

近年、SiCパワーデバイスの性能を最大限に引き出し、高機能かつ高効率なパワーモジュールの実用化を目指すうえで、デバイス実装材料の耐熱性と放熱性の向上が重要な課題となっている。一つの解決策として現在注目を集めているのが、金属微粒子を用いた焼結接合である。従来の金属微粒子を含有する導電性樹脂接着技術では、金属粒子と混ざりあったポリマー（エポキシ樹脂等）が硬化することで接着される。これに対して、金属ナノ粒子を用いた焼結接合技術では、粒子を覆う有機保護層の熱分解によって、粒子の焼結反応が進行することで接合が完了する¹⁾。特徴として200～300℃程度の低温接合が可能でありながら、焼結後の接合部に金属の耐熱性と熱伝導性が継承される点があげられる。特にAgナノ粒子による接合体はこれらの特性に優れ、ナノ粒子生成の容易さや耐酸化性の観点から応用研究が盛んに進められている²⁾。本報ではAgナノ粒子焼結体の熱物性評価事例を紹介するとともに、デバイスの重要な放熱性指標になりえる焼結接合部の熱抵抗評価技術について詳しく述べる。



技術本部
加古川事業所
技術室
かねつき けんじ
金築 俊介

第1表 Ag 焼結試作材の熱物性値

熱物性値 (室温)		測定方法
密度 g/cm ³	7.12 (10.5)	寸法計測
比熱 J/(g・K)	0.256 (0.237)	示差走査熱量計法 (DSC)
熱拡散率 mm ² /s	130 (174)	レーザーフラッシュ基板測定法
熱伝導率 W/(m・K)	237 (427)	密度×比熱×熱拡散率
ヤング率 GPa	47.7 (83)	共振法
平均線膨張係数 ※25～200℃ ×10 ⁻⁶ [1/K]	19.21 (19.0)	熱機械分析法 (TMA)

