

특집 : TLP Bonding for High Temperature Operation Temperature

고온동작소자의 패키징을 위한 천이액상확산접합 기술

정도현¹ · 노명환¹ · 이준형² · 김경흠² · 정재필^{1,†}

¹서울시립대학교 신소재공학과, ²(주)덕산하이메탈

Transient Liquid Phase (TLP) Bonding of Device for High Temperature Operation

Do-hyun Jung¹, Myung-hwan Roh¹, Jun-hyeong Lee², Kyung-heum Kim² and Jae Pil Jung^{1,†}

¹Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul, 163, Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Korea

²Duksan Himetal Co. Ltd., 66, Muryong 1-ro, Buk-gu, Ulsan 44252, Korea

(Received February 27, 2017; Corrected March 9, 2017; Accepted March 14, 2017)

Abstract: Recently, research and application for a power module have been actively studied according to the increasing demand for the production of vehicles, smartphones and semiconductor devices. The power modules based on the transient liquid phase (TLP) technology for bonding of power semiconductor devices have been introduced in this paper. The TLP bonding has been widely used in semiconductor packaging industry due to inhibiting conventional Pb-base solder by the regulation of end of life vehicle (ELV) and restriction of hazardous substances (RoHS). In TLP bonding, the melting temperature of a joint layer becomes higher than bonding temperature and it is cost-effective technology than conventional Ag sintering process. In this paper, a variety of TLP bonding technologies and their characteristics for bonding of power module have been described.

Keywords: power module, power semiconductor, transient liquid phase (TLP) bonding, Pb-free solder, High temperature operation

1. 서 론

최근 자동차 동력원에서 전기 에너지 비율이 증가함에 따라, 이를 효율적으로 변환, 분배하기 위한 파워 모듈(power module)에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 파워 모듈은 전력 공급, 변환 및 분배 등의 다양한 역할을 하며, 파워 모듈을 구성하는 전력반도체(power semiconductor)는 크게 전력을 변환하는 절연게이트형 양극성 트랜지스터(IGBT), 금속산화막실리콘 전계효과 트랜지스터(MOSFET) 및 diode 등의 소자로 구성된다.¹⁾ 전력 반도체는 다른 반도체 소자와는 달리, 높은 구동 전압을 요구하여, 고 전류 및 다량의 열이 발생하고, 그 경향은 점차 소형화, 고밀도화 되고 있다.²⁾ 이러한 전력 반도체들로 구성되는 파워 모듈은 전기자동차를 비롯한 친환경 자동차를 구동시키기 위한 핵심 부품이다. 특히 자동차에 사용되는 파워 모듈은 안전과 밀접한 관계가 있고, 사용 환경이 열악하기 때문에 높은 접합부 신뢰성이 요구된다.³⁾

그림 1에 파워 모듈을 구성하는 (a) die 및 (b) substrate

접합부를 나타내었다. 접합부는 통상 150°C이하(Si의 junction temperature)에 노출되며, 지속적인 열적/물리적 충격이 가해진다. 또한, 세라믹 기관과 금속소재 간의 열팽창계수 차이(CTE mismatch)로 인한 응력과, 접합 시 용융된 금속의 응고과정에서 발생하는 응력 및 기포 등의 요인들과 균열은 내구성과 신뢰성을 크게 저하시킨다.⁴⁾

한편, 파워 모듈의 접합에 있어서, 기존에는 그 접합재로 유연 솔더(Pb-base solder)가 사용되어 왔으나, ELV(end of life vehicle) 및 RoHS(restriction of hazardous substances) 규제가 강화됨에 따라 이의 사용이 제한되고 있다. 또한 최근 파워모듈을 구성하는 전력 반도체 재료가 Si에서 SiC로 변화되는 경향에 따라 방열판이 축소 혹은 제거되어 접합부는 보다 고온에 노출될 수 있다.²⁾ SiC 반도체는 Si 반도체에 비해 에너지 밴드 갭이 크고, 절연 파괴 강도가 우수하며, 전자포화속도가 높고, 열 전도성이 뛰어나다. 즉, SiC 전력반도체를 사용한 파워 모듈에서는 앞선 특징을 바탕으로 소자의 소형화, 주변부품의 소형화, 연비향상 및 고온작동이 가능하지만, 모듈 내부는 200°C 이

[†]Corresponding author
E-mail: jujung@uos.ac.kr

© 2017, The Korean Microelectronics and Packaging Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

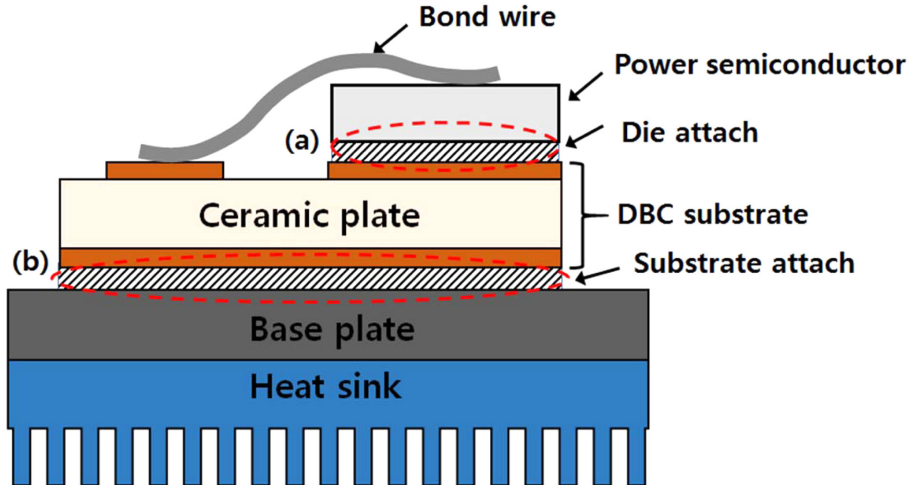


Fig. 1. Schematic illustration of die attach area (a) and substrate attach area (b) in conventional power module. (DBC indicates direct bonded copper).

