

특집 : 파워모듈의 접합기술과 최근동향

파워모듈의 TLP 접합 및 와이어 본딩

강혜준 · 정재필[†]

서울시립대학교 신소재공학과

TLP and Wire Bonding for Power Module

Hyejun Kang and Jaepil Jung[†]

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

(Received December 9, 2019; Corrected December 24, 2019; Accepted December 27, 2019)

Abstract: Power module is getting attention from electronic industries such as solar cell, battery and electric vehicles. Transient liquid phase (TLP) bonding, sintering with Ag and Cu powders and wire bonding are applied to power module packaging. Sintering is a popular process but it has some disadvantages such as high cost, complex procedures and long bonding time. Meanwhile, TLP bonding has lower bonding temperature, cost effectiveness and less porosity. However, it also needs to improve ductility of the intermetallic compounds (IMCs) at the joint. Wire bonding is also an important interconnection process between semiconductor chip and metal lead for direct bonded copper (DBC). In this study, TLP bonding using Sn-based solders and wire bonding process for power electronics packaging are described.

Keywords: power module, TLP bonding, wire bonding, electronics packaging

1. 서 론

파워모듈이란 전자기기에 필수적인 부품으로 전력이 공급되면 변환하고 안정성과 효율성을 확보하는 등 다양한 역할을 한다. 파워모듈은 모두 탑재 기기의 인버터 혹은 컨버터 회로에 사용되지만 회로의 구성에 따라 그 종류가 다양하며 모듈의 사양도 각기 다르다.¹⁾ 파워모듈의 종류에는 전력 변환에 사용되는 파워 반도체의 Insulated Gate Bipolar Transistor(IGBT)와 다이오드를 여러 개 실장하여 전용 케이스에 넣은 IGBT 모듈 그리고 이 IGBT 모듈에 과전류나 과열 등의 보호 회로를 내장한 Intelligent Power Module(IPM), 금속산화막실리콘 전계효과 트랜지스터 Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)을 실장해 넣은 MOSFET 모듈이 있다. 여기에서 모듈은 여러 개의 전력 부품들, 통상 전력 반도체 다이오드 등을 물리적으로 보호하는 역할을 한다. 이러한 전력 반도체는 일반적으로 실장하는 기판에 솔더링 또는 소결되어 필요시에 전기적 및 열적 접촉과 전기적 절연을 제공하는 역할이다. 파워모듈은 단일 전력 전자 스위치(MOSFET, IGBT, BJT, Thyristor, GTO, JFET) 혹은 다이오드를 포함한다. 이외에도 전통적으로 파워모듈은

topology라고 불리는 특정 구조의 전기적 회로를 형성하도록 연결해주는 다수의 반도체 die를 포함하고 있다.²⁾

최근 전기자동차나 하이브리드 자동차와 같은 친환경에 적합한 고신뢰성, 고효율의 파워디바이스의 개발이 주목 받으면서 신뢰성이 높은 파워모듈에 대한 관심도 높아지고 있다. 파워모듈의 신뢰성 향상은 곧 반도체 칩의 본딩 와이어 및 다이 어테치용 솔더 접합부의 신뢰성 향상과 직결된다. 파워모듈을 위한 접합법으로는 Ag, Cu 분말을 사용한 sintering,³⁾ Sn계를 중심으로 한 TLP 접합^{4,5)} 등이 있으며 와이어 본딩에는 Al 와이어, Al-0.5%Cu 와이어, Al-0.005% Ni 와이어 등 다양한 알루미늄 와이어들과 Al ribbon, Cu-Al clad ribbon, Cu 와이어들이 사용되고 있다. 본고에서는 파워디바이스를 위한 파워모듈의 접합법으로써 Sn계를 중심으로 한 TLP 접합 및 와이어 본딩에 관하여 소개하고자 한다.

2. TLP Bonding

금속을 접합하는 방법에는 모재를 용융시켜 접합하는 용융용접법과 모재를 용융시키지 않고 접합하는 고상접합법이 있다. 그리고 이들의 중간 특성을 가지는 즉, 모

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

© 2019, 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.

재는 용융되지 않지만 접합재(filler metal)의 용융으로 접합되는 브레이징과 솔더링이 있다. 용융용접법에는 잘 알려진 아크 용접이나 가스 불꽃 용접, 레이저 용접, 전자빔 용접 등이 있다. 고상접합법에는 확산접합, 초음파 접합, 마찰 접합 등이 대표적인데 특히 고상접합법 중에서 확산접합법은 가장 기본적인 접합법이다.

