

SiC Power Device의 주변 기술 개발

우 현 민, 안 준 영, 이 명 준 / 산켄전기 코리아(주)
나 재 두 / 인하공업전문대학

1. 서 론

최근의 전력변환분야에서 SiC 파워 디바이스의 관심 및 연구가 증가되고 있는 가운데 일본의 독립행정법인 신에너지·산업기술 종합개발기구(NEDO: National Economic Development Office)에서는 「차세대 Power Electronics 기술 개발(Green IT Project)」 및 「저탄소 회사를 실현하는 신재료 전력 반도체 Project」에서 SiC 파워 디바이스를 이용한 혁신적 전력변환기 설계 기술과 고온 실장 기술 개발을 현재 활발하게 진행하고 있다[1]. 이러한 기술개발 추세에 맞추어 관련 기술을 가진 산업체들이 FUPET(R&D Partnership for Future Power Electronics Technology)라는 연구개발기구를 조직하여 SiC 파워 디바이스 연구 및 개발 구성원으로서 제조기술 및 이를 이용한 전력변환기 설계기술개발에 집중 투자 및 전념하고 있다.

일본의 산켄전기社의 경우, SiC 파워 디바이스를 이용하여 소형 및 대용량 3상 인버터를 개발하여 보고하였다[2]. 개발된 3상 인버터의 경우 고주파수의 스위칭 주파수를 가지면서 고온에서 합리적인 동작성능을 보여주고 있다. 이러한 인버터를 구현하기 위해서는, 반도체 칩의 혁신 이외에 고온 동작 보증과 고주파 스위칭 주파수에 대응할 수 있는 실장 기술에 대한 개발이 절실히 필요하다.

2. 실장 기술 개발 요건

전력용 스위칭 반도체 소자인 IGBT, MOSFET 등의 SiC 파워 디바이스는 사용 온도가 일반적으로 150℃ 정도까지로 제한되고 있다. 이러한 이유로 기존의 파워모듈 및 주변 소자들은 -40℃ ~ 150℃ 범위 내에서 신뢰성 보증으로 충분했다. 그러나 SiC 파워디바이스의 경우는 200℃ 이상에서의 고온에서 동작이 가능하지만 이러한 장점을 살리기 위해서는, 고온에서의 동작에 대응 가능한 실장 기술을 개발할 필요성이 대두된다. 따라서, 이러한 실장 기술의 조건의 필요성으로 (주)산켄전기에서는 파워모듈의 상한 온도를 250℃로 신뢰성에 대한 확보를 목표로 했다. 주된 실장 기술개발 요건으로는 Gel, Die Attach 및 Wire 등이 있다. 실장 기술의 문제점으로 Gel은 고온상태에서 경화 및 수축, Die Attach와 Al Wire는 냉열시험시의 진행성 균열에 의한 접합강도저하, 전기적 저항특성 증가가 존재한다. (주)산켄전기는 Green IT Project의 이러한 문제점들을 대처하기 위한 검토 및 개발을 해 왔으며, 본 기획시리즈에서는 Al Wire에 초점을 맞추어 재질 차이에 따른 신뢰성 영향에 대해 설명하고자 한다.

3. 냉열 시험 결과

표 1의 Al Wire의 비교표에서 보는 바와 같이 4종류의



Al Wire를 준비하였다. 특히 C는 250℃의 온도에서 20시간으로 시효경화에 따라 D와 동등한 강도를 가지는 상태가 된다. D는 Wire의 심에 Cu선을 추가함에 따라 Wire 전체의 팽창률이 Al (23ppm/℃)보다 Cu(17ppm/℃)에 가까워, 기재(基材)인 Si₃N₄(3ppm/℃)와의 선 팽창의 차에서 생기는 응력 저감을 가져온다.

그림 1은 시험 평가용 샘플 구조를 나타낸다. SiN 기관상의 Au, Ni 도금된 Cu 배선에 2mm각의 SiC Chip을 AuGe뿔납에 접합하였다. Reflow조건 및 사용 Jig는 참고 문헌 [3]과 같이 하였다. 그 후에 Chip측을 1st bond로 Wire Bonding하였다.

