 상에 존재하는 은 표면처리 층과 구리 입자가 양호한 소결 접합부를 구성함을 확인하였다. 280 및 300 °C 온도에서 다양한 소결 압력하에서 접합된 구리 소결 접합부 SEM 사진을 Fig. 6과 7에 각각 나타내었다. Fig. 5의 250 °C 온도 조건과 비교하였을 때, 공정 온도가 증가함에 따라 소결 접합부 두께는 점차 감소하였으며, 단면 상에 보이는 소결 반응에 의한 미세 보이드 또한 감소하여 전반적으로 소결 접합부의 치밀도가 향상되는 결과를 얻었다. 본 연구에서는 10분 동안의 비교적 짧은 소결 접합 공정에도 불구하고, 양호한 구리 소결 접합부를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과를 바탕으로, 각 접합 조건 별 소결 접합부의 두께를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 소결 접합 온도 및 압력이 증가함에 따라 접합부 두께는 감소하는 경향을 보였다. 처음 약 50 μm 두께로 인쇄된 구리 페이스트가 pre-drying 및 10 MPa 압력을 이용한 소결 접합 공정을 수행한 후, 250 °C 온도에서는

Fig. 6 Cross-sectional SEM images of Si chip/sintered Cu layer/DBC joints at different sintering pressures at 280 °C

Fig. 7 Cross-sectional SEM images of Si chip/sintered Cu layer/DBC joints at different sintering pressures at 300 °C

Fig. 8 Variation of joint thickness with sintering pressure and temperature

약 30 μm , 280 $^{\circ}\text{C}$ 및 300 $^{\circ}\text{C}$ 온도에서는 약 22~24 μm 의 두께를 가지는 접합부를 형성함을 확인하였다.

구리 소결 접합부 미세 구조의 보다 세밀한 관찰을 위해, FIB 단면 분석이 수행되었다. Fig. 9는 280 $^{\circ}\text{C}$ 온도에서 다양한 소결 압력하에서 접합된 구리 소결 접합부의 단면 FIB 이미지를 보여준다. 전반적으로 구리 소결 접합부가 Si chip 및 DBC 기판 사이에서 양호한 금속학적 결합을 이루고 있음을 확인하였다. 또한, 구리 소결 접합부의 가운데 부분 (center)의 관찰을 통해, 구리 입자들끼리의 접촉 (contact) 및 확산 (diffusion)이 접합 압력이 증가함에 따라 증가하였음을 분명하게 확인할 수 있었다. 게다가, 비록 빈도수는 적지만 Si chip과 DBC 기판 상의 은 표면처리 층과 구리 입자 사이

의 접촉 및 확산으로 인한 금속간 결합의 형성을 확인할 수 있었으며, 접합 압력이 증가함에 따라 이들 결합도 증가함을 확인하였다. 이들 은/구리 계면의 소결 접합 메커니즘과 관련하여, 많은 선행 연구들이 수행되었다. 문헌에 따르면, 은과 구리 원자는 동일한 FCC (face-centered-cubic)의 결정 격자구조를 가지며, 이들 이원 합금계 (binary system)는 두 원소간 어떠한 안정한 화합물도 생성하지 않는 전용 고용체 (complete solid solution)를 형성하며, 큰 원자간의 격자 뒤틀림 (lattice distortion) 없이 서로의 원자를 상호 확산을 통해 공유할 수 있다^{13,16)}. 이러한 결과로 은/구리 소결 접합은 두 원자의 상호확산으로 인한 양호한 소결 접합부를 형성할 수 있다. Fig. 10은 압력 증가에 따른 구리 소결 접합부 내의 미세 조직의 변화를 보여주는 FIB 이미지이다. 일정 온도에서 인가된 소결 압력의 증가가 구리 입자들끼리의 접촉 수 (contact event)를 증가시키며, 이러한 입자들의 접촉 증가로 인한 구리 원자의 확산 빈도의 증가가 소결 접합에 따른 보이드 수의 감소 및 보다 치밀한 미세 구조 (dense microstructure)의 형성을 야기하였다^{12,14)}.