확산접합법이란 고온의 접합 온도에서 피접합체에 압력을 가하여 접합면을 밀착시킴으로써 피접합되는 양측면 원자 간 상호 확산을 유발하여 접합하는 방법이다. 확산접합법은 접합부가 용융된 후에 응고된 층이 존재하지 않고 고상 상태에서 접합되기 때문에, 접합부는 모재와 물리적, 화학적 특성이 동일하게 되므로 신뢰성이 우수하다. 또한, 확산접합법은 용융용접이 어려운 합금이나 이종금속의 접합에도 쉽게 적용할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 접합 중 고온에서 피접합체에 가해지는 압력에 의해 피접합체가 변형될 우려가 있고, 접합계면의 기공과 같은 결함을 줄이기 위하여 평탄한 접합 표면이 필요하며 접합시간이 길다는 단점도 존재한다.

이러한 고상확산접합의 단점을 개선하기 위하여 고안된 방법이 액상확산접합법(Transient Liquid Phase bonding, TLP 접합법)이다. TLP 접합법은 브레이징과 고상확산접합법의 장점만을 조합한 접합법으로서 확산 브레이징(diffusion brazing)으로도 불린다. 접합온도에서 접합재를 용융시키고 모재는 용융되지 않는(오직 일부 계면부만이 용융) 점에서 브레이징과 유사하고 확산에 의해 응고 접합하는 방식에서 고상확산접합법과 유사하다. TLP 접합법은 1970년대 초에 Hoppin III⁶⁾ 과 Duvall⁷⁾ 등에 의해 연구, 제안되었다. 아래 그림은 고상확산접합과 브레이징, TLP 접합 과정을 비교한 것이다. 고상확산접합법은 “모재접합준비→가압→소성변형에 의한 기공평탄화→기포수축→기포소멸 및 접합 완료”의 과정으로 진행된다. 브레이징은 “모재접합준비→가열 및 접합재 용융→냉각에 의한 응고 및 접합 완료”의 과정으로 진행되며, TLP 접

합법은 “모재접합준비→가열 및 접합재 용융→등온응고→성분균일화 처리 및 접합 완료”의 과정으로 진행된다.

TLP 접합법은 원리적으로 접합재 내에 포함된 용점저하 원소가 피접합재 내부로 확산되면서 접합재 내의 용점저하 원소의 농도가 감소함으로 인해 등온에서 응고하게 되는 독특한 응고 특성을 가진다. 또한 동일한 온도에서 액체가 고체로 바뀌는 등온응고 특성을 가지기 때문에 응고 후에 접합온도로 가열하여도 접합부가 다시 용융되지 않으므로 고온 강도와 신뢰성이 매우 높다. 전통적인 TLP 접합법과는 다르게 피접합재보다 오히려 용점이 높고 확산속도가 빠른 순수 C, B 등의 접합재를 사용하여 단시간에 TLP 접합을 이루는 방법은 저자 등이 제안한 바 있다.⁸⁻¹⁴⁾

그러나 전자산업에서 주로 사용되는 Sn계 합금 혹은 솔더를 기반으로 한 TLP 접합법은 원래의 TLP 방법에 비해 약간 다르다. 예를 들어 Sn-Cu, Sn-Ni 혹은 Sn-Ag를 접합재의 기반으로 하고 경우에 따라 여기에 Cu 등 다른 금속 분말을 첨가하여 접합재로 사용한다. 전자산업에서의 Sn을 기반으로 한 TLP 접합법은 용점저하 원소가 모재 쪽으로 확산하면서 발생하는 농도 감소에 따른 등온 응고 개념은 거의 적용되지 않는다. 접합재 내의 Sn과 Cu, Ni, Ag 등이 상호 반응하여 금속간화합물이 접합부 전체에 걸쳐서 형성되면서 Sn계 솔더에 비하여 용점이 더 높은 금속간화합물로 인하여 고온 강도가 높아지는 특성을 가지기 때문이다.

저자 등은 Multi Walled Carbon Nano Tube(MWCNT)를 포함한 Cu-Sn 합금을 사용하여 Cu 판상 시편의 TLP 접합을 실시하였다.¹⁵⁾ 260°C에서 8분간 접합한 결과, 접합부는 Cu₃Sn IMC로 완전히 변화되었다. 이 접합법의 특징은 제2상인 MWCNT로 접합부를 강화하였으며, Cu₆Sn₅의 강도를 향상시킨다는 것이다. Cu/MWCNT+Cu₃Sn/Cu 접합부는 저온에서 접합하지만 Cu₃Sn IMC의 용점에 가까운 고온에서 작동이 가능하며 flake상의