이 샘플을 -40℃ ~ 250℃의 기체상 냉열시험(이후부터는 간략히 냉열 시험이라고 함)에 투입하여 각 냉열 Cycle 수로 샘플을 추출하여 온실에서 시험을 하였다. 이러한 것을 참고 문헌[4]에서는 Tweezers Pull시험을 하며 이번의 시험용 샘플의 경우 Wire가 단단한 샘플이 존재하여 Tweezers Pull 시험을 할 경우 변형이 어려워 Pull Hook 시험으로 변경하였다. 이 때의 Pull 강도 측정 결과를 그림 2에 나타내었다. 냉열시험 전의 Pull 강도는 모든 샘플에서 IEC60749-22의 규격치를 상회하여 신뢰성이 확보되었다.

또한 샘플 C는 시효 처리를 하지 않은 상태에서 초기 Pull강도를 측정하였다. 각 냉열 Cycle 후의 Pull 강도 변화로 두 개의 경향을 보였다. C와 D는 초기강도가 높지만 급격히 강도가 저하하고 빠른 단계로 ICE 규격치에 도달

표 1 Al Wire의 비교표

샘플	내용
A	부식방지 첨가물 첨가한 Al
B	고순도 Si
C	시효 경화의 특성을 가지는 Al
D	심에 Cu선을 가지는 Al

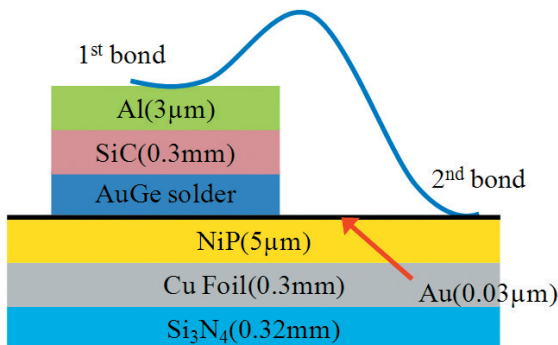


그림 1 평가 시료의 단면구조

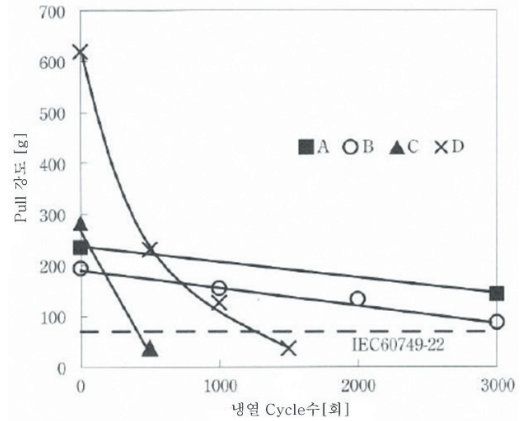


그림 2 냉열 시험 회수에 따른 Wire Pull 강도의 변화

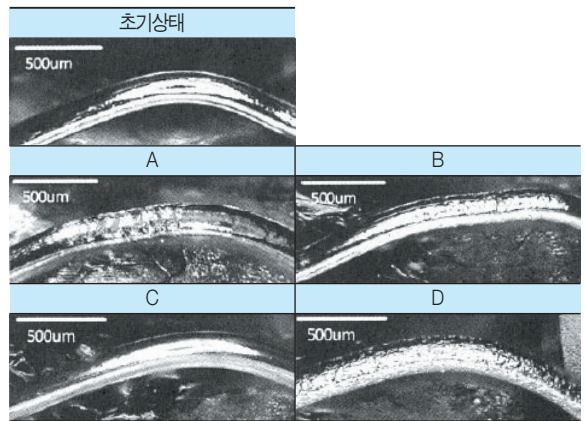


그림 3 초기상태에서 1000Cycle이후의 Wire loop 상태

하지 못하였다. 하단부는 1st bond측의 접합 경계면이었다. 한편 A, B는 초기강도가 낮지만, 3000Cycle까지 IEC규격을 만족하였다 초기 과단(破斷)은 주로 Wire Loop부분이었지만 냉열 사이클이 진행되면서 Bonding neck부분이나 접합 경계면에서의 과단이 늘어나는 경향을 보였다.