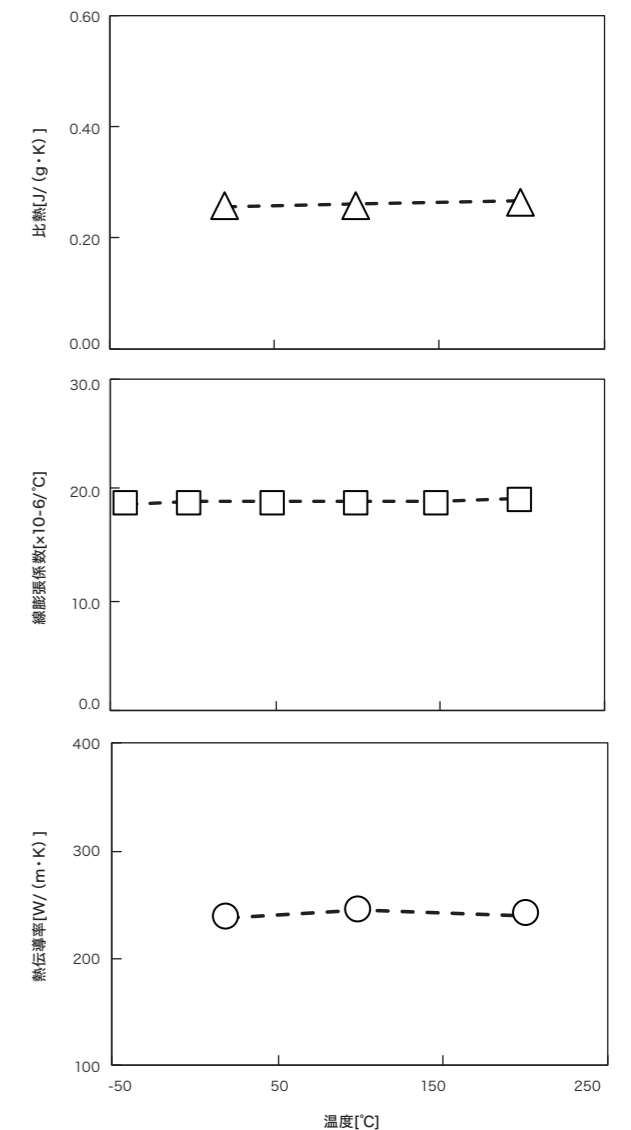
()内の数値は純Agの文献値

1.2 Ag 焼結体の熱物性評価

第2図の条件で試作したAg焼結体から採取した試験片を用い、熱物性(密度、比熱、熱拡散率、熱伝導率、ヤング率および線膨張係数)を評価した。第1表にAg焼結試作材の熱物性評価結果(室温)を、測定方法、純Agの文献値とともに示す。純Agとの密度比から換算した気孔率は32%程度であり、ポイドと強い相関を示す熱物性値(熱拡散率、熱伝導率、ヤング率)が、純Agよりも全て低くなっている。熱伝導率に着目すると、デバイス接合にしばしば用いられるSn基Pbフリーハンダの熱伝導率(約60W/mK)と比べて、本試作材の熱伝導率は約4倍高く、熱伝導性に優れている。機械強度の観点から接合部のポイドはできる限り少ない方が望ましいが、ある程度のポイドを許容せざるをえないAg焼結体の場合、デバイスにかかる熱応力を緩和する効果がある¹⁾。すなわち、Ag焼結体を用いたデバイスの熱設計では、ポイド量と諸物性の関係を最適化することが重要な課題となる。また、熱物性値の温度依存性評価の一例(比熱、線膨張係数、熱伝導率)を第3図に示す。これらの物性値は200℃までほとんど一定であり、本温度域内での熱物性は安定していることがわかる。

Agナノ粒子焼結体において、熱分析がその作製条件を決定する上で重要であることを示し、あわせて、試作材の熱物性を評価した事例を紹介した。Ag焼結体の物性はポイドに強く依存することから、デバイス熱設計の高度化をはかるには、作製条件に応じた熱物性を適宜評価する必要がある。

第3図 Ag 焼結体の比熱、線膨張係数および熱伝導率の温度依存性



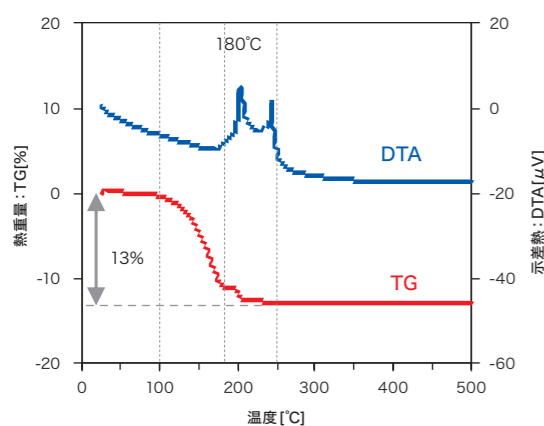
B-1 Ag ナノ粒子焼結体の作製と熱物性評価

1.1 Ag 焼結体の作製方法

粒径100nm程度のAgナノ粒子を含有した焼結性ペーストを供試材とし、ホットプレスによってAg焼結体を作製することにした。ペーストにはAgナノ粒子の他に溶剤や有機系粒子保護層が含まれることから、予熱や焼結温度、加圧のタイミングなどが重要な条件となる。そこで焼結体の作製指針を得るために、TG-DTAによる熱分析を実施し、ペーストの高温反応挙動を調査した。第1図に本ペースト材のTG-DTA曲線を示す。約100～180℃で溶剤の揮発に相当する重量減少が認められ、以降、約180～250℃において有機保護層の熱分解に伴う発熱反応が確認され

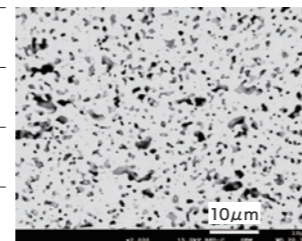
た。また分析終了温度(500℃)における重量減少率は13%であり、ペースト中のAg含有量は87%であることがわかる。以上の結果から、第2図左側に示す条件でペーストのホットプレスを実施し、50×50×t0.6mmのシート材を試作した。ペーストの流動性が損なわれると、加圧による焼結促進効果が低下することが懸念されるため、ここでは溶剤が半分程度残存する160℃を予熱温度とし、加圧は予熱終了直後に開始した。試作したAg焼結体の断面組織を第2図右側に示す。Ag母相中には焼結過程で生じた微細なポイド(数百ナノ～数ミクロンサイズ)が多数認められ、熱物性に一定の影響を及ぼすことが示唆される。

