

パワー半導体の高温動作を可能にする ダイボンド材料及び焼結接合技術

Die-Bonding Material and Sintering Joining Technology for Power Semiconductors
Allowing Operation at High Temperatures

平塚 大祐 佐々木 陽光 井口 知洋
 ■HIRATSUKA Daisuke ■SASAKI Akihiro ■IGUCHI Tomohiro

パワー半導体は家電機器から、車載機器、送配電システムに至るまで幅広く活用されている。従来適用されてきたSi（シリコン）半導体に比べて、より高温での動作が可能なSiC（シリコンカーバイド）半導体の適用により、パワー半導体の動作温度は今後200℃以上に高温化する見込みである。そのため、半導体チップを基板に接合するダイボンド部（はんだなど）の耐熱性が問題になる。

そこで東芝は、200℃以上の高温に耐え、放熱性に優れたダイボンド材料の一つとして、銀（Ag）ナノ粒子に着目した。現行のAgナノ粒子接合部の脆化（ぜいか）メカニズムを明確にし、脆化を防ぎ、信頼性を更に向上させる金属塩ナノ析出（MS²NP：Metal Salt Solution-Nano Precipitation）法を開発した。

Power semiconductors are widely used in various fields including household appliances, industrial motors, vehicles, and energy transmission and distribution systems. With their operating temperatures showing a rising tendency due to the increasing demand for higher efficiency as well as the application of silicon carbide (SiC) semiconductors, the junction temperature of such devices is expected to exceed 200°C. It is therefore necessary to develop a heat-resistant die-bonding material to bond chips to substrates.

To address this issue, Toshiba has focused on a silver (Ag) nanoparticle material as a die-bonding material that possesses superior heat radiation characteristics and can withstand high temperatures exceeding 200°C. In order to realize a die-bonding material with higher reliability than existing materials, we have also developed a metal salt solution-nanoprecipitation (MS²NP) method as a countermeasure against the degradation of die attachments consisting of sintered Ag nanoparticles.

1 まえがき

エアコンや、エレベーター、ハイブリッド自動車、電気自動車などでは、電源電圧と駆動電圧が異なることが多く、インバータやコンバータなどの電力変換装置が搭載されている。これらの中でパワー半導体を用いて電力を変換する機器をパワーモジュールと呼ぶ。一般に、パワー半導体は絶縁基板にはんだで接合されている（図1）。これらのパワー半導体は、10mm角程度の小さなものでもチップ1枚あたりに50Aから家庭数世帯分に相当する数百A程度の電流が流れるため、動作中はチップから多くの熱が発生する。現行のSiパワー半導体の動作温度の上限は175℃程度である。この温度を超えないようにするため、チップから発生した熱はチップ裏面から、はんだで接合した基板を経由して、ヒートシンクを通じて速やかに排出される必要がある。したがってパワー半導体チップと絶縁基板を接合するダイボンド部には、熱伝導率の高い材料を用いることが望ましい。

近年、200℃以上の高温動作が可能な特長を持ったSiCパワー半導体の開発と製品化が進められている。しかし、現在ダイボンド部に多く用いられているすず-銀（Sn-Ag）系やすず-銅（Sn-Cu）系の鉛（Pb）フリーはんだは220℃近傍に融点を持つため、SiCパワー半導体の特長を生かすことができない。

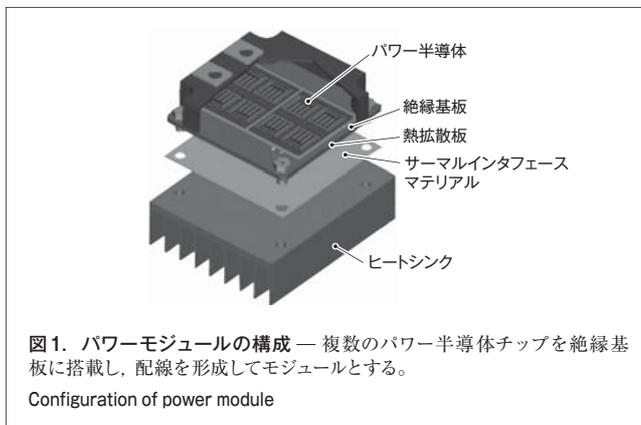


図1. パワーモジュールの構成 — 複数のパワー半導体チップを絶縁基板に搭載し、配線を形成してモジュールとする。
Configuration of power module