상의 온도에 노출된다.⁵⁾

이러한 최근의 추세에 대응하기 위한 die 및 substrate 접합 소재는 납 성분의 제거(Pb-free)와 동시에 고온 신뢰성이 요구된다. 이를 위해 주석기반의 솔더(Sn-based solder)에 비해 용점이 높은 Au⁶⁾, Bi^{7,8)}, Zn⁹⁾ 계열의 접합 소재¹⁰⁾들이 연구된 바 있고, 접합 후 접합부의 용점이 상승하는 천이액상확산(transient liquid phase; TLP) 접합기술이나 Ag 소결 접합법¹¹⁾도 활발히 연구되고 있다.

Zn, Bi 계열 솔더는 부식저항성과 열적/전기적 전도성이 낮고, 높은 용융온도와 낮은 열전도성으로 인해 소자에 열적 영향을 미칠 수 있으며, 접합 온도에서 소자와 기판을 손상시킬 위험성이 높은 단점이 있다.¹²⁻¹³⁾ Au 계열 접합소재는 높은 부식저항성과 우수한 열전도도와 전기전도도, 대기 중 무 플럭스(flux-less) 접합이 가능하다는 장점이 있지만, 가격이 비싸다는 치명적인 단점이 있다.¹⁴⁾ Ag 나노 소결 접합법은 100 nm급의 은 파우더를 약 200°C의 저온에서 소결하여 접합하는 기술로써, 접합 후 소결체의 용점이 700°C 이상으로 상승하여 고온 안정성이 높으면서 동시에 전기전도도와 접합 강도가 우수한 장점이 있다.¹¹⁾ 그러나, 접합을 위해 1~20 MPa의 압력이 가해지므로 소자와 기판이 손상될 위험성이 크고, 소결체의 특성상 다수의 기공(pore)이 접합부에 형성되며, 기존의 솔더링 설비를 이용하기 힘든 단점이 있다.¹⁵⁾ 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 Ag 나노 입자를 이용한 무가압 소결 접합이 연구된 바 있으나, 소재의 가격이 높다는 한계가 있다.¹¹⁾

모재를 용융시키지 않고 2개의 물질을 접합하여 우수한 강도를 확보할 수 있는 기술에는 고상확산법(solid diffusion bonding), 마찰교반용접법(Friction Stir Welding) 및 천이액상확산접합기술(이후 TLP 접합) 등이 있다. 그 중에서도 1950년대 Lynch 등에 의해 처음 소개된 TLP 접

합은 고상 확산법과 브레이징법의 장점만을 조합시킨 것으로서, 접합과정 중 접합면에 일시적(transient)으로 액상을 형성시킨 후(브레이징), 접합 온도를 계속 유지하면(확산접합) 삽입금속층의 용점저하원소가 액상에서 모재 쪽으로 확산함에 따라 삽입금속의 용점이 상승하여, 액상이 접합 온도에서 등온응고가 발생하면서 접합되는 기술이다. TLP 접합은 고온특성이 필요한 내열합금이나 스테인리스강 등 구조용 합금의 접합에 많이 적용되어 왔다.¹⁶⁻²⁰⁾ 이 기술은 접합 후 형태 변화를 크게 감소시킬 수 있는 장점으로 인해 이종금속간 접합이 용이하고, 열영향부(heat effect zone, HAZ)가 작은 특성이 있다. 또한, 종래의 브레이징(brazing)이나 확산접합(diffusion bonding)의 단점을 해결한 접합법으로, 고온에서 접합강도는 모재와 거의 동등한 수준을 나타낸다.

본 고에서는 용융된 저용점 금속과 용융되지 않은 고용점 금속간의 상호확산을 통해서 고온 안정성이 높은 금속간 화합물(intermetallic compound, IMC)을 형성시키는 TLP 접합의 연구동향에 대해 알아보하고자 한다.

2. TLP 접합

확산 접합(diffusion bonding)으로 알려진 초기 TLP 접합은 Ni, Fe, Cu계열 합금 등을 접합시키기 위해 용점 저하 원소인 B, P 등을 첨가한 합금을 삽입금속(filler metal)으로 사용한 접합법이다. 기본적으로 브레이징(brazing)과 확산 접합의 개념이 결합된 형태로, 일반적으로 고체와 고체가 접합되는 고상확산접합법과 달리, TLP 접합은 삽입금속이 접합온도에서 액상의 상태에서 고상으로 등온응고(isothermal solidification)하는 액상확산접합이다. 즉, 접합온도보다 낮은 용점을 갖는 삽입금속을 접합온도에서 용융시킨 후 액상-고상 상호확산(solid-liquid inter-

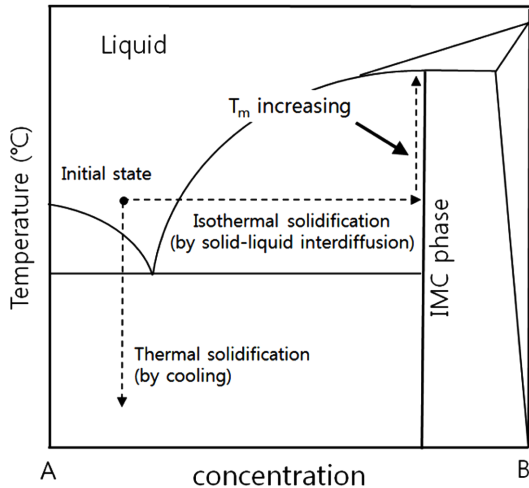


Fig. 2. Isothermal solidification and thermal solidification in phase diagram. (T_m indicates melting temperature).

diffusion)을 통해 용점저하 원소를 모재로 확산시켜, 접합재의 용점을 상승시키는 등온응고를 이용한다. 전자재료 접합 분야에서의 TLP 접합은 접합부의 조성변화를 통해 접합온도보다 높은 온도에서 용융되는 금속상이 되거나,²¹⁻²³ 금속간화합물(IMC)상이 형성되어 접합부에서 등온응고가 발생한다.²⁴ 그림 2에는 가상의 평형상태도를 이용하여 기존 솔더링에서의 냉각에 의한 응고와 TLP 접합에서의 등온응고를 나타내었다. 이러한 TLP 접합은 SLID(solid liquid inter-diffusion) bonding,²⁵ TLPS(transient liquid phase soldering)²⁶ 및 IDS(Isothermal diffusion soldering)²⁷로도 불리고 있다.

