

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15046

研究課題名（和文）低温低加圧大面積超耐熱実装技術の開発

研究課題名（英文）Development of low temperature low pressure large area heat resistant bonding technology

研究代表者

陳 伝とう（Chen, Chuantong）

大阪大学・産業科学研究所・特任准教授（常勤）

研究者番号：50791703

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：自動車用インバータ装置をはじめとする高温環境で使用される電子機器では、さらに小型化省エネルギー化の進展に伴い、SiC等半導体チップの大面積接合技術が必要となる。250℃を超える高温領域温度範囲で動作を保证するために、耐熱性と放熱性を兼ね備えた実装材料の革新が必要になる。本研究では最高250℃までの動作を保证するSiCダイアタッチのための安価なCuまたはAlシートで大面積接合技術を開発した。特にAl張り基板はAl材のソフトさから応力緩和能力に優れるので有力であるし、中間層としても応力緩和の効果が見られた。Alシートを利用するモジュール構造の設計および応用にも大きく期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本提案の直接的成果は、先進半導体を多く用いる領域でニーズが高まっている高温環境下（250℃以上）で動作可能な高温ワイドバンドギャップ（WBG）高温WBG半導体素子実装材料として、焼結材料のコストを削減すると同時に参加問題を解決し、関連するプロセスにもイノベーションを波及させることが可能であることが強みである。半導体材料としての焼結材料のイノベーションは、世界が求めるパワーモジュール実現のコア技術となるため、豊富な展開可能性を秘めていると考えられる。また、本技術が実現・展開することによるモジュールの電力削減などのアウトカムは、確実にSDGs項目への貢献に繋がる。

研究成果の概要（英文）：Electronic devices used in high-temperature environments, such as automotive inverters, require large-area bonding technology for semiconductor chips such as SiC as they become more compact and energy-saving. In order to guarantee operation in the high-temperature region temperature range exceeding 250℃, it is necessary to innovate mounting materials that combine heat resistance and heat dissipation. In this research, we developed a large area bonding technology with inexpensive Cu or Al sheets for SiC die attach that guarantees operation up to 250℃. A large area bonding of 10 mm square SiC has a bonding strength of 31.5 MPa. It proved to be highly reliable and superior to other die attach joints. Albonded substrates are powerful because they are excellent in stress relaxation ability due to the softness of Al material, and thus they are also expected to have a great stress-relaxation effect as an intermediate layer.

研究分野：電子デバイスおよび電子機器関連

キーワード：アルミシート接合 パワーモジュール パワー半導体 高温信頼性

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

SiC (炭化ケイ素) は、電子・電力・情報通信・車載・電鉄など全ての機器で画期的な省エネルギーを実現する新世代パワー半導体の切り札であり、エネルギー問題の解決と半導体産業の活性化に大きく貢献すると期待されている。一方、電力変換モジュール(図1)の大幅な小型化及び大電力変換においては、著しい電力密度の上昇が生じる。その温度はジャンクションで 200 を超えるが、SiC 自体は耐熱性の問題がないもののモジュールを構成する各部位の耐熱性は 175 を下回るのが現状である。従来の Si デバイスの動作温度である 150 に比べて大幅に高い極限環境の動作温度(~250) で信頼性を確保する必要がある次世代超耐熱実装において、新たな接合材料への開発が期待される。特に、耐熱・放熱パフォーマンスが優れ、高電圧・大電流電力変換できる大面積チップ($\geq 10 \times 10 \text{mm}^2$)への接合材料の開発要求が高まってきている。

近年、検討が進められている高温実装に対応可能なデバイスの接合技術は大きく分けて 3 種類あり、高融点鉛フリーはんだ接合、金属間化合物(IMC)接合、Ag または Cu ナノ粒子を用いた焼結接合である。これらの中でも、Ag 粒子を用いたペーストの焼結接合は、300 以下の低温接合性と 250 以上の高耐熱性が両立できる。しかしながら、これらの元素の内、銀は高価で、大面積チップへの接合においては、Ag ペースト内部では空気の供給が不足し、有機物などが十分に燃えることができず、焼結結合が不完全となり接合強度はチップの面積と幾何学的に減少する。銅粒子の焼結接合については、Ag より安価であり、被接合部材である Cu 回路と同元素であることを特長とするが、課題として自身の酸化のため接合条件が厳しくなる。

SiC ダイと金属張りセラミックス基板の間の熱膨張差のため、デバイスが高温で動作する際に SiC や接合層へ厳しい応力が発生する。この熱応力がパワー半導体の寿命に大きな影響を与えるため、特に SiC ダイへ掛かる応力を抑制するための柔らかい中間接合層が必要である。現在、熱応力緩和構造を取り入れた DBC と DBA の Cu, Al 張り基板は材質の柔軟さから応力緩和能力に優れるので有力であることがすでに証明されるため、Cu, Al シートを中心接合層と、さらに応力緩和の効果があると考えられる。