また、Pbを多く含むはんだは290℃以上の高い融点を持つが、環境への影響を考慮した場合、適用は避けるべきである。更に、周辺部材の耐熱性や冷却時の残留応力の観点から、接合温度は300℃以下であることが望ましい。したがって、耐熱性が高く、低温で接合可能な高温対応ダイボンド材料の開発と実用化が求められている。

2 高温対応ダイボンド材料及び接合技術

これまでに報告されているダイボンド材料の、融点と接合プ

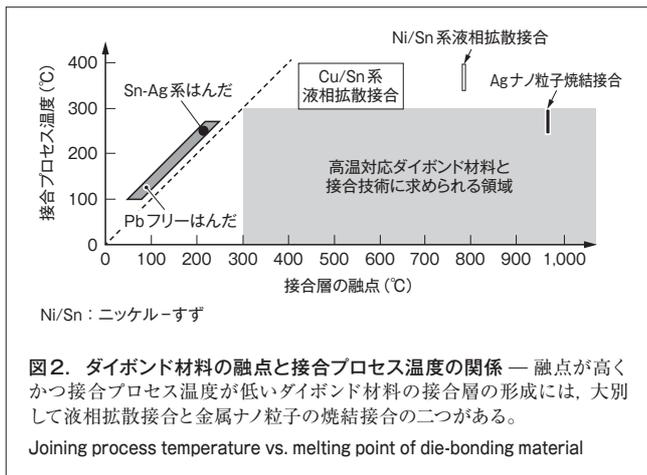


表1. ダイボンド材料の材料特性

Properties of die-bonding materials for power modules operating at high temperatures

	Ag ナノ粒子	Cu/Sn 拡散	Ni/Sn 拡散	Au-Sn 共晶	Sn96.5 Ag3Cu0.5
接合層の融点 (°C)	962	415~676	790	280	217~228
接合プロセス温度 (°C)	250~300	300~400	350~400	320~350	240~260
熱伝導率 (W/(m·°C))	>200	34~70	20	57	22~55

Au-Sn: 金-すず

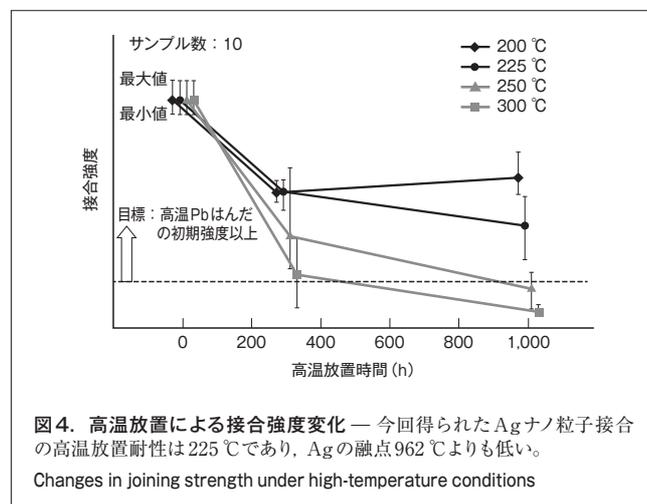
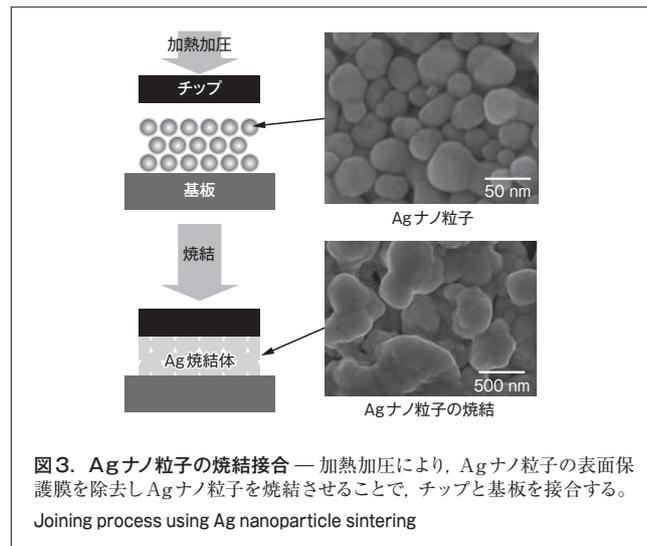
プロセス温度の関係を図2に示す。はんだ接合は、接合材であるはんだを熔融させ、被接合材との界面で金属間化合物を生成して接合する。そのため、接合プロセス温度は一般に接合層の融点よりも高くなる。

