

## 전력반도체 접합용 천이액상확산접합 기술

이정현<sup>1</sup> · 정도현<sup>2</sup> · 정재필<sup>1,†</sup>

<sup>1</sup>서울시립대학교 신소재공학과, <sup>2</sup>경북테크노파크 경량소재융복합기술센터

### Transient Liquid Phase Diffusion Bonding Technology for Power Semiconductor Packaging

Jeong-Hyun Lee<sup>1</sup>, Do-hyun Jung<sup>2</sup>, and Jae-Pil Jung<sup>1,†</sup>

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

<sup>2</sup>Lightweight Materials Technology Center, Gyeongbuk Technopark, 27, Sampung-ro, Gyeongsan-si, Gyeongsangbuk-do 38542, Korea

(Received December 11, 2018; Corrected December 21, 2018; Accepted December 28, 2018)

**Abstract:** This paper shows the principles and characteristics of the transient liquid phase (TLP) bonding technology for power modules packaging. The power module is semiconductor parts that change and manage power entering electronic devices, and demand is increasing due to the advent of the fourth industrial revolution. Higher operation temperatures and increasing current density are important for the performance of power modules. Conventional power modules using Si chip have reached the limit of theoretical performance development. In addition, their efficiency is reduced at high temperature because of the low properties of Si. Therefore, Si is changed to silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN). Various methods of bonding have been studied, like Ag sintering and Sn-Au solder, to keep up with the development of chips, one of which is TLP bonding. TLP bonding has the advantages in price and junction temperature over other technologies. In this paper, TLP bonding using various materials and methods is introduced. In addition, new TLP technologies that are combined with other technologies such as metal powder mixing and ultrasonic technology are also reviewed.

**Keywords:** Transient liquid phase bonding, Power module, High temperature, SiC, Solder

## 1. 서 론

전력반도체(Power semiconductor)란 입력 전력을 각 전자기기에 맞게 변환 및 공급하는 역할을 하는 반도체로 파워모듈(Power module)이라고도 불리우며, IGBT (insulated gate bipolar mode transistor), MOSFET (metal oxide silicon field effect transistor), GTO (gate turn-off thermistor), 다이오드 등으로 구성되어 있다. Fig. 1은 전력반도체의 모식도를 보인 것으로, 여기에는 다이(die)와 기판의 접합을 포함하고 있다. 전력반도체는 다른 일반 반도체 대비, 높은 전류 및 전압으로 많은 열이 발생하기 때문에 고신뢰성, 고내압화 등 높은 물성이 요구되며, 또한 소형화되고 있는 전자기기 트렌드에 맞춰 크기 또한 작아지고 있기 때문에 더욱 높은 전자패키징 기술력이 필요하다.<sup>1)</sup>

최근 전자기기의 사용전력 증가, 전기 및 친환경 자동차의 개발로 인해 전력반도체 수요가 점차 증가하고 있

다.<sup>2-4)</sup> 특히 전기자동차 개발로 인한 수요가 크게 증가하고 있는데, 자동차 산업에 사용되는 전력반도체는 고온과 물리적 충격에 지속적으로 노출되기 때문에 안전성의 문제로 모듈내의 접합부에서는 기계적, 전기적으로 높은 신뢰성이 요구된다. 이러한 접합부의 문제를 개선하기 위하여 Au 계 솔더, Zn 계 솔더, Ag 소결법, 천이액상확산 접합 등 다양한 접합재 및 접합방법에 대한 연구가 진행되고 있다.<sup>5-12)</sup> 이 중에서 Zn 기반 접합재는 낮은 열전도도로 인해 열 손상이 발생할 수 있고, 또한 높은 용점을 지니고 있어서 접합 시 다이와 기판을 손상시킬 위험이 있다. 반면, Au 기반 접합재와 Ag 소결법은 우수한 열전도도와 전기 전도도로 높은 신뢰성을 보이지만 가격이 매우 높다는 단점이 있다. 이러한 단점을 해결할 수 있는 기술로 천이액상확산접합이 있다.

천이액상확산접합(transient liquid phase diffusion bonding; TLP)은 1950년대에 처음 도입된 것으로, 확산접합과

<sup>†</sup>Corresponding author

E-mail: jujung@uos.ac.kr

© 2018, 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.

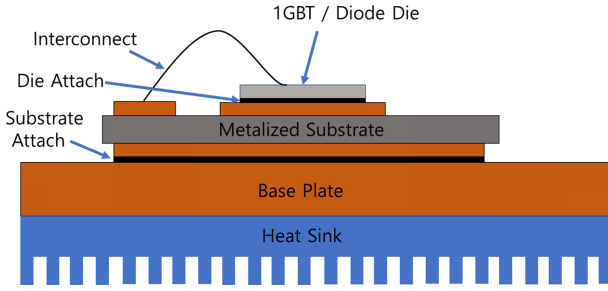


Fig. 1. Schematic diagram of power semiconductor.

