Au 粒子接合の展開
Development of Au Particle Bonding Technology

田中貴金属工業株式会社
技術開発統括部
小柏俊典

1. はじめに

SiC、GaN などの次世代パワーデバイスの開発が進んでいる。これらデバイスを高温環境下でも正常に動作させるため、材料の耐熱性向上や熱応力低減の実装技術開発が進んでいる。即ち、材料の物性や欠陥制御など、材料科学的な視点からの新たな接合技術開発が鍵となる。特に、高温動作環境においては、デバイスを正常に動作させるために、基板や配線などに固定する耐熱接合技術が重要であり、Ag 系、Cu 系の他に、Au 系【1, 2】の焼結材料に関する研究が進んでいる。また、接合信頼性の向上には、被接合材料である電極膜の耐熱安定性の検討が必要なのは言うまでもない【3】。

一方、パワーデバイスの領域においても、実装面積の低減，伝送経路短縮といった高密度実装に対する要求がある。それに対して、チップ電極と基板電極を対向させて直接接続させるフリップチップ接合が必要とされる。例えば、Au めっきバンプを用いる Au/Au 固相接合は，微細化に対応できるものの，バンプの変形量が小さいことやバンプ高さのバラツキ、更には高い接合温度のため，接続不良やチップの湾曲による残留ひずみを発生させる等の問題が顕在化している。今後、Au 粒子を用いた低温接合の展開が期待される【4】。

2. 目的

本研究では、最初にサブミクロン Au 粒子の焼結体試験片を用いて機械的特性を明らかにし、次いで LED デバイスのフリップチップ接合サンプルを作製して、部材間の熱膨張差を吸収する応力緩和能の有無を評価した。その結果、Au 粒子による焼結接合が、次世代パワーデバイスに求められる実装技術に適することを検討する。

3. 主な成果

⑴ 平均粒径 0.3μm の Au 粒子は、大気中の無負荷環境下で 150℃以上の加熱により、ネックの形成・成長が顕著になる。

(2) 室温で引張試験、応力緩和試験を行い、Au 粒子焼結体の材料物性を測定した。ヤング率及び引張り強さは、焼結温度が低いほど小さくなった。また、クリープ変形能は、焼結温度が低いほど優れることが判った。これらの材料物性は、低温焼結体特有のクラスター状組織により出現する【5】。

⑶ 室温で圧縮試験を行い、Au 粒子焼結体の変形挙動を明らかにした。圧縮変形は粒子の

再配列に加えて、粒子間のせん断変形で進行し、真ひずみは 40MPa で ε t= 0.16、100MPa で ε t= 0.29 に達する。

⑷ サブミクロン Au 粒子を用いてペーストを試作、230℃加熱後の接合界面を観察した。Au 粒子と Au 膜間のネック部は 200℃・1 時間の熱処理で成長し、接合強度は 24.7MPa と十分な強度に達した。

⑸ LED チップをアルミニウム基板にフリップチップした構造体で ON/OFF 試験を行った。LED 点灯時の全光束(lm)は、Au 粒子接合した LED において 15000 サイクルまで変化しなかった。異材間の熱膨張差で生じる応力を緩和する点で、Au 粒子接合は Sn 系、Au 系はんだより優れていることを確認した。

4. 結論

サブミクロン Au 粒子による焼結接合が、その低温接合性と応力緩和特性の観点から、次世代パワーデバイスの実装に適合すると判断した。

5. 参考文献

【1】 伊藤健, 他, “サブミクロン金属粒子を用いたダイボンド技術の開発”, マイクロ接合研究委員会資料, MJS-321-2011, 44～55.

【2】 加藤史樹, 他, “高温動作に対応したサンドイッチ型ワイヤボンドレス SiC パワーモジュールの作製技術”, エレクトロニクス実装学会誌, 16 【4】 (2013) 300～304.

【3】 Takeshi Ito, et al. “Thermal stability of back side metallization multilayer for power device application“, Microelectronics Reliability, 52 (2012) 199-205.

【4】 小柏俊典, 他, “サブミクロン Au 粒子焼結体を用いた低温接合技術”, エレクトロニクス実装学会誌, 10 【7】 560～566.