そこで、低い接合プロセス温度で高い融点を持った接合層を形成するため、液相拡散接合や金属ナノ粒子の焼結接合が提案されてきた^{(1)~(3)}。金属ナノ粒子の焼結接合では、金属をナノスケールまで微粒化することで反応性を向上させ、接合材料を融解することなく、低温で焼結させて金属から成る接合層を形成する。したがって、低い接合プロセス温度で、金属本来の高い融点を持つ接合層が得られる。

ダイボンド材料の特性を表1に示す。Agナノ粒子の熱伝導率はSn-Ag系Pbフリーはんだとして代表的なSn96.5Ag3Cu0.5に比べて4倍以上高い。以下では、このように優れた高温対応ダイボンド材料であるAgナノ粒子及びこれを用いた焼結接合技術について述べる。

3 Agナノ粒子の焼結接合とその耐熱性

Agナノ粒子の焼結接合では、保管時の凝集や焼結を防ぐため、一般に有機物から成る表面保護膜を持ったAgナノ粒子を有機溶剤に分散させたペーストをダイボンド材料として用いる。この接合技術は通常、加熱加圧により表面保護膜を除去して粒子間を接触させ、焼結により接合層を形成する(図3)。



Agナノ粒子は、金属の中でもっとも熱伝導率の高いAgを母材とするため、接合層も高い熱伝導率を持つ。

多くの学術論文では接合層の融点に主眼を置いて耐熱性を論じているが、パワーエレクトロニクス(以下、パワエレと略記)機器への適用を想定した場合、高温放置信頼性についても着目すべきである。例えば、Agの融点(962°C)よりも低い250°Cで1,000 h放置し、接合層が脆化した報告もある⁽⁴⁾。

そこで、Agナノ粒子の焼結接合の高温放置耐性を明らかにするため、大気中、200~300°C-1,000 hの条件で高温放置試験を実施した。パワー半導体チップを銅(Cu)配線に接合したサンプルを用い、試験の目標は1,000 h後の強度が高温Pbはんだの初期接合強度(16 MPa)以上であることとした。

評価の結果、250°C以上では目標を達成できず(図4)、半導体チップの動作温度が250°C以上に上昇した場合にはこの技術の適用は難しいことがわかった。したがって、接合層の耐熱性については、接合層の融点だけでなく、高温放置信頼性についても考慮するべきである。