Fig. 11은 300 $^{\circ}\text{C}$ 온도에서 다양한 소결 압력하에서 접합된 구리 소결 접합부의 단면 FIB 이미지를 보여준다. 280 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도 조건과 비교하였을 때, 300 $^{\circ}\text{C}$ 로 온도가 증가함에 따라 구리 입자 소결의 양이 증가하였으며, 은/구리 사이의 소결 접합도 개선됨을 단면 분석을 통해 확인할 수 있었다. 특히, 300 $^{\circ}\text{C}$ 의 온도

Fig. 9 Cross-sectional FIB images of Si chip/sintered Cu layer/DBC joints at different sintering pressures at 280 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 10 Cross-sectional FIB images of sintered Cu layers at different sintering pressures at 280 °C

Fig. 12 Cross-sectional FIB images of sintered Cu layers at different sintering pressures at 300 °C

및 10 MPa 압력 조건하에서 접합된 구리 소결 접합부의 경우, 구리 입자들 사이에 상당 부분이 소결 공정을 통해 치밀화가 이루어 졌음을 확인하였다 (Fig. 11(k)). 이들 소결 접합부에 있어서는 특히 구리 입자들 사이의 접촉 및 원자 확산을 통한 소결 반응의 결과로 형성되는 소결 보이드 (sintering void)의 크기가 점차 작아짐을 확인할 수 있었다. 이들 보이드를 Fig. 11(k)에

흰 색 화살표로 표시하였다. 본 연구에서 얻어진 구리 소결 접합부 생성 및 소결 메커니즘이 Fig. 2(b)의 모식도와 잘 일치하였다. 또한, DBC 기판 상의 은 층과 구리 입자 사이에도 이전 조건과는 달리 보다 많은 접촉과 소결 반응이 진행되었음을 확인할 수 있었다 (Fig. 11(l)). Fig. 12는 300 °C의 온도에서 압력 증가에 따른 구리 소결 접합부 중심부의 미세 조직을 보

Fig. 11 Cross-sectional FIB images of Si chip/sintered Cu layer/DBC joints at different sintering pressures at 300 °C

Fig. 13 Variation of die shear strength with sintering temperature and pressure

여주는 FIB 이미지로, 본 관찰을 통해 압력 증가에 따른 소결 반응의 진행 정도를 비교 및 파악할 수 있었다.

구리 소결 접합부의 기계적 강도에 미치는 다양한 소결 접합 공정 변수의 효과를 평가하기 위해서 구리 소결 접합부의 칩 전단 강도 시험이 수행되었으며, 그 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 소결 온도가 증가함에 따라 접합부 전단 강도는 증가하였다. 접합 압력에 있어서는 1.5와 5 MPa의 접합 압력에 비해 10 MPa의 접합 압력에서 높은 전단 강도를 나타내었다. 10 MPa의 접합 압력의 경우, 250 °C에서는 약 15 MPa의 전단 강도를 나타내었으나, 온도가 300 °C까지 증가함에 따라 전단 강도가 약 20 MPa까지 증가하였다. 250 °C에서 300 °C까지 온도가 증가함에 따라, 1.5, 5, 10 MPa의 접합 조건에서 소결 접합된 접합부의 전단 강도가 각각 38.5, 33.2, 34.1 %씩 증가하였다. 이러한 소결 접합 온도 및 압력 증가에 따른 접합 강도 증가의 결과는 상기에서 언급한 소결

접합 온도 및 압력이 증가함에 따라 관찰된 소결도 증가에 따른 금속층과 구리와의 금속 접합, 접합부 두께 감소, 보이드 감소 및 소결 접합부 치밀화 증가의 경향과 일치하는 경향을 보였다. 칩 전단 강도 변화에 대한 원인을 조사하기 위해 전단 시험 후 파단면을 관찰하였으며, 그 결과를 Fig. 14에 나타내었다. 5 MPa의 접합 압력의 경우, 전단 시험 후 파단이 주로 DBC 기판 계면에서 발생하는 것을 확인 할 수 있었으며, 일부에서는 소결된 구리가 관찰되었다. 반면, 접합 압력이 10 MPa로 증가할 경우, 250 °C에서는 파면에서 관찰되는 소결된 구리의 면적이 증가하였으며, 온도가 280 °C 및 300 °C로 증가할 경우 DBC 계면 및 Si chip의 일부가 파괴되는 경향을 나타내었다. 이들 결과로 미루어 보아, 본 연구에서 사용된 Si chip/구리 소결층/DBC 접합부의 경우 낮은 접합 압력 및 온도에서는 주로 DBC 접합 계면에서 파괴가 일어나며, 높은 접합 압력 및 온도에서는 Si chip 계면 및 내부에서 파괴가 일어남을 확인하였다.