2.1. 접합 원리

전력반도체의 패키징을 위한 TLP 접합은 다양한 방법으로 적용되고 있으나, 기본적인 원리는 다음과 같다.²⁴⁻²⁸

(그림 3 참조)

① 초기 접합부 설계(initial state)

그림 3의 (a)에서는 고용점 금속의 범프(bump)와 저용점 금속의 박판(foil)을 이용한 TLP 접합의 초기 상태를 나타내었다. 이 단계는 접합을 위한 초기 준비단계로, 접합 전 2개의 고용점 재료 사이에 저용점 재료가 샌드위치 구조로 위치되며, 그 후 접합 온도의 상승에 따라 저용점 재료의 용융 및 젖음 상태로 이어진다.

② 용융 및 젖음(melting and wetting)

설계한 접합부를 저용점 금속이 용융되는 온도로 가열하면, 그림 3의 (b)와 같이 용융된 금속이 고용점 금속 표면에 젖는다. 즉, 접합부를 접합온도까지 가열하면, 삽입 금속의 용점은 접합 온도보다 높고, 모재 용점보다는 낮으므로, 삽입금속만 용융 및 접합된다.

젖음 불량으로 인해 접합부 전 영역에 고체-액체 계면이 형성되지 않을 경우 균일한 IMC성장이 이루어지지 않거나 접합부에 기공이 형성된다. 이러한 접합 불량은 접합부의 기계적 특성 및 열적 특성을 저하시키는 원인이 되므로,²⁹ 이를 개선하기 위해, 금속 표면에 금(Au)의 증착³⁰ 및 OSP(Organic solderability preservative) 표면처리를 하여 wetting 성능을 향상시킨 연구 결과가 있다.²⁹ 해당 단계에서는 1 MPa이하의 압력이 가해지나, 일부 무가압(pressure-less) TLP 공정에서는 젖음을 크게 향상시켜 용융된 금속에 의해 접합부를 자가 충전(self-densify)한 바 있다.²⁸

③ 고상-액상 상호 확산(solid-liquid inter-diffusion)

용융된 저용점 금속이 고체의 고용점 금속을 용해(dissolution)하면서 그림 3의 (c)와 같이 계면을 중심으로 금속간 화합물의 성장이 시작된다. 계면에서 성장하는 금속간 화합물은 용융된 저용점 금속을 소비하면서 성장하며, 온도에 변화가 없더라도 지속적인 확산으로 인해 금

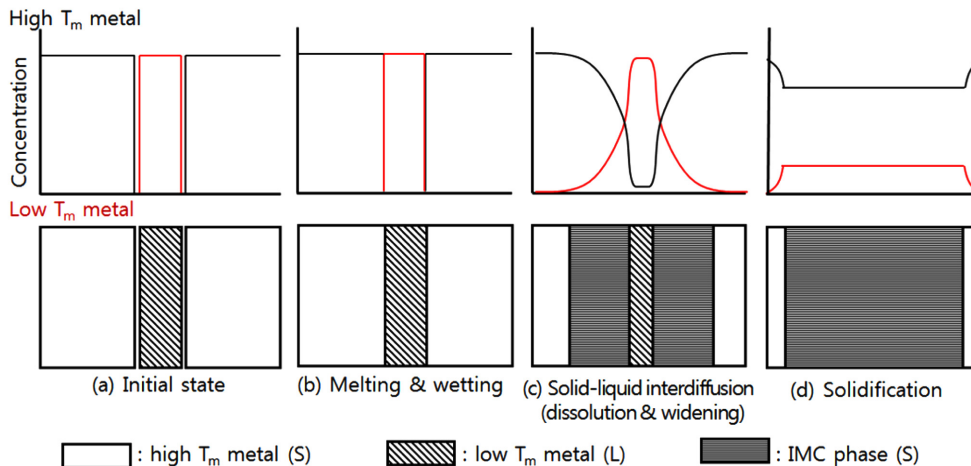


Fig. 3. Schematic TLP bonding step and associated concentration profile.

Table 1. Several bonding techniques for packaging of powder semiconductor.

	Conventional solder	High temp. solder	silver sintering	TLP bonding
Material	Sn base alloy	Bi, Zn base alloy	Micro/Nano size silver powder	Cu-Sn, Cu-Ni
High temp. sustainability	Re-melting temp. = process temp. Depend on M.P. of solder		Re-melting temp. > process temp. >900°C (performance varies)	400~900°C (depend on materials)
Process temperature	<250°C	300~450°C	250~280°C	200~300°C (except Au-Sn)
Process pressure	non or low	non or low	<5 MPa	<1 MPa
Materials cost	Low (Conventional)	Low	High (Nano materials and Silver)	Low (except Au, Ag, In)
Compatibility	High (Conventional)	High (Conventional)	Low	High · Similar to conventional soldering process · General materials used in power semiconductor packaging (Cu, Ni, Sn)
Drawback	low melting temp.	High process temp.	High pressure High material cost	Long process time Hard to set process condition

속간 화합물이 형성되는 범위가 넓어지면서 접합부 응고가 진행된다.²⁴⁾ 즉, 접합과정 중 일시적(transient)으로 액상을 형성시킨 후, 접합 온도를 유지하면 삽입금속의 용점저하원소가 액상에서 모재 쪽으로 확산함에 따라 삽입금속 용점이 상승하여, 액상이 접합 온도에서 등온응고가 발생한다. 일반적으로 액상의 확산은 고상의 확산보다 3배 이상 빠르기 때문에³¹⁾ 고상-액상 계면을 넓힘으로써 접합시간을 단축시키는 것이 가능하며, 접합 후 균질화 열처리를 실시하면 모재와 접합부 성분 원소의 상호확산을 통해 접합부가 소멸되고, 모재와 일체화된다.