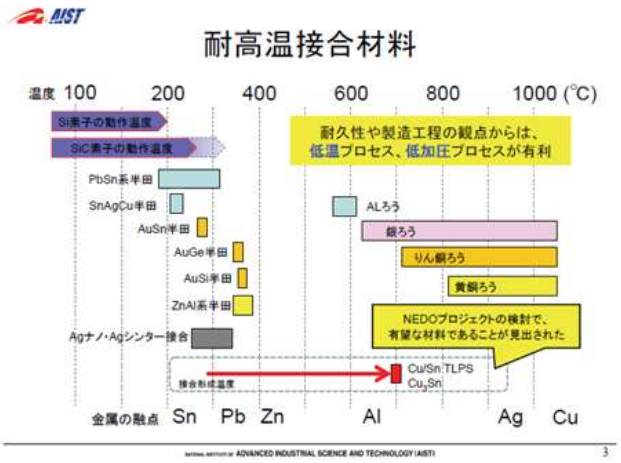
【5】 澁谷忠弘, 他, “サブミクロン金粒子低温焼結マイクロ接合構造の機械的疲労信頼性評価”, エレクトロニクス実装学会誌, 9 【6】 (2006) 465～471.

発表内容

1. 次世代パワー半導体の実装材料
2. Au粒子の焼結挙動及びその機械的特性
3. Au粒子焼結体とAu膜間の接合状態
4. フリップチップ実装したLEDモジュール構造での Au粒子接合の高信頼性
5. まとめ

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.
The Future is Precious. TANAKA

次世代パワー半導体の実装材料



（出所：産業技術総合研究所提供）

貴金属材料は、高いから検討しない。

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.
The Future is Precious. TANAKA

発表内容

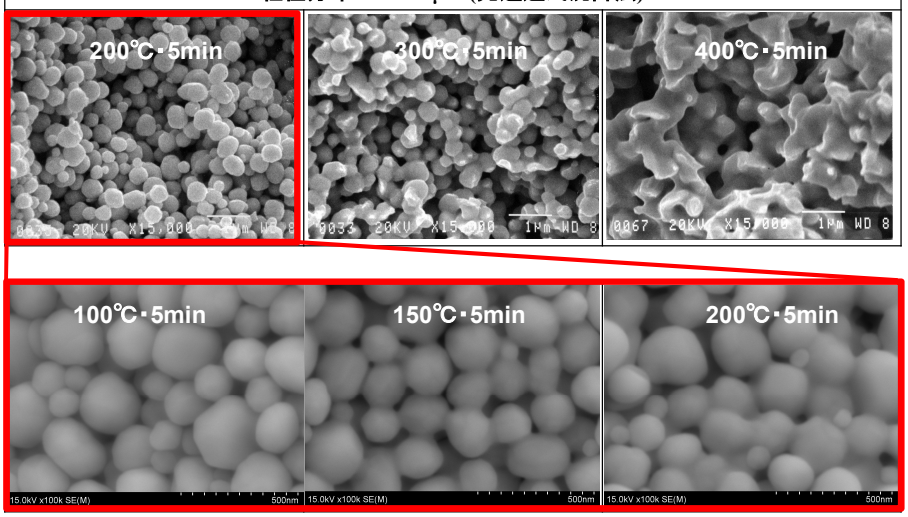
1. 次世代パワー半導体の実装材料
2. Au粒子の焼結挙動及びその機械的特性
3. Au粒子焼結体とAu膜間の接合状態
4. フリップチップ実装したLEDモジュール構造での Au粒子接合の高信頼性
5. まとめ

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.

The Future is Precious. TANAKA

Au粒子(0.3μmφ)の焼結挙動

粒径分布0.2～0.4μm (光透過式沈降法)



接触境界での表面原子拡散(無加圧)⇒ネックの発生・成長⇒Au/Au接合

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.

