

특집 : 차세대 전력반도체 모듈 패키지 기술

차세대 전력반도체 소자 및 패키지 접합 기술

김경호 · 좌성훈[†]

서울과학기술대학교 나노IT디자인융합대학원

Recent Overview on Power Semiconductor Devices and Package Module Technology

Kyoung-Ho Kim, and Sung-Hoon Choa[†]

Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

(Received August 24, 2019: Corrected August 30, 2019: Accepted September 27, 2019)

Abstract: In these days, importance of the power electronic devices and modules keeps increasing due to electric vehicles and energy saving requirements. However, current silicon-based power devices showed several limitations. Therefore, wide band gap (WBG) semiconductors such as SiC, GaN, and Ga₂O₃ have been developed to replace the silicon power devices. WBG devices show superior performances in terms of device operation in harsh environments such as higher temperatures, voltages and switching speed than silicon-based technology. In power devices, the reliability of the devices and module package is the critically important to guarantee the normal operation and lifetime of the devices. In this paper, we reviewed the recent trends of the power devices based on WBG semiconductors as well as expected future technology. We also presented an overview of the recent package module and fabrication technologies such as direct bonded copper and active metal brazing technology. In addition, the recent heat management technologies of the power modules, which should be improved due to the increased power density in high temperature environments, are described.

Keywords: Power semiconductor, Package module, Wide Band Gap, Ceramic substrate, Thermal management

1. 서 론

매년 약 20% 이상 성장하고 있는 전기 및 하이브리드 전 기차(EV/HEV) 시장에서 전력반도체(power semiconductor) 는 전력의 변환(DC↔AC), 모터 구동의 스위칭, 제어 등 을 수행하기 위하여 사용된다. 전력반도체 소자기술은 고온환경의 다이오드(diode)와 MOSFET(metal oxide semiconductor field effect transistor), JFET(junction field transistor) 등의 단극소자(unipolar) 및 HEMT(high electron mobility transistor), IGBT(insulated gate bipolar transistor) 등의 양극소자(bipolar)로 구분된다. 최근 전력반도체에 대한 수요가 급증하면서, 전력반도체 소자의 전력밀도 증가에 대한 많은 연구가 보고되고 있다.¹⁻⁴⁾ 그러나, 빠른 속도로 기술이 개발되고 있는 현재의 상황에서 실리콘 기반의 전력반도체는 가까운 장래에 전력밀도 증가로 인한 한계에 도달할 것으로 예측되고 있다.⁵⁾ 전력밀도 증가는 기존의 150°C에서 구동하는 온도환경에서 200~300°C의 고온환경을 요구한다. 이와 같은 환경에서

안정적인 특성 및 신뢰성을 만족하기 위하여 SiC, GaN, Ga₂O₃와 같은 화합물 기반의 넓은 밴드 갭(wide band gap, WBG)을 나타내는 소재들에 대한 연구에 대한 결과가 보고되고 있다.⁶⁻¹³⁾

한편 전력반도체에서 패키지 모듈의 신뢰성 설계는 매우 중요하다. 전력반도체에서 발생된 열은 패키지 각 부분의 열-기계적 응력을 발생시키고, 접합부의 열 피로에 의하여 접합부 및 소자의 수명이 열화된다. 따라서 소자에서 발생하는 열을 적절히 방출하여 소자의 접합부 온도(junction temperature)를 적정 온도 이하로 유지하는 것이 매우 중요하다. 전력반도체 소자를 접합하는 기관의 종류는 접합방식에 의하여 분류되고, 주로 DBC(direct bonded copper)와 AMB(active metal brazing) 방식에 의해 제조된 기관이 사용된다. DBC 방식은 구리(Cu) 층에 산화막을 형성시킨 후, 세라믹에 직접 접합하고, AMB 방식은 금속과 세라믹 사이에 중간재를 사용하여 브레이징(brazing) 접합을 수행한다. 기존 낮은 가격 및 공정성이 우수하다는 이유로 기존에는 Al₂O₃ 및 AlN 소재의 세라

[†]Corresponding author
E-mail: shchoa@seoultech.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.

믹이 주로 사용되었으나, 최근에는 기계적 특성 및 신뢰성이 우수한 Si₃N₄ 소재에 대한 연구가 진행되고 있다.¹⁴⁾ 기관 소재에 대한 연구가 매우 중요한 이유 중 하나는 전력반도체 패키지 모듈의 효율적인 열관리와 연관이 있다. 일반적으로 전력반도체는 고온환경에서 열화문제가 발생하고, 차량에 장착된 모듈의 오작동 등으로 인한 소자의 파괴는 사람의 생명을 위협하는 요소로 작용하기 때문이다. 효율적인 모듈의 열관리를 위하여 기존의 베이스 플레이트(base plate)-히트 싱크(heat sink)를 사용하는 구조에서 히트 싱크만 사용하는 구조로 변경하고, 알루미늄(Al) 소재에서 열전도율이 우수한 금속이 첨가된 형태의 소재로 변경하기 위한 연구들이 진행 중이다.¹⁵⁾ 이 경우, 베이스 플레이트를 사용하지 않는다는 장점과 더불어 니켈(Ni) 도금이 필요 없으므로 상대적으로 낮은 비용으로 공정 수행이 가능하다. 또한, 간소화된 구조는 열의 이동경로가 줄어들어 만큼 열저항이 낮아지고, 경량화 및 작은 크기 등의 장점을 나타낸다.

본 논문에서는 WBG(wide band gap)의 전력반도체 소자 기반의 기술 및 동향과 그에 따른 금속/세라믹 기반의 기관기술에 대한 제조공정 및 소재 개발에 대한 최근 2-3년 동안의 최신 기술동향에 대해서 중점적으로 서술하였다. 또한, 전력밀도 증가로 인해 발생하는 고온 환경에서 전력모듈의 열 관리 필요성 및 연구 결과에 대해서도 서술하였다.

