

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成27年度研究進捗評価用〕

平成24年度採択分
平成27年3月20日現在

極限環境パワー半導体の異相界面科学

Science of Hetero-Interface of Advanced Power Devices
in Extreme Environments

課題番号：24226017

菅沼 克昭 (SUGANUMA KATSUAKI)

大阪大学・産業科学研究所・教授



研究の概要

SiC などワイドバンドギャップ・パワー半導体の、極限環境デバイス動作を実現するため、幅広い視点から材料及び界面設計指針の確立に取り組んでいる。独自開発の Ag 粒子焼結接合法で無加圧・低温・大気中で接合するメカニズムを解明し、これに基づく新たなストレスマイグレーション接合法を開発し、ナノレベル界面現象解明と新規実装領域を開拓している。

研究分野：工学

キーワード：電気接続・配線、パワー半導体、異相界面

1. 研究開始当初の背景

SiC などワイドバンドギャップ・パワー半導体の実現には、従来技術では到達できない200°C以上の極限環境動作が望まれ、大電流負荷時の異相界面における熱的、機械的、電気的に最適化された材料選択と界面設計指針が必要不可欠である。当初は、従来の鉛フリーはんだ技術の延長技術かナノ粒子ペーストを用いた高圧固相接合の利用が考えられていたが、特性、プロセス、経済性の全ての点で現実解にはならなかった。

2. 研究の目的

提案者が有するセラミック／金属界面設計と鉛フリーはんだ材料の基礎的知見に基づき、独自開発の純 Zn はんだ、Ag 粒子焼結接合による超耐熱ダイアタッチを基礎とし、ナノレベルの解析、シミュレーションを生かし、従来技術に替わる新たな、材料開発、プロセス設計の指針を獲得し、極限環境で実用出来る異相界面設計指針を確立する。

3. 研究の方法

独自開発の純 Zn はんだと Ag 粒子焼結接合を基本とし、以下の4研究項目について研究を推進する。

- ①SiC ダイと絶縁基材の応力緩和放熱接続材料・構造設計指針確立する。
- ②300°C極限条件の界面構造安定化を行う。
- ③大電流負荷 EM 現象を装置開発から取り組み、評価技術開発、新材料提案を行う。
- ④極限温度サイクルにおける異相界面現象を解明し、界面高性能化の指針を獲得する。

4. これまでの成果

Ag 粒子焼結接合法の材料、プロセスの2面から、詳細なナノレベルの接合や劣化メカニズム解明と課題の抽出に取り組み、さらに、新たな材料、プロセスの提案に結びつけている。

まず、Ag 焼結接合における学術的に未解明なメカニズムが単純な酸化還元反応ではなく、Ag 表面で酸素との酸化還元反応により Ag ナノ粒子を形成しながら一種のナノ粒子表面拡散が生じ、Ag 粒子間ネッキングを成長させている可能性を見出した (図1)。

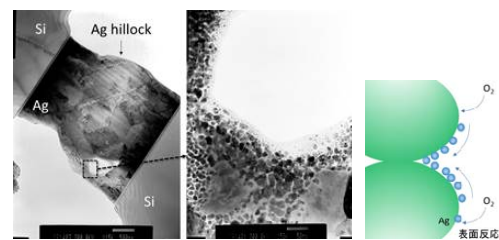


図1 250°Cで1時間処理した Ag 薄膜 SM 接合の TEM 微細組織と低温焼結を実現する仮説。

発見したこのメカニズムに基づき、新たな粒径2分布を持つサブミクロン Ag 粒子のペーストを開発した。接合には、Ag 粒子のパッキングが影響するが、新規な2段ポリオール法を開発し、粒度分布を制御した粒子合成に成功した。第一段合成の低温でシードとなる100~200nm 粒子を形成し、第二段目で望の500nm 以上の大きさに成長させる簡便な合成法である。この新材料を用いることで、200°C

においても $5 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}$ の低抵抗配線と高強度接合を実現することを明らかにした。

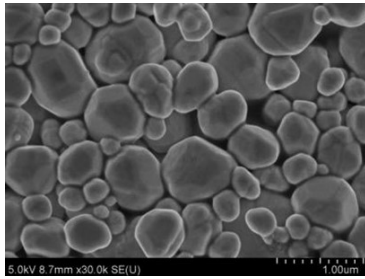


図2 2段ポリオール法で合成したサブミクロン Ag ハイブリッドペースト。

さらには、画期的なストレス・マイグレーション (SM) Ag 薄膜接合を開発した。従来、金属膜表面のヒロックの形成は、配線の短絡を生じる悪者であったが、本研究で Ag 薄膜の表面にヒロックが多数形成される条件を明らかにし、わずか $1 \mu\text{m}$ 厚の Ag 薄膜を形成した半導体を 250°C の低温、無加圧、大気中で接合すると、図3に示すように、無欠陥の界面形成が達成できた。Ag は、電気抵抗、熱伝導の2点で金属の中で最高の性能を有し、技術として従来の全てのダイアタッチ技術を凌駕する可能性を秘め、学术界だけでなく世界の産業界が注目している。このメカニズムを他の金属へ展開するプロセス、反応条件探索を継続しており、これらの発見は、学術的に金属の新たな焼結現象メカニズム提案に結びつくものと期待している。