The Future is Precious. TANAKA

Au粒子焼結体の引張試験片

試験片作製手順

試験片作製用金型作製

↓

Au粒子の埋込

↓

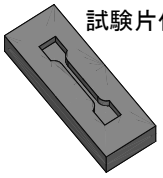
大気中で加熱(加圧なし)
230℃, 260℃, 340℃・1時間

↓

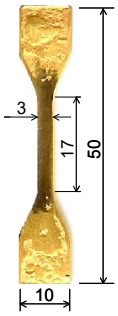
研磨(1mm厚)

↓

引張試験(変位制御)
マイクロフォース試験機
(INSTRON 8800D)



試験片作製用金型



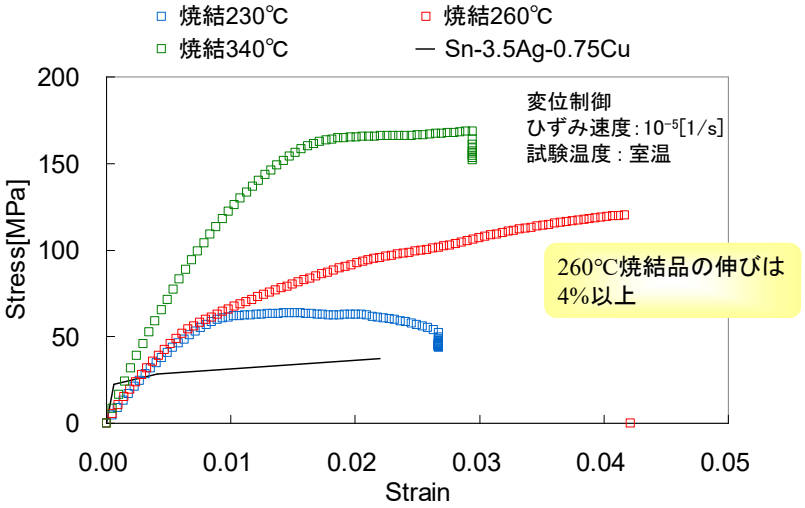
引張試験片

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.

The Future is Precious. TANAKA

Au粒子焼結体の応力−歪曲線

クリープ特性は歪を保持した時の応力緩和曲線から、Norton則を用いて評価した。



Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.

The Future is Precious. TANAKA

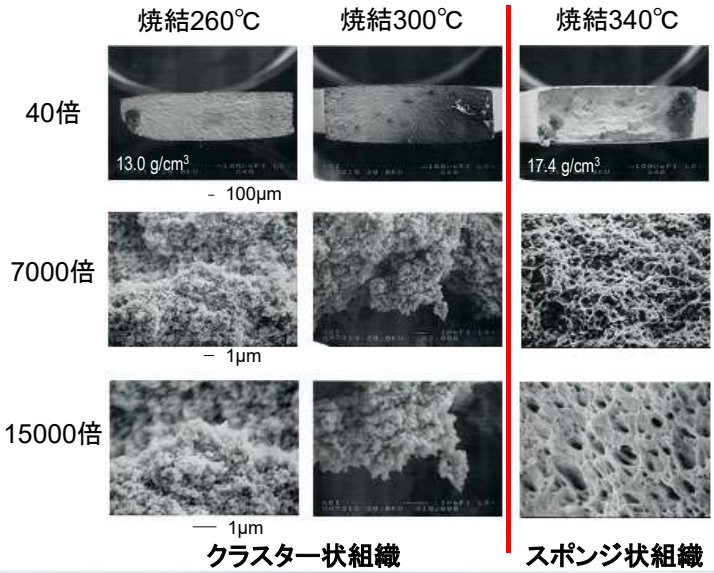
Au粒子焼結体の材料物性

	縦弾性率E [GPa]	引張り強さ [MPa]	クリープ定数A [MPa/h]	クリープ指数n
焼結温度230℃	9.5	63.7	1.00E-40	22.00
焼結温度260℃	10.4	120.5	-	-
焼結温度340℃	16.1	168.6	4.48E-40	16.88
Sn-3.5Ag-0.75Cu	40	38.3	7.29E-18	11.26