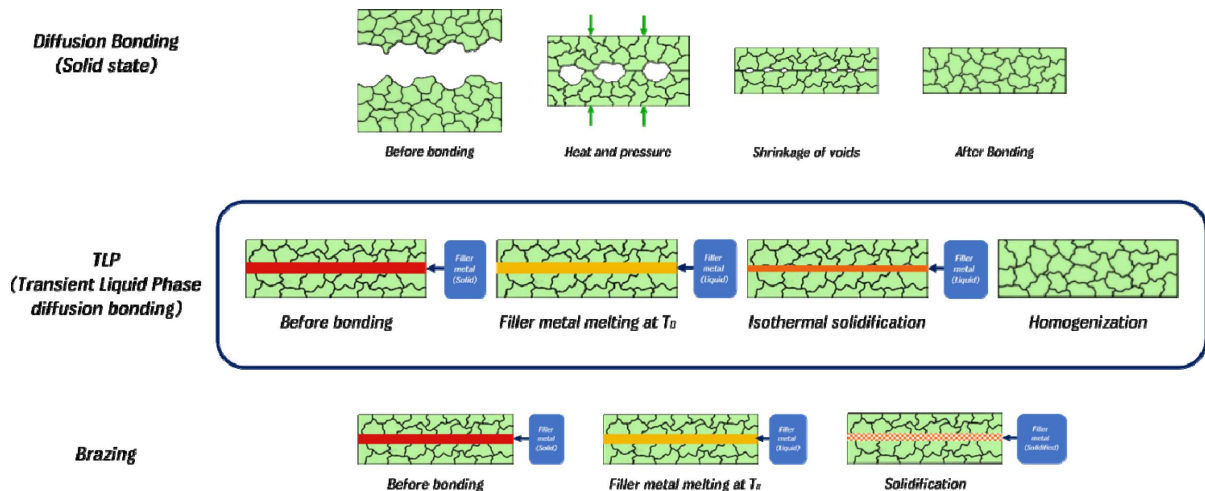


Fig. 1. Schematics of Diffusion Bonding, TLP and Braze processes.

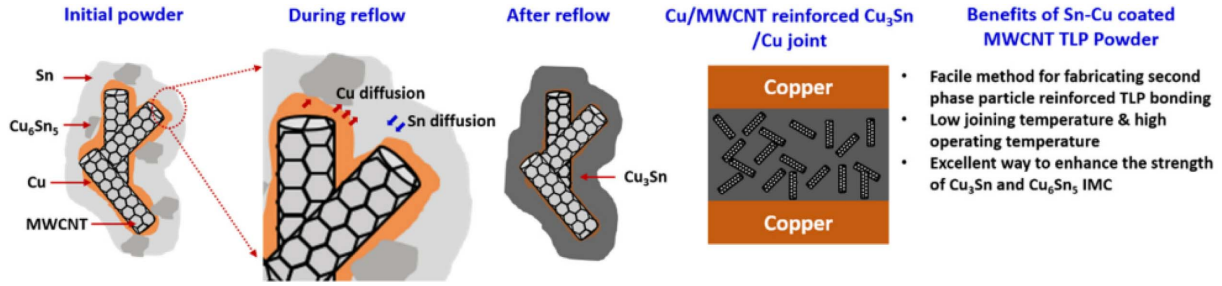


Fig. 2. Schematic illustration of TLP bonding using Sn-Cu coated MWCNT.¹⁵⁾

MWCNT와 Cu₃Sn 복합재는 접합부 기공의 함량이 적다. 또한 MWCNT에 의해 열전도도가 향상된다. Cu/MWCNT +Cu₃Sn/Cu 접합부의 전단강도는 약 35 MPa로 측정되었다.

Fig. 3은 다양한 TLP 접합법에 의해 접합된 Cu/Cu 혹은 세라믹/금속 등의 접합 시편에 대해 전단 접합 강도를 조사한 것이다.¹⁶⁾ 각 시편의 접합 온도, 접합 시간, 접합 강도 등을 명시하였다. 그림에서 보듯이 접합 강도가 우수한 결과는 Si/Sn/Si 시편(Ref30)으로 강도는 14.4 MPa에 달하지만 접합 온도가 350°C로 높고, 접합 시간은 60분으로 길다는 단점을 가지고 있다. 반면에 Cu/Sn/Cu 시편(Ref26)은 접합온도 280°C에서, 접합 시간은 8초로 매우 짧지만 접합 강도는 0.5 MPa로 매우 낮은 단점을 가지고 있다. 저자 등이 연구한 Cu/MWCNT+Cu₃Sn/Cu 접합 시편은 접합 온도 260°C, 접합 시간 8분, 전단 접합 강도는 35 MPa로 접합 시간 및 강도 측면에서 균형을 이루었다.

Fig. 4는 저자 등이 Sn계 솔더를 사용하여 파워모듈을 TLP접합법으로 제조한 예시이다.¹⁷⁾ 이 연구는 SiC chip

을 AlN 기판 위의 DBC에 접합한 것으로, 접합용 솔더 소재로는 도금된 Sn-Cu, Sn-Ni, Sn-Ag를 채택하였다. 접합은 250°C에서 진행되었으며 접합 후 특성 시험 결과, 모든 접합부가 450°C 이상에서도 내열성을 가지는 것을 확인하였다. 접합부의 보이드 분율은 Cu 함량과 접합 시간에 따라 감소하는 경향을 보였고 접합 시간에 따라 접합 강도가 증가하였으나 에이징 및 열 사이클 시험 후에는 강도가 감소하였다.