또한, 우리는 이전에 약 40 nm 입자 크기의 구리 분말을 이용하여 페이스트를 제조한 후, 구리 소결 접합 공정 및 기계적 강도 시험을 수행하였으며, 그 결과를 문헌에 발표하였다¹⁴⁾. 그 결과로 300°C 접합 온도, 10 MPa 접합 압력 및 10분 접합 시간의 경우, 약 40 MPa의 접합 강도를 얻었다. 그 결과와 본 연구 결과를 비교하였을 때, 상대적으로 낮은 접합 강도의 원인은 구리 소결 분말과 Si chip 및 DBC 기판과의 접합 면적의 감소에 기인하는 것으로 판단된다. 즉, 40 nm의 미분의 구리 입자를 사용하였을 경우에는 보다 많은 면적에서 chip과 DBC 기판이 구리 소결 입자와 접촉하여 소결 접합이 진행된 반면, 본 연구에서 사용된 약 0.5~1.5 μm

Fig. 14 Fracture surfaces of Cu sintered joints after die shear testing under various sintering conditions

입도 사이즈의 구리 분말의 경우, 상대적으로 보다 적은 면적에서 chip과 DBC 기판이 구리 소결 입자와 접촉하여 소결 접합이 이루어 졌기 때문에 보다 낮은 칩 전단 강도 값이 얻어진 것으로 사료된다. 구리 소결 접합의 경우, 향후 고전력 반도체 모듈, 우주/ 항공 전자 모듈, 열전소자 접합 모듈, 고방열 LED 모듈 등에 그 활용이 폭발적으로 늘어날 것으로 예상됨에 따라, 저비용 고온 대응 접합 소재로서의 장점으로 인해 그 채택이 증가할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 기초 연구로서 고온 대응 접합 소재 적용을 위해 다양한 소결 조건에 따른 구리 소결 접합부의 야금학적 특성 평가 및 접합부 기계적 신뢰성 평가를 수행하였다. 구리 소결 접합 시 구리 입자 및 접합부의 산화거동 및 산화물 존재 여부와 산화물 생성에 따른 전력변환모듈의 신뢰성에 대한 연구가 현재 수행 중이다. 본 연구진은 현재 구리 소결 접합부로 형성된 전력모듈을 제작하여 열충격 및 항온항습 신뢰성 시험을 수행 중이며, 신뢰성 시험에 따른 전력반도체의 온저항을 측정하여 저항 변화를 관찰할 계획이다. 향후, 보다 광범위한 구리 소결 접합의 적용을 위해서는 보다 낮은 온도 및 압력에서의 소결 접합과 적절한 분위기의 접합 공정, 다양한 신뢰성 평가 등에 대한 최적화 연구가 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온에서 동작하는 고전력 반도체 모듈의 접합을 위해 마이크로 입자를 이용한 구리 페이스 트를 제작하였으며, Si chip과 세라믹 DBC 기판을 이용하여 다양한 소결 접합 공정 (압력 및 온도) 조건하에서 접합을 수행한 후, 소결 접합부 미세 구조의 변화 및 기계적 강도 평가가 수행되었으며 다음과 같은 결론이 얻어졌다.

1) 구리 소결 접합부의 비파괴 X-ray 분석 결과, 소결 접합부 계면에 특이할 만한 큰 접합부 계면 박리나 보이드는 관찰되지 않았으며 양호한 구리 소결 접합부가 얻어졌음을 확인할 수 있었다. 소결 온도 및 압력이 증가함에 따라 소결 접합부 두께는 감소하였으며, 소결 반응에 의한 미세 보이드 또한 감소하여 전반적으로 소결 접합부의 치밀도가 향상되는 결과를 얻었다.

2) 소결 압력의 증가가 구리 입자들끼리의 접촉을 증가시키며, 이러한 입자들의 접촉 증가로 인한 구리 원자의 확산 증가가 소결 접합에 따른 보이드 수의 감소 및 보다 치밀한 미세 구조의 형성을 야기하였다.

3) 전단 시험을 통한 기계적 강도 측정 결과, 소결 접

합 온도 및 압력이 증가함에 따라 접합 강도가 증가하였으며, 낮은 접합 압력 및 온도에서는 주로 DBC 접합 계면에서 파괴가 일어나며, 높은 접합 압력 및 온도에서는 Si chip 계면 및 내부에서 파괴가 일어남을 확인하였다.

4) 향후, 보다 광범위한 구리 소결 접합의 적용을 위해서는 보다 낮은 온도 및 압력에서의 소결 접합과 적절한 분위기의 선택 및 다양한 신뢰성 평가 등에 대한 최적화 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 논문은 산업통상자원부 소재부품기술개발사업 (과제번호: 10080187)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