第1図 Ag ナノ粒子焼結性ペーストのTG-DTA曲線



第2図 Ag 焼結体の作製条件と断面SEM写真の一例

予熱	160℃×15min
焼結	250℃×30min
加圧	5.0MPa(予熱後)
サイズ	50×50×t0.6mm



B-2 Ag 焼結接合部の熱抵抗評価

前章ではAgナノ粒子を含有した焼結性ペーストを用い、Ag焼結体を試作した。本章では、焼結ペーストを用いて2枚のCu板を焼結接合し、接合部の熱抵抗を評価した事例を紹介する。

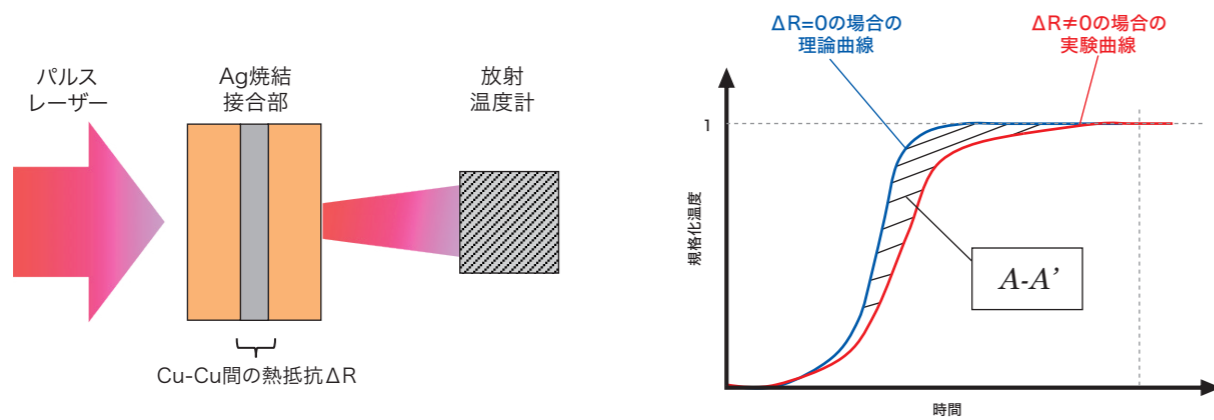
2.1 接合部の熱抵抗評価方法

ここではレーザーフラッシュ応答関数法を用いた接合部の熱抵抗測定手法について説明する。本法は積層試料表面をレーザーパルスで加熱し、応答関数理論³⁾にもとづいて試料間の熱抵抗を評価する方法である。具体的には、2枚のCu板が焼結接合され

た積層試料を瞬間加熱し、試料裏面の温度上昇曲線から面積熱拡散時間を求める(第4図)。このときの接合部の熱抵抗ΔRは、式(1)によって算出される。

$$\Delta R = \left(\frac{1}{b_1 \tau_1^{1/2}} + \frac{1}{b_2 \tau_2^{1/2}} \right) (A - A') \dots\dots\dots (1)$$

第4図 レーザーフラッシュ応答関数法による接合体の熱抵抗評価の概念図



τ はCu板の厚さ d と熱拡散率 α によって定義される熱拡散時間であり、 b は熱浸透率である。添字1および2は、2枚のCu板をそれぞれ意味する。また、 A は上述のとおり実測した温度曲線から得られる面積熱拡散時間である。 A' は積層板間の熱抵抗が理論上ゼロと仮定した場合の面積熱拡散時間であり、式(2)によって与えられる。

$$A' = \frac{b_1\tau_1^{3/2} + 3b_1\tau_1^{1/2}\tau_2 + 3b_2\tau_1\tau_2^{1/2} + b_2\tau_2^{3/2}}{6(b_1\tau_1^{1/2} + b_2\tau_2^{1/2})} \dots\dots\dots (2)$$