Table 1. Calculated surface tension of solders.<sup>24)</sup>

Properties (at 300K)	Si	4H-SiC	6H-SiC	GaN
Band gap width $E_g$ [eV]	1.12	3.26	3.03	3.4
Breakdown electric field $E_c$ [ $MV \cdot cm^{-1}$ ]	0.3	3	2.5	3
Electrons mobility $\mu_n$ [ $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ ]	1400	900	500	1250
Holes mobility $\mu_p$ [ $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ ]	600	100	101	200
Thermal conductivity $\lambda$ [ $W \cdot K^{-1} \cdot cm^{-1}$ ]	1.5	4.9	4.9	1.3
Relative permittivity $\epsilon_r$	11.8	10	9.7	9
Saturation velocity $v_{sat}$ [ $\times 10^7 \text{ cm} \cdot s^{-1}$ ]	1	2	2	2.2
Maximum working temperature $T_{max}$ [ $^{\circ}C$ ]	150	760	760	800

브레이징을 조합한 접합 방법이다. 브레이징처럼 접합 과정에서 접합의 인터페이스에서 일시적으로 액상이 형성되지만, 접합온도를 계속 유지하면 접합재 내의 용점저하원소들이 모재(Base metal)로 확산되면서 액상이 등온응고되면서 접합이 이루어진다.<sup>13-16)</sup> 이는 확산접합과 유사한 과정이다. TLP 접합은 온도를 유지하면서 원소들이 상호 확산되기 때문에 조성의 균일화가 이루어지고, 접합 영역의 변화를 최소화할 수 있어 열영향부(heat-affected zone)가 작다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 접합의 강도가 기본 금속과 거의 동일하게 나타난다.<sup>17,18)</sup> TLP 접합은 마이크로 전자 패키징 산업뿐만 아니라 스테인리스강과 같은 구조용 합금 접합, 고신뢰성 및 고온특성이 요구되는 내열합금 등의 접합에 이용되고 있다.<sup>19,20)</sup> 본 논문에서는 파워모듈 접합을 위한 TLP 접합의 최신 기술 동향에 대해서 고찰하고자 한다.

## 2. 전력반도체 패키징의 신뢰성 이슈

Si die의 성능이 이론적 한계에 다다르면서 Si를 SiC 혹은 GaN으로 교체하려는 움직임이 활발히 진행되고 있다. Si 대비 SiC와 GaN의 성능을 Table 1에 나타내었다. SiC와 GaN으로 대체됨에 따라 다이의 성능 및 작동온도를

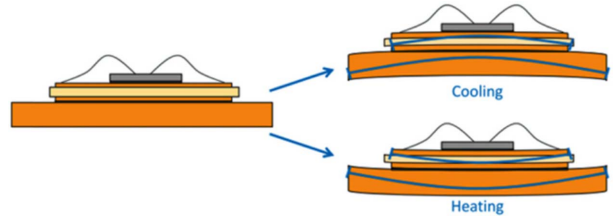


Fig. 2. Schematic diagram of warpage during heating and cooling.

높일 수 있게 되었지만, 기존의 패키징의 물성과 신뢰성이 이에 부합하지 못하는 문제가 발생하고 있다. 기존에 주로 사용되고 있던 Sn-Ag-Cu (SAC) 솔더의 경우 낮은 열피로 특성으로 인해 균열 및 박리의 문제가 발생하고 있다.

또한, 전력반도체가 구동할 때 발생하는 열 혹은 외부에서 가해지는 열은 접합의 수명을 단축시킨다. 열팽창계수(coefficient of thermal expansion; CTE) 차이로 인하여 온도 변화가 가해지면 소재들을 각자 다른 정도로 팽창과 수축을 하면서, 접합부분에 열 응력이 축적되게 된다.<sup>21)</sup> Fig. 2에 나타난 바와 같이 이종재료 접합에서 CTE 차이에 의한 휨(warpage) 현상은 승온 시 열팽창계수가 큰 쪽으로, 냉각 시 열팽창계수가 작은 쪽으로 휘어지게 되며, 그 과정에서 접착력이 감소하거나 크랙(crack)이 형성되는 등 기계적 물성이 감소하기 때문에 CTE 차이로 인한 손상을 제어하는 것은 전력반도체 패키징 신뢰성에 중요한 부분을 차지한다.