다이 어태치 본딩에는 SnSb 솔더, SnSb-X 솔더(Ag 등을 첨가), TLP 솔더, Ag 신터링, Cu 신터링 등을 이용할 수 있다. 이중 SnSb 솔더는 주로 고용강화를 이용한 것이고, SnAg 솔더는 Ag₃Sn IMC의 석출강화를 이용하며, SnSb-X솔더 등은 고용 및 석출강화를 복합적으로 이용한다.¹⁸⁾ 일반적인 SnAg 솔더는 열 사이클을 -40°C~125°C 범위에서 -40°C~150°C로 변경하면 균열진전 속도가 가속화되어 수명이 현저히 감소한다. 그러나 SnSb-X 솔더와 같은 복합강화 솔더는 -40°C~150°C의 열 사이클 시험에서도 상대적으로 고온강도와 고온안정성이 개선되기도 한다.

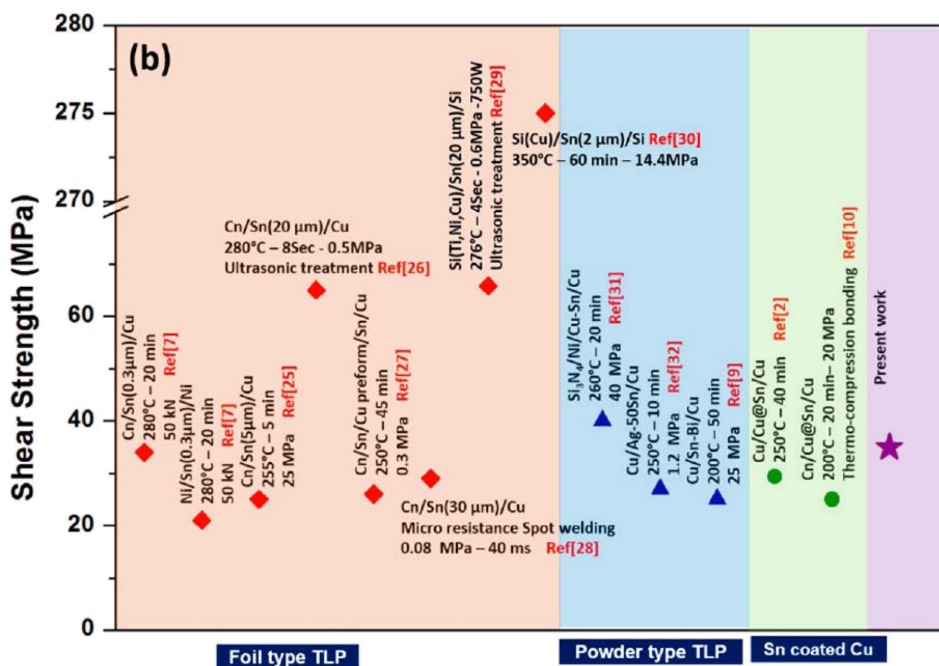


Fig. 3. Comparison of shear strength with different TLP conditions.¹⁵⁾

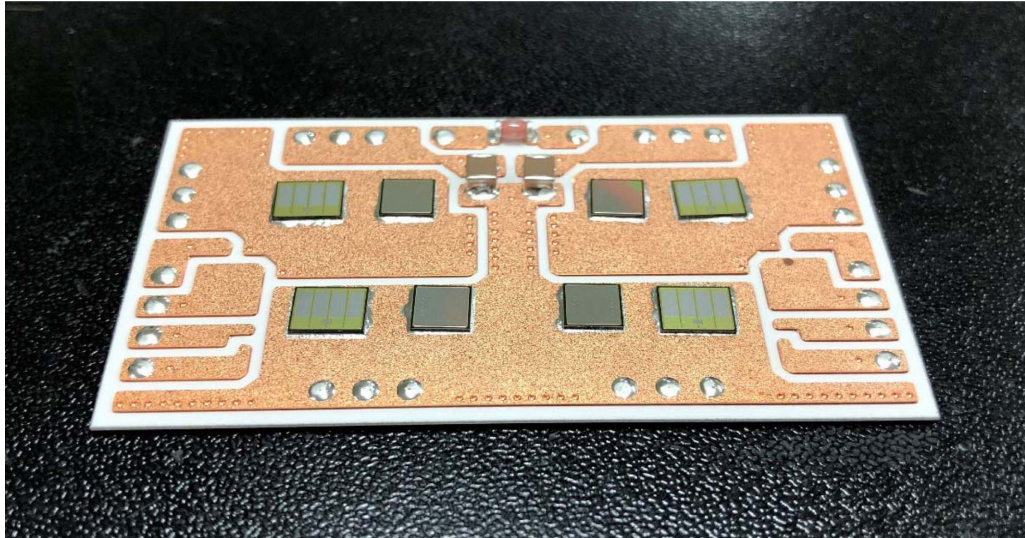


Fig. 4. Example of power module fabricated using Sn-based TLP bonding by authors.¹⁷⁾