④ 등온응고(isothermal solidification) 및 성분의 균질화(homogenization)

용점 저하 원소가 모재로 확산되면 액상 삽입금속 내 용점 저하 원소의 평균 조성이 감소되므로, 액상의 삽입금속이 접합온도에서 응고가 진행되는데, 이를 등온응고(isothermal solidification)라 한다. 그림 3의 (d)와 같이, 일정한 온도를 유지함으로써 접합부 전 영역에 금속간화합물을 성장시킨다. 접합 시간이 충분히 유지되면, 액상영역이 완전히 사라지게 되며, 등온응고 이후 접합부 조성을 모재와 유사하게 만들기 위해 균질화(homogenization)가 진행된다.²¹⁾ 이 과정을 거치게 되면, 접합부는 모재와 화학적으로 거의 유사한 상태를 이루기 때문에, 브레이징보다 고온 기계적 강도가 우수하다.³²⁾

한편, 접합부에 소비되지 않은 저용점 금속은 고온 작동 시 접합부의 신뢰성을 크게 저하시킨다.³³⁾ 저용점 금속이 많을 경우 기판의 금속층(metallization layer)까지 소비하며 완전한 접합부 형성이 어려울 수 있으므로, 접합부 두께와 소재를 고려한 공정설계가 필요하다. 이를 위

해 C. Ehrhardt 등은 파워더 기반의 TLP 접합에서 완전한 Cu₆Sn₅ 접합부 형성을 위해 아래 식(1)을 사용하였으며, 구리(Cu), 주석(Sn) 혼합비를 39:61이라 계산하였다³⁴⁾.

$$\omega t\%(Cu) = \frac{6m_A(Cu)}{6m_A(Cu) + 5m_A(Sn)} \tag{1}$$

위 식에서 mA는 몰질량(g/mol)이다.

TLP 접합 기술은 우수한 접합 품질과 낮은 공정온도 대비 높은 내열성을 얻을 수 있으며, 접합부가 모재와 유사한 소재로 구성되어 높은 안정성을 갖는다.⁵⁻²⁴⁾ 그러나, 이를 위해 접합부를 완전히 금속간 화합물로 전이시켜야 한다는 점에서 초기 변수 확보가 어려운 공정이다.

2.2. 접합 소재

전자재료 접합을 위한 TLP 접합 소재는 크게 주석(Sn)과 인듐(In)계열로 나뉘며 각각의 용점은 231.9°C와 156.6°C이다. Sn은 Ni-Sn³⁵⁾, Cu-Sn³⁶⁾, Au-Sn³⁷⁾, Ag-Sn³⁸⁾으로 TLP접합에 사용된다. 이중 가격적 측면에서 Cu-Sn과 Ni-Sn이 유력한 후보군으로 주목받고 있다. Ni-Sn은 이미 LED시장에서 고온용 접합소재로 사용되고 있으나, Cu-Sn에 비해 전기적 특성 및 열적 특성이 떨어진다. 반면 Cu-Sn은 소재의 산화문제와 복잡한 평형 상태도를 갖는다는 단점이 있으며, Cu₆Sn₅ 금속간 화합물의 성장과 더불어 Cu₃Sn의 성장이 같이 진행되어 접합부 신뢰성을 저하시킬 수 있다. 인듐은 Au-In 및 Ag-In으로 TLP 접합에 사용되는데, 이들 소재의 가격은 매우 고가이다. 또한 In은 산화가 쉽게 발생하므로 TLP layer의 표면에 Au를 증착한 후 접합한다.³⁷⁾ 산화막이 제거되지 않을 경우 wetting이 발생하지 않고, 이 부분을 중심으로 확산이 이루어지

Table 2. Comparison of various TLP bonding system.

Material	Temperature(°C)		Relative market price**	Relative conductivity**		Note
	bonding	re-melt(IMC)		Thermal	Electrical	
Cu-Sn	280	415 (Cu ₆ Sn ₅) 676 (Cu ₅ Sn)	Cu: 0.5 Sn: 0.8	Cu: 4.4	Cu: 4.1	Complex phase
Ni-Sn	300	800 (Ni ₃ Sn ₃)	Ni: 1 Sn: 0.8	Ni: 1	Ni: 1	Conventional packaging materials for high temp. device
Au-Sn	250	419 (AuSn)	Au: 2600 Sn: 0.8	Au: 3.5	Au: 3.1	Free from oxidation
Ag-Sn	250	480 (Ag ₃ Sn)	Ag: 63 Sn: 0.8	Ag: 4.7	Ag: 4.4	-
Ag-In*	200	495	Ag: 63 In: 37.5	Ag: 4.7	Ag: 4.7	-
Au-In	175	880	Au: 2600 In: 37.5	Au: 3.1	Au: 3.1	Most expensive

* TLP sintering : Silver + Indium powder

** Relative values are normalized to Ni.

지 않아 결함이 생성된다. 표 2에 TLP 접합에 사용되는 재료와 그 특성을 나타내었다.

2.3. 전자재료 접합 분야에서의 TLP 접합

TLP 접합은 특정 온도까지 가열하여 용융된 저융점 금속이 고융점 금속에 wetting되고, 이후 액상-고상 상호확산을 통해 고융점의 균일한 성분을 갖는 접합부를 얻거나, 중간상인 IMC를 접합부에 형성시키는 기술이다.³⁹⁾ 즉, 접합 후 접합부 용융 온도($T_{re-melting}$)가 접합온도($T_{bonding}$)보다 높다. TLP 접합은 예로부터 이 같은 특징을 바탕으로 작동 시 많은 열을 발생시키는 전력반도체, LED, 우주항공 및 센서 등의 분야의 적용이 연구되어 왔다.⁴⁰⁾ 특히 최근 고온용 납 솔더에 대한 규제와 자동차용 전력반도체 환경변화에 대응하기 위해 나노 은(nano-Ag) 소결법과 함께 주목받고 있는 기술이다. 고온 안정성 확보를 위해, Ag 나노 분말을 이용한 저온 소결법에 대한 연구가 진행되고 있다. 이 기술은 Ag nano paste를 접합면에 도포한 후 300°C 이하에서 장시간 소결하여 접합하는 것으로, Au가격 수준의 Ag nano paste를 이용하기 때문에, 재료 가격의 상승과 접합재 내부 보이드 발생으로 인한 장기 신뢰성, 전도도 및 접합강도가 저하되는 단점이 있다. 그림 4에 Ag나노 분말을 이용한 저온 소결법에서 발생한 보이드를 나타내었다. 즉, 이러한 Ag 나노 분말을 이용한 저온 소결법은 전술한 단점 외에도, 접합 시 압력을 가해야 하는 등 제품 제조에 어려움이 있고, 제조원가도 상승하는 결과를 야기한다.¹¹⁾

