

銀ナノ粒子を用いた接合材料FlowMetal®の無垢Cu基板との接合信頼性の検討

Reliability of Silver Sinter Die-attach Material, FlowMetal®, on Bare Copper Substrate

渡辺 智文

Tomofumi WATANABE

Abstract

The higher operating temperature of power semiconductor devices, the higher thermostability and thermal conductivity are required for die-attach materials. Silver sinter materials are the most promising die-attach material for SiC and GaN devices in high temperature operation. Using newly developed silver nanoparticle paste, FlowMetal®, semiconductor chips could be jointed bare copper substrates by pressureless sintering in a nitrogen atmosphere. Sintered silver layers by using the silver nanoparticle paste showed a high thermostability in heat cycle test.

Keywords: Power device; Silver nanoparticle; Thermostability; Jointing material; Sintering

1. 緒 言

SiC(Silicon Carbide)やGaN(Gallium Nitride)などの化合物系パワー半導体の開発が進み、既存のシリコン半導体素子よりも使用温度は高くなる傾向にある。一般的に化合物系パワー半導体が使用される環境は200℃以上となる可能性があると言われてしている。そうなると接合材料に要求される代表的な品質としては耐熱温度が高いことや熱伝導率が高いことが挙げられる。これまでの一般的なはんだ材料は金属の融解と凝固を接合に利用するため、耐熱温度と材料の融点が比例関係にあり、接合温度も上がってしまうデメリットがある。

そこで、ナノ粒子の特長である低温焼結性を利用した接合材料が提案されており、研究が進められている¹⁾。金属ナノ粒子はサイズ効果により、ナノメートルサイズまで粒径が小さくなると室温程度まで融点が低下する。そして粒子間の融着・焼結が進むことによって融点が上昇することは一般的によく知られている²⁾。この金属ナノ粒子の特長を用いることで接合温度は低く、かつ焼結後はバルクの融点になるため耐熱温度を上げることが可能な接合材料となると考えられる。また、金属ナノ粒子、特に銀ナノ粒子を用いるとバルクの熱伝導率が約420W/mKと非常に高いため、低熱抵抗化のメリットもある。

我々はナノ粒子や分散剤、溶媒の配合設計を行うことにより200℃での耐熱信頼性に向けた銀ナノ粒子

接合材料をFlowMetal®シリーズのラインナップのひとつとして開発してきた。その結果、低加圧さらには無加圧の接合で下限温度-40℃から上限温度200℃の過酷なヒートサイクル試験の条件下においても1000サイクル後にポイドと接合層に変化が見られなかった³⁻⁴⁾。しかし、これらの報告は金めっきされた基板表面に接合した結果であった。実際のデバイスにおいて、基板表面に金めっき処理が必要となるとコストアップに繋がってしまうため、無垢銅への直接接合が求められている。そこで我々は無垢銅に対して無加圧で接合させるために銀ナノ粒子自体の設計を検討し直した。本報告では、我々が開発した銀ナノ粒子接合材料が無加圧接合条件にて無垢銅基板に接合でき、下限温度-55℃から上限温度150℃のヒートサイクル試験において耐熱信頼性が得られたことを述べる。

2. 実 験

2.1 銀ナノ粒子接合材料

我々が合成した銀ナノ粒子の粒径は約20-100nmであり、形状は主に球形であった。この銀ナノ粒子を用いて、接合材料となるペーストを調整した。

2.2 無加圧接合試験サンプル作製

接合部材として5mm角または7mm角、厚み0.3mm

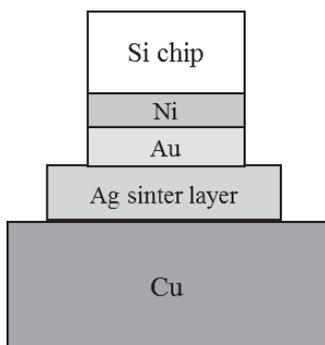


Figure 1 Construction of the test piece.