## 3. TLP 접합의 원리

### 3.1. TLP 접합 공정

TLP 접합은 용가재(filler metal)의 용융, 모재의 용융, 등온응고(isothermal solidification), 균일화로 크게 4단계로 구성되어 있으며, 이를 Fig. 3에 나타내었다. 두 개의 모재 사이에 용가재를 삽입한 후 접합온도 이상, 모재 용점 이하의 온도로 가열하면 용가재만이 용융되어 접합부를 채우게 된다. 이 상태에서 접합온도를 유지하면 용가재에 내의 용점저하원소가 모재로 확산되어 접합부와 인접한 모재 부분이 용융되고, 액상층이 확대된다. 접합온도를 계속 유지하면 용점저하원소와 모재 내의 원소들이 확산되면서 액상의 조성이 변하게 되고 등온응고과정이 일어나게 된다. 이 과정에서 금속간화합물(Inter metallic compound; IMC)이 일부분 형성되기도 한다.<sup>13)</sup> 액상 소멸 후에도 온도를 유지하면 원소들이 확산되면서 모재와 접합부의 농도가 균일하게 분포하게 된다. 일반적으로 액체에서의 확산이 고체 확산보다 약 3배정도 빠르기 때문에 균질화를 위한 확산은 비교적 오랜 시간이 소요될 수 있다. 고체화가 이루어진 후 균질화가 제대로 이루어지지 않으면 물성이 불균형을 이루면서 신뢰성에 문제가 발생하게 된다.

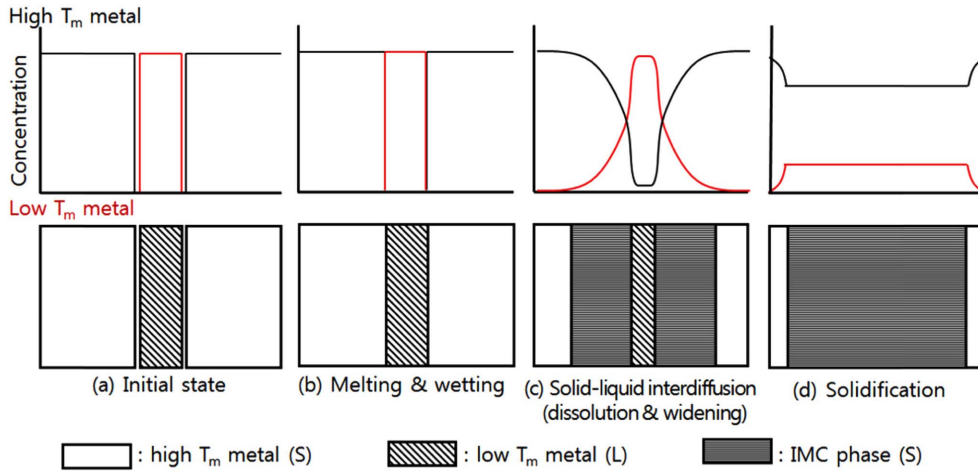


Fig. 3. Schematic of transient liquid phase bonding process.<sup>39)</sup>

### 3.2. TLP 접합 공정

언급한 바와 같이 용점저하 원소가 모재 금속으로, 모재 금속의 원소가 용가재로 확산되면서 용융상의 응고 현상이 발생한다. 이 과정 중 IMC가 생기게 되는데, 고온에서 장시간 접합을 진행할수록 IMC의 두께는 증가하게 된다. 적절한 온도와 시간동안 접합을 진행하게 되면 모든 액상이 사라진 후 적절한 균질화가 진행되면서 기초 금속과 유사한 접합이 형성된다. 이 경우에는 기본 브레이징 방법 대비 고온에서의 기계적 특성이 매우 우수하다.

등온응고와 균일화를 위해 고려해야 할 사항은 용점저하 원소의 비율이다. 과도한 용점저하 원소는 접합부의 신뢰성 저하를 초래하기 때문에 이를 고려하여 용가재를 설계 및 제작해야 한다. C. Ehrhardt는 Cu-Sn계 TLP 접합에서 완전한 접합 영역을 설계하기 위해 식 1의 방정식을 제안하였다.<sup>22)</sup>

$$w\%(Cu) = \frac{6 \cdot m_A(Cu)}{6 \cdot m_A(Cu) + 5 \cdot m_A(Sn)} \times 100 \quad (1)$$

$m_A$ 는 몰 질량으로 위 방정식에 구리와 주석의 몰 질량 (Cu: 63.546 g/mol, Sn: 118.71 g/mol)을 대입하여 계산해보면 아래와 같은 결과를 도출할 수 있다.

$$w\%(Cu) = \frac{6 \cdot 63.576g/mol}{6 \cdot 63.546g/mol + 5 \cdot 118.71g/mol} \times 100 = 39.13\% \quad (2)$$

위 결과에 따르면 용가재 설계 시 적절한 Cu 함량은 약 39.13%가 되지만, 모재에 Cu가 포함되어 있을 때 외부 압력이 가해지면 39.13%보다 낮은 함량이 요구된다.<sup>22)</sup>