TLP법은 Ag 소결법에 비해 재료비와 접합 비용이 저렴하여 가격 경쟁력을 확보할 수 있고, 수시간 소요되는 Ag 소결법에 비해 접합시간이 30분 이하로, 생산성이 향상되는 장점이 있다. 또한, 천이액상 확산접합법은 모재를 용융시켜 접합하는 용융 용접법이 아니므로 고온균열에 대한 위험성을 배제할 수 있고, 확산에 의한 균질화 처

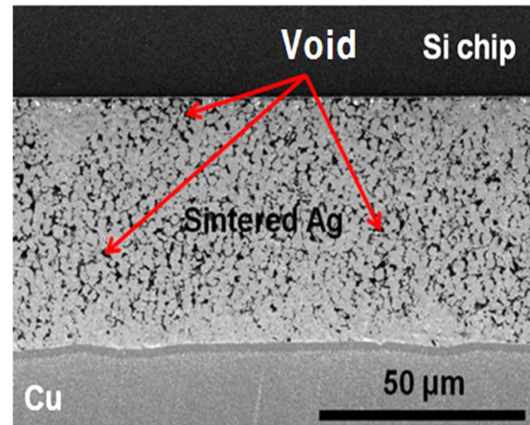


Fig. 4. SEM cross-sectional images of sintered Ag joint using micro-sized chestnut-burr-like Ag particle paste.¹¹⁾

리 시 모재와 거의 동일한 수준의 강도를 얻을 수 있으므로, 단순한 브레이징에 의한 접합부보다 우수하다고 할 수 있다. Lis 등은 Ag-Sn, Ni-Sn계 접합 소재를 적용하여 전단 강도 약 60.4 MPa를 갖는 양호한 TLP 접합을 완료하였다.³⁵⁾

표 1에는 전자재료 접합 분야에서 TLP 접합의 특징을 기존 솔더링 소재, 고온 솔더링 소재 및 나노 은 소결공정과 비교하여 나타내었다.

한편, 소자의 작동 환경에서 접합부의 특성은 아래 식 (2)의 절대융점대비온도(TH, Homologous temperature)에 따라 달라진다.

$$TH = T_{operation} / T_{melting} [K/K] \tag{2}$$

위 식에서 $T_{operation}$ 은 소자의 작동 온도, $T_{melting}$ 은 삽입 금속의 용융온도이며, TH의 값이 작을수록, 즉 작동온도

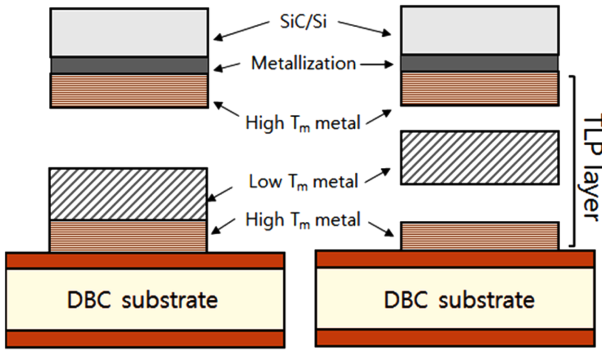


Fig. 5. Schematic illustration of various powder type TLP bonding techniques. (a) Layer type TLP, (b) paste type TLP.

대비 용점이 높을수록 열충격, 전단강도를 비롯한 기계적 특성에서 우수한 성능을 보인다.²⁹⁾ TLP 접합의 경우 소자에 따라 400~900°C, Ag 소결법의 경우 900°C이상의 $T_{re-melting}$ 온도를 갖기 때문에 200°C에서 작동하는 환경을 고려할 경우 TH값이 0.7~0.37이다. 반면 기존 SAC305 솔더의 경우 0.97의 절대용점대비 온도를 갖는다. 300°C 이하의 접합공정을 사용함으로써 소자에 가해지는 열 손상을 줄이고, 기판 및 소자와 접합부간의 열팽창계수 차이로 인한 응력 발생을 최소화 할 수 있다.

2.4. 전력 반도체 패키징을 위한 TLP 접합

전력 반도체 패키징을 위한 TLP 접합 기술 후보군으로 Cu-Sn 또는 Ni-Sn system이 주목받고 있으며, 최근 수행되는 연구는 접합시간을 단축시키면서 동시에 우수한 접합품질을 얻기 위한 방향으로 진행 중이다. 그림 5에는 진공증착 장비를 이용하여 금속층을 형성한 TLP 접합을 나타내었다. 이 경우 기판의 전처리와 진공증착을 포함하여 높은 공정비용과 복잡한 공정 단계가 요구된다.⁴¹⁾ 또한 금속층 두께가 매우 얇아 기판과 접합부 사이에서 발생하는 열팽창계수 차이로 인한 응력을 수용하기 힘들며, 두꺼운 금속층을 형성시키기에는 공정비용과 시간이 지나치게 소요된다. 이후 저용점 금속을 기계적 가공을 통해 얇은 박 형태로 제조하여 접합부에 삽입 후 접합하는 기술⁴²⁻⁴⁴⁾이 연구되었다. TLP 접합에서 접합시간(t)에 따라 성장하는 금속간 화합물의 두께(χ)는 Fick's 확산법칙을 통해 예측하는 것이 가능하며, 이를 식(3)에 나타내었다.⁴⁵⁾

$$\Delta\chi^2 = Dt \tag{3}$$

여기서 D는 상호확산계수(interdiffusion coefficient)로, 아래 식 (4)의 아레니우스 식(Arrhenius relation)으로 표현이 가능하다.