3. Wire Bonding

와이어 본딩(wire bonding)이란 반도체 칩 위의 알루미늄 전극과 금속 단자인 리드를 접합하는 공정으로 반도체 칩과 리드의 전기적 접속을 위해 사용한다. 파워모듈을 위한 와이어 본딩은 주로 알루미늄 와이어, 알루미늄 리본, 동 와이어, 알루미늄-동 와이어가 사용된다. 와이어 본딩의 방법은 카필러리(Capillary, 미세관)를 사용할 경우, 볼 본딩(Ball bonding, 1st bonding)과 크레센트 본딩(2nd bonding)으로 나뉜다. 알루미늄 등 볼 본딩이 어려운 와이어는 웨지(Wedge)를 본딩 툴로 사용하는 웨지 본딩으로 접합한다.

와이어 본딩 접합은 카필러리를 통해 공급되는 본딩 와이어 끝을 전극과 와이어 끝 사이에 아크를 이용해 녹여 볼을 만든 후 초음파를 통해 칩의 알루미늄 전극에 압착하는 과정으로 진행된다. 이것이 볼 본딩이다. 알루미늄 전극에 압착하여 볼 본딩한 후에 카필러리는 금속 단자인 리드 위로 이동한다. 이동하면서 카필러리를 통해 와이어가 적당한 길이로 공급되며 금속 단자인 리드 위에서 접합은 아크 없이 카필러리의 끝부분을 이용해 초음

파로 와이어와 리드를 압접한다. 이것이 크레센트 본딩이다. 접합이 완료되면 와이어는 클럼퍼로 고정 후 당겨서 절단한다.¹⁹⁾ Fig. 5는 와이어의 접합 공정을, 그림6은 와이어 접합 장치와 카필러리 및 와이어 본딩의 예시를 나타낸 것이다.

Fig. 7은 와이어 본딩의 접합 기구에 관하여 저자 등이 보고한 것을 보인 것이다.²⁰⁾ 해당 연구에 따르면 와이어 본딩 시 초음파 출력을 증가시키면 출력이 낮은 경우에는 칩 위의 전극 패드에 압착된 볼 부분에 미세 슬립(micro slip)이 일어난다. 이 때, 볼 부분 원주부에 발생하는 미세 슬립의 크기는 Mindlin에 의해 아래 식과 같이 계산되었다.²⁰⁾ 초음파 출력이 높아지면 미세 슬립은 전반적으로 전영역 슬라이딩(Gross sliding)으로 변화한다. 이 과정에서 발열 및 압착에 의하여 볼 본딩이 완성되는 것이다.

웨지 본딩(Wedge bonding)이란 보통 알루미늄 와이어를 웨지라는 틀을 이용해 칩 위의 전극 및 리드에 초음파를 가하여 압착하는 접합 방법이다. 초음파를 이용하므로 상온에서 접합 계면에 소성변형을 일으켜 알루미늄의 산화막을 파괴시키는 구조이다. 와이어는 주로 직경 약

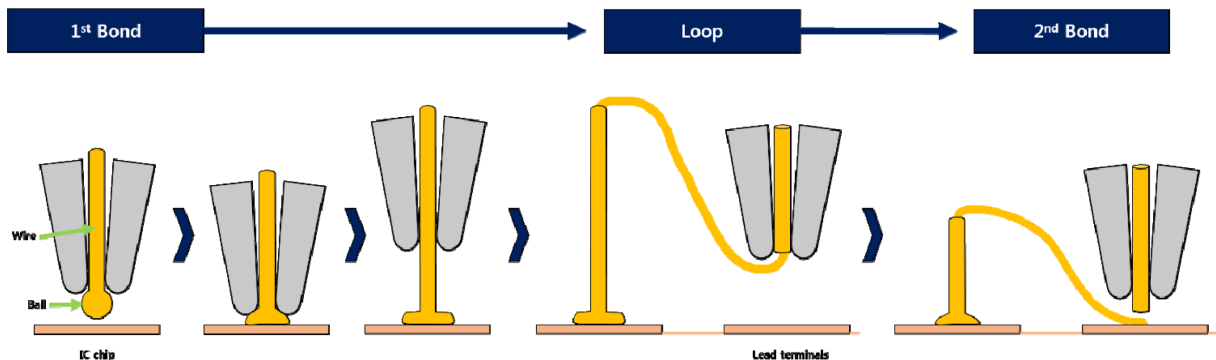


Fig. 5. Schematic of wire bonding process.