## 4. TLP 접합의 종류

### 4.1. Cu-Sn

현재까지 가장 많이 연구된 기술은 Cu-Sn 용가재를 이

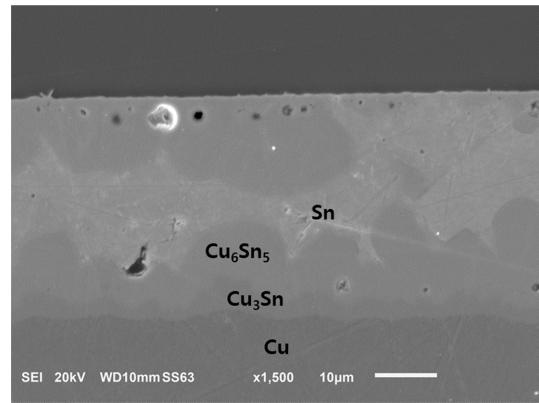


Fig. 4. Cross-sectional microstructure of the joint bonded with Sn-Cu.

용한 TLP 접합이다. 일반적인 Cu-Sn TLP 접합은 280°C에서 진행되며, Fig. 4에서 처럼  $Cu_6Sn_5$ 와  $Cu_3Sn$  두 가지 IMC가 주로 형성된다. 최근에는 위와 같은 일반적인 방법뿐만 아니라 용가재의 형태를 변형한 다양한 기술이 존재한다. 첫 번째 기술은 Cu와 Sn을 교대로 쌓아 개량된 포일(foil) 형태의 용가재를 사용하는 방법으로, 이렇게 층을 교대로 쌓게 되면 맞닿는 표면적이 넓어지면서 확산이 더욱 빠르게 진행된다.<sup>23)</sup>

두 번째로, Sn foil (thickness: 30 µm) 표면에 Cu plate (thickness: 0.5 mm)를 위치시키고 전류(900A)를 이용하여 접합하는 방법으로, 침상형 IMC ( $Cu_6Sn_5$ 와  $Cu_3Sn$ )이 형성되며 접합시간(전류를 흘려주는 시간)에 비례하여 접합층의 IMC가 증가한다.<sup>24)</sup>

세 번째는 Cu plate 사이에 Sn foil을 넣은 Cu/Sn/Cu 형태의 접합재를 사용하여 고온(250°C), 초음파와 전력(20kHz, 300W)을 동시에 가하여 접합을 하는 방법이다. 이 방법은 접합시간이 8초 이내로 고온만을 사용하는 기존 방법 대비 접합시간을 단축할 수 있는 장점이 있다.<sup>25)</sup>

기존 방법 대비 초음파를 사용하게 되면 IMC가 접합부 내에서 무작위로 형성된다. 그러나 접합시간이 8초 이상이 되면 접합부가 모두  $Cu_3Sn$ 이 되면서 기존 접합 방법과 유사한 결과를 얻게 된다.

네 번째는 전기도금으로 Cu ball 위에 Sn을 도금하여 접합재로 사용한 방법이다. 전기도금 시 Cu ball과 Sn 사이에 IMC가 형성되며, 도금된 ball로 접합부를 채운 후 고온을 가하여 접합하는 방법으로 IMC가 거미줄처럼 생성된다.<sup>26)</sup>

마지막 방법은 Cu, Sn powder를 이용하여 고온고압 상태에서 소결을 하는 기술로, 압력으로 인해 용점이 낮아져 낮은 온도에서 접합이 가능하다.<sup>27)</sup> 소결 후 Sn과 Cu 입자가 접합부에 남아있을 수 있고, 소결 시 가하는 압력이 다이에 손상을 줄 수 있다.

#### 4.2. Ni-Sn

각각의 모재에 sputtering, 전기도금 등의 방법을 이용하여 Ni를 형성한 후 중간에 Sn foil을 삽입하여 약 300°C로 가열하는 것이 일반적인 Ni-Sn TLP 접합의 방법이다. 300°C로 가열해주면 Sn이 용융되면서 Ni로 확산이 되고, Ni-Sn 합금이 형성되면서 응고된다.<sup>28)</sup> Ni-Sn TLP의 경우 IMC로  $Ni_3Sn_4$ 가 주로 형성된다.