- Au粒子焼結体のヤング率及び引張り強さは、230℃焼結の方が小さい。Sn系はんだと比べ、230℃焼結体のヤング率は1/4と小さく、引張強度は1.5倍であった。
- 応力緩和曲線(室温)からNorton則で評価したところ、230℃焼結体がクリープ変形し易いが、Sn系はんだのクリープ変形能は更に優れる。

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.
The Future is Precious. TANAKA

引張破断面の観察

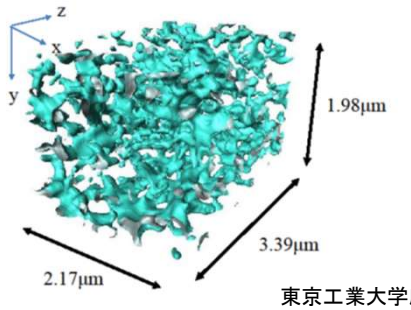


Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.
The Future is Precious. TANAKA

Au粒子焼結体の相対密度

3次元FIBナノトモグラフィ解析により相対密度を解析した。

・気孔部分のトモグラフィー像（相対密度：84.9%）



東京工業大学応用セラミックス研究所
若井史博教授のご提供

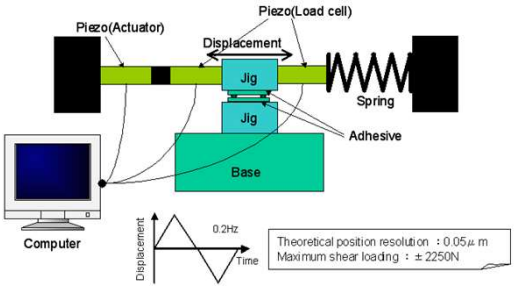
相対密度は、100℃・3min.で74%（14.3 g/cm^3）、200℃・3min.で78%（15.1 g/cm^3）、300℃・3min.で82%（15.8 g/cm^3）であり、熱処理温度の上昇で組織の緻密化が進行した。

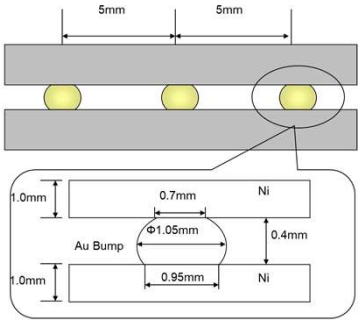
Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.

The Future is Precious. TANAKA

機械的せん断試験

Au焼結体の疲労挙動を把握する目的で、Au焼結体バンプを3×3の5mm間隔で配置、230℃・30分で押圧接合したPdメッキ/Ni基板を試験片とした。その後、機械的せん断疲労試験機で印加した上下Ni基板の変位の差を、バンプに生じる相対変位とした。解析では、せん断試験の負荷速度が速いため、クリープを考慮せず弾塑性解析とした。また、一連の変位制御試験中に反力の上昇が認められず、加工硬化がほとんど発生しないことから、移動硬化則を用いて解析した。破壊(Nf)は、サイクルごとに生じる反力が、初期値から10%降下したサイクル数とした。



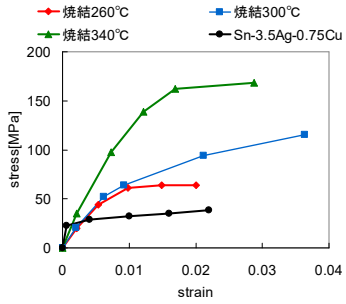


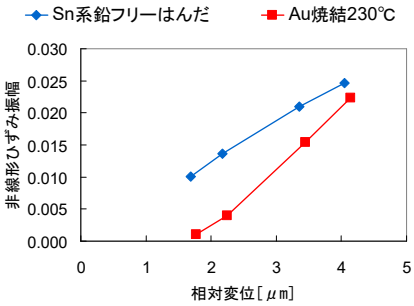
Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.

