Ag 페이스트를 이용한 질화알루미늄 히터 단자 소결 접합

김윤찬^{*,**} · 유동열^{*,***} · 손준혁^{*,***} · 김지성^{*,****} · 김민수^{*} · 이창우^{*} · 변재원^{**} · 방정환^{*,†}

^{*}한국생산기술연구원

^{**}서울과학기술대학교 신소재공학과

^{***}고려대학교 신소재공학과

^{****}한국산업기술대학교 신소재공학과

Terminal Sinter-Bonding Using Silver Paste for Aluminum Nitride Heater

Yun-Chan Kim^{*,**}, Dong-Yurl Yu^{*,***}, Junhyuk Son^{*,***}, Ji-Sung Kim^{*,****}, Min-Su Kim^{*},
Chang-Woo Lee^{*}, Jai-Won Byeon^{**}, and Junghwan Bang^{*,†}

^{*}Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), Incheon, 21999, Korea

^{**}Department of Materials Science & Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
Seoul, 01811, Korea

^{***}Department of Material Science & Engineering, Korea University, Seoul, 02841, Korea

^{****}Advanced Materials Engineering, Korea Polytechnic University, Siheung, 15073, Korea

[†]Corresponding author: nova75@kitech.re.kr

(Received August 2, 2021; Revised August 11, 2021; Accepted August 23, 2021)

Abstract

In this study, a Ag sintered joint was applied to replace the high-Pb solder to bonding materials between Aluminum Nitride (AlN) substrates and terminals used in wafer bake processes. The Ag sintered joint was fabricated using an optimized temperature profile. The high-Pb solder specimens were fabricated using a conventional reflow process. An X-ray analysis and mechanical properties evaluation of the specimens were performed. Subsequently, a high temperature storage test was performed for a high temperature reliability evaluation. The initial void analysis result showed that the Ag sintered joint and high-Pb solder joint had approximately 1%, and 20% voids, respectively. After being stored at a high temperature of 280 °C for 1000 h, the shear strength of the high-Pb solder joint decreased by approximately 27% owing to the Pb degradation. However, the shear strength of the Ag sintered joint was maintained. After 1000 h of a high temperature storage test, growth of Ni₃Sn₄ intermetallic compound and Kirkendall voids were observed at the high-Pb solder interface. Furthermore, a Ag-Au layer was observed at the sintered Ag interface. In addition, the sintered Ag joints densified after the high temperature storage test.

Key Words: Ag sintering, Aluminum nitride, High-Pb solder, Bake unit, Heater

1. 서 론

반도체 공정 과정 중 포토 공정 등에서 베이크 단계를 거치는 고온 공정이 적용되고 있으며 세라믹 기판을 사용하여 열을 전달한다. 이때 기판 소재로 질화알루미늄(Aluminum Nitride, AlN), 탄화규소(Silicon Carbide, SiC) 등이 사용되고 있다. 특히, 질화알루미늄은 우수

한 기계적 물성 및 열전도도 등 많은 이점을 가지고 있어 기판 소재로서 각광받고 있다¹⁾. 이러한 세라믹히터 기판과 단자 접합 기술은 주로 high-Pb 솔더를 이용한 리플로우 솔더링(reflow soldering) 공법을 사용하여 왔다. 하지만 high-Pb 솔더는 AlN히터의 사용환경인 100~200 °C의 고온에서 장시간 유지되면서 접합 계면에 금속간화합물(Intermetallic Compound, IMC)의 성장 및 솔더 내부 열화 등에 의한 계면 박리가 발

생하여 고장의 원인이 된다^{2,3)}. 또한 일반적인 리플로우 솔더링은 공정 진행 중에 플럭스(flux)가 휘발되지 못하고 솔더 내부에 갇히게 되면서 보이드(void)를 발생시키게 된다. 그리고 큰 보이드가 형성되거나 계면 부분에 형성될 경우 접합부의 기계적 특성을 악화시켜 장기적 신뢰성에 취약하다^{4,5)}. 이를 대체할 수 있는 접합 기술로는 천이액상접합(Transient Liquid Phase Bonding, TLPB), Ag 소결 접합(Ag sintering) 등의 다양한 접합기술이 연구되고 있다. 천이액상접합 기술은 접합부 전체를 IMC화하기 때문에 300 °C 이상의 고온에서도 안정하다는 장점을 가진다. 하지만 전체 IMC를 형성시키는 공정은 긴 시간이 소요된다는 단점이 있다⁶⁻⁸⁾. Ag 소결 접합 기술은 융점 이하에서 고상 접합을 하는 기술로 high-Pb 솔더보다 비교적 낮은 온도인 250 °C 내외의 온도에서 접합할 수 있다. Ag 소결 접합부의 열전도도는 200~300 W/m·K 로 전통적인 솔더에 비해 높은 장점이 있다. 또한, 300 °C까지의 고온 환경에서도 재용융이나 취성을 가지고 있는 IMC가 생성되지 않기 때문에 많은 장점을 가지고 있는 접합 공정이다⁹⁻¹²⁾.