그림 3의 각 Wire의 1000Cycle 후의 Loop부분을 관찰한 결과를 나타냈다. A, B는 Wire loop의 top 부근의 표면이 거칠어져 Loop Top부분이 일그러지듯이 변형되었다. 한편, C와 D는 loop 형태로 변형은 없지만 D만 Wire 표면 전체가 거칠어졌다.

A, B에 보여지는 Wire 변형 및 표면의 거침은 주로 Si₃N₄ 기재(基材)인 Wire의 팽창률 차이에서 생기는 응력에 의한 것이다. 한편 C, D에서 loop형상에 변화가 보이지 않는 것은 Wire Loop 부분이 충분히 단단하게 변형을 일으키지 않기 때문이다. 그 대신 Loop 변형으로 흡

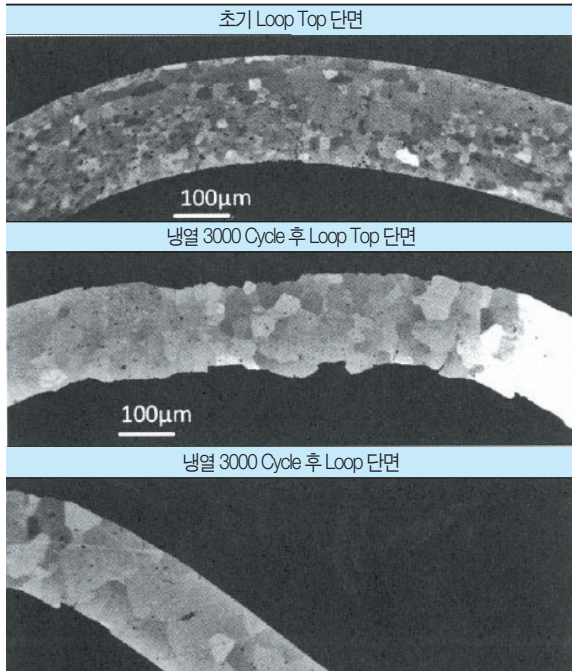


그림 4 A 단면 SEM 그림

수되지 않은 응력은 접합 경계면에 집중하여 크랙 (Crack)이 진행되어 강도가 현저히 저하된다. D가 C에 비해 강도 저하가 낮은 것은 상기에서 나타내었듯이 선 팽창률의 차이를 작게 하고 응력이 저감된 것이 이유의 하나라고 보여진다. 또한, D의 경우만 표면의 거침이 보이는 것은 심의 Cu와 표면의 Al의 선 팽창의 차가 원인이라고 보여진다.

다음으로 A의 초기 상태와 3000 Cycle 후의 단면 SEM 그림을 그림 4에 나타내었다. 초기 Loop Top부분(상단)에 비하여 3000 Cycle후(가운데 그림 및, 하단 그림)의 Wire는 결정 입경(알갱이 지름)이 커짐을 알 수 있다. 또한, 외관상은 표면의 거침으로 관찰된 Loop Top 부분(가운데 그림)은 표면의 거침이 없는 부분(하단)에 비해 결정 입경이 작음을 알 수 있다. 이 현상은 재결정 온도가 250℃ 이하인 A, B는 냉열 시험에 따라 결정 입경이 커지기 때문에 Hall-Petch 효과[5]로 Loop부분은 전체적으로 소성 변형(塑性變形, plastic deformation)되기가 쉬워진다. 냉열 시험으로 인해 발생하는 소성변형은 Loop top으로부터 표면의 거친 부분은 점차 넓어지고, 소성 변형하지 않는 부분은 냉열 Cycle 시험에서 결정 입경의 확대에 따라 항복 응력이 떨어지고 있다. 이와 같은 현상은 순차적으로 표면으로부터 소성 변형 부분이 이동해 가기 때문이라고 생각한다. 이로