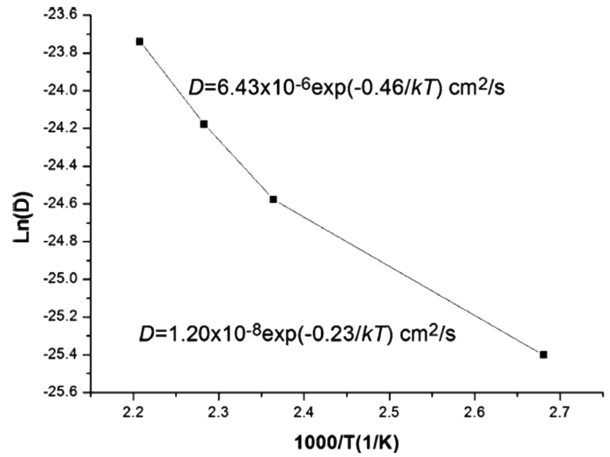


Fig. 6. Arrhenius plot of the diffusivities for the Au/In reaction and the activation energy calculated from the slopes of the lines.⁴⁶⁾

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \tag{4}$$

여기서, D_0 는 고유상호확산계수(intrinsic diffusivity), Q는 활성화에너지(activation energy), R은 기체상수(gas constant), T는 절대온도를 의미한다. 따라서, 고유확산계수 D_0 값과 금속간 화합물 성장에 필요한 활성화 에너지(Q)는 접합공정과 소자에 따라 다를 수 있다. TLP 접합 시 고온 안정성 확보를 위해, 접합부 신뢰성에 대한 연구가 이루어지고 있다. 솔더 접합부 신뢰성에 영향을 미치는 주요 인자는 금속간화합물의 형성과 성장인데, W. Zhang 등은 3차원 칩 실장을 위한 Au/In TLP 접합에서, IMC 성장에 필요한 활성화 에너지 계산을 위해 식(4)의 아레니우스 식을 이용하여 그 값을 계산하였다.⁴⁶⁾ 그 결과, 그림 6과 같이, 150°C 이상 온도에서 활성화 에너지는 0.46 eV로 나타났고, 150°C 이하에서는 약 0.23 eV로 측정되었다. 이 값은 Liu⁴⁷⁾, Bjontegaad⁴⁸⁾ 등의 연구 결과와 유사하다.

TLP접합에서는 용융된 저용점 금속에 의해 용해(dissolution)된 고용점 금속이 금속간 화합물을 형성하면서 등온응고가 이루어진다. 이때 용융된 저용점 금속에 고용점 금속이 녹아들어가는 용해속도는 식(5)를 통해 표현할 수 있다.⁴⁹⁾ 용해 속도는 용해속도상수(dissolution rate constant, k), 반응 온도에서 용융 금속에 용해될 수 있는 고용점 금속의 포화 용해도(C_s), 용융 금속에 녹아 있는 고용점 금속의 현재 농도(C), 용융 금속의 부피(V) 및 용융 금속과 고용점 금속사이 계면 면적(S)에 영향을 받는다.

$$\frac{dc}{dt} = k \frac{S}{V} (C_s - C) \tag{5}$$

여기서 용해 속도는 고상-액상 계면 면적에 비례하기 때문에, 고상과 액상계면의 면적을 넓힘으로써 접합시간을 줄일 수 있다.

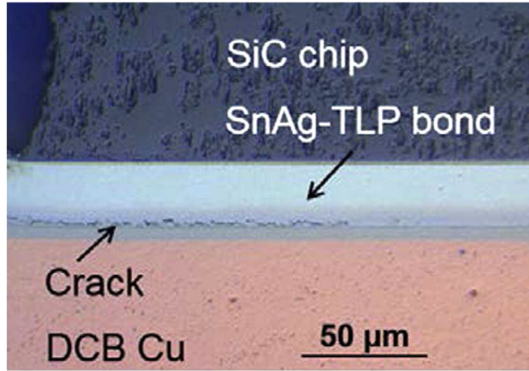


Fig. 7. Micrograph of an Sn-Ag TLP bonded SiC diode on AlN DCB after 50,000 cycles at $\Delta T = 100 \text{ K}$.⁵⁰⁾

2.5. TLP 접합의 기계적 특성 및 신뢰성 평가

TLP 접합에서의 기계적 특성 및 그 신뢰성은 접합 소재 및 공정 변수에 따라 다양하게 나타나며, 미세조직의 변화와도 밀접한 관계가 있다. Bajwa 등은 Sn-Ag 를 이용하여 SiC의 TLP 접합을 완료하여 TC 1000 사이클 후의 전단강도를 비교 측정하였다.⁵⁰⁾ 그 결과, TLP 접합 후 전단강도는 39.8MPa 나타내었으며, 1000 사이클 후의 전단 강도는 약 5.78% 감소된 37.5 MPa를 보였다. 이는 1000 사이클 후 TLP 접합부의 접합계면 분석 결과, 접합재의 열팽창계수 차이로 인해 접합계면의 가장자리 부근에서 그림 7과 같이 균열이 발생하고, 이러한 균열이 접합부 중앙으로 전파되어 전단강도를 저하시키는 것으로 사료된다.

또한, Nobeen 등은 Sn-Ag를 이용하여 TLP 접합 후 접합 압력에 따른 전단강도를 평가하였다. 그 결과, 0.2 MPa 접합 압력일 때 전단 강도 약 2.9 MPa, 접합 압력이 0.4 MPa일 때는 전단 강도 약 10.6 MPa로, 접합 압력이 클수록 접합부 전단 강도는 높아지는 경향을 보였다.³⁸⁾

3. 결 론

본고에서는 전력반도체 등 고온 특성이 요구되는 디바이스의 접합에 사용되는 접합법과 관련하여, 액상확산접합법(TLP)에 대하여 소개하였다. TLP 접합법은 1970년대 초 이후로 그간 많은 발전이 진행되어 왔으며, 최근에는 전자분야에서도 다양하게 적용되고 있다. TLP 접합법은 소재 및 공정의 가격, 고온 신뢰성 측면에서 고온 작동 소자의 접합기술로 많은 장점을 가지고 있으며, 또한 Ag 소결법에 비해 가압이 필요하지 않고 접합시간이 짧다는 장점도 있다. 특히 파워 모듈에서 SiC반도체의 사용이 확대되고, 각종 환경규제로 인해 납 솔더의 사용이 불가능한 상황에서 이러한 흐름은 가속화 될 것으로 사료된다. 그러나 기존의 특성들을 개선할 여지도 남아 있어, 보다 많은 관심과 연구가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 연구성과실용화진흥원의 지원을 받아 연구되었습니다.