이에 따라, 본 연구에서는 열전도도 및 기계적 특성이 우수한 AlN 기판에 무전해 니켈-금도금(Electroless Nickel Immersion Gold, ENIG) 표면처리를 하여 접합 패드를 형성하였다. 그 후, Ag 소결 접합 기술을 적용하여 단자 접합부의 기계적 특성과 열에 대한 내구성을 high-Pb 솔더와 비교, 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 상용 Ag 페이스트 특성 및 열분석

Ag 소결 접합을 위해 상용 Ag 페이스트(MAX102, Nihonhanda, Japan)를 사용하였으며, 열중량(Thermogravimetric)-시차열(Differential Thermal)분석법(TG-DTA: STA8000, PerkinElmer, USA)을 이용하여 400 °C까지 10 °C/min 속도로 승온시켜 중량 감소와 열 흐름을 분석하였다. Ag 페이스트의 입자 크기와 분포를 분석하기 위해 기판 위에 Ag 페이스트를 도포 후 80, 300 °C에서 각각 15, 60 분간 대기(air) 중에서 가열 후 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)을 통해 관찰하였다.

2.2 Ag 소결 접합과 솔더링을 이용한 시편 제작

AlN 기판 접합 패드의 지름은 7 mm 이며, 전력 공급 단자는 지름 5 mm, 두께 2.8 mm의 Ni 단자를 사용하였다. 기판과 단자의 표면처리는 ENIG로 도금하였다. Ag 소결 접합과 high-Pb 솔더는 동일한 기판과 단자를 사용하여 접합하였다.

Ag 페이스트는 200 μ m 두께의 스텐실마스크(stencil mask)을 사용하여 AlN 기판의 접합 패드와 동일한 면적으로 프린팅하였다. 그 후, 프린팅된 Ag 페이스트 위에 Ni 단자를 실장(mounting)한 후 Fig. 1 (a)의 소

Fig. 1 Photographs of (a) thermo-compression bonder, (b) reflow and (c) (d) temperature profile of Ag sintering and soldering

Fig. 2 Schematic diagrams of (a) Ag sintering and (b) high-Pb soldering

결 접합 장비(SJCWD-100, SJ company, Korea)를 사용하여 접합을 진행하였다. 공정 조건은 80 °C에서 30 분간 예열(preheat) 공정을 진행하였으며, 300 °C에 도달하였을 때 공압실린더를 통해 5 MPa의 압력을 가한 후 30분간 소결 공정을 진행하였다. 그 프로파일을 Fig. 1 (c)에 나타내었다. 예열 시간은 10, 20, 30 분 3 가지 조건으로 진행하였으며, 보이드 분율을 비교하여 적합한 조건을 적용하였다. 보이드 분율 측정은 2D X-ray inspection system(H160, XAVIS, Korea)를 사용하였다. high-Pb 솔더(92.5Pb-5Sn-2.5Ag, Nihonhanda, Japan)는 리플로우 장비(1809EXL, Heller, USA)를 사용하여 피크 온도 330 °C에서 접합하였으며, 사용한 장비와 프로파일을 Fig. 1 (b), (d)에 나타내었다. Ag 소결 접합 시편과 high-Pb 솔더 시편 모식도는 Fig. 2에 나타내었다.

2.3 Ag 소결과 high-Pb 솔더의 기계적 특성 평가

일반적으로 접합부에서는 사용 중 칩과 기판 간의 열 팽창계수 차이로 인해 계면에 전단 응력이 발생하기 때문에 전자부품 접합부에서는 전단강도(shear strength) 평가가 주로 사용되고 있다¹³⁾. 따라서 접합강도는 전단강도 측정장비(Dage4000, Dage, USA)를 사용하여 측정하였다. 시험 조건은 전단 속도 200 $\mu\text{m/s}$, 전단 높이 250 μm 으로 진행하였으며, Fig. 3에 모식도를 나타내었다. 전단강도는 최소 10 개 시편에 대한 평균을 취하였으며, 전단시험 후 파면 관찰은 광학현미경(SV-55, SOMETECH VISION, Korea)을 사용하였다.