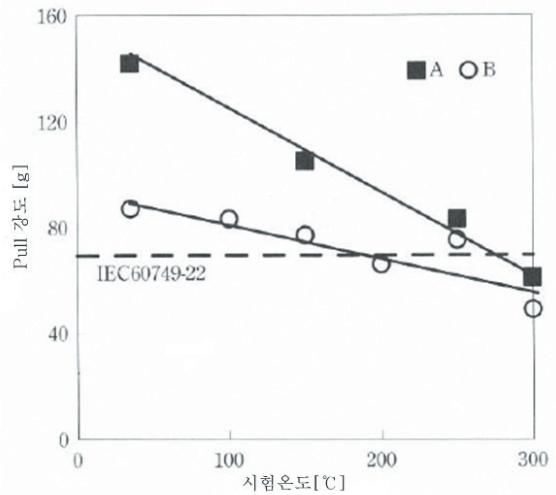


그림 5 초기와 냉열 3000Cycle 후의 온도 Pull강도

인해, 냉열 시험에 따른 소성 변형은 한 부분에 집중되지 않고, 냉열 시험을 3000Cycle 행하여도 Loop부분에 있어 파단되지 않았다고 보여진다. 따라서 냉열 시험에 있어서는 Wire Loop 안에서 변형하기 쉽고, 접합 경계면으로의 집중을 피할 수 있는 재질이 좋음을 알 수 있다.

4. 고온 Pull 강도 결과

파워모듈을 동작 시에 wire가 고온이 된다는 것을 가정한 경우, 기계적 강도를 보증하는 것이 중요하다. 냉열 3000Cycle 이 후 샘플을 고온에서의 Pull 강도를 측정된 결과를 그림 5에 나타내었는데 A와 B 샘플 모두 강도가 떨어졌다. A는 250℃까지 IEC규격 이상이지만 B는 IEC 규격 이하이다. A에는 방부제가 포함되어 있어, 이로 인해 Pull강도가 늘었다고 생각한다. 이와 같이 냉열 시험에서는 Wire 강도가 부드러울수록 신뢰성이 높았지만, 고온에서의 Pull강도를 고려한 경우에는, 부드러운 재료로는 신뢰성 확보가 불가능하다는 것이 판명되었다.

5. Power Cycle 시험 결과

실제 기기 동작에 가까운 온도 스트레스가 걸리는 Power Cycle 시험 결과를 나타낸다. 그림 6에 나타낸 것과 같이 SiC-SBD가 8개 직렬 연결로 앞서 기록한 각 Wire를 사용하였다. 1Cycle 60초의 Power Cycle 시험에서 통전 6.2A, 2초, Fan 공기 냉각 58초로 하였다. 이 조건으로 ΔT_j