그 밖의 방법으로는 Ni-Sn paste를 이용한 기술이 있으며, die에 Ni (8  $\mu m$ )을 형성한 후 기판과 다이 사이에 paste를 삽입한 후 250°C에서 초음파(35 kHz), 압력(0.4MPa), 전력(500W)을 10초동안 동시에 가해준다. paste 내에 Ni 함량이 20wt.%일 때 가장 높은 강도를 보였으며, 24wt.% 이상이 되면 접합 후 잔여 Ni이 남게 되면서 강도가 저하되는 것으로 보고된다.<sup>29)</sup>

#### 4.3. Ag-Sn

일반적인 Ag-Sn TLP 방법은 각각의 모재에 Cr/Ag 다층박막을 형성한 후 가운데에 Sn 형성 후 280°C, 0.3MPa 환경에서 접합하는 것이다. 이 때, Cr층은 기판과의 접합력을 향상시키기 위해 형성한다.<sup>30)</sup> Ag-Sn TLP 접합의 경우  $Ag_3Sn$ 이 주로 형성된다.

그 밖에, PVD (physical vapor deposition)와 전기도금을 이용하여 Sn과 Ag를 겹겹이 쌓은 foil을 제작하여 접합하는 방법이 있다.<sup>31)</sup> Sn과 Ag가 맞닿는 면적이 넓어지면서 확산이 빠르게 진행되고, 이로 인해 접합이 빠르게 진행되는 장점이 있다. 뿐만 아니라 용가재를 foil로 제작할 경우 접합의 용이성이 향상된다.

#### 4.4. Au-Sn

일반적인 Au-Sn TLP 접합은 약 450°C에서 접합이 이루어진다. Au-Sn TLP로 SiC 다이를 접합할 경우 90MPa 이상의 강도가 확보되며, 400°C의 고온시효 결과 1000시간 이후에도 강도가 유지되는 것이 확인되었다.<sup>32)</sup> Au-Sn 조성은 기계적 물성이 뛰어난 뿐만 아니라, 높은 고온 신

뢰성을 지니는 장점이 있다. 뿐만 아니라, Au-Sn의 물성은 다른 TLP 접합대비 매우 뛰어나지만, 귀금속인 Au의 가격문제로 상용화의 문제가 있다.

#### 4.5. 3원계

Cu-Sn-Ag 3원계 용가재를 사용하여 TLP 접합을 진행할 경우 2가지 이상의 IMC가 형성된다. Cu-Sn-Ag의 경우  $Cu_3Sn$ ,  $Cu_6Sn_5$ ,  $Ag_3Sn$ 이 주로 형성되는데, Cu를 기판으로 사용한 시편의 경우 온도가 높아지거나, 접합온도 유지시간이 길어지면 모재의 Cu가 접합부로 확산되면서  $Cu_6Sn_5$ 상이 사라지고  $Cu_3Sn$ 상이 성장한다. 접합강도는 23.4MPa(접합온도 300°C, 접합시간 15분)에서 60.2MPa(접합온도 300°C, 접합시간 420분)까지 확인되었다.<sup>33)</sup> IMC의 형성 순서는 Cu 기판으로부터  $Cu_3Sn$ ,  $Cu_6Sn_5$ ,  $Ag_3Sn$ 으로,  $Cu_6Sn_5$  상이 남아있으면  $Cu_6Sn_5$ 와  $Ag_3Sn$  사이에서 균열이 일어난다.

Sn-Bi-Cu 3원계의 경우, Sn-Bi 접합재 내에 Cu 입자를 첨가하여 이용한 방법으로, Bi가 용점을 낮춰주는 역할을 하여 200°C 이하의 온도에서 접합이 가능하다. 저온에서의 접합이 가능한 장점이 있지만 Cu 입자가 첨가되면 접합부에 공극(void)이 크게 형성되는 경향이 있는데 이러한 공극은 기계적 강도를 저하시키는 역할을 하여 신뢰성에 문제를 줄 수 있다.<sup>34)</sup>

### 5. 최신 천이액상확산접합 기술

#### 5.1. TLP 금속 분말 접합

기존 박막형태가 아닌 금속 분말을 이용한 TLP 접합방법들이 제안되고 있다. 금속 분말을 사용할 경우, 같은 양의 입자를 사용하더라도 입자의 크기가 크면 표면적이 상대적으로 작아지기 때문에 IMC 형성이 적어지게 된다. 입자 크기가 작으면 표면적이 넓어져 접합시간이 빨라지는 장점이 있지만, 입자들의 반데르발스 힘으로 인해 응집하려는 성질이 있어 분산을 시키지 못하면 불순물처럼 작용할 수 있다.

금속 분말을 이용할 경우 접합 시 젖음성 저하 및 역확산 등의 문제가 발생할 수 있다. 이러한 현상이 발생하면 접합부의 공극 혹은 신뢰성 저하의 문제를 야기할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 금속 분말 표면에 도금을 하는 방법이 제안되었다. 스퍼터링, 무전해도금 등을 이용하여 금속 분말 표면에 다른 금속을 형성하면, 젖음성이 향상되는 효과를 볼 수 있다.