2.4 고온방치시험을 통한 접합부 특성 분석

솔더 접합부는 고온에서 작동할 경우 원자가 확산하여 계면에 IMC가 성장하게 된다. 또한 IMC는 취성을 가지고 있으며, 확산속도 차이에 의해 계면에 형성하는

Fig. 3 Schematic diagram of shear test

커켄달 보이드(kirkendall void)와 함께 솔더 접합부의 취성 파괴의 원인이 된다^{2,16,17)}. Ag 소결 접합부는 고온에 노출되면 소결 반응이 촉진되어 소결 밀도가 증가한다. 하지만 Ag-Au 층의 확산이 발생함에 따라 Au 층이 소모되어 강도가 감소한다고 보고되었다²²⁾. 따라서 이러한 거동을 관찰하기 위해서 고온방치시험을 진행하였다. 고온방치시험은 오븐 챔버(OF-02GW, JEIOTECH, Korea)를 사용하였고, 세 가지 온도 조건 130, 200, 280 °C에서 1,000 시간 동안 진행하였다. 고온방치 시간에 따른 접합부 계면 변화는 SEM을 사용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 Ag 페이스트 열분석

Ag 페이스트의 TG-DTA 열분석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. TGA 결과를 보면 약 80 °C에서 중량 감소가 시작되어 약 170 °C까지 관찰되었다. DTA 결과에서 80 °C에서 170 °C 사이에 존재하는 하나의 흡열(endothermic) 피크가 관찰되며, 80 °C에서 증발하기

Fig. 4 TG-DTA curve of Ag paste

시작한 유기물과 관련된 것이라 판단된다. Ag 페이스트의 Ag 비율이 약 91 %이며, 170 °C 이후 중량이 약 8.5 % 감소된 것으로 보아 대부분의 유기물이 제거된 것을 알 수 있다. 또한, 약 300 °C에서 발생된 발열(exothermic) 피크는 Ag 입자의 표면 확산에 의한 소결 온도로 판단된다. 금속 입자의 발열 피크는 입자 표면에서의 원자 확산이나 비정질(amorphous) 금속 입자의 결정화(crystallization)에 해당한다고 알려져 있다. 금속 입자는 벌크 금속에 비해 높은 표면 에너지를 가지고 있어 불안정하다. 따라서 소결 시 입자 간 계면에서 결정구조가 안정화되는 과정을 통해 에너지가 낮아지기 때문에 발열 반응이 발생된다고 보고된다^{14,23)}.

Fig. 5 (a)는 예열 공정으로 페이스트 내 유기물들을 제거한 후 Ag 입자, (b)는 소결 공정 이후 입자 간 necking 형성을 관찰한 이미지이다. Ag 입자는 200~500 nm의 단일 입자로 구성되어 있으며, 소결 공정 이후 입자간 necking이 형성된 것을 확인하였다. Ag 입자 간 소결 작용은 온도와 압력에 의해 입자 이동이 발생하고, 낮은 표면 에너지 상태를 위해 necking을 형성하게 된다고 보고하고 있다^{19,20)}.

Fig. 5 SEM images of (a) Ag paste after preheat process and (b) Ag paste after sintering

3.2 접합부 비파괴 보이드 분석

Ag 소결 접합부의 예열 공정 시간에 따른 보이드 분율 변화를 Fig. 6 (a)에 high-Pb 솔더의 보이드 분율을 Fig. 6 (b)에 나타내었다. Ag 소결 접합부는 예열 공정 시간이 증가될수록 보이드 분율이 감소했으며, 30 분간 진행했을 때 보이드가 1 % 미만으로 관찰되었다. 따라서 Ag 소결은 예열 시간 30 분으로 접합 공정을 진행하였다. Fig. 6 (b)에 나타낸 high-Pb 솔더는 약 19.4 ± 10.1 %의 보이드가 관찰되었다. 일반적으로 리플로우 솔더링 공정에서는 보이드가 다량 발생된다고 보고된다²¹⁾.