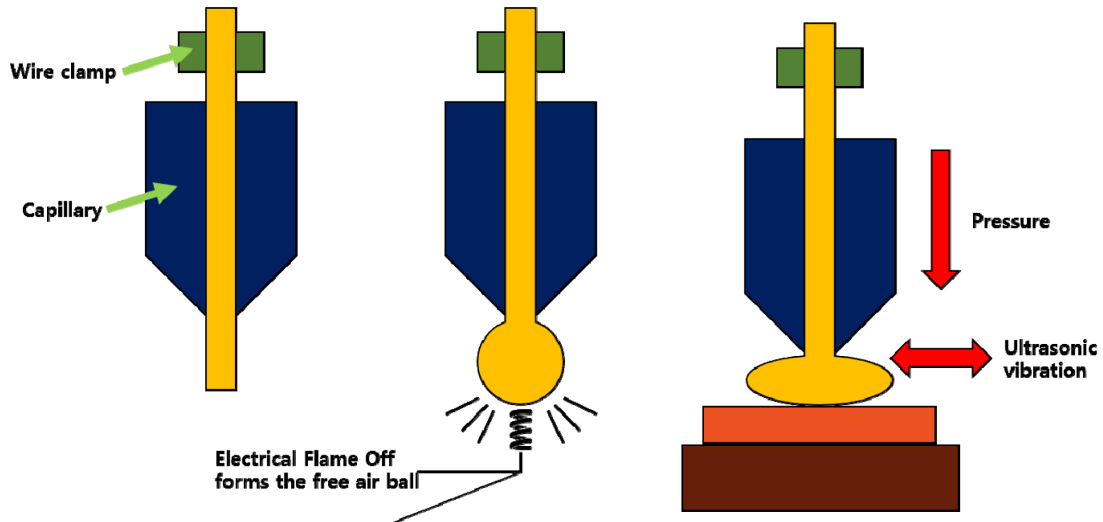
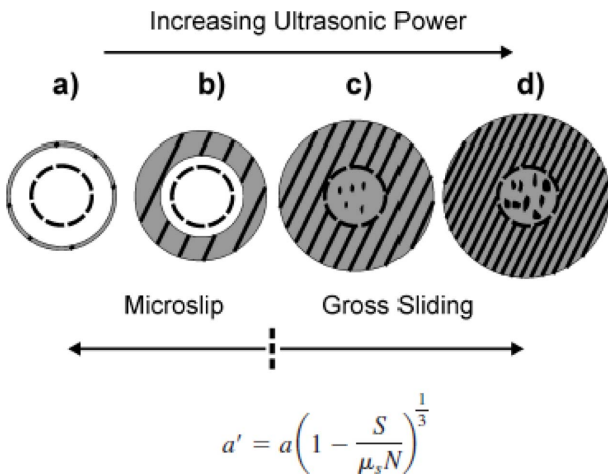


Fig. 6. Schematic of ball bonding in a wire bonding process.



단, N: normal force, S: tangential force, μ_s : coefficient of static friction, a' : annulus inner radius, a: contact radius.

Fig. 7. Illustration of bonding mechanism in ball bonding.¹⁹⁾

25~50 μm 의 Al-1%Si를 사용하며 알루미늄 와이어의 강도가 낮기 때문에 이를 보완하기 위해 금 와이어를 사용하기도 한다. 예를 들어, 직경 10 μm 의 극세 금 합금을 사용하여 40 μm 의 미세 피치 웨지 본딩 실험이 진행되기도 하였다.²¹⁾

웨지 본딩은 다음과 같은 순서 진행된다. 먼저, “웨지”라는 툴로 웨지 끝단 위의 알루미늄 와이어를 반도체 칩의 알루미늄 전극 위에 두고 초음파를 가하여 압착한다. 다음 와이어를 리드 쪽으로 당겨 웨지 끝 부분으로 와이어를 리드에 초음파를 가하며 압착한다. 마지막으로 클램퍼로 와이어를 끼운 상태로 당기면서 와이어를 절단한다. 이때 발생하는 와이어의 변형이 산화 피막의 파괴나 접합 면적, 접합부의 강도에 큰 영향을 미친다. 웨지 본딩법의 장점은 주로 알루미늄 와이어를 사용하기 때문에 반도체 칩의 알루미늄 전극과 동종 금속 간의 접합이라는 것이다. 접합 계면에 금속간 화합물이 형성될 우려가

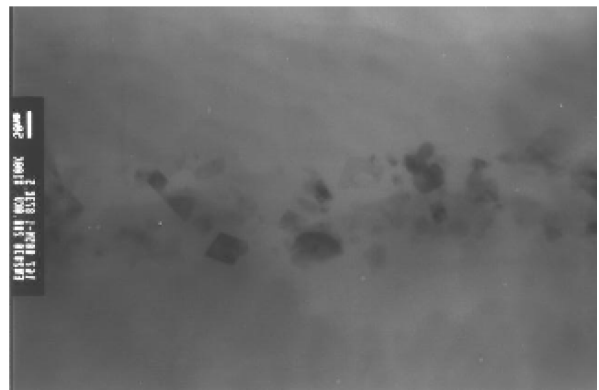


Fig. 8. Oxide dispersed along bonding interface in Al-5Mg alloy diffusion bonding.²³⁾

없으며 오픈 현상도 없다. 또 접합부의 크기가 볼 본딩법과 비교하여 작기 때문에 미세 피치 달성이 상대적으로 쉽다. 그러나 와이어 당 접합 속도가 약 0.25초로 볼 본딩법보다 느리기 때문에 양산성 측면에서는 다소 뒤쳐진다.