2. 전력반도체 소자 산업 및 기술동향

세계적으로 전력반도체 소자 시장은 2018년에 이미 135억 달러에 이르고, 매년 2.9%의 성장을 2024년까지 이어갈 것이라고 예상되고 있다. 특히, 전기 및 하이브리드 전기차량 시장에서의 전력모듈 시장은 더욱 가파른 성장을

나타낼 것으로 예측된다. Fig. 1에서 보여주듯이 2017년도부터 2023년도까지 전기차(battery electric vehicle, BEV) 시장은 매년 22%, 하이브리드 전기차(hybrid electric vehicle, HEV) 시장은 BEV 시장의 약 2배 수준인 43.4%의 성장률을 나타낼 것이라고 보고되었다. 현재의 기술 수준에서 가장 중요한 것은 제품과 공급업체가 다양해짐으로써, 모듈의 가격이 낮아질 수 있는 환경구축과 패키징 및 제조기술이 표준화되는 것이다.

전기 및 하이브리드 전기차량(EV/HEV)에서 전력의 변환(DC↔AC), 모터 구동의 스위칭, 제어 등을 수행하기 위하여 사용되어지는 전력반도체 모듈은 150°C의 온도 환경에서 구동하는 실리콘 소자 기반에서 제조되어왔으나, 최근 성능 및 전력밀도 증가 요구에 따라 200~300°C에서 작동이 가능한 SiC 및 GaN와 같은 넓은 밴드 갭(WBG) 소재로 대체하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁶⁻⁸⁾ Table 1에 정리된 것처럼 SiC와 GaN는 실리콘 소자와 비교하여 약 3배 수준의 넓은 밴드 갭과 약 8배 수준의 고전압을 견딜 수 있고, Ga₂O₃는 그 이상의 성능을 나타낸다고 알려져 있다.⁹⁾ 또한, 실리콘 소자 대비 절연파괴(breakdown) 한계가 약 10배 수준이므로, 반도체 칩(chip)의 크기를 1/10 수준으로 줄일 수 있다는 장점이 있다.

2.1. SiC 및 GaN 소재기반의 전력반도체

전력반도체 소자기술은 다이오드 기술에 따라 SBD(schottky barrier diode), JBSD(junction schottky barrier diode), PIN(positive intrinsic negative) 다이오드 등으로 분류할 수 있다. 또한, 단극소자와 양극소자로 분류할 경우, 단극소자는 MOSFET, JFET 등으로 구분할 수 있고, 양극소자는 HEMT, IGBT, Thyristor 등으로 구분이 가능하다. Fig. 2에 나타난 것처럼 SiC는 약 600 V 이상의 인버터,

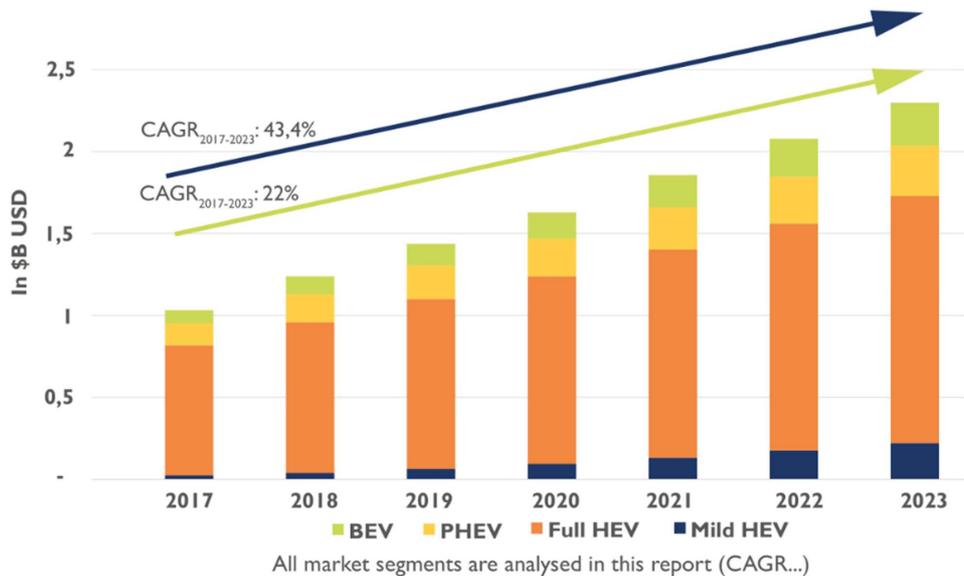


Fig. 1. Power module market by EV/HEV type (Source: Power Electronics for EV/HEV report, Yole Development, 2018).

Table 1. Electrical properties of various WBP materials⁹⁾

Materials parameters	Si	GaAs	4H-SiC	GaN	β -Ga ₂ O ₃
Bandgap, E _g (eV)	1.1	1.43	3.25	3.4	4.85
Dielectric constant, ϵ	11.8	12.9	9.7	9	10
Breakdown field, E _c (MV/cm)	0.3	0.4	2.5	3.3	8
Electron mobility, μ (cm ² /Vs)	1480	8400	1000	1250	300
Saturation velocity, v _s (10 ⁷ cm/s)	1	1.2	2	2.5	1.8~2
Thermal conductivity λ (W/cm·K)	1.5	0.5	4.9	2.3	0.1~0.3
Figures of merit relative to Si					
Johnson = E _c ² ·V _s ² /4 π ²	1	1.8	278	1089	2844
Baliga = ϵ · μ ·E _c ³	1	14.7	317	846	3214
Combined = λ · ϵ · μ ·V _s ·E _c ²	1	3.7	248.6	353.8	37
Baliga high frequency = μ ·E _c ²	1	10.1	46.3	100.8	142.2
Keyes = λ ·[(c·V _s)/(4 π · ϵ)] ^{1/2}	1	0.3	3.6	1.8	0.2
Huang HCAFOM, ϵ · μ ^{0.5} ·E _c ²	1	5	48	85	279