최근 보고된 연구에 따르면, X. Liu 등이 무전해도금을 이용하여 Cu 분말 위에 Sn을 코팅하여 TLP 접합을 하였다. 분말 표면에 Sn을 형성하는 중  $Cu_6Sn_5$  IMC가 형성되는 것이 확인되었다. 제작된 분말을 사용하여 TLP 접합을 진행할 경우 Sn과 반응하지 않은 Cu 상이 접합재 내에 남아있게 된다. 300°C에서 200시간 동안 고온시효를 진행하여도 강도저하가 나타나지 않은 것을 확인할 수 있

었다.<sup>35)</sup>

금속 분말 사용 시 젖음성의 문제가 발생하는 이유 중 하나는 분말의 넓은 표면적으로 인해 표면이 쉽게 산화되는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 유기물에 분말을 분산시켜 paste 형태로 제작하여 사용할 수 있다. 유기물로 산화를 방지할 수 있지만, 접합 시 유기물 잔사로 인해 기계적 물성이 저하될 수 있다.

5.2. 초음파를 이용한 TLP 접합

기존 TLP 접합 방법은 고온 분위기를 유지하며 접합을 진행하지만, 초음파를 함께 사용할 경우 접합시간을 크게 단축시킬 수 있다. Cu-Sn TLP의 경우 초음파를 사용하면 8초 이내로 접합이 가능해진다.<sup>25)</sup> 그러나, 초음파를 이용할 경우 기판이 초음파의 영향을 받아 손상이 일어날 수 있다.<sup>36)</sup> 기존 TLP 접합에서 접합부 내의 단일 금속상(Sn, Cu 등)이 남아 있게 되면 기계적 물성이 저하되는 현상이 발견되기도 한다. 이 경우 문제를 해결하기 위해 접합부가 IMC로 형성되는 방법을 사용하는데 초음파를 이용할 경우 짧은 시간 안에 접합부를 고르게 IMC화 할 수 있다.

5.3. TGB (thermal gradient bonding)

Yang 등은 TGB (thermal gradient bonding) 방법을 제안하였다.<sup>37)</sup> TGB는 shirzadi와 Wallach가 1997년에 처음 발표한 기술로, 접합부의 상하 부분의 온도차이를 이용한 TLP 접합 기술로, 본 기술을 이용하여 접합할 경우 기존 TLP 접합 대비 접합 시간을 크게 단축시킬 수 있다.<sup>38)</sup>

접합 후 단면을 확인하게 되면 온도가 낮은 부분에서부터 온도가 높은 부분 쪽으로 Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> IMC가 기둥형태로 성장하였다. 접합부의 상하부분의 온도차이를 없애면 IMC는 상하 부분에서 비슷한 크기로 성장하게 된다.

마지막 특징은 IMC를 만드는데 소모되는 Cu는 고온부에서 확산되어 오는 것이기 때문에 저온부 Cu는 큰 변화가 없다는 것이다. 접합 후 확산으로 인해 고온부 Cu는 요철이 많이 생기지만, 저온부 Cu는 평활도를 유지할 수

있다(Fig. 5). 따라서, 고온부 Cu를 저온부 대비 두껍게 설계해야 한다.

6. 결 론

4차 산업혁명의 도래로 사물인터넷(IoT), 가상현실(VR), 인공지능(AI), 전기자동차(EV) 및 자율주행자동차 등 관련 제품들이 등장하면서 전력반도체의 수요가 증가하고 있다. 이러한 흐름속에서 제품의 효율적인 에너지 사용을 위해 전력반도체의 중요성이 증대되고 있으며, 전력반도체의 기능을 향상시키기 위해 기존 Si 반도체를 SiC 혹은 GaN으로 교체하는 움직임이 보여주고 있다. SiC 및 GaN을 사용한 전력반도체는 고전류 및 고전압을 견딜 수 있지만 고온이 발생하면서 접합부에 타격이 가해진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 접합 방법들이 연구 개발 중에 있다. 본 논문에서는 전력반도체에 적용되는 다양한 패키지 기술 중 천이액상확산접합의 원리, 다양한 종류와 그 특성에 대하여 소개하였다. 또한, 전기자동차와 같이 고성능을 요구하는 전력반도체에 맞추기 위해 금속 분말, 초음파와 같이 다른 기술들과 접목시켜 최근 새로 개발된 천이액상확산 기술들을 소개하였다. 최근 고효율 고신뢰성의 전력반도체 접합을 이루기 위해 다양한 시도를 진행하고 있으나, 열팽창 계수, 열전도도 등 다양한 요소들로 인한 신뢰성 문제 등을 개선할 여지도 남아 있기 때문에 본 기술에 대한 추가적인 연구와 심도 있는 논의가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

This work was supported by the Energy Efficiency & Resources Core Technology Program of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) and was granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (No. 201720-20109280).