3.3 고온방치시험 후 접합 특성 변화

Fig. 7은 고온방치시험 후 Ag 소결과 high-Pb 솔더의 단면 분석 결과를 나타내었다. Fig. 7 (a)에서 Ag 소결 접합부는 Ag 입자 간 necking이 형성된 다공성(porous) 구조가 관찰되었다. 또한, 고온방치시험 후 입자간 소결반응에 의해 소결된 Ag가 조밀하게 관찰되었다. 접합부 계면에서는 Ag-Au 층이 관찰되었는데, Ag와 Au는 동일한 면심입방구조(FCC)를 가지고 격자상수가 각각 4.08, 4.07로 비슷하기 때문에 원자

Fig. 6 X-ray void images of (a) Ag sintering by preheat time and (b) high-Pb soldering

(a)

(b)

Fig. 7 The cross-section SEM image of (a) sintered Ag, (b) high-Pb solder after high temperature storage test

상호확산에 의해 전율고용체를 형성하여 계면 접합이 이루어진다. 이러한 Ag-Au 층은 VFL(Void Free Layer)로 나타나며 고온에 노출되면 점차 확산하여 성장한다고 보고되고 있다^{22,24,25)}. Fig. 7 (b)에 나타낸 high-Pb 솔더 접합부 계면에서 Ni_3Sn_4 IMC의 형성 및 성장이 관찰되었다. 하지만 초기에는 형성된 IMC의 두께가 얇아 SEM으로 관찰되지 않았다. 고온방치 온도가 증가될수록 Sn, Ni의 확산속도가 증가함에 따라 IMC의 성장이 증가하였으며, 소폭의 커켄달 보이드가 관찰되었다. 또한, 고온방치 후 Ag_3Sn IMC의 조대화와 Pb 조직 열화가 관찰되었다. 형성된 IMC 및 커켄달 보이드는 고온방치시간이 증가됨에 따라 장기적 신뢰성이 저하 될 것으로 판단된다^{2,16,17)}.

Fig. 8에 고온방치시험 후 전단강도 변화를 그래프에

나타내었다. Ag 소결 접합부의 초기 전단강도는 40.7 MPa로 측정되었다. 고온방치시험 1,000 시간 진행 후 130, 200, 280 °C 각각의 온도에서 41.0, 40.0, 39.8 MPa로 강도를 유지하였다. 반면, high-Pb 솔더는 초기 20.3 MPa로 Ag 소결 접합부보다 낮은 강도가 측정되었다. 고온방치시험 1,000 시간 진행 후 130, 200, 280 °C 각각의 온도에서 19.0, 17.2, 14.9 MPa로 강도가 감소하였다. high-Pb 솔더는 온도가 높을수록 Pb 조직 내 열화 외에도 초기에 생성된 Ag_3Sn 입자가 성장하면서 강도가 감소하게 된다²⁾. Ag 소결 접합부는 280 °C에서 강도가 유지되었으며, high-Pb 솔더는 초기 대비 강도가 약 27 % 감소하였다.

Ag 소결 접합부는 전단시험 시 입자 간 necking 파단이 주를 이루며 소결된 Ag 층 내부에서 파단이 발생

Fig. 8 Shear strength after high temperature storage test at (a) 130 °C, (b) 200 °C, (c) 280 °C

(a)

(b)

Fig. 9 Fracture images of (a) sintered Ag and (b) high-Pb solder after high temperature storage test

한다¹⁸⁾. Fig. 9 (a)는 Ag 소결 접합부의 고온방치 시험 후 파단면을 나타내었으며, 기관과 단자에서 소결된 Ag가 관찰되었다. 고온방치시험 1,000 시간 유지 후에도 Ag 소결 접합부의 파단 모드가 동일하게 관찰되었

다. Fig. 9 (b)에는 high-Pb 솔더의 고온방치시험 후 파단면을 나타내었다. high-Pb 솔더는 모든 조건에서 연성 파괴가 관찰되었다. 그러나 고온방치시험 후 Pb 조직의 열화에 따른 강도 저하가 발생된 것으로 판단된다²⁾.

4. 결 론

ENIG 표면처리된 Ni 단자와 AlN 기판을 Ag 소결 접합, high-Pb 솔더링을 적용하여 접합하였다. 그 후, 고온방치시험에 따른 기계적 및 열적 특성을 비교, 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) TG-DTA 분석 결과, Ag 페이스트는 80 °C에서 유기물이 제거되었으며, 약 300 °C에서 소결 시작 온도로 판단되는 발열피크가 관찰되었다.

2) 보이드 분석 결과, Ag 소결 접합은 30분 예열 공정에서 보이드 분율이 1 % 미만으로 측정되었으며, high-Pb 솔더는 약 19.4 ±10.1 %의 보이드 분율이 측정되었다.