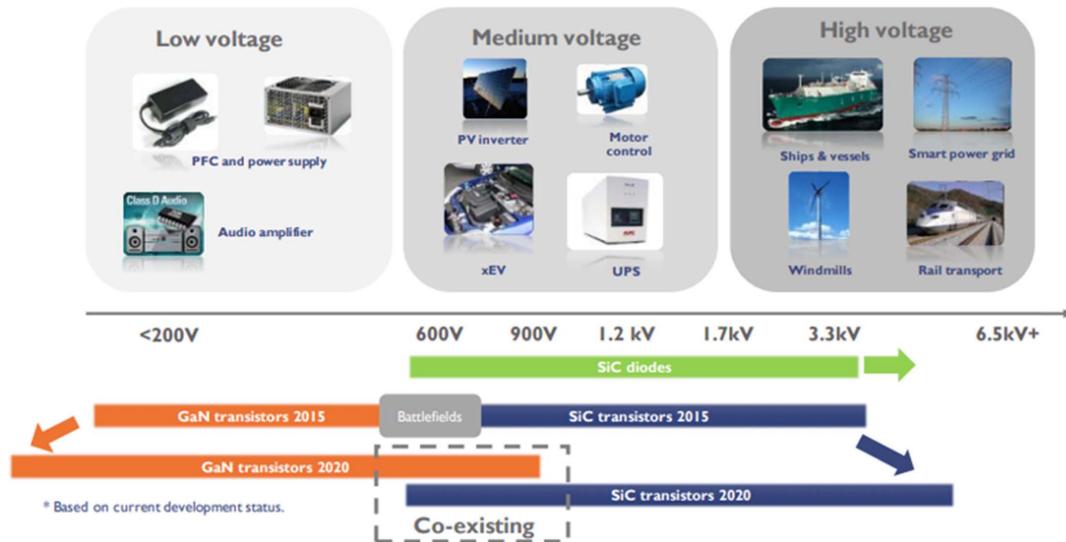


Fig. 2. WBG market segmentation as a function of voltage range (source: GaN and SiC for power electronics applications report, Yole Development, July 2015).

전기 및 하이브리드 전기 차량의 모터 구동 등에 사용되고, 500~700°C까지의 온도환경에서 동작이 가능하다.^{10, 11)} 또한, 기존의 실리콘 기반의 제조 공정에서 일부 공정 및 장비를 추가함으로써 SiC 공정수행이 가능하다. 반면, 단결정 성장과 높은 생산단가 및 에피층 증착 시 발생하는 결함에 대한 해결이 필요하다.¹²⁾ GaN는 SiC와 비교하여 상대적으로 낮은 약 900 V 이하의 소자에 주로 사용된다. 또한, 실리콘 보다 약 2배 이상 높은 온도인 400°C까지 동작이 가능하고, 고속 스위칭 특성이 우수하다. 하지만, 제조 공법이 실리콘 기반의 반도체와는 다르기 때문에 신규 설비 투자와 낮은 수율 및 단결정 성장에 대한 문제를 해결하기 위해 보다 많은 연구가 진행되고 있다.^{13, 14)}

2.2. Ga₂O₃ 소재기반의 연구동향

SiC와 GaN에 비하여 보다 넓은 밴드 갭을 나타내는

Ga₂O₃는 최근 전력반도체 시장에서 주목받고, 활발히 연구되고 있는 소재이다. 또한, 절연과괴 한계가 SiC와 GaN 보다 약 3~4배 높기 때문에 고전압 환경에서 사용이 용이하다는 장점이 있다. Ga₂O₃는 SBD, MOSFET, IGBT, Thyristor 등에 응용분야에서 많은 연구가 진행되고 있다.¹⁶⁻¹⁸⁾ 최근 Mun 등¹⁹⁾은 2.32 kV의 항복전압을 나타내는 고성능 FP(field plate) β -Ga₂O₃ MOSFET을 개발하였고, 차세대 고전압 및 고전력 스위칭 소자로써 사용이 가능할 것이라고 발표하였다. Fig. 3은 FP- β -Ga₂O₃ MOSFET의 구조에 대한 모식도 및 이미지를 보여준다.

2.3. 전력반도체 소자 접합기술

WBG 소자와 같은 차세대 전력반도체는 200~300°C의 온도조건이 요구되고, 전자패키징 산업에서 가장 널리 사용되는 Sn 기반의 SAC305(Sn-3.0Ag-0.5Cu)는 217°C에서

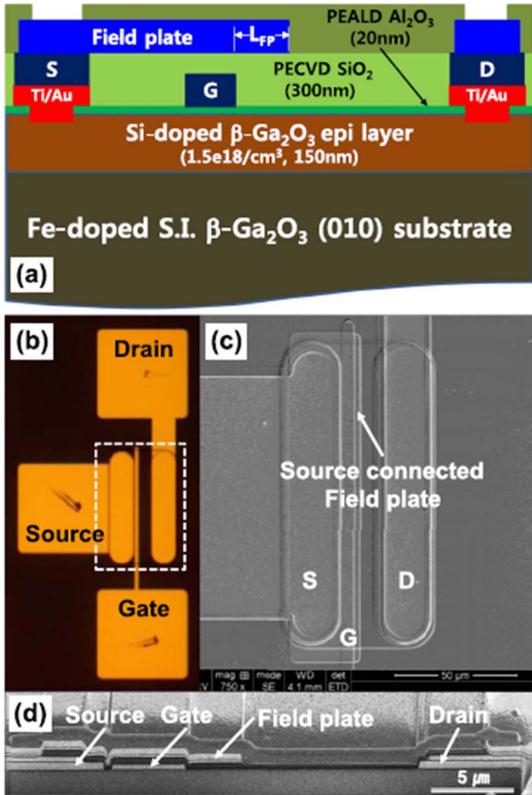


Fig. 3. (a) Cross-section view of FP $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MOSFET structure of a source-connected FP, (b) Optical microscope of finger-type MOSFET taken after gate electrode formation, (c) Top-down SEM image, and (d) Cross-sectional SEM view of source-connected FP-MOSFET.¹⁹⁾