References

1. W. Suh, H. S. Jung, Y. H. Lee, and S. H. Choa, "Heat dissipation technology of IGBT module package", J. Microelectron. Packag. Soc., 21(1), 7 (2014).
2. A. HassanFathabadi, "Novel battery/photovoltaic hybrid power source for plug-in hybrid electric vehicles", Solar. Energy., 159, 243 (2018).
3. Z. Liang, "Status and trend of automotive power packaging", Proc. 24th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Bruges, 325, IEEE Power Electronics Society (PELS) (2012).
4. R. John, O. Vermesan, and R. Bayerer, "High temperature power electronics IGBT modules for electrical and hybrid vehicles", Proc. International Conference on High Tempera

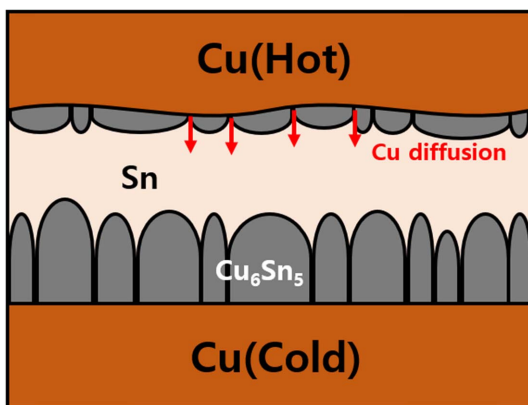


Fig. 5. Schematic drawing showing the mechanism for the TGB process.