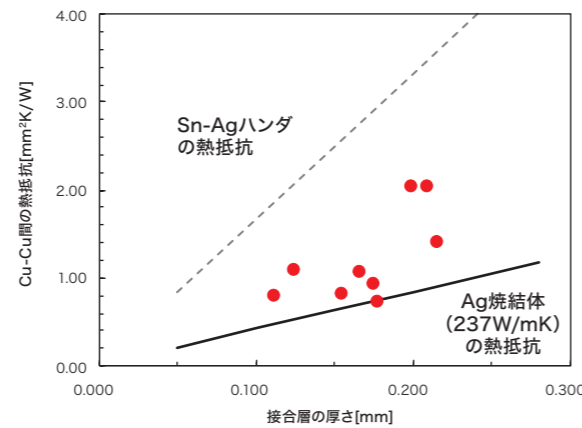
一般的な熱抵抗測定手法として定常熱流を利用した温度傾斜法が挙げられるが、接触加熱方式であるために、試料と測定ロッド接触部の熱抵抗5~10mm²K/Wが測定誤差となる。一方、レーザーフラッシュ応答関数法は積層板の材質にもよるが、最小で±0.1mm²K/W程度の分解能が得られ、薄く放熱性の高い接合体の熱抵抗測定に適している手法である。ハンダ接合部やサーマルインターフェイス材料などの評価にも適用可能であり、放熱性の観点から接合性や接着性を評価できる利点もある^{4),5)}。

2.2 Ag 焼結接合部の熱抵抗と接合状態

2枚1組のCu板(純度4N、φ10×t1mmサイズ)を用意し、ホットプレスによってAg焼結接合を実施した。接合条件は焼結体単体の試作条件(第2図左側)と同様であるが、対向した2つのホットプレート間にスペーサを設けることで、接合層の厚さをある程度制御できるようにした。

第5図にAg焼結接合体の熱抵抗測定結果を塗赤丸で示す。接合層が厚くなるにつれて熱抵抗が増大する傾向が見られる。図の実線は、密度7.12g/cm³のAg焼結体の熱伝導率237W/mK(第1表)と接合層の厚さから換算した熱抵抗であるが、測定結果のほとんどが実線よりも高くなっている。このことは、ボイドや界面剥離等の欠陥が接合部の熱抵抗に影響していることを示している。

第5図 Ag 焼結接合体の熱抵抗測定結果

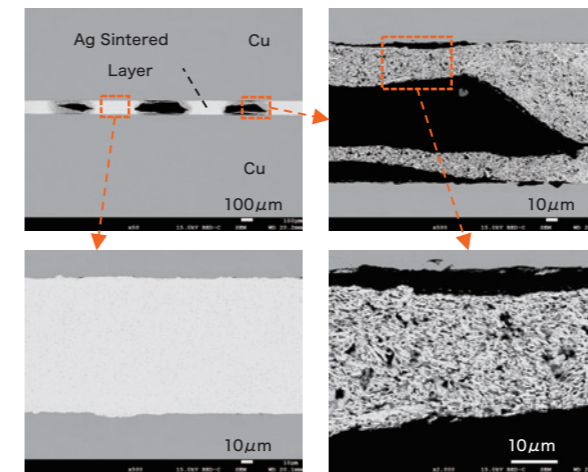


そこで接合状態を調べるために、SAT(Scanning Acoustic Tomography)を用いた非破壊観察を行った。熱抵抗の異なる2つのサンプルにおいて表裏観察を実施した結果(第6図)、いずれも欠陥箇所(図の白色領域)が多く見受けられ、ミリメートルサイズの粗大な貫通ボイドが確認された。また熱抵抗の高いサンプルでは、裏面側のCu-Ag焼結体界面に、ギャップが広範囲にわたって存在していた。第7図に熱抵抗が比較的高いサンプル(2.0mm²K/W)の接合部の断面SEM像を示す。緻密なAg焼結層の間に焼結層を貫通する大きなボイドが認められ、ボイド近傍に界面ギャップが多いことがわかった。第6図より、巨大な貫通ボイドは面内に広がる様相であることから、このボイドはAg粒子が焼結する過程で生じた母相中の微細ボイド(第2図左側)とは異なるメカニズムで発生したものと思われる。