용융되므로 기존의 솔더링(soldering) 기술은 사용온도에서 재용융(re-melting)될 우려가 있다. 그러므로, 전력반도체 소자 접합기술로써, 나노입자를 이용한 소결(sintering) 기술과 TLP(transient liquid phase) 접합기술에 대한 연구가 많이 보고되었다.^{20,21)} 그러나, 소결 기술은 압력을 발생시킬 수 있는 별도의 장비를 필요로하고, 공정에서 고비용의 소재를 사용해야 한다는 이유로 산업 전반에 널리 적용이 어렵다는 문제를 가지고 있다.²²⁾

Fig. 4는 Sn-Cu 기반의 TLP 접합공정 모식도를 나타낸다. TLP 접합은 고용점 금속들의 사이에서 저용점 소재가 용융되어 접합부 계면에 IMC(intermetallic compound)를 일차적으로 형성하고, 열처리 공정을 수행하여 공정

중에 IMC가 접합부 전체로 확산하게 된다. Sn-Cu 접합에서 고용점 금속 사이에 Cu_6Sn_5 와 Cu_3Sn IMC가 형성된다고 알려져 있고, Cu_6Sn_5 의 용융온도는 415°C , Cu_3Sn 은 640°C 이다. TLP 공정에 의해 형성된 IMC는 기계적 특성과 크리프(creep) 저항 특성이 증가하지만, 취성과괴 경향 또한 증가한다고 알려져 있다.²³⁾ TLP 공정에서 주로 사용되는 접합소재는 저온에서 Sn, In 등이 사용되고, 고온에서 Cu, Ag, Ni 등이 주로 사용된다.²⁴⁾

3. 전력반도체 모듈 및 기판 접합기술

전력반도체 모듈은 높은 전류와 전압이 가해지는 환경에서 동작한다. 고전류/고전압 및 우수한 방열특성을 만족하기 위하여, 약 $200\sim 400\ \mu\text{m}$ 수준의 두꺼운 구리회로(copper circuit)를 사용하고, 고절연성/고열전도율 및 고방열 특성을 만족하는 약 $0.2\sim 1.0\ \text{mm}$ 두께의 세라믹 소재도 동시에 사용된다. 전력반도체 기판의 종류는 접합방식에 의하여 분류되고, 주로 DBC와 AMB 방식에 의해 제조된 기판이 사용된다. Fig. 5는 DBC와 AMB 기판의 제작공정 모식도를 나타낸다. DBC와 AMB 공정의 가장 큰 차이점은 금속과 세라믹의 접합에 중간재 사용유무와 온도조건이다. AMB 공정에서 중간재를 사용하므로 상대적으로 DBC 공정보다 낮은 온도에서 수행된다.

DBC 기판의 접합공정은 구리 박막의 한쪽 면에 화학적으로 산화층(CuO)을 형성하고, 약 $1,070^\circ\text{C}$ 에서 세라믹의 양면에 공융접합(eutectic bonding) 방식으로 제조된다. 또한, 공정온도는 구리 박막이 용융되는 온도인 $1,085^\circ\text{C}$ 이상 승온되지 않도록 조절되어야 한다.²⁵⁾ AMB 기판은 금속층과 세라믹층 사이에 위치하게 되는 활성금속을 사용하여 금속과 세라믹을 접합하는 방식을 사용한다. 활성금속은 약 $815\sim 875^\circ\text{C}$ 의 고온 및 진공상태인 진공로에서 액상을 형성하여 금속과 세라믹을 접합하기 위한 중간재를 의미한다.²⁶⁾ 금속과 세라믹의 접합에서 일반적인 금속들은 대부분 매우 낮은 젖음 특성(wettability)을 나타낸다고 알려져 있다. 반면, Ti, Hf, Zr, V 등 IV족 혹은 V족 금속은 세라믹과 접합이 용이하다. 그러므로, 전력반도체 기판 제조에서 Ti 혹은 Ti가 첨가된 합금이 가장 많이 사용되고 있다.

전력반도체 기판 제조 공정에서 세라믹층과 금속층이

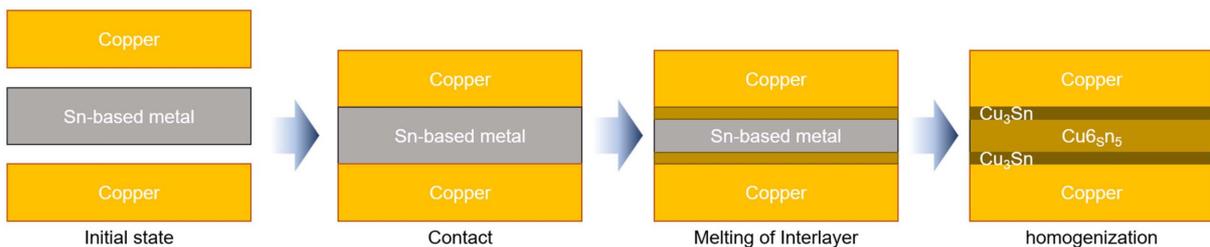


Fig. 4. Schematic illustration for Sn-Cu system during TLP bonding.