のSiチップ（接合面は金/ニッケルをスパッタリング）と無酸素銅基板（面積：20×20mm、厚み：1mm）を用いた。銅基板は表面の酸化膜の影響をできるだけ取り除くことを目的として、希硫酸にて超音波洗浄を行った。まず、銀ナノ粒子ペーストを銅基板上に、開口部が7.5mm角のメタルマスクを用いて印刷した。その印刷した銀ナノ粒子ペーストの上にSiチップを0.2MPaの荷重でマウントした。次にチップをマウントしたサンプルを室温の炉に入れた後、銅基板の酸化を防ぐため、窒素を流すことで酸素濃度を500ppm以下にした。その雰囲気です室温から約30分で最大温度となる250℃まで昇温させ、30分間保持することで焼成を行った。焼成はチップに荷重をかけず無加圧で行った。焼成後は150℃以下になるまで自然冷却し、銀ナノ粒子ペーストにて接合されたサンプルを得た。接合サンプルの構成図をFigure 1に示す。

2.3 ヒートサイクル試験前後における接合層の評価

従来品⁴⁾と本報告にて新たに調整した銀ナノ粒子ペーストを用いて、5mm角のSiチップを用いたFigure 1の接合サンプルをそれぞれ作製した。各接合サンプルの接合強度はロードセルの上限荷重が980Nのボンディングテストにて測定し、比較を行った。以下の実験は、新たに調整した銀ナノ粒子ペーストにて実験を行った。

7mm角の接合サンプルのボイドや剥離の様子を超音波探傷（Scanning Acoustic Tomography ; SAT）にて測定した。耐熱信頼性をヒートサイクル試験にて評価した。試験条件は、接合したサンプルをそのままの状態にて、下限温度-55℃、上限温度150℃、各温度での保持時間15分、昇温・降温時間はそれぞれ約3分で一定回数行い、試験のサイクル数増加によって接合部のボイド率の変化を測定した。また、初期と1000サイクル後のサンプルを研磨によって断面出しを行い、加速電圧20kVでSEM(Scanning Electron Microscope)観察し、クラックの進展状態を確認・評価した。

3. 結果

3.1 従来品との接合強度の比較

従来品と本報告の接合材ペーストを用いて5mm角チップにて窒素雰囲気と同条件で接合したサンプルの接合強度を測定した結果をFigure 2に示す。従来品は10MPa程度で銅基板界面に近い部分で接合層の凝集破壊が見られたのに対して、本報告のペーストでは測定上限となる40MPaを超えても破壊しなかった。Figure 3にSAT像を示す。従来品は剥離もしくはボイドが発生している様子が見られたのに対し、本報告の(a)ではボイドや剥離はほとんど見られなかった。Figure 4に示す従来品の断面SEM像を見ると剥離は基板界面付近で生じており、接合層には焼結した銀粒子間の

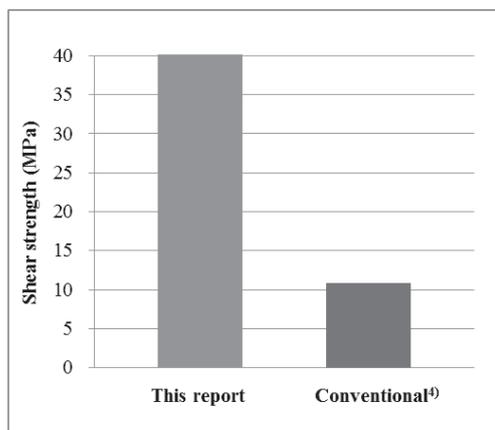


Figure 2 Comparison of shear strength.

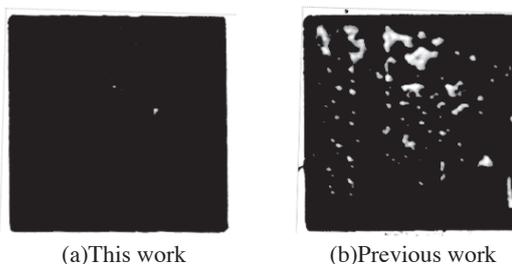


Figure 3 Comparison of SAT image of sintered Ag layers.

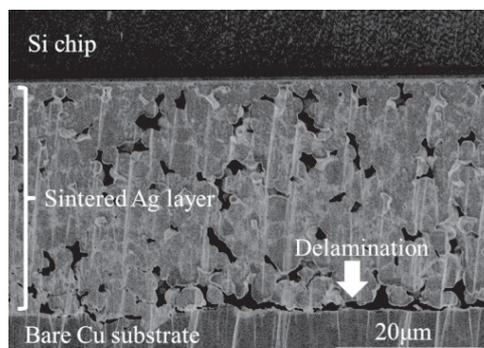


Figure 4 Cross-sectional SEM image of the sintered Ag layer in previous work⁴⁾.

