

次世代パワー半導体に向けた高信頼性、材料コスト削減を実現する銀とシリコンを用いた新複合接合材の開発

産業科学研究所 フレキシブル3D 実装協働研究所

特任准教授(常勤) 陳 伝彤

<https://researchmap.jp/chenchuantong>

特任教授 菅沼 克昭

<https://researchmap.jp/ksuganuma>

研究の概要

脱炭素化の社会において、EV（電気自動車）の普及に欠かせないのが、「SiC（炭化ケイ素）パワー半導体」である。この半導体により、電力変換ロスを大幅に低減し、機器の小型化や、CO₂排出量削減に大きく貢献することができるが、一方で、250℃を超える環境下では、安定的な動作を保证するための耐熱・放熱技術や、厳しい使用環境での接合信頼性を維持する材料の開発が遅れていた。高温動作の課題に対しては銀系ナノ粒子（粒径<100 nm）焼結接合技術の活用が主に検討されているが、それも厳しい熱衝撃試験（-50~250℃）では、銀接合層と半導体デバイス接合界面（境界）に、亀裂の発生および構造破壊の問題があった。今回の新接合材においては、銀とシリコンの接合界面におけるシリコン表面に酸化膜ができることで、低温界面が確実に形成され、低い熱膨張係数を実現し（Figure 1）、またシリコンの添加量を調整することにより熱膨張係数の制御が可能となった。

研究の背景と結果

脱炭素化の社会の実現に向け、次世代のパワー半導体である SiC や GaN などワイドバンドギャップ（WBG）・パワー半導体を用いたパワーエレクトロニクス技術による電力変換器の高出力密度化、小型化と電力損失の低減の実現が期待されている。今後 SiC パワー半導体の市場拡大には、SiC パワーモジュールのさらなる小型化と大電力変換が必要となる。2030年に電力密度が現状の~100W/cm²から300W/cm²に、また Si では到達できない300℃近い極限環境動作が望まれる。WBG 半導体パッケージ中の半導体/樹脂/金属/セラミックスなど異種材料界面は、それぞれの物性の違いにより発生する厳しい劣化と損傷の蓄積に曝される。このため、熱的、機械的、電気的に最適化された材料開発と信頼性評価が必要不可欠である。

現在、高温動作に対しては銀（Ag）系ナノ粒子（粒径<100 nm）焼結接合技術の活用が主に検討されている。しかしながら、SiC パワー半導体の熱膨張係数は $3.1 \times 10^{-6} / \text{K}$ であり、現在の Ag ナノ粒子焼結層の熱膨張係数は約 $18 \sim 22 \times 10^{-6} / \text{K}$ であるため、厳しい熱サイクル条件（-50~250℃）では、熱膨張の差から生じる応力により銀接合層と半導体デバイス接合界面にき裂の発生および構造破壊との信頼性の問題が報告されている。接合層と SiC 半導体の熱膨張係数の違いによって生じる熱応力の発生を最小限に抑えるため、低熱膨張係数の接合材料の開発が重要となる。

今回(株)ダイセルとの共同研究で、低温・無加圧条件下で、銀とシリコンの接合界面におけるシリコン表面に酸化膜ができることで、低温界面が確実に形成され、低い熱膨張係数の接合材料を実現した。Si 添加量の増加に伴い、熱サイクル中の Ag 焼結接合部の劣化を顕著に抑制する効果が認められた。すなわち、平均クラック幅は明らかに狭くなり、基板クラックと界面剥離は完全に抑制された。このような微細構造の改善により、Ag@Si20% 接合部は、純 Ag 接合部の2倍のせん断強度保持率を示すなど、機械的信頼性が大幅に向上した（Figure 1）。Finite-element model (FEM) でのシミュレーション結果は、Si 添加がモジュール内で熱応力を均一化または低減するように積極的に調整していることを示した（Figure 2）。これらの要因が相まって、熱サイクル応力に対する材料の耐性を高めることに寄与している。

研究の意義と将来展望

今回新開発した SiC パワー半導体と DBC 基板（セラミック基板）を銀とシリコンの合金焼結材料で接合する構造体は、回路基板の熱膨張を低減させ、厳しい使用環境においても亀裂や構造破壊が起こりにくく、優れた接合信頼性が得られる。さらに、シリコンを加えることで、従来の銀のみの接合材よりも基板製造コストの削減につなげることができる。

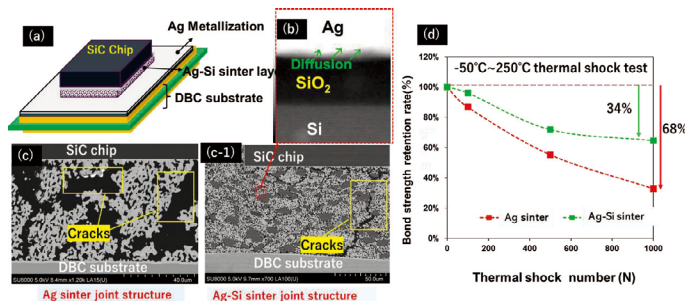


Figure1. (a) The die-attached structure consisting of SiC chip, Ag sinter-based paste and Ag metallized DBC substrate. (b) STEM observation of the interface between Ag and Si. (c) Microstructure in the cross-sections of Ag100% joint structure after thermal cycling test. (c-1) Microstructure in the cross-sections of Ag@Si20% joint structure after thermal cycling test. (d) Shear strength retention rate of Ag sinter joint and Ag@Si20% sinter joint structure during thermal cycling.

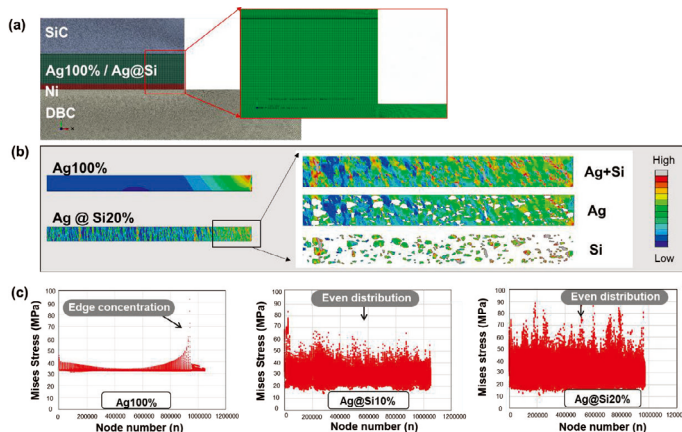


Figure 2. (a) The Finite-element model corresponding to the die-attached structure consisting of SiC chip, Ag sinter-based paste and EN-ELNPA metallized DBC substrate. (b) In the case of Ag@Si treated as a heterogeneous material, Mises stress distribution in Ag100% and Ag@Si20% joined layers after thermal cycling test. (c) The corresponding stress intensity across nodes within the Ag100%, Ag@Si10% and Ag@Si20% joint structures.

特 許 WO/2024/219382、PCT/JP2024/031626

論 文 Liu, Yang; Chen, Chuantong et al. Development of Ag@Si composite sinter joining with ultra-high resistance to thermal shock test for SiC power device: Experiment validation and numerical simulation. Composites Part B: Engineering. 2024, 281, 111519. doi: 10.1016/j.compositesb.2024.111519

参考URL <https://www.sanken.osaka-u.ac.jp/achievement/release/240717.html>

キーワード パワーデバイス、銀焼結接合、EV/HEV、宇宙航空、5G/6G 通信