- ture Electronics (HiTEC), Oxford, 199, International Microelectronics Assembly and Packaging Society (iMAPS) (2009).
5. H. S. Chin, K. Y. Cheong and A. B. Ismail, "A review on die attach materials for SiC-based high-temperature power devices", *Met. Mater. Trans. B*, 41, 824 (2010).
  6. 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", *J. Jap. Inst. Electron. Packga.*, 11, 141 (2008).
  7. 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, 15 (2018).
  8. B. S. Lee and J. W. Yoon, "Die-attach for power devices using the Ag sintering process: Interfacial microstructure and mechanical strength", *Met. Mater. Int.*, 23, 958 (2017).
  9. S. C. Fu, M. Zhao, H. Shan, and W. Li, "Fabrication of large-area interconnects by sintering of micron Ag paste", *Mater. Lett.*, 226, 26 (2018).
  10. T. Fan, H. Zhang, P. Shang, C. Li, C. Chen, J. Wang, Z. Liu, H. Zhang, and K. Sukanuma, "Effect of electroplated Au layer on bonding performance of Ag pastes", *J. Alloys. Compd.*, 731, 1280 (2018).
  11. H. Shao, A. Wu, Y. Bao, Y. Zhao, G. Zou, and L. Liu, "Microstructure evolution and mechanical properties of Cu/Sn/Ag TLP-bonded joint during thermal aging", *Mater. Charact.*, 144, 469 (2018).
  12. J. W. Yoon and B. S. Lee, "Sequential interfacial reactions of Au/In/Au transient liquid phase-bonded joints for power electronics applications", *Thin. Solid. Films.*, 660, 618 (2018).
  13. G. O. Cook III and C. D. Sorensen, "Overview of transient liquid phase and partial transient liquid phase bonding", *J. Mater. Sci.*, 46, 5305 (2011).
  14. J. F. Lynch, L. Feinstein, and R. A. Huggins, "Brazing by the Diffusion Controlled Formation of a Liquid Intermediate Phase", *Weld. J.*, 38, 85 (1959).
  15. T. C. Illingworth, I. O. Golosnoy, V. Gergely, and T. W. Clyne, "Numerical modelling of transient liquid phase bonding and other diffusion controlled phase changes", *J. Mat. Sci.*, 40, 2505 (2005).
  16. M. S. Park, S. L. Gibbons, and R. Arroyave, "Phase-field simulations of intermetallic compound growth in Cu/Sn/Cu sandwich structure under transient liquid phase bonding conditions", *Acta Mater.*, 60, 6278, (2012).
  17. 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. Kor. Inst. Met. Mater.*, 33, 1302 (1995).
  18. J. P. Jung, C. D. Lee, and C. S. Kang, "A study on the melting induced diffusion bonding of 304 stainless steel", *J. Kor. Inst. Met. Mater.*, 31, 323 (1993).
  19. A. S. Khaja, C. Kaestle, A. Reinhardt, and J. Franke, "Optimized thin-film diffusion soldering for power-electronics production", *Proc. 36<sup>th</sup> International Spring Seminar on Electronics Technology*, Alba Iulia, Romania, 11 (2013).
  20. 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).
  21. N. Y. A. Shammas, "Present problems of power module packaging technology", *Microelectron. Reliab.*, 43, 519 (2003).
  22. 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. 64<sup>th</sup> Electronic Components & Technology Conference (ECTC)*, Orlando, 1321, IEEE (2014).
  23. C. Honrao, T. C. Huang, M. Kobayashi, N. Smet, P. M. Raj, and R. Tummala, "Accelerated SLID bonding using thin multi-layer copper-solder stack for fine-pitch interconnections", *Proc. 64<sup>th</sup> Electronic Components & Technology Conference (ECTC)*, Orlando, 1160, IEEE (2014).
  24. 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", *J. Mater. Sci.*, 52, 1943 (2017).
  25. H. Y. Zhao, J. H. Liu, Z. L. Lim Y. X. Zhao, H. W. Niu, X. G. Song, and H. J. Dong, "Non-interfacial growth of Cu<sub>3</sub>Sn in Cu/Sn/Cu joints during ultrasonic-assisted transient liquid phase soldering process", *Mater. Lett.*, 186, 283 (2017).
  26. 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.*, 180, 383 (2016).
  27. H. Greve, L.Y. Chen, I. Fox, and F.P. McCluskey, "Transient liquid phase sintered attach for power electronics", *Proc. 63<sup>rd</sup> Electronic Components & Technology Conference*, Las Vegas, 435, IEEE (2013).
  28. 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. Trans. Power. Electron.*, 28, 2448 (2013).
  29. H. Ji, M. Li, S. Ma, and M. Li, "Ni<sub>3</sub>Sn<sub>4</sub>-composed die bonded interface rapidly formed by ultrasonic-assisted soldering of Sn/Ni solder paste for high-temperature power device packaging", *Mater. Des.*, 108, 590 (2016).
  30. N. S. Nobeen, T. Imade, B. H. Lee, E. J. R. Phua, C. C. Wong, and C. L. Gan, "Transient liquid phase (TLP) bonding using Sn/Ag multilayers for high temperature applications", *Proc. 15<sup>th</sup> Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, Singapore, 647, IEEE (2013).
  31. A. A. Bajwa and J. Wilde, "Reliability modeling of Sn-Ag transient liquid phase die-bonds for high-power SiC devices", *Microelectron. Reliab.*, 60, 116 (2016).
  32. T. A. Tollefsen, A. Larsson, O. M Løvrvik, and K. Aasmundtveti, "Au-Sn SLID bonding-properties and possibilities", *Metallurgical and Materials Transactions B*, 43B, 397 (2012).
  33. H. Shao, A. Wu, Y. Bao, Y. Zhao, and G. Zou, "Interfacial reaction and mechanical properties for Cu/Sn/Ag system low temperature transient liquid phase bonding", *Mater. Electron.*, 27, 4839 (2016).
  34. O. Mokhtari and H. Nishikawa, "The shear strength of transient liquid phase bonded Sn-Bi solder joint with added Cu particles", *Adv. Powder. Technol.*, 27, 1000 (2016).
  35. X. Lu, S. He, and H. Nishikawa, "Thermally stable Cu<sub>3</sub>Sn/Cu composite joint for high-temperature power device", *Scr. Mater.*, 110, 101 (2016).
  36. H. Ji, Y. Qiao, and M. Li, "Rapid formation of intermetallic joints through ultrasonic-assisted die bonding with Sn-0.7Cu solder for high temperature packaging application", *Scripta. Materialia.*, 110, 19 (2016).
  37. T. L. Yang, T. Aoki, K. Matsumoto, K. Toriyama, A. Horibe, H. Mori, Y. Orii, J. Y. Wu, and C. R. Kao, "Full intermetallic

joints for chip stacking by using thermal gradient bonding”, Acta. Materialia., 113, 90 (2016).

38. A. A. Shirzadi and E. R. Wallach, “Temperature gradient transient liquid phase diffusion bonding: a new method for joining advanced materials”, Science and Technology of Welding and Joining, 2, 89 (1997)
39. D. H. Jung, M. H. Roh, J. H. Lee, K. H. Kim, and J. P. Jung, “Transient Liquid Phase (TLP) Bonding of Device for High Temperature Operation”, J. Microelectron. Packag. Soc., 24(1), 17 (2017).



- 이정현
  - 서울시립대학교 신소재공학과
  - TLP접합, 전자패키징, 전해도금
  - E-mail: uos\_jh31@naver.com
- 



- 정도현
  - 경북테크노파크 경량소재융복합기술센터
  - 브레이징, 솔더링
  - E-mail: jdh1016@gbtp.or.kr
- 



- 정재필
  - 서울시립대학교 신소재공학과
  - 전자패키징, 접합
  - E-mail: jpjung@uos.ac.kr
-