空隙が多数見られた。従来品の銀接合層の緻密度が低いことはあるが、銀粒子と銅の接合ができていないことが接合強度の低下に寄与していると考えられる。銅基板を希硫酸にて洗浄しているが、除去しきれなかった酸化膜、もしくは再酸化によるわずかな酸化膜の影響が金属ナノ粒子の接合原理である粒子の焼結による被接合体界面との元素拡散を阻害していると考えた。そこで本報告で新たに調整した接合材ペーストは酸化膜を除去しつつ粒子は焼結させるような有機成分を配合させた。それによって銀粒子と銅表面の元素拡散が促され、接合強度が飛躍的に向上したと言える。

3.2 無加圧接合での200℃ヒートサイクル試験

次に7mm角チップを銅基板へ無加圧接合したサンプルに対して、上限温度150℃のヒートサイクル試験を実施した前後でのSAT像の変化をFigure 5に示す。7mm角チップでも5mm角のチップに比べて初期の段階でポイドが多く発生することはなかった。また、-55/150℃のヒートサイクル試験1000サイクル後もポイドの増加や剥離が進行している様子はSAT像では見られなかった。ヒートサイクル試験前後での断

面SEMを観察した結果をFigure 6に示した。Figure 4の従来品に比べて初期に銅基板界面やチップ界面で銀接合層が剥離している様子は見られず、Figure 2で接合強度が高かった結果とも一致する結果となった。Figure 6(c)から焼結した後の粒子間の空隙が少なく、緻密度が非常に高いことがわかる。また、酸素濃度が500ppm以下という有機分が燃焼しにくい条件でも粒子に付着している分散剤が外れ、ナノ粒子同士が融着していることが確認できた。有機分の排斥を促す効果があるとされる外部からの加圧を行っていない無加圧の焼成条件においてもナノ粒子の配合設計によって窒素雰囲気での焼結は可能であることが示唆された。-55/150℃のヒートサイクル試験1000サイクル後も焼結した銀接合層自体に変化は無く、緻密な状態を保っていた(Figure 6(f))。Figure 6(d)および(e)からもチップ界面や銅基板界面にクラックが進展している様子は見られなかった。この結果からSiチップと銅基板という線膨張係数差が大きな組み合わせの部材構成でも銀の接合層は高い信頼性を有していることがわかった。

これまでの我々の知見⁴⁾から、ヒートサイクルの

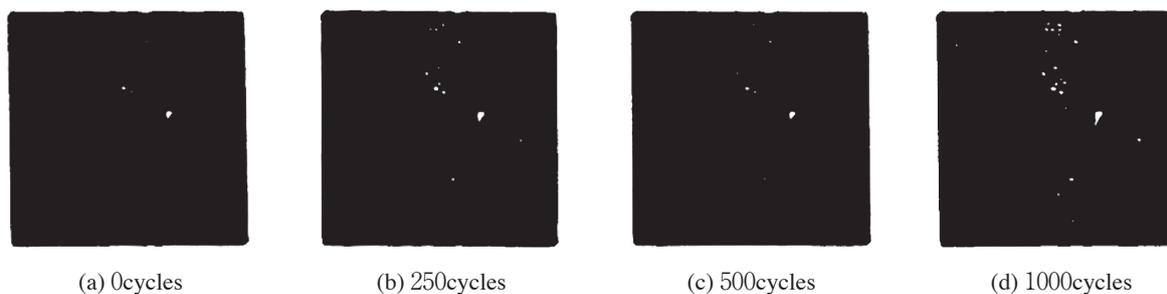


Figure 5 SAT images of the sintered Ag layers varying cycle numbers of heat cycle test at a temperature range between -55 and 150℃.