한편, I. Lum 등은 알루미늄 와이어의 웨지 본딩에 대하여도 상기 볼 본딩과 유사하게 접합 과정을 제시하였다.²¹⁾ 볼 본딩과 마찬가지로 웨지 본딩에서도 초음파 출력력을 증가시키면 출력이 낮은 경우에는 칩 위의 전극 패드에 압착된 볼 부분에 미세슬립(micro slip)이 일어난다. 초음파 출력이 높아지는 경우에도 역시 미세슬립이 전반적으로 전영역 슬라이딩(Gross sliding)으로 변화하고 이 과정에서 발열 및 압착에 의해 웨지 본딩이 이뤄진다.

접합과정에서 알루미늄 표면의 산화막은 초음파에 의한 좌우 micro slip 및 gross sliding 과정에서 파괴되어 접합 계면에 개재물로 남겨거나, 모재 내로 확산되어 소멸된다. 알루미늄은 산소에 대한 고용도가 거의 없기 때문에 계면에서 산화물은 파괴된 상태로 존재하게 된다. 아래 그림8은 Al-5%Mg 접합면에 산화막이 입자상으로 파괴된 상태로 존재하는 것을 저자 등이 보고한 예이다.²²⁾

IGBT 모듈을 위한 와이어 본딩에는 Al wire, Al-0.5%Cu,

Al-0.005%Ni 등 다양한 알루미늄 와이어들이 사용된다. 알루미늄 와이어에 구리를 첨가하면 고온에서의 creep 특성을 개선시킬 수 있다고 알려져 있다. Kurosu 등은 IGBT 칩의 알루미늄 본딩 와이어에 구리를 합금하는 실험을 통해 알루미늄 와이어 기지 금속에 Al₂Cu 석출물(θ phase)이 생성되어 알루미늄 와이어를 석출강화 시키는 것이 그 이유임을 밝힌 바 있다.²³⁾ 이들은 열처리 및 에이징에 의해 매우 미세한 Al₂Cu phase들이 Al 기지금속 및 입계에 석출되어 Al-0.5%Cu 와이어의 신뢰성이 Al 와이어에 비해 훨씬 더 개선된다고 설명하였다. 비슷한 관점에서 알루미늄 와이어에 니켈을 첨가하면 Al₃Ni 석출물을 Al와이어 기지금속에 석출시킴으로써 알루미늄 와이어에 고온 강도를 개선시킬 수 있다.²⁴⁾

4. 결 론

지금까지 파워모듈 제조에 필요한 TLP 접합법 및 와이어 본딩법에 대하여 서술하였다. Sn계 솔더를 이용한 TLP 접합법은 저온 접합하면서 저가 공정이라는 장점이 있지만 접합 후 취성을 유발하는 금속 간 화합물이 생성된다는 단점도 존재했다.²⁵⁾ 이러한 단점을 개선하기 위하여 다양한 연구들이 진행되고 있으며 특히 접합부에 대한 단순 접합 강도 평가 외에 다양한 시효 강도 특성, 휨(warpage) 등 변형이나 전기적, 열적 특성과 같이 다양한 분야에 심도 있는 연구들이 행해지고 시제품의 제조도 이루어지고 있다. 또한 와이어 본딩 기술은 이 기술의 유연성과 가격경쟁력, 그리고 기존 인프라의 큰 장점 때문에 새로운 패키징 기술들이 반도체의 소형화 요구조건을 만족함에도 불구하고 여전히 패키징 분야에서 각광받고 있다.²⁶⁾ 차세대 디바이스를 위한 고신뢰성을 가진 파워 모듈 제조를 위하여 본고에서 소개한 접합법 및 신뢰성에 대한 다양하고 심도 있는 연구 진행이 계속될 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지효율 및 자원 핵심 기술 프로그램의 지원을 받아 산업통상자원부로부터 지원을 받아 진행되었습니다(제2020109280호).