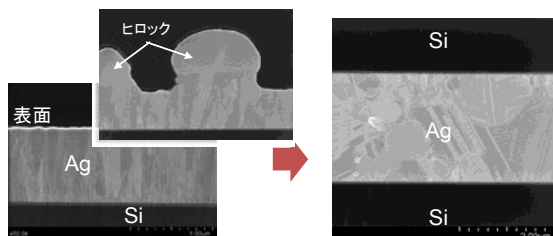


図3 Si 上の $1 \mu\text{m}$ 厚 Ag 薄膜から 250°C で形成するヒロックとダイアタッチ界面 SEM 像。

また、配線やダイアタッチ温度の低温化では、加熱無しで画期的な光焼結法を提案し、強いフラッシュ光で透明な SiC を通して接合層のみを加熱し、約 1 秒でダイアタッチが可能なることを示した。

他に、大電流負荷エレクトロマイグレーション (EM) において目標である新規な自動計測可能な EM 評価装置を完成した。これまで、パワー半導体実装部位評価に利用可能な大電力 EM 評価技術は世界にも無く、本装置がモデルケースになると期待される。WBG パワー半導体の実用化に向け 250°C を越える厳しい温度サイクルに耐える応力緩和構造を提案し、協力企業で検証を予定している。

5. 今後の計画

本研究は、当初の計画を越えて複数の新技術開発へ繋がる成果を挙げている。学術的には、新たな金属粒子の低温焼結メカニズム解明に向けシミュレーションと高分解能観察を主体に進める。新開発の 2 粒度分布 Ag ハイブリッド粒子焼結接合では、焼結温度低温化の限界探索、特性評価限界を明らかにする。SM 接合に於いては、低温におけるナノレベル界面形成メカニズムを継続し、さらに、Ag の他の材料への適用の可能性を探索する。これらの新技術は積極的に外部機関との共同作業により現実的な実用の可能性を探索する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. Ultra thermal stability of LED die-attach achieved by pressureless Ag stress-migration bonding at low temperature, T. Kunimune, M. Kuramoto, S. Ogawa, T. Sugahara, S. Nagao, K. Sugaunuma, *Acta Materialia*, 89(2015), 133-140.
2. Surface modification of Cu flakes through Ag precipitation for low-temperature pressureless sintering bonding, S.W. Park, S. Nagao, K. Sugaunuma, *Materials Letters*, (2015), in press.
3. Quasi-transient liquid-phase bonding by eutectic reaction of Sn-plated Zn on Cu substrate for high-temperature die attachment, S.W. Park, S. Nagao, K. Sugaunuma, *J. Alloys Compd.*, (2015), in press.
4. Mechanical stabilities of ultrasonic Al ribbon bonding on electroless nickel immersion gold finished Cu substrates, S. Park, S. Nagao, T. Sugahara, K. Sugaunuma, *JJAP*, 53(2014), 04EP06.
5. Hillock growth dynamics for Ag stress migration bonding, S. Nagao, C. Oh, T. Sugahara, K. Sugaunuma, *Materials Letters*, 137(2014), 170-173.
6. Pressureless wafer bonding by turning hillocks into abnormal grain growths in Ag films, C. Oh, S. Nagao, T. Kunimune, K. Sugaunuma, *Appl. Phys. Letters*, 104(2014), 161603.
7. High-strength Si wafer bonding by self-regulated eutectic reaction with pure Zn, S.W. Park, T. Sugahara, S. Nagao, K. Sugaunuma, *Scripta Mater.*, 68[8](2013), 591-594.
8. Low-temperature and low-pressure die bonding using thin Ag-flake and Ag-particle pastes for power devices, S. Sakamoto, K. Sugaunuma, *IEEE Trans. CPMT*, 3[6](2013), 923-929.
9. Low-temperature pressure-less silver direct bonding, T. Kunimune, M. Kuramoto, S. Ogawa, M. Niwa, M. Nogi, K. Sugaunuma, *IEEE Trans. CPMT*, 3[3](2013), 363-369.
10. Enhanced ductility and oxidation resistance of Zn through the addition of minor elements for use in wide-gap semiconductor die-bonding materials, S.W. Park, T. Sugahara, K.S. Kim, K. Sugaunuma, *J. Alloys Compd.* 542[25](2012), 236-240.
11. 著書: SiC/GaN パワー半導体の実装と信頼性評価技術、菅沼克昭編著、日刊工業新聞社、(2014.12).
12. 受賞: エレクトロニクス実装学会賞 (平成 26 年 5 月)、菅沼克昭

ホームページ等:

研究室 HP: <http://www.eco.sanken.osaka-u.ac.jp/>

WBG コンソーシアム HP: <http://wbg-i.jp/>