3) 접합강도 측정 결과, Ag 소결 접합부의 초기 강도는 40.7 MPa, high-Pb 솔더는 20.3 MPa로 측정되었다. 고온방치시험 130, 200, 280 °C에서 1,000 시간 유지 후 Ag 소결은 강도를 유지하였으며, high-Pb 솔더는 각각 7, 15, 27 % 감소하였다.

4) 전단시험 후 파단면 관찰 결과, Ag 소결 접합부는 모든 조건에서 Ag 내부 파단이 관찰되었다. 그러나 high-Pb 솔더의 경우, 모든 조건에서 연성파괴가 관찰되었으나, 고온방치시험 온도와 시간이 증가함에 따라 Pb 조직 내 열화가 관찰되었다.

5) 단면 분석 결과, Ag 소결 접합부는 고온방치시험 진행 후에 소결된 Ag가 초기에 비해서 조밀해졌으며, Ag-Au 층이 소폭 증가하였다. 하지만, high-Pb 솔더의 경우, 초기에는 계면에 Ni₃Sn₄ IMC가 형성되었으며, 고온방치 시험 후 IMC의 성장과 커켄달 보이드가 관찰되었다.

ORCID: Yun-Chan Kim: <https://orcid.org/0000-0002-5059-4324>

ORCID: Junghwan Bang: <http://orcid.org/0000-0002-0226-9076>

References

1. P. Rong, H. Zhou, X. S. Ning, Y. B. Lin, and X. Wei, The Study and Fabrication of Al/AlN Substrate, *Mater. Lett.* 56(4) (2002) 465-470.
[https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00530-X](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00530-X)
2. G. Khatibi, A. B. Kotas, and M. Lederer, Effect of Aging on Mechanical Properties of High Temperature Pb-rich Solder Joints, *Microelectron. Reliab.* 85 (2018) 1-11.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2018.03.009>
3. F. P. McCluskey, M. Dasha, Z. Wanga, and D. Huff, Reliability of High Temperature Solder Alternatives, *Microelectron. Reliab.* 46(9-11) (2006) 1910-1914.
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2006.07.090>
4. M. Yunus, K. Srihari, J. M. Pitarresi, and A. Primavera, Effect of Voids on the Reliability of BGA/CSP Solder

- Joints, *Microelectron. Reliab.* 43(12) (2003) 2077-2086.
[https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(03\)00124-0](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(03)00124-0)
5. J. Gong and I. C. Ume, Void Inspection in Lead-free Solder Bumps on Ball Grid Array (BGA) Packages Using Laser Ultrasound Technique, *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2011)*, Denver, USA (2011) 941-948.
6. F. Yu, J. Cui, Z. Zhou, K. Fang, R. W. Johnson, and M. C. Hamilton, Reliability of Ag Sintering for Power Semiconductor Die Attach in High-Temperature Applications, *IEEE Trans. Power Electron.* 32(9) (2016) 7083-7095.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2016.2631128>
7. J. H. Son, M. K. Kim, D. Y. Yu, Y. Ho Ko, J. W. Yoon, C. W. Lee, Y. B. Park, and J. H. Bang, Thermal Aging Characteristics of Sn-xSb Solder for Automotive Power Module, *J. Weld. Join.* 35(5) (2017) 38-47.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.5.6>
8. L. Sun, M. H. Chen, and L. Zhang, Microstructure Evolution and Grain Orientation of IMC in Cu-Sn TLP Bonding Solder Joints, *J. Alloys Compd.* 786 (2019) 677-687.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.384>
9. M. Abtew and G. Selvaduray, Lead-free Solders in Microelectronics, *Mater. Sci. Eng. R Rep.* 27(5-6) (2000) 95-141.
[https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(00\)00010-3](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(00)00010-3)
10. C. Chen and K. Suganuma, Microstructure and Mechanical Properties of Sintered Ag Particles with Flake and Spherical Shape from Nano to Micro Size, *Mater. Des.* 162 (2019) 311-321.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.062>
11. S. Wang, M. Li, H. Ji, and C. Wang, Rapid Pressureless Low-Temperature Sintering of Ag Nanoparticles for High-Power Density Electronic Packaging, *Scr. Mater.* 69(11-12) (2013) 789-792.
<https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.08.031>
12. N. Y. Lee, J. H. Lee, and C. Y. Hyun, Chip Sinter-Bonding Using Ag-Based Paste for Power Semiconductor Devices, *J. Weld. Join.* 37(5) (2019) 482-492.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.5.8>
13. J. H. Ahn, K. S. Kim, Y. C. Lee, Y. I. Kim, and S. B. Jung, Regulation in Shear Test Method for BGA of Flip-Chip Packages, *J. Microelectron. Packag. Soc.* 17(3) (2010) 1-9.
14. J. Jiu, H. Zhang, S. Nagao, T. Sugahara, N. Kagami, Y. Suzuki, Y. Akai, and K. Suganuma, Die-Attaching Silver Paste Based on a Novel Solvent for High-Power Semiconductor Devices, *J. Mater. Sci.* 51(7) (2016) 3422-3430.
<https://doi.org/10.1007/s10853-015-9659-8>
15. M. S. Kim, C. M. Oh, and W. S. Hong, Pressureless Silver Sintering Property of SiC Device and ZTA AMB Substrate for Power Module, *J. Weld. Join.* 37(2) (2019) 15-20.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2019.37.2.3>