4 脆化メカニズムの解明と高耐熱材料技術の開発

接合層の耐熱性を向上できれば、高温動作化が更に進んだ場合でも、その特長を生かした製品を創出できる。

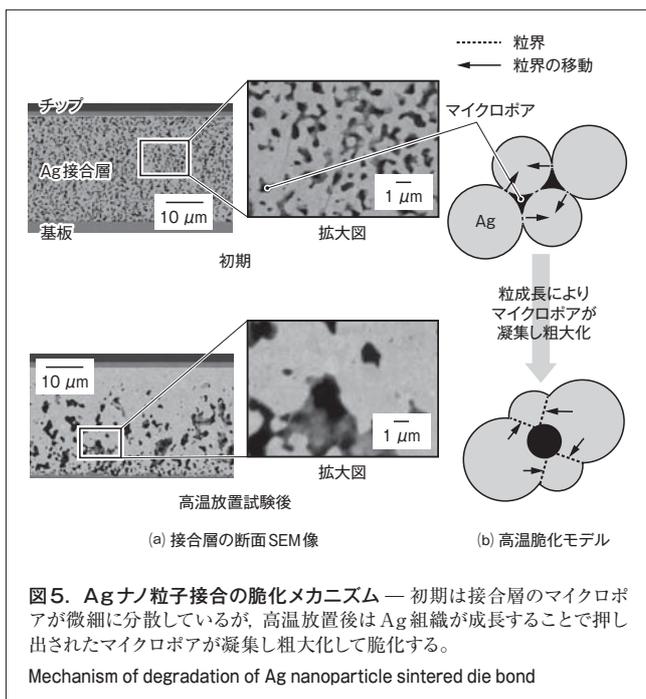
そこで、高温放置下でAgナノ粒子接合の組織が脆化するようすを走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した。その結果、接合層のマイクロポア (空隙) が粗大化することで組織が脆化することがわかった。また、Agの結晶粒の粗大化も観察された。これらの結果から、接合層の強度が高温放置で低下するメカニズムは、Agの粒成長により押し出されたマイクロポアの粗大化による組織脆化であることがわかった (図5)。

この脆化モデルによれば、Ag粒界の移動を妨げることで、高温脆化を抑制できる。一般に、粒界に母相 (この接合ではAg) 以外の成分から成る粒子 (二次相粒子) が存在すると、ピン止め効果⁽⁵⁾により粒界の移動は抑制される。このとき、二次相粒子による抑制力 σ は式(1)で表される。

$$\sigma = \frac{3f\gamma_{gb}}{2R_p} \quad (1)$$

ここで、 f は二次相粒子の体積分率、 γ_{gb} は粒界エネルギー、 R_p は二次相粒子の半径である。

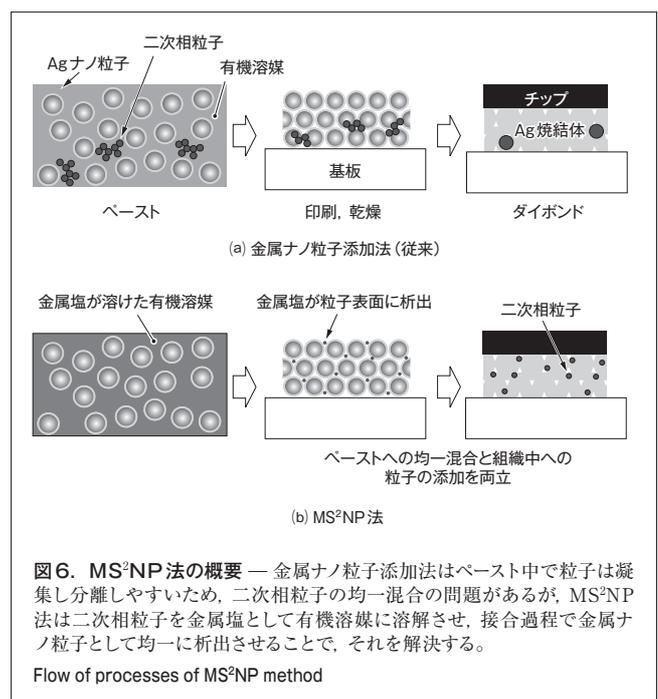
式(1)から、二次相粒子の添加量が多く、大きさが小さいほど粒界移動、すなわち組織脆化の抑制効果が高いと言える。一方、二次相粒子の添加量が多すぎると、Agの優れた熱伝導率が損なわれる可能性がある。したがって、組織脆化の抑制にはナノスケールの二次相粒子を少量、粒界に配置することが有効であると考えられる。