2. 研究の目的

本研究開発では、SiC パワー半導体の最大の性能を引き出すために Cu または Al シートで新たに接合技術の基礎原理に基づき材料とプロセスを最適化し、実用化を目指す。熱応力緩和構造を取り入れた DBC と DBA を主体とする、SiC ダイと基板間の大きな熱膨張差を緩和するため、Cu または Al シートで応力緩和接合構造を開発する。新たな Cu/Al 接合技術に対して、高度なナノレベルの観察技術・非破壊検査技術・シミュレーション技術の学術基盤を基に、接合構造の高い信頼性と優位性を証明する。

3. 研究の方法

Cu または Al シート両面に Ti/Ag をスパッタし、片面に Ti/Ag をスパッタした DBC/DBA と SiC ダイの間にこのシートを挟んで 300 までの低温、低加圧で接合することで接合構造を形成する。Ti/Ag をスパッタされた SiC ダイ、シート両面および基板表面は加熱する際に表面圧縮応力を発生し、Ag ヒックロクの成長により、低温低加圧でも界面が接合させる。

4. 研究成果

図1に示すように Al シート両面に Ti(0.1 μm)/Ag (1 μm)を順番にスパッタし、片面に Ti/Ag をスパッタした DBA と SiC ダイの間にこの Al シートを挟んで 200 から 350 までの温度範囲で接合を実施し、せん断強度を測定した。3x3 mm² SiC ダイで 300 の接合の場合には、33.6MPa の接合強度を得られた。また、XRD で Al シートに Ti/Ag をスパッタする前後の表面応力を分析し、スパッタ後の Al シート表面に残留応力は 166 MPa であったことが分かった。加熱接合する際に表面残留応力を解除し、シート表面に Ag ヒックの成長により、強固な界面が接合できるとのメカニズムも解明した。本研究で得られた結果は、Al シートダイアタッチ接合が WBG 電子デバイスの新たな接合材料及び技術として良好なものであることを示している。また、Al 張り基板は Al 材のソフトさから応力緩和能力に優れるので有力であるし、中間層としても応力緩和の効果が大きく期待でき、Al シートを利用するモジュール構造の設計および応用にも大きく期待される。

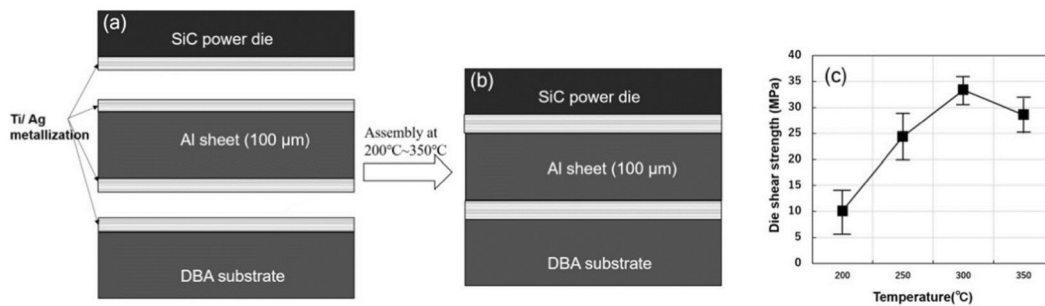


図1. 金属シート接合技術のイメージ図と異なる焼結温度で接合構造のせん断強度

また、図2に示すようにスパッタ Ag と Ag 界面は広い面積でもほぼ隙間なく接合でき、300 の接合では、界面接合率が 90%以上であった。接合構造の高温信頼性も評価し、高温 250 500 時間に放置しても、接合強度は 32.1MPa に維持した。走査型電子顕微鏡(SEM)の接合構造の断面観察により、Al シートでの接合構造は高温 250 500 時間に放置しても、金属間の拡散が見えなく、金属間化合物も生じなかった。250 までの厳しい温度試験に耐えることを示した。また、Al シートで 5mm 角の SiC ダイの大面積接合を実施した。300 、1MPa の接合条件で、平均 31.5MPa の接合強度を得られ、接合強度は接合面積にほぼ依存しないことが分かった。この技術でもっと大きな面積の接合にも利用できると考えられる。5mm 角の SiC 接合構造の高温 250 放置信頼性試験を実施し、信頼性について評価した。500 時間放置しても接合強度が 30.1MPa に維持したため、大面積接合でも高い高温信頼性を示された。