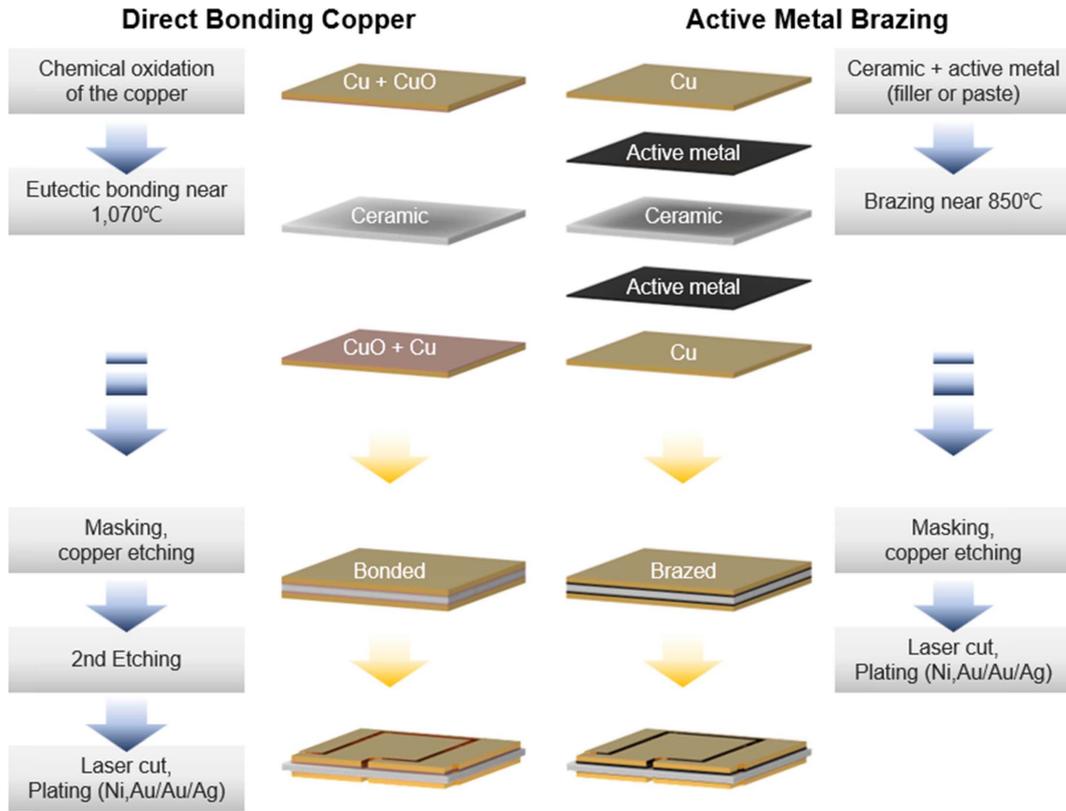
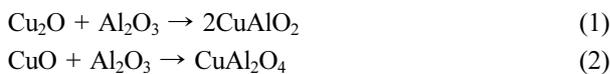


Fig. 5. Schematic illustration of process flow for DBC and AMB substrate.

Table 2. Mechanical properties of various ceramic substrate materials^{15,28-30)}

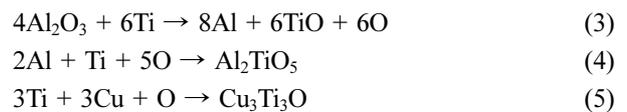
Materials parameters	Al ₂ O ₃	AlN	Si ₃ N ₄
Thermal conductivity (W/m·K)	20~40	150~220	86~170
Coefficient of thermal expansion (ppm/°C)	7	2.5~5	2.7~3.1
Dielectric breakdown strength (kV/mm)	10~35	14~35	10~25
Dielectric strength (kV/mm) with 300 μm Cu	~15 (DBC)	15~20 (DBC)	~18 (AMB)
Dielectric constant	9~10	8~9	8~9
Bending strength (MPa)	300~380	250~350	600~900
Young modulus (GPa)	300~370	300~320	200~300
Fracture toughness (MPa·m ^{1/2})	3~5	2~3	4~7
Heat capacity (J/g·K)	0.88	0.78	0.71
Density (g/cm ³)	3.96	3.26	3.25

안정적으로 접합되는 것이 가장 중요하다. 젖음성 및 기계적 강도 등이 우수한 접합 특성을 만족하기 위하여 산화물 혹은 세라믹과 원활한 반응을 나타내는 금속을 중간층으로 사용한다. DBC 기판 제조 공정에서 CuO와 Al₂O₃의 화학 반응은 다음과 같다.²⁷⁾



2CuAlO₂ 화합물은 공정 중에 발생하는 반응이고, 접합 후에는 CuAl₂O₄ 화합물이 관찰된다. Al₂O₃와 더불어 널리 사용되는 AlN 세라믹으로 기판을 제조할 경우에는 미

리 AlN 표면을 산화하여 얇은 Al₂O₃ 층을 형성 후 접합한다. AMB 기판 제조 공정에서 주로 사용되는 활성금속인 Ti가 첨가된 합금과 Al₂O₃의 화학반응은 다음과 같다.²⁸⁾



기판 제조에서 세라믹의 선정은 우수한 열전도율, 절연성, 열-기계적 특성, 신뢰성 등을 기준으로 한다. Table 2는 전력반도체 기판의 세라믹층으로 주로 적용되고 있는 Al₂O₃, AlN, Si₃N₄의 전기적, 기계적 특성을 나타낸다.