ORCID: Jong-Hoon Back: <http://orcid.org/0000-0002-1170-3428>

ORCID: Jeong-Won Yoon: <http://orcid.org/0000-0001-8708-542X>

References

1. J. W. Yoon, J. H. Bang, Y. H. Ko, S. Yoo, J. K. Kim, and C. W. Lee, Power Module Packaging Technology with Extended Reliability for Electric Vehicle Applications, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 21 (4) (2014), 1-13
<http://dx.doi.org/10.6117/kmeps.2014.21.4.001>
2. Y. Wang, S. Jones, A. Dai, and G. Liu, Reliability enhancement by integrated liquid cooling in power IGBT modules for hybrid and electric vehicles, *Microelectron. Reliab.* 54 (2014), 1911-1915
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2014.07.037>
3. X. Dai, Y. Wang, Y. Wu, H. Luo, G. Liu, D. Li, and S. Jones, Reliability design of direct liquid cooled power semiconductor module for hybrid and electric vehicles, *Microelectron. Reliab.* 64 (2016), 474-478
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2016.07.063>
4. B. S. Lee, Y. H. Ko, J. H. Bang, C. W. Lee, S. Yoo, J. K. Kim, and J. W. Yoon, Interfacial reactions and mechanical strength of Sn-3.0Ag-0.5Cu/Ni/Cu and Au-20Sn/Ni/Cu solder joints for power electronics applications, *Microelectron. Reliab.* 71 (2017), 119-125
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.03.011>
5. J. H. Bang, D. Y. Yu, Y. H. Ko, J. W. Yoon, and C. W. Lee, Lead-free Solder for Automotive Electronics and Reliability Evaluation of Solder Joint, *Journal of Welding and Joining*, 34 (1) (2016), 26-34
<http://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.1.26>
6. J. Son, M. Kim, D. Y. Yu, Y. H. Ko, J. W. Yoon, C. W. Lee, Y. B. Park, and J. Bang, Thermal Aging Characteristics of Sn-xSb Solder for Automotive Power Module, *Journal of Welding and Joining*, 35 (5) (2017), 38-47
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.5.6>
7. F. Roccaforte, P. Fiorenza, G. Greco, R. L. Nigro, F.

- Giannazzo, F. Iucolano, and M. Saggio, Emerging trends in wide band gap semiconductors (SiC and GaN) technology for power devices, *Microelectron. Eng.* 187-188 (2018), 66-77
<https://doi.org/10.1016/j.mee.2017.11.021>
8. B. S. Lee, and J. W. Yoon, Cu-Sn intermetallic compound joints for high-temperature power electronics applications, *J. Electron. Mater.* 47 (2018), 430-435
<https://doi.org/10.1007/s11664-017-5792-2>
 9. J. F. Li, P. A. Agyakwa, and C. M. Johnson, Interfacial reaction in Cu/Sn/Cu system during the transient liquid phase soldering process, *Acta Mater.* 59 (2011), 1198-1211
<https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.10.053>
 10. Y. H. Byun, C. M. Jeong, J. W. Yoon, C. H. Kim, C. S. Kim, B. W. Lee, S. W. Booh, and U. I. Chung, A novel and simple fabrication technology for high power module with enhanced thermal performance, *Proc. 8th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)* (2012), 1070-1073
<https://doi.org/10.1109/VPPC.2012.6422503>
 11. J. W. Yoon, J. H. Back, and S. B. Jung, Effect of surface finish metallization on mechanical strength of Ag sintered joint, *Microelectron. Eng.* 198 (2018), 15-21
<https://doi.org/10.1016/j.mee.2018.06.009>
 12. K. S. Siow, Mechanical properties of nano-silver joints as die attach materials, *J. Alloys Compd.* 514 (2012), 6-19
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.10.092>
 13. B. S. Lee, J. W. Yoon, Die-Attach for Power Devices Using the Ag Sintering Process, Interfacial Microstructure and Mechanical Strength, *Met. Mater. Int.* 23 (2017), 958-963
<https://doi.org/10.1007/s12540-017-6908-1>
 14. J.W. Yoon, and J.H. Back, Effect of Sintering Conditions on the Mechanical Strength of Cu-Sintered Joints for High-Power Applications, *Materials*. 11 (2018), 2105
<https://doi.org/10.3390/ma11112105>
 15. Y. Gao, H. Zhang, W. Li, J. Jiu, S. Nagao, T. Sugahara, and K. Suganuma, Die bonding performance using bimodal Cu particle paste under different sintering atmospheres, *J. Electron. Mater.* 46 (2017), 4575-4581
<https://doi.org/10.1007/s11664-017-5464-2>
 16. Y. Akada, H. Tatsumi, T. Yamaguchi, A. Hirose, T. Morita, and E. Ide, Interfacial Bonding Mechanism Using Silver Metallo-Organic Nanoparticles to Bulk Metals and Observation of Sintering Behavior, *Mater. Trans.* 49 (2008), 1537-1545
<https://www.jim.or.jp/journal/e/49/07/1537.html>