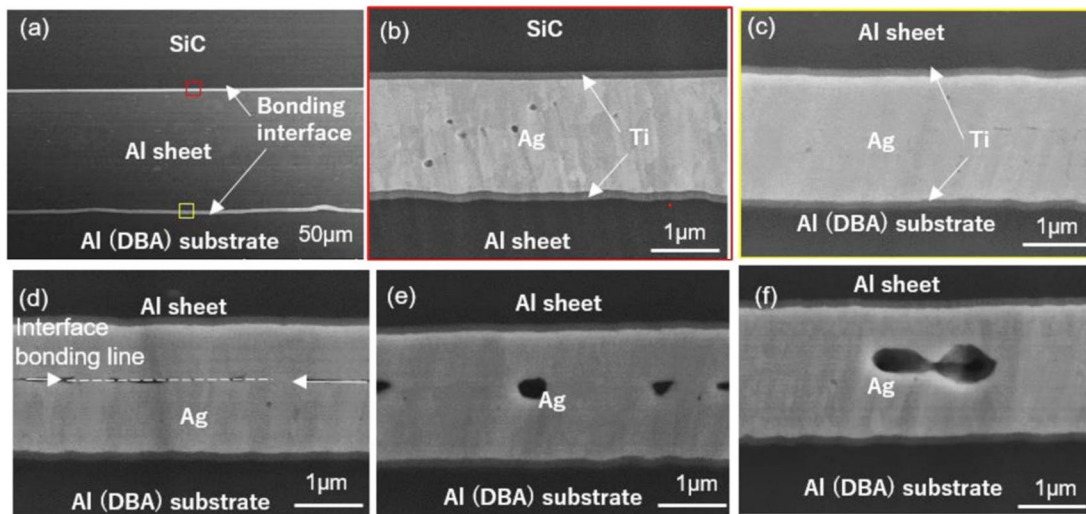


図2 . Al シート接合界面構造とそれぞれ接合界面と高温放置後の接合構造と界面の変化

さらに、Al シートより熱伝導性と電気特性は優れる Cu シートをダイアタッチ接合材料として、SiC と DBC 基板のダイアタッチ接合実験を実施した。Cu シート両面に Ag だけスパッタ成膜し、また SiC と DBC 基板の接合面に Ag だけスパッタ成膜し、Cu シートと Ag スパッタ膜を加熱する際に Cu-Ag 界面を合金化することで、界面接合させるとの新たな接合技術を提案した。接合面に Ti/Ag をスパッタした DBA と SiC の間に Cu シートを挟んで 200 から 350 までの温度範囲で接合を実施し、Cu シート両面にスパッタ Ti と Ag の膜厚はパワーモジュール接合構造の接合強度に与える影響を調査した。結果により接合構造の接合強度は Cu-Ag 界面合金化程度に影響を受け、接合温度、特に接合の雰囲気大きく依存することが分かった。

今回新たに提案した Cu または Al シート接合技術は、耐熱と放熱に優れるだけでなくコストパフォーマンスの魅力を有することから、SiC の能力を最大限に生かすことが可能である。小型・軽量化・高出力モータ電源制御用インバータに向けて、Cu または Al シートで大面積チップへの接合技術と最適化プロセス開発もできた。今回パワー半導体が必要とする新たな実装に着手し、世界の他のグループに先駆けて、開発を進める基本的なアプローチが素材の各種現象の根本を理解した材料設計であり、特に、大面積接合技術の開発においては、世界の他のグループより一段階早い先進性を有すると考えられる。また、これらの開発に於いては、日本の素材メーカーから提供される実装技術の選択肢が豊富になって、大きなインパクトがあると認識している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Chuantong Chen, Hao Zhang, Jinting Jiu, Xu Long, Katsuaki Suganuma	4. 巻 31
2. 論文標題 Thermal fatigue behaviors of SiC power module by Ag sinter joining under harsh thermal shock test	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 China welding	6. 最初と最後の頁 15-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.12073/j.cw.20211130001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Chuantong Chen, Katsuaki Suganuma	4. 巻 108
2. 論文標題 Fatigue-Resistant of Ag Sinter Joining on Ni-P/Pd/Au Finished DBA Substrate with Thick Ni-P Layer During Thermal Shock Test	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ECS Transactions	6. 最初と最後の頁 21-26
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chuantong Chen, Katsuaki Suganuma	4. 巻 10
2. 論文標題 Low temperature SiC die-attach bonding technology by hillocks generation on Al sheet surface with stress self-generation and self-release	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific reports	6. 最初と最後の頁 9042
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-66069-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Chuantong Chen, Zheng Zhang, Yang Liu, Katsuaki Suganuma
2. 発表標題 Micro-flake Ag paste sinter joining on bare DBA substrate for high temperature SiC power modules
3. 学会等名 2022 International Conference on Electronics Packaging (ICEP) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 陳 伝とう;・菅原 徹・菅沼 克昭
2. 発表標題 SiCパワーモジュール向けの新型アルミ膜ダイアタッチ接合技術
3. 学会等名 第 33 回 (2020 年) セラミックス秋季シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chuantong Chen, Katsuaki Suganuma
2. 発表標題 Novel approach of die attach technology for SiC power module by pure Al thin film bonding
3. 学会等名 2021 International Conference on Electronics Packaging (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Chuantong Chen, Dongjin Kim, Zheng Zhang, Katsuaki Suganuma
2. 発表標題 Die attach module by Cu sheet interconnect for high temperature applications
3. 学会等名 20th International Conference on Electronic Materials and Packaging (EMAP) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Chuantong Chen, Katsuaki Suganuma	4. 発行年 2022年
2. 出版社 Inst of Engineering & Technology	5. 総ページ数 300
3. 書名 Sic Power Module Design: Performance, Robustness and Reliability	

〔産業財産権〕

〔その他〕

Chuantong CHEN
<https://researchmap.jp/chenchuantong>
大阪大学フレキシブル3D実装協働研究所
<https://www.f3d.sanken.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------