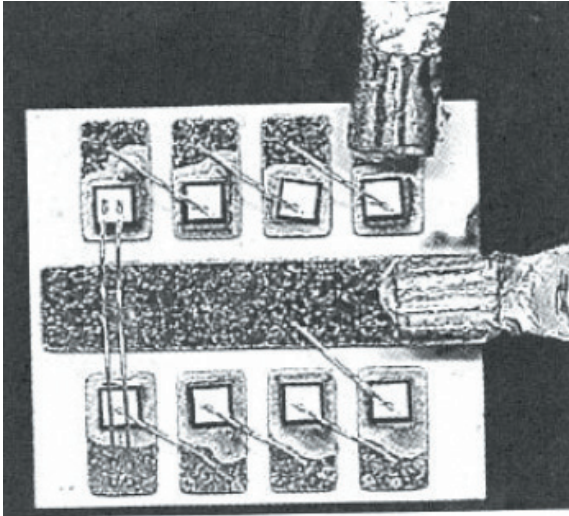


그림 6 Power cycle 실험의 Sample 사진

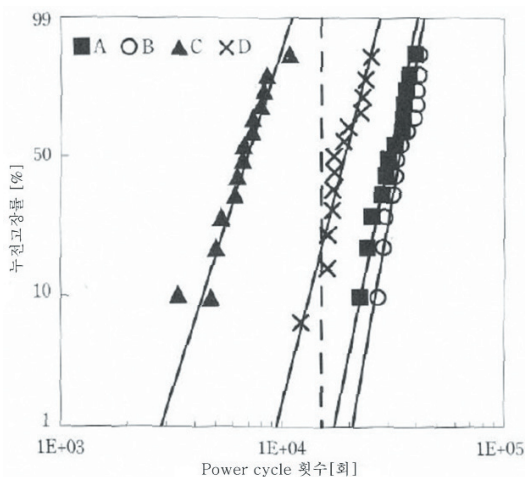


그림 7 각 시료 별 Power cycle 실험의 Weibull plot

= 170°C (30°C~200°C)를 확인하였다. 또한 Power Cycle 시험 결과를 그림 7에 나타내었다. 모든 재질에 있어서, 고장 Mode는 Chip과 Wire의 접합 경계면은 Open이었다. 이는 Silicon 반도체에서의 Power Cycle 시험에서 일반적인 경향이다. 냉열 시험과 같이 전체가 같은 온도가 되는 것이 아니라, 급격히 고온이 된 Chip으로부터 전달되는 과도적인 온도 분포로 발생하는 응력이 원인이 된다. 참고문헌[6]에 의하면, 산업용 Si-IGBT에 요구되는 Power Cycle 보증횟수는 15000회로 되어 있고, 이 목표를 만족하는, Wire 재질은 A와 B였다. Power Cycle 시험에 있어서도 부드러운 재료 쪽이 수명이 긴 경향을 알 수 있었다.

6. 결 론

SiC 고온 동작을 보증하기 위하여 Al Wire의 -40°C~250°C의 신뢰성 검토를 하였다. Wire Loop 부분이 부드러운 재료를 사용함에 따라, 접합 경계면으로의 응력 집중을 막을 수 있지만, 고온 상태에서의 Pull 강도도 고려한 경우, 어느 정도의 단단함도 필요함을 알 수 있었다. 이에 따라 적절한 재료 강도 및 재료 강도 이외의 검토가 필요하다. 향후 A보다도 뛰어난 신뢰성을 가진 Wire재질 및 접합 방법을 검토해 나아간다.

참고문헌

- [1] 「低炭素社会を実現する次世代パワーエレクトロニクスプロジェクト」
基本計画 : <http://www.nedo.go.jp/content/100084462.pdf>(2013년9월11日参照)
- [2] 佐藤伸二、松井建平、関子祐輔、谷本智、村上善則 : 「SiCを用いた高電密度3相インバータの開発」サンケン技報、vol.43、p21-24、Nov.2011
- [3] STANIMOTO, K, MATSUI, Y, ZUSHI, S, SATO, Y, MURAKAMI and T, YAMADA : Reliability Assessment of Pb-free Solder SiC Die Attachment for SiC Power Applications Operated at Higher Junction Temperature Proceeding of Mate 2012 (2012), p107-112
- [4] 谷澤秀和、谷本智、渡辺衣世、佐藤伸二、松井建平、村上善則、佐々木健介 : 「200°C以上でのSiC 駆動を想定したAl ワ이어ボンディング信頼性」スマートプロセス学会誌、第2巻 第4号 p170-177(2013年7月)
- [5] N. Ono, R. Nowak, S. Miura: Effect of deformation temperature on Hall-Petch relationship registered for polycrystalline magnesium, ELSEVIER Materials volume 58, Issues 1-2, Jan 2004, p39-43
- [6] 西浦彰、征矢野伸、両角朗 : 「ハイブリッド車専用IGBTモジュール」富士時報、79-5(2006), p6-9