References

1. Motioncontrol, Motion Control Co., "Global Market Trends for Automation and Industrial Power Modules", Jun. (2015), from <http://www.motioncontrol.co.kr/default/news/?nwsid=n3&uid=9370>
2. Wikipedia, Wikipedia Foundation. Lnc., from <http://en.wikipedia.org/wiki/Powermodule>
3. M. 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).
4. S. H. Rajendran, D. H. Jung, W. S. Cheon, and J. P. Jung, "Transient Liquid Phase Bonding of Copper using Sn Coated Cu MWCNT Composite Powders for Power Electronics", Appl. Sci., 9(3), 529 (2019).
5. M. H. Roh, H. Nishikawa, J. P. Jung, and W. J. Kim, "Transient Liquid Phase Bonding for Power Module Packaging", J. Microelectron. Packag. Soc., 24(1), 27 (2017).
6. G. S. Hoppin III and T. F. Berry, "Activated Diffusion Bonding", Weld. J., 49(11), 505 (1970).
7. D. S. Duvall, W. A. Owczarski, and D. F. Paulonis, "Transient Liquid Phase Bonding: A New Method for Joining Heat Resistant Alloys", Weld. J., 53(4), 203 (1974).
8. J. P. Jung and C. S. Kang, "Transient Liquid Phase Process in Ni-B Joining", Mater. Trans., JIM, 38(10), 886 (1997).
9. J. P. Jung and C. S. Kang, "Liquid Phase Diffusion Bonding of Rene80 Using Pure Boron", Mater. Trans., JIM, 37(5), 1008 (1996).
10. J. P. Jung, C. D. Lee, and C. S. Kang, "A study on the melting induced bonding of 304 stainless steel", J. of Kor. Inst. of Met. & Mater., 31(3), 323 (1993).
11. J. P. Jung and C. S. Kang, "Liquid metal formation of Ni/B/Ni diffusion bonded joint", J. of Kor. Inst. of Met. & Mater., 33(10), 1302 (1995).
12. J. P. Jung and C. S. Kang, "A study on the width of liquid layer of Ni/B/Ni diffusion bonding system", J. of Kor. Weld. Soc., 13(4), 402 (1995).
13. J. P. Jung, and C. S. Kang, "Mechanical Property of Liquid Phase Diffusion Bonded Joint of Rene80 / B / Rene80", J. of Kor. Weld. Soc., 13(3), 125 (1995).
14. J. P. Jung and C. S. Kang, "Liquid phase diffusion bonding procedure of Rene80/B/Rene80 system", J. of Kor. Weld. Soc., 13(2), 172 (1995).
15. S. H. Rajendran, D. H. Jung, W. S. Jeon, and J. P. Jung, "Transient Liquid Phase Bonding of Copper Using Sn Coated Cu MWCNT Composite Powders of Power Electronics", Appl. Sci., 9(3), 529 (2019).
16. H. J. Kang, J. H. Lee, J. H. Lee, D. K. Chang, and J. P. Jung, "Fabrication of SiC Power Module Using Electroplated Sn-X-TLP Solders", Proc. Annual meeting of KWJS, Daegu, Korea, 125 (2019).
17. Y. Tamai, A. Morozumi, T. Saito, F. Momose, Y. Nishimura, E. Mochizuki, and Y. Takahashi, "High thermal cycling reliability of automotive IGBT module with high strength solder alloy", Proc. MES 2015, Osaka, Japan, 123, JIEP (2015).
18. C. S. Kang and J. P. Jung, "Micro-Joining (in Kor.)", Samsung Books, Seoul, Korea, 307 (2002).
19. I. Lum, J. P. Jung, and Y. Zhou, "Bonding Mechanism in Ultrasonic Gold Ball Bonds on Copper Substrate", Metall. Mater. Trans. A., 36(5), 1279 (2005).
20. R. D. Mindlin, "Compliance of Elastic Bodies in Contact", Trans. ASME, J. Appl. Mech., 16, 259 (1949).
21. I. Lum, M. Mayer, and Y. Zhou, "Footprint Study of Ultrasonic Wedge Bonding with Aluminum Wire on Copper Substrate", J. Electron. Mater., 35(3), 433 (2006).
22. K. Kotani, J. P. Jung, K. Ikeuchi, and F. Matsuda, "Effects of Oxide Morphology on Bond Strength of Diffusion Bonded Interfaces of Al-Alloys", Trans. JWRL, 28(2), 27 (2000).
23. K. Ozaki, T. Kurosu, and J. Onuki, "Development of Damage

Free Thick Al-Cu Wire Bonding Process and Reliability of the Wire Bonds”, *Electrochem.*, 82(2), 100 (2014).

24. T. Kurosu, K. Khoo, Y. Nakamura, K. Ozaki, N. Ishikawa, and J. Onuki, “Reliability Enhancement of Thick Al Cu Wire Bonds in IGBT Modules Using Al₂Cu Precipitates”, *Mater. Trans.*, 52(3), 453 (2012).
25. J. H. Lee, D. H. Jung, and J. P. Jung, “Transient Liquid Phase Diffusion Bonding Technology for Power Semiconductor Packaging”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 25(4), 9 (2018).
26. J. W. Yoon, J. H. Bang, Y. H. Ko, S. H. 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), 1 (2014).



- 강혜준
 - 서울시립대학교 신소재공학과
 - Soldering, Electroplating, Micropackaging
 - e-mail: uoslab609@naver.com
-



- 정재필
 - 서울시립대학교 신소재공학과
 - Microjoining, Brazing, Soldering, Electroplating
 - e-mail: jpjung@uos.ac.kr
-