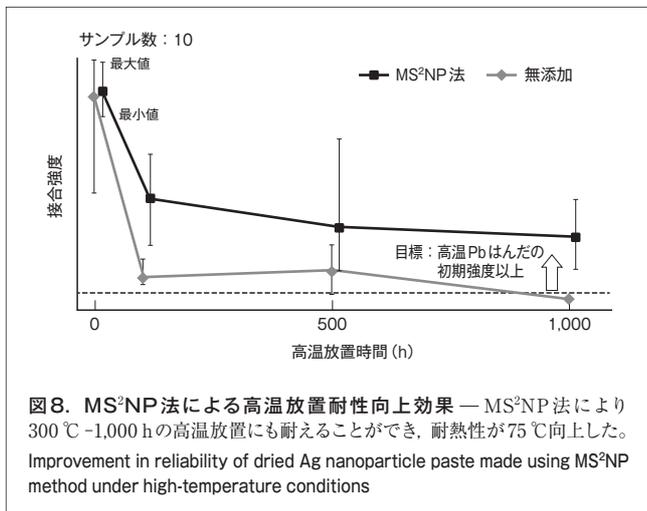
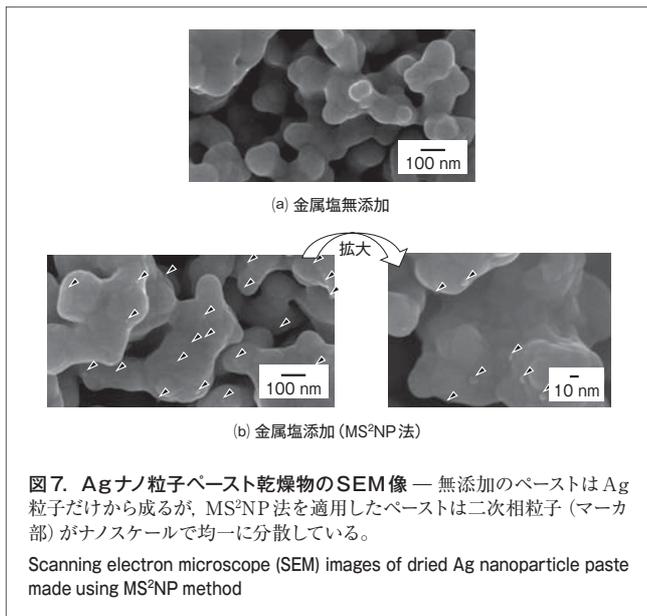


二次相粒子の添加方法も重要である。一般に、金属ナノ粒子は比表面積が大きいことと、同一の固体濃度でもペースト中の粒子間距離が小さくなることから、有機溶媒中で凝集や沈降を起こしやすい。更に、2種類以上の金属ナノ粒子が存在する系では、表面電荷や適用可能な表面保護膜及び分散剤が異なることから、均一かつ安定な分散状態を保つことはいっそう難しくなる。したがって、Agナノ粒子が高濃度に分散したペーストに対して、単純に二次相粒子を金属ナノ粒子として添加するだけでは、凝集なく均一に分散させることは難しい。

このような問題を解決する新しい材料技術として、二次相粒子を金属塩から成る前駆体として添加し、それを有機溶媒に溶解させ、接合過程で金属ナノ粒子として均一に析出させる金属塩ナノ析出 (MS²NP: Metal Salt Solution-Nano Precipitation) 法を開発した (図6)。

Agナノ粒子ペーストの乾燥物をSEMで観察することで二次相粒子の析出を検証した。その結果、金属塩を添加したペーストだけから、粒子径5~20 nm程度の二次相粒子がAg粒子表面に析出するようすが確認された (図7)。得られたペーストから得た接合層を大気中、300℃で高温放置した結果、1,000 h後の強度低下が抑制され、目標を達成できることがわかった (図8)。更に得られた接合層の初期断面を高分解能透過型電子顕微鏡 (TEM) により観察した結果、Ag粒界に粒径20~50 nmの二次相粒子が観察された (図9)。これらの結果から、MS²NP法を適用することで二次相粒子が高温脆化を抑制し、Agナノ粒子接合の耐熱性を300℃まで向上できることがわかった。