References

1. J. Millan, "A Review of WBG Power Semiconductor Devices", 2012 International semiconductor Conference (CAS), 57 (2012).
2. I. W. Suh, H. S. Jung, Y. H. Lee and S. H. Choa, "Heat Dissipation Technology of IGBT Module Package", J. Microelectron. Packag. Soc., 21(3), 7 (2014).
3. S. S. Kim "Trend of Technical Development of Power Device and its Evaluation", 2016 MPC conference, 149 (2016).
4. T. Hu, H. Chen and M. Li, "Die attach materials with high remelting temperatures created by bonding Cu/Sn microparticles at lower temperatures", Materials and Design, 108, 383 (2016).
5. H. Greve, S. A. Moeini and F. P. McCluskey, "Reliability of paste based transient liquid phase sintered interconnects", 2014 IEEE 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Orlando, FL, 1314 (2014).
6. H. S. Chin, K. Y. Cheong and A. B. Ismail, "A Review on Die Attach Materials for SiC-Based High-Temperature Power Device", Metallurgical and Materials Transactions B, 41(4), 824 (2010).
7. Y. Takaku, I. Ohnuma, Y. Yamada, Y. Yagi, Y. Nishibe, Y. Sutou, R. Kainuma and K. Ishida, "Bi-Base Composite Solders for Mounting Power Semiconductor Devices", Journal of Japan Institute of Electronics Packaging 11(2), 141 (2008).
8. Q. Jiang, S. Mukherjee, A. Dasgupta, D. Shaddock and L. Yin, "Mechanical constitutive properties of a bi-rich high temperature solder alloy", 2016 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), Las Vegas, NV, 1236 (2016).
9. K. S. Kao, S. C. Chung, C. W. Fan, J. Y. Chang and T. C. Chang, "Utilization of Zn alloy for the manufacture of automotive power device modules", Proc. 2015 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC), Kyoto, 546 (2015).
10. Y. Yamada, Y. Takaku, Y. Yagi, I. Nakagawa, T. Atsumi, M. Shirai, I. Ohnuma and K. Ishida, "Pb-Free High Temperature Solder Joints for Power Semiconductor Devices", Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, 2(1), 79 (2009).
11. R. H. Roh, H. Nishikawa and J. P. Jung, "A Review of Ag Paste Bonding for Automotive Power Device Packaging", J. Microelectron. Packag. Soc., 22(4), 15 (2015).
12. K. Sukanuma and K. Kim, "Sn-Zn low temperature solder", J. Mater. Sci. Mater. Electron. 18, 121 (2006).
13. Z. Mei and J. W. Morris, "Characterization of eutectic Sn-Bi solder joints", J. Electron. Mater. 21 599 (1992).
14. H. Chin, K. Cheong and A. Ismail, "A Review on Die Attach Materials for SiC-Based High-Temperature Power Device", Metallurgical and Materials Transactions B, 41(4), 824 (2010).
15. S. W. Yoon, M. D. Glover and K. Shiozaki, "Nickel-Tin Transient Liquid Phase Bonding Toward High-Temperature