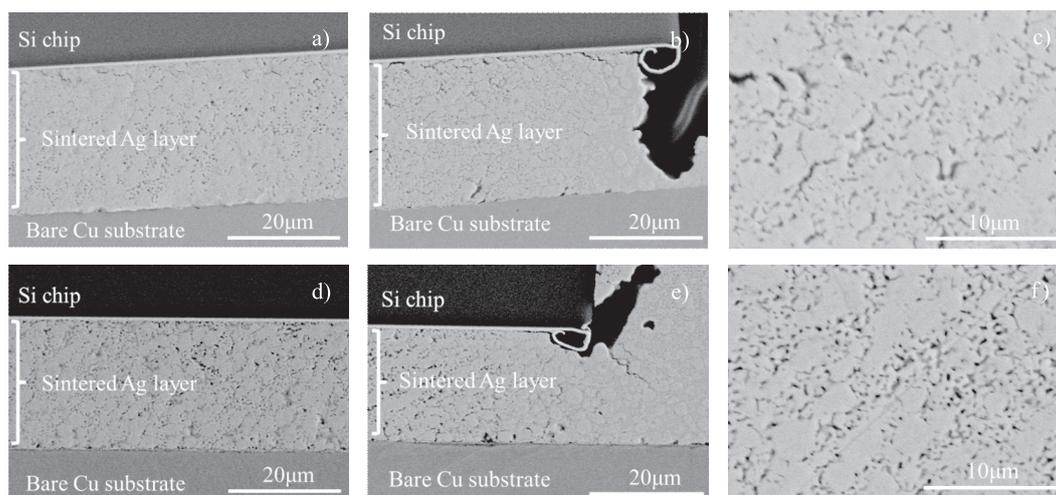


Figure 6 Cross-sectional SEM images of the sintered Ag layers before and after 1000 cycles of a heat cycle test at a temperature range between a -55 and 150℃: a) an initial view at the center region of the chip; b) an initial view at the edge of the chip; c) an enlarged view of a); d) a view after 1000 cycles, the center of the chip; e) a view after 1000 cycles, the edge of the chip; f) an enlarged view of d).

熱応力によるクラックは端部の接合層とチップ界面付近から入り始め、そのクラックは焼結して繋がった粒子同士の細くて密度の低い部分から進展していくと考えている。Figure 6 (b)を見ると、初期状態でチップ端部界面にわずかにクラックが入っているが、Figure 6 (d)ではそのクラックの進展は見られない。銀粒子が焼結した接合層内の空隙が低減し、緻密になったため、ヒートサイクルによる熱応力にチップ界面や焼結した粒子が耐えることができたと考えられる。本報告では上限温度が150℃のヒートサイクル試験を実施したが、さらに高い温度にて熱応力が大きくなる条件での信頼性を確認、評価していく必要がある。

4. 結 言

我々が無垢銅へ直接接合するために新たに開発した銀ナノ粒子を用いた接合材料によって、従来検討品ではなしえなかった銅への無加圧接合でも高い接合強度が得られた。7 mm角のSiチップと銅基板とを無加圧接合すると、下限温度-55℃から上限温度150℃のヒートサイクル試験において1000サイクル後も、接合層に大きな劣化は見られず良好な接合状態を維持していた。

したがって、無加圧接合条件においても銀ナノ粒子接合材料が優れた耐熱信頼性を示すことを明らかにし

た。今後、この銀ナノ粒子を用いた接合技術を高温動作する化合物半導体系パワーデバイスへ適用するために上限温度が175℃以上でのヒートサイクル条件でも耐熱信頼性が得られることを実証する予定である。

本報は下記報告に補足修正を加えたものである。

[Mate2017 第23回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, Vol. 23(2017), pp. 117-120.]

References

- 1) K.S. Siow, "Mechanical properties of nano-silver joints as die attach materials", J. Alloys Compd. , **514**, 6-19 (2012)
- 2) Q.S. Mei, K. Lu, "Melting and superheating of crystalline solids: From bulk to nanocrystals", Prog. Mater. Sci. , **52**, 1175-1262(2007)
- 3) 渡辺智文, 武居正史, 下山賢治, "銀ナノ粒子による高耐熱接合材料の開発", Mate2015 第21回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, **21**, 113-116(2015)
- 4) 渡辺智文, 武居正史, "銀ナノ粒子を用いた接合材料による200℃信頼性の確立", Mate2016 第22回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, **22**, 117-120(2016)



渡辺 智文

Tomofumi WATANABE

2009年 入社

R&Dセンター