The Future is Precious. TANAKA

発生する非線形ひずみの違い

バンプ接合部のコーナー部で、同じ相対変位を負荷した際に発生する相当塑性ひずみが最大になる。その部分の非線形ひずみ振幅量について、有限要素法モデルを用いて比較した。





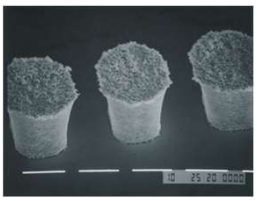
- 同じ相対変位を与えても、Sn系はんだの非線形ひずみ振幅(⊿εin)が大きい。Sn系はんだのヤング率は高いが降伏応力が低いためである。
- Sn系はんだに発生した⊿εinが1%の時、焼結材の⊿εinは0.1%であった。即ち、せん断負荷を受けると、はんだは塑性ひずみで吸収し、焼結体は弾性変形で吸収することで、異材間の線膨張係数のミスマッチを吸収する。

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.
The Future is Precious. TANAKA

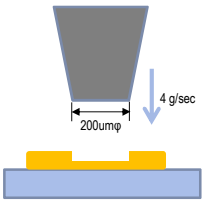
Au粒子焼結体の圧縮変形試験

狭ピッチ実装分野において、Au粒子バンプによる熱圧着接合を想定した場合、低温接合性のみならず、接合面の段差吸収が必須

圧縮変形挙動の調査



Au particle bumps of 15 μm in diameter and 20μm high

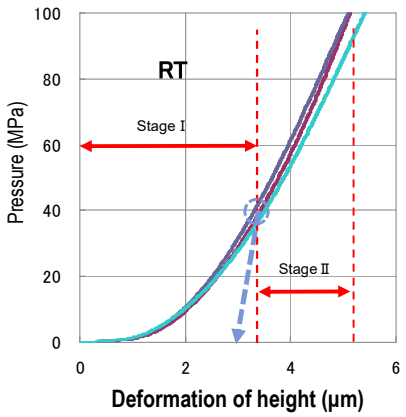


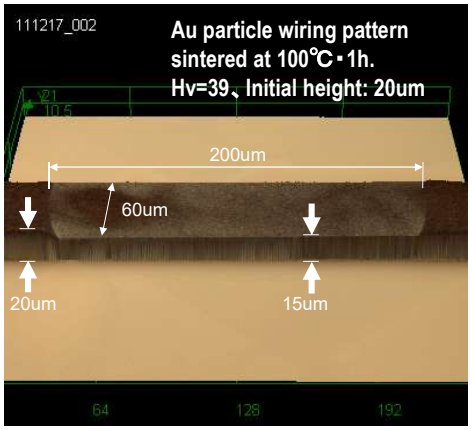
【試験装置】
島津微小圧縮試験機(MCT510)
Micro Compression Testing Machine, SHIMAZU

【試験サンプル】
①0.3umφAu粒子を用いたパターン (60um幅、20um厚)
②めっきバンプ(MICROFAB Au660)、100um□・20um厚

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.
The Future is Precious. TANAKA

Au粒子焼結体の応力−歪曲線

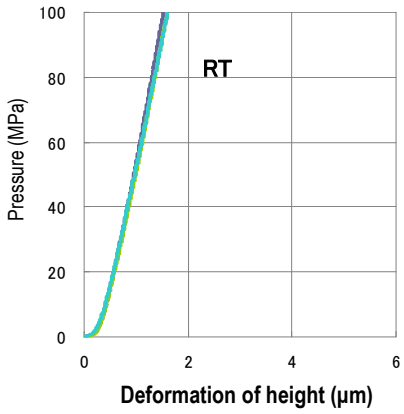


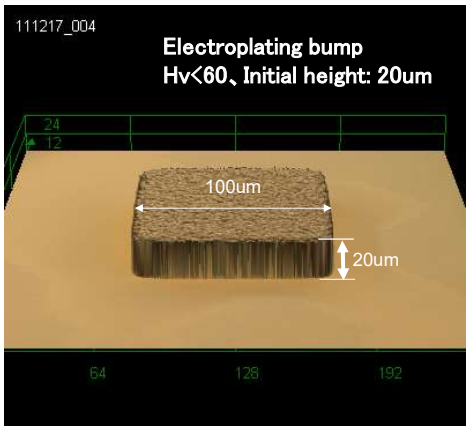


- 低応力領域(