16. L. Xu, J. H. L. Pang, K. H. Prakash, and T. H. Low, Isothermal and Thermal Cycling Aging on IMC Growth Rate in Lead-free and Lead-based Solder Interface, *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.* 28(3) (2005) 408-414.
<https://doi.org/10.1109/TCAPT.2005.853593>
17. Y. D. Jeon and K. W. Paik, Studies on Ni-Sn Intermetallic Compound and P-Rich Ni Layer at the Electroless Nickel UBM-Solder Interface and Their Effects on Flip Chip Solder Joint Reliability, *Proceedings of Electronic Components and Technology Conference (ECTC 2001)*, Orlando, USA (2001).
18. Y. Liu, H. Zhang, L. Wang, and X. Fan, Effect of Sintering Pressure on the Porosity and the Shear Strength of the Pressure-Assisted Silver Sintering Bonding, *IEEE Trans. Device Mater. Reliab.* 18(2) (2018) 240-246.
<https://doi.org/10.1109/TDMR.2018.2819431>
19. C. Chen, J. Yeom, C. Choe, G. Liu, Y. Gao, Z. Zhang, B. Zhang, D. G. Kim and K. Suganuma, Necking Growth and Mechanical Properties of Sintered Ag Particles with Different Shapes Under Air and N₂ Atmosphere, *J. Mater. Sci.* 54(20) (2019) 13344-13357.
<https://doi.org/10.1007/s10853-019-03813-0>
20. Z. Z. Fang and H. Wang, Densification and Grain Growth during Sintering of Nanosized Particles, *Int. Mater. Rev.* 53(6) (2008) 326-352.
<https://doi.org/10.1179/174328008X353538>
21. W. I. Seo, Y. H. Ko, Y. H. Kim, and S. H. Yoo, Void Fraction of a Sn-Ag-Cu Solder Joint Underneath a Chip Resistor and its Effect on Joint Strength and Thermomechanical Reliability, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 30(17) (2019) 15889-15896.
<https://doi.org/10.1007/s10854-019-01935-4>
22. C. Chen, K. Suganuma, T. Iwashige, K. Sugiura, and K. Tsuruta, High-Temperature Reliability of Sintered Microporous Ag on Electroplated Ag, Au, and Sputtered Ag Metallization Substrates, *J. Mater. Sci. Mater. Electron.* 29(3) (2018) 1785-1797.
<https://doi.org/10.1007/s10854-017-8087-8>
23. K. S. Moon, H. Dong, R. Maric, S. Pothukuchi, A. Hunt, Y. Li, and C. P. Wong, Thermal Behavior of Silver Nanoparticles for Low-Temperature Interconnect Applications, *J. Electron. Mater.* 34(2) (2005) 168-175.
<https://doi.org/10.1007/s11664-005-0229-8>
24. X. Wang, Y. Mei, X. Li, M. Wang, Z. Cui, and G. Q. Lu, Pressureless Sintering of Nanosilver Paste as Die Attachment on Substrates with ENIG Finish for Semiconductor Applications, *J. Alloys Compd.* 777 (2019) 578-585.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.10.294>
25. S. A. Paknejad, G. Dumas, G. West, G. Lewis, and S. H. Mannana, Microstructure Evolution during 300 C Storage of Sintered Ag Nanoparticles on Ag and Au Substrates *J. Alloys Compd.* 617 (2014) 994-1001.
<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.08.062>