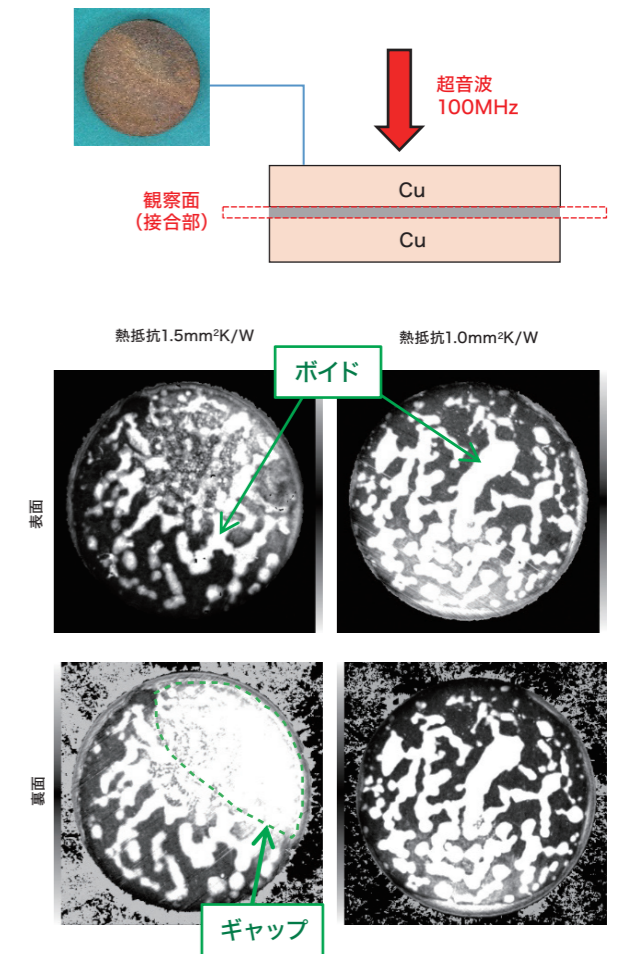
焼結体試作材の作製時、片側のホットプレートにペーストを塗布した状態で予熱を行ったため、溶剤が面外方向に揮発しやすい状況であった。これに対し焼結接合過程では、ペーストを2枚のCu板で挟み込んだ状態で予熱を施した。そのため、溶剤の面外揮発がCu板によって妨げられ、揮発ガスが面内方向に通り

やすく、結果として接合面内に大きな貫通ボイドが形成されたと考えられる。この種のボイド低減のためには、例えば、ペースト使用量を減らす、つまり接合面積や層厚さを減らすことが有効であると考えられ、接合条件として最適化すべき重要な要素であると考えられる。その他としては、予熱時間を長くする、予熱温度までの昇温速度を遅くする等の予熱条件を検討する必要がある。貫通ボイドを減らすことができれば、Agの潜在的に高い熱伝導性を引き出すことになり、接合強度や長期信頼性の向上にもつながる。今後は、より系統的に実験を進めることで、さらに知見を深めていく所存である。

第7図 接合部の断面SEM像(熱抵抗2.0mm²K/W)



第6図 Ag 焼結接合体の超音波顕微鏡写真



近年注目されているAgナノ粒子を用いた焼結体の熱物性評価事例に加え、焼結接合部の熱抵抗評価手法を解説し、熱抵抗と接合性について述べた。接合体の熱抵抗評価を通じて接合プロセス・条件の最適化を検証することが可能であり、本技術がデバイス設計者の一助になれば幸いである。

参考文献 *1) 廣瀬明夫：溶接学会誌, 80巻(2011), 8号, pp.702-708
 *2) 菅沼克昭：SiC/GaNパワー半導体の実装と信頼性評価技術, (2014), 日刊工業新聞社
 *3) T. Baba：Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 48, 05EB04 (2009)
 *4) S. Kanetsuki et al.：Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 56, 6S1 (2017)
 *5) S. Kanetsuki et al.：Sensors and Materials, Vol. 31 (2019) No. 3