- Operational Power Electronics in Electrified Vehicles”, IEEE Transactions on Power Electronics, 28(5), 2448 (2013).
16. J. P. Jung and C. S. Kang, “Liquid phase diffusion bonding of Rene80 using pure boron”, Material Transactions, 37(5), 1008 (1996).
 17. J. P. Jung and C. S. Kang, “Transient Liquid Phase process in Ni-B joining”, Material Transactions, 38(10), 886 (1997).
 18. J. P. Jung, C. D. Lee and C. S. Kang, “A study on the Melting Induced Diffusion Bonding of 304 stainless steel”, J. of the Korean Inst. of Met. & Mater., 31(3), 323 (1993).
 19. J. P. Jung and C. S. Kang, “Liquid Metal Formation on Ni/B/Ni Diffusion Bonded Joint-Liquid Phase Diffusion Bonding Using B as an Insert Material”, J. of the Korean Inst. of Met. & Mater., 33(10), 1302 (1995).
 20. J. P. Jung and C. S. Kang, “A Study on the Width of Liquid Layer of Ni/B/Ni Diffusion Bonding System”, The Korean Welding and Joining Soc., 13(4), 147 (1995).
 21. M. J. Kim, Y. Zhou and J.P. Jung, “Reduced temperature soldering of capacitors using Sn-Bi plated Sn-3.5%Ag”, Soldering & Surface Mount Technology, 19, 3 (2007).
 22. J. S. Lee, W. Bang, J. P. Jung and K. H. Oh, “Microstructure and Strength of Sn-Bi Coated Sn-3.5 mass%Ag Solder alloy”, Material Transactions, 45(3), 783 (2004).
 23. J. S. Lee, W. H. Bang, J. P. Jung and K. H. Oh, “Application of TLP (Transient liquid phase) bonding method to the high Tm lead free solder”, Materials Science Forum, 475(479), 1869 (2005).
 24. O. G. Cook and C. D. Sorensen, “Overview of transient liquid phase and partial transient liquid phase bonding”, Journal of Materials Science, 46(16), 5305 (2011).
 25. K. E. Aasmundtveit, T. A. Tollefsen, T. T. Luu, A. Duan, K. Wang and N. Hoivik, “Solid-Liquid Interdiffusion (SLID) bonding — Intermetallic bonding for high temperature applications”, 2013 European Microelectronics Packaging Conference (EMPC), Grenoble, 1 (2013).
 26. A. S. Khaja, C. Kaestle, A. Reinhardt and J. Franke, “Optimized thin-film diffusion soldering for power-electronics production”, Proceedings of the 36th International Spring Seminar on Electronics Technology, Alba Iulia, 11 (2013).
 27. B. Gollas, J. H. Albering, K. Schmut, V. Pointner, R. Herber and J. Etzkorn, “Thin layer in situ XRD of electrodeposited Ag/Sn and Ag/In for low-temperature isothermal diffusion soldering”, Intermetallics, 16, 962 (2008).
 28. H. Greve, L. Y. Chen, I. Fox and F. P. McCluskey, “Transient liquid phase sintered attach for power electronics”, 2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference, Las Vegas, NV, 435 (2013).
 29. J. Strogies and K. Wilke, “Universal high-temperature suitable joint adapting diffusion soldering”, Proceedings of the 5th Electronics System-integration Technology Conference (ESTC), Helsinki, 1 (2014).
 30. T. A. Tollefsen, A. Larsson, O. Løvvik and K. Aasmundtveit, “Au-Sn SLID Bonding—Properties and Possibilities”, Metallurgical and Materials Transactions B, 43(2), 397 (2012).
 31. C. C. Lee, C. Y. Wang and G. Matijasevic, “Advances in Bonding Technology for Electronic Packaging”, J. Electron. Packag., 115(2), 201 (1993).
 32. J. P. Jung and C. S. Kang, “Mechanical Property of Liquid Phase Diffusion Bonded Joint of Rene80 / B / Rene80”, The Korean Welding and Joining Soc., 13(3), 125 (1995).
 33. F. Lang, H. Yamaguchi, H. Nakagawa and H. Sato, “High temperature resistant joint technology for SiC power devices using transient liquid phase sintering process”, Proc. 13th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging (ICEPT), Guilin, 157 (2012).
 34. C. Ehrhardt, M. Hutter, H. Oppermann and K. D. Lang, “A lead free joining technology for high temperature interconnects using Transient Liquid Phase Soldering (TLPS)”, Proc. 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Orlando, FL, 1321, IEEE (2014).
 35. A. Lis and C. Leinenbach, “Effect of Process and Service Conditions on TLP-Bonded Components with (Ag,Ni)–Sn Interlayer Combinations” The Minerals, Metals & Materials Soc., 44(11), 4576 (2015).
 36. N. S. Bosco and F. W. Zok, “Strength of joints produced by transient liquid phase bonding in the Cu–Sn system”, Acta Materialia 53, 2019 (2015).
 37. A. Torleif, A. Tollefsen, A. Larsson, O. Løvvik and K. Aasmundtveit, “Au-Sn SLID Bonding—Properties and Possibilities”, Metallurgical and Materials Transactions B, 43(2), 397 (2012).
 38. N. S. Nobeen, R. Imade, B. Lee, E. Phua, C. Wong and C. Gan, “Transient liquid phase (TLP) bonding using Sn/Ag multilayers for high temperature applications”, Proc. 15th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2013), Singapore, 647, IEEE (2013).
 39. G. Humpston, D. M. Jacobson and S. P. S. Sangha, “Diffusion soldering for electronics manufacturing”, Endeavour, 18(2), 55 (1994).
 40. H. Chin, K. Cheong and A. Isnauk, “A Review on Die Attach Materials for SiC-Based High-Temperature Power Devices”, Metallurgical & Materials Transactions B, 41B, 824 (2010).
 41. A. Bajwa and J. Wilde, “Reliability modeling of Sn–Ag transient liquid phase die-bonds for high-power SiC devices”, Microelectronics Reliability, 60, 116 (2016).
 42. H. Y. Zhao, J. H. Liu, Z. L. Li, Y. X. Zhao, H. W. Niu, X. G. Song and H. J. Dong, “Non-interfacial growth of Cu₃Sn in Cu/Sn/Cu joints during ultrasonic-assisted transient liquid phase soldering process”, Materials Letters, 186, 283 (2017).
 43. B. Liu, Y. Tian, J. Feng and C. Wang, “Enhanced shear strength of Cu–Sn intermetallic interconnects with interlocking dendrites under fluxless electric current-assisted bonding process”, Journal of materials science, 52(4), 1943 (2017).
 44. J. H. Liu, H. Y. Zhao Z. L. Li, X. G. Song, H. J. Dong Y. X. Zhao and J. C. Feng, “Study on the microstructure and mechanical properties of Cu-Sn intermetallic joints rapidly formed by ultrasonic-assisted transient liquid phase soldering”, Journal of Alloys and Compounds, 692, 552 (2017).
 45. C. Honrao, T. C. Huang, M. Kobayashi, V. Smet, P. M. Raj, and R. Tummala, “Accelerated SLID bonding using thin multi-layer copper-solder stack for fine-pitch interconnections”, Proc. 64th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Orlando, FL, 1160, IEEE (2014).
 46. W. Zhang and W. Ruythooren, “Study of the Au/In Reaction for Transient Liquid-Phase Bonding and 3D Chip Stacking”, J. Electron. Mater., 37(8), 1095 (2008).
 47. Y. M. Liu and T. H. Chuang, “Interfacial Reactions between Liquid Indium and Au-Deposited Substrates” J. Electron. Mater., 29(4), 405 (2000).
 48. J. Bjontegaard, L. Buene, T. Finstad, O. Lonsjo and T. Olsen,

“Low Temperature Interdiffusion in Au/In Thin Film Couples”, *Thin Solid Films*, 101(3), 253 (1983).

49. V. I. Dybkov, “Growth Kinetics of Chemical Compound Layers”, 1st ed. Cambridge International Science Publishing, Cambridge, England, 135 (1998).
50. A. Bajwa and J. Wilde, “Reliability modeling of SnAg transient liquid phase die-bonds for high-power SiC devices”, *Microelectronics Reliability*, 60, 116 (2016).



- Do-Hyun Jung
- Department of Materials Science and Engineering
- University of Seoul, Seoul-02504, South Korea
- Research Interests: Electroplating, Packaging, TLP Bonding
- E-mail: jdh1016@uos.ac.kr



- Myung-Hwan Roh
- Department of Materials Science and Engineering
- University of Seoul, Seoul-02504, South Korea
- Research Interests: TLP Bonding, Brazing, Soldering
- E-mail: lucete0611@naver.com



- Jun-Hyeong Lee
- Duksan Himetal Co. Ltd., 66, Muryong 1-ro, Buk-gu, Ulsan, Republic of Korea
- Research Interests: Electroplating, Thermoelectric module
- E-mail: leewnsud@naver.com



- Kyung-Heum Kim
- Duksan Himetal Co. Ltd., 66, Muryong 1-ro, Buk-gu, Ulsan, Republic of Korea
- Research Interests: Soldering, Thermoelectric module
- E-mail: khkim@oneduksan.com



- Jae-Pil Jung
- Department of Materials Science and Engineering
- University of Seoul, Seoul-02504, South Korea
- Research Interests: Microjoining, Electroplating, Brazing Fillers, Solder-Joint Reliability
- E-mail: jppjung@uos.ac.kr