5 あとがき

パワーエレクトロニクス製品のための高温対応ダイボンド材料をベンチマークし、融点、熱伝導率及び接合強度が高く、低温で接合可能なAgナノ粒子に着目した。Agナノ粒子接合の耐熱性について、融点だけでなく高温放置耐性も評価することで、接合層が高温放置下で脆化するメカニズムを解明した。これに基づいて信頼性を向上させる材料技術としてMS²NP法を開発し、従来不可能であった300℃の高温放置に対応する優れた耐熱性を付与することができた。

今後は、パワー半導体の特性を最大限に生かすパワーエレクトロニクス製品を創出するため、この材料技術の製品展開を進めていく。

文献

- (1) Guth, K. et al. "New assembly and interconnects beyond sintering meth-

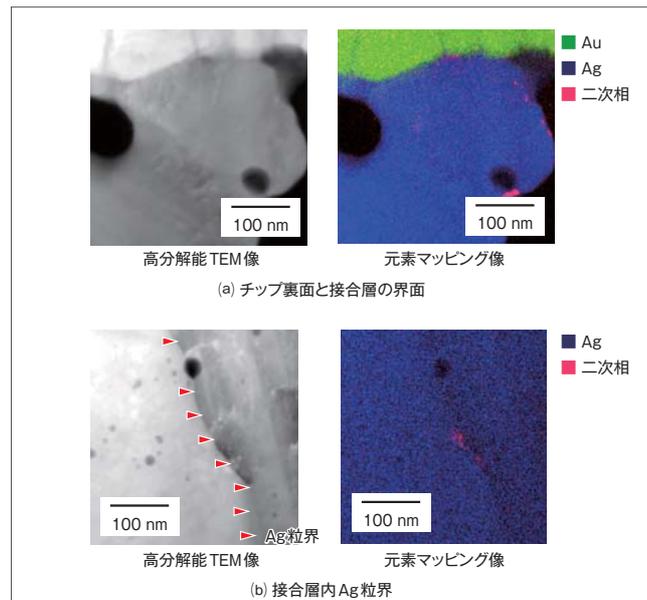


図9. MS²NP法から得られた接合層の初期断面TEM像 — 高分解能TEM観察により、MS²NP法で狙いどおりAg粒子界にナノスケールの二次相粒子を導入できることが確認された。

Transmission electron microscope (TEM) images of microstructure of Ag nanoparticle sintered die bond made using MS²NP method

- ods", international exhibition & conference for power electronics, intelligent motion, renewable energy & energy market 2010 (PCIM2010). Nuremberg, PCIM, 2010, p.232 - 237.
- (2) Ide, E. et al. Metal-metal bonding process using Ag metallo-organic nanoparticles. *Acta Materialia*. **53**, 8, 2005, p.2385 - 2393.
- (3) 平塚大祐 他. 銀ナノ粒子を用いた高信頼性ダイボンド技術. *エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム論文集*, **17**, 2011, p.111 - 116.
- (4) Behrens, T. "Novel Copper Metallization on Silicon Carbide Electronic Devices Enabling Increased Packaging Lifetime and Higher Junction-Temperatures". 15th European Conference on Power Electronics and Applications 2013 (EPE'13). Lille, France, 2013-09, ECCE. 2013, p.1 - 10.
- (5) Smith, C. S. Grains, Phases, and Interfaces: An Interpretation of Microstructure. *Trans. AIME*. **175**, 1948, p.15 - 51.



平塚 大祐 HIRATSUKA Daisuke, Ph.D.

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 電機電池応用パワーエレクトロニクス開発部主務, 博士 (工学)。ダイボンド技術の開発を経て、パワーエレクトロニクス技術の開発に従事。スマートプロセス学会会員。Power and Industrial Systems Research and Development Center



佐々木 陽光 SASAKI Akihiko

生産技術統括部 生産技術センター 実装技術研究部。パワーエレクトロニクス機器のパッケージ技術の開発に従事。Electronic Packaging & Assembly Technology Research Dept.



井口 知洋 IGUCHI Tomohiro

生産技術統括部 生産技術センター 実装技術研究部主任研究員。パワーエレクトロニクス機器のモジュール実装技術の開発に従事。溶接学会会員。Electronic Packaging & Assembly Technology Research Dept.