Al_2O_3 는 높은 강도와 낮은 가격이라는 장점을 가지고 있지만, 20~30 W/m·K의 상대적으로 낮은 열전도율을 나타낸다. AlN 는 70~250 W/m·K의 높은 열전도율을 가지고 있고, 실제로 출력밀도가 상대적으로 높은 인버터와 같은 부품에 적용되고 있지만, 반복적인 온도변화 환경에서 금속과 AlN 사이의 열팽창계수 차이(CTE mismatch)로 인한 접합부 크랙이 발생한다고 알려져 있다. Si_3N_4 의 경우, Al 기반의 세라믹보다 약 3~4 배 수준의 높은 강도를 나타내므로 기계적 특성 및 신뢰성 측면에서 우수하다. 또한, AlN 보다 Si_3N_4 가 상대적으로 낮은 열전도율을 나타낸다고 알려졌으나, Hirao 등³²⁾은 177 W/m·K 수준의 열전도율과 11.2 MPa·m^{1/2} 수준의 파괴인성(fracture toughness)을 나타낼 정도로 개선하였다고 보고하였다.

4. 전력모듈 열 관리

전력반도체는 모터의 제어를 위해 항상 고온, 고습, 진동 및 충격이 가해지는 가혹한 환경에서 동작한다. 따라서, 패키지 모듈의 냉각 기술은 매우 중요하다. 현재의 냉각 방식은 베이스 플레이트를 사용하여 열을 전달하는 간접냉각 방식과 히트 싱크에 바로 접합되어 열을 방출시키는 직접냉각 방식으로 구분할 수 있다. Fig. 6은 기존의 간접냉각 방식(indirect liquid cooling)과 최근의 직접냉각

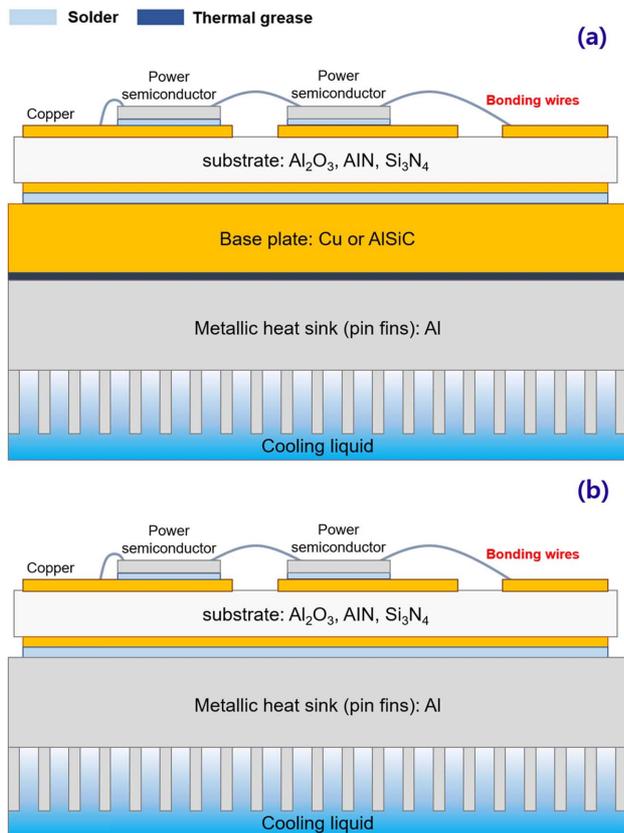


Fig. 6. Schematic comparison of (a) conventional indirect cooling structure and (b) direct cooling structure.

방식(direct liquid cooling)의 구조를 보여준다. 간접냉각 방식은 전력반도체 모듈의 적절한 열 관리를 위하여 Cu 또는 AlSiC 등의 소재를 사용하는 MMC(metal matrix composite) 베이스 플레이트에 접합되고, 최종적으로 히트 싱크에 접합되는 구조를 나타낸다. 간접냉각 방식에서 베이스 플레이트는 사용 중 냉각수로 인해 발생하는 부식 문제 등을 해결하기 위하여 Ni 도금이 추가적으로 필요하다. 반면, 최근에는 베이스 플레이트를 생략하고 히트 싱크의 소재를 대체하기 위한 직접냉각 방식의 연구가 진행되고 있다.³³⁾ 기존의 Al 소재의 히트 싱크를 Cu 또는 AlCu 소재로 대체할 경우, 베이스 플레이트를 사용하지 않는다는 장점과 더불어 Ni 도금이 필요 없으므로 상대적으로 낮은 비용으로 공정 수행이 가능하다. 또한, 간소화된 구조는 열의 이동경로가 줄어들어 만큼 열저항이 낮아지고, 경량화 및 작은 크기 등의 장점을 나타낸다.

일반적으로 EV/HEV 전원 시스템에서 스위칭 소자로 사용되는 Si 기반의 IGBT는 약 150°C 이상의 환경에서 동작될 경우, 급격한 특성 및 신뢰성 저하와 같은 열화 문제를 나타내므로 발열관리가 필수적이라고 알려져 있다.^{34,36)} SiC 및 GaN를 소재로 하는 차세대 소자에서는 온도 환경이 더 높아지므로, 열 관리가 더욱 중요해질 것으로 예상된다. 금속과 세라믹의 상호연결을 위하여 그리스, 젤, 접착제, elastomer, 위상변화 물질 등과 같은 TIM(thermal interface material)은 TC(thermal cycling)과 같은 시험에서 솔더와 기판 사이의 박리 등과 같은 문제를 발생시킨다고 알려져 있다.³⁷⁾ 이러한 현상과 직접적인 원인은 소재 간의 열적 특성의 불균형 또는 열팽창계수 차이로 보고되었다

George 등³⁸⁾에 의하면, TC 시험에서 반복적으로 가해지는 열 조건에서 각 재료 간의 열팽창계수 차이로 인하여 휨이 발생하고, 휨이 발생하는 굽힘모드에서 크랙은 접합부 외곽에서부터 발생하여 내측으로 전파된다고 하였다. 박리는 주로 식각된 구리의 가장자리에서부터 시작하여 세라믹 평면으로 전파되는 형태의 크랙이 발생한다고 하였다. 반면, 금속영역에서 식각 되어진 부분의 경우, 균열은 세라믹 층의 하면에서 상부면으로 시작 및 증가하여 세라믹 층의 평면에 수직으로 전파된다. 그러므로, 전력반도체 기판의 본래의 역할인 절연성을 상실할 수도 있다고 경고하였다. 세라믹 층에 휨이 발생했을 때 크랙이 쉽게 발생하는 가장 큰 이유는 인장강도가 압축강도보다 현저히 낮은 특성을 나타내기 때문이다. 세라믹 층에 주로 사용되는 Al_2O_3 의 인장강도는 압축강도에 비교하여 12%, Si_3N_4 는 16% 수준을 나타낸다고 알려져 있다.³⁹⁾

5. 결 론

연간 약 20% 이상의 성장을 보이고 있는 EV/HEV 시장에서 요구되는 성능 및 신뢰성을 만족하기 위하여 기

존의 전력반도체 산업은 Si 기반의 제조기술에서 차세대 소재를 사용하는 제조기반의 변화가 일어나고 있다. SiC, GaN, Ga₂O₃ 등과 같은 WBG 소자에 대한 연구를 기반으로 구동전력을 낮추고, 고속 스위칭, 고전압, 고온, 고전류밀도 환경에서 현재보다 약 1/10의 작은 크기로 응용이 가능하다. 반면, 기존의 Si 기반의 제조공정에서 새로운 공정을 적용하는데 있어서, 증착 기술과 구조 및 장비 개발과 비용 등의 해결해야 할 문제가 남아있다. 전력반도체 소자의 성능이 증가함에 따라, 모듈 기판 소재에도 기존보다 향상된 고전류/고전압 및 방열특성을 요구하고 있다. 기존의 DBC 및 AMB 기판에서 사용되는 Al₂O₃, AlN 소재가 출력밀도가 높은 환경에서 금속과의 열팽창 계수 차이로 인해 크랙이 발생하지만, Si₃N₄는 약 3~4 배 높은 강도의 우수한 기계적 특성을 가지고 있으므로 좋은 대안이 될 것으로 예상된다. 또한, EV/HEV에 적용되는 부품은 운전자의 생명과 직결된다는 점에서 장시간 사용되었을 때 발생할 수 있는 문제에 대해 심각하게 고려되어야 한다. 그러므로, 장기 신뢰성에 대한 연구 및 방열과 관련되어 예측/평가 가능한 기술들 역시 지속적으로 개발이 필요하다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다..

References

1. N. Dharmarasu, "AlGaIn/GaN HEMT grown on SiC with carbon doped GaN buffer by MOCVD", Electron Devices Technology and Manufacturing Conference(EDTM), 434 (2019).
2. S. S. Moosavi, A. Kazemi, and H. Akbari, "A comparison of various open-circuit fault detection methods in the IGBT-based DC/AC inverter used in electric vehicle", Engineering Failure Analysis, 96, 223 (2019).
3. X. Liang, S. Srdic, J. Won, E. Aponte, K. Booth, and S. Lukic, "A 12.47 kV Medium Voltage Input 350 kW EV Fast Charger using 10 kV SiC MOSFET", 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 581 (2019).
4. 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).
5. P. Roussel, "SiC Market and Industry Update", International SiC Power", Electronics Applications Workshop (ISiCPEAW), Sweden (2011).
6. K. Shenai, M. Dudley, and R.F. Davis, "Current status and emerging trends in wide bandgap (WBG) semiconductor power switching devices", ECS J. Solid State Science and Technology, 2(8), 3055 (2013).
7. F. Roccaforte, A. Frazzetto, G. Greco, F. Giannazzo, P. Fiorenza, R. L. Nigro, M. Saggio, M. Leszczynski, P. Pristawko, and V. Raineri, "Critical issues for interfaces to p-type SiC and GaN in power devices", Applied Surface Science, 258(21), 8324 (2012).
8. J. Millan, P. Godignon, X. Perpina, A. Perez-Tomas, and J. Rebollo, "A survey of wide bandgap power semiconductor devices," IEEE Transactions on Power Electronics, 29(5), 2155 (2014).
9. S. J. Pearton, J. Yang, P. H. Cary IV, F. Ren, J. Kim, M. J. Tadjer, and M. A. Mastro, "A review of Ga₂O₃ materials, processing, and device", Applied Physics Reviews, 5(1), 011301 (2018).
10. D. J. Spry, P. G. Neudeck, L. Chen, D. Lukco, C. W. Chang, and G. M. Beheim, "Prolonged 500°C demonstration of 4H-SiC JFET ICs with two-level interconnect", IEEE Electron Device Letters, 37(5), 625 (2016).
11. T. P. Chow, "Wide bandgap semiconductor power devices for energy efficient systems", Proc. IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), 402 (2015).
12. S. Dimitrijevic, and P. Jamet, "Advances in SiC power MOSFET technology", Microelectronics Reliability, 43(2), 225 (2003).
13. F. Zimmermann, G. Gartner, H. Strater, C. Roder, M. Barchuk, D. Bastin, P. Hofmann, M. Krupinski, T. Mikolajick, J. Heitmann, and F. C. Beyer, "Green coloring of GaN single crystals introduced by Cr impurity", J. Luminescence, 207, 507 (2019).
14. T. Kimura, S. Sato, K. Kataoka, T. Morikawa, and D. Nakamura, "Self-assembled single-crystalline GaN having a bimodal meso/macropore structure to enhance photoabsorption and photocatalytic reactions", ACS applied materials & interfaces, 11(4), 4233 (2019).
15. S. S. Kang, "Advanced cooling for power electronics", IEEE International conference on integrated power electronics systems (CIPS), 1 (2012).
16. M. H. Roh, H. Nishikawa, and J. P. Jung, "Transient Liquid Phase bonding for Power Semiconductor", J. Microelectron. Packag. Soc., 24(1), 27 (2017).
17. F. Ren, J. C. Yang, C. Fares, and S. J. Pearton, "Device processing and junction formation needs for ultra-high power Ga₂O₃ electronics", MRS Communications, 9(1), 77 (2019).
18. J. Yang, C. Fares, R. Elhassani, M. Xian, F. Ren, S. J. Pearton, M. Tadjer, and A. Kuramata, "Reverse breakdown in large area, field-plated, vertical β -Ga₂O₃ rectifiers", ECS Journal of Solid State Science and Technology, 8(7), 3159 (2019).
19. J. K. Mun, K. Cho, W. Chang, H. -W. Jung, and J. Do, "2.32 kV Breakdown voltage lateral β -Ga₂O₃ MOSFETs with source-connected field plate", ECS Journal of Solid State Science and Technology, 8(7), 3079 (2019).
20. K. Chu, Y. Sohn, and C. Moona, "A comparative study of Cu/Sn/Cu and Ni/Sn/Ni solder joints for low temperature stable transient liquid phase bonding", Scripta Materialia, 109, 113 (2015).
21. H. Tatsumi, A. Lis, T. Monodane, H. Yamaguchi, Y. Kashiba, and A. Hirose, "Transient liquid phase sintering using Copper-Solder-Resin composite for high-temperature power modules", IEEE Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 564 (2018).
22. H. Tatsumi, A. Lis, H. Yamaguchi, T. Matsuda, T. Sano, Y. Kashiba, and A. Hirose, "Evolution of transient liquid-phase sintered Cu-Sn skeleton microstructure during thermal

- aging”, *Applied Sciences*, 9(1), 157 (2019).
23. D. Mu, H. Huang, S. D. McDonald, and K. Nogita, “Creep and mechanical properties of Cu_6Sn_5 and $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ at elevated temperatures”, *Journal of electronic materials*, 42(2), 304 (2013).
 24. H. Feng, J. Huang, J. Yang, S. Zhou, R. Zhang, and S. Chen, “A transient liquid phase sintering bonding process using nickel-tin mixed powder for the new generation of high-temperature power devices”, *Journal of Electronic Materials*, 46(7), 4152 (2017).
 25. T. Ishizaki, M. Usui, and Y. Yamada, “Thermal cycle reliability of Cu-nanoparticle joint”, *Microelectronics Reliability*, 55(9-10), 1861 (2015).
 26. M. Ali, K. M. Knowles, P. M. Mallinson, and J. A. Fernie, “Microstructural evolution and characterisation of interfacial phases in $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ag-Cu-Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3$ braze joints”, *Acta Materialia*, 96, 143 (2015).
 27. I. Krasniy, A. Berkin, G. Minskiy, A. Denisova, and S. Kumacheva, “Research of the DBC joining interface”, *International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, 185 (2016).
 28. A. Kar, and A. K. Ray, “Ceramic-Metal Joining Using Active Filler Alloy-An In-Depth Electron Microscopic Study”, *The Transmission Electron Microscope*, 317 (2012).
 29. J. H. Harris, “Sintered aluminum nitride ceramics for high-power electronic applications”, *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society(TMS)*, 50(6), 56 (1998).
 30. L. Sim, S. R. Ramanan, H. Ismail, K. N. Seetharamu, and T. J. Goh, “Thermal characterization of Al_2O_3 and ZnO reinforced silicone rubber as thermal pads for heat dissipation purposes”, *Thermochimica acta*, 430(1-2), 155 (2005).
 31. X. Huang, P. Jiang, and T. Tanaka, “A review of dielectric polymer composites with high thermal conductivity”, *IEEE Electrical Insulation magazine*, 27(4), 8 (2011).
 32. K. Hirao, Y. Zhou, H. Hyuga, T. Ohji, and D. Kusano, “High thermal conductivity silicon nitride ceramics”, *Journal of the Korean Ceramic Society*, 49(4), 380 (2012).
 33. Y. Wang, S. Jones, A. Dai, and G. Liu, “Reliability enhancement by integrated liquid cooling in power IGBT modules for hybrid and electric vehicles”, *Microelectronics Reliability*, 54(9-10), 1911 (2014).
 34. A. Uhlemann, and T. Fath, “Investigation on AlCu clad base plates and a new by-pass cooler concept for pin fin power modules”, *International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)*, 256 (2014).
 35. C. Qian, A. M. Gheitaghy, J. Fan, H. Tang, B. Sun, H. Ye, and G. Zhang, “Thermal management on IGBT power electronic devices and modules”, *IEEE Access*, 6, 12868 (2018).
 36. I. W. Suh, H. S. Jung, Y. H. Lee, Y. H. Kim, and S. H. Choa, “Heat dissipation technology of IGBT module package”, *J. Microelectron. Packag. Soc.*, 21(3), 7 (2014).
 37. J. P. Gwinn, and P. L. Webb, “Performance and testing of thermal interface materials”, *Microelectronics Journal*, 34(3), 215 (2003).
 38. A. J. George, M. Breitenbach, J. Zipprich, M. Klingler, and M. Nowotnick, “Nonconchoidal Fracture in Power Electronics Substrates due to Delamination in Baseplate Solder Joints”, *IEEE Electronic System-Integration Technology Conference(ESTC)*, 1 (2018).
 39. “Material Properties Charts”, *Ceramic Industry Magazine* (2013) from <https://www.ceramicindustry.com>



- 김경호
 - 서울과학기술대학교
 - 나노IT디자인융합 대학원 박사 후 과정
 - 전자/전장패키징, 무연솔더, 접합부 신뢰성
 - e-mail: kittun81@gmail.com
-



- 좌성훈
 - 서울과학기술대학교
 - 나노IT디자인융합 대학원
 - 유연 전자소자, MEMS, 반도체 패키징, 나노 공정
 - e-mail: shchoa@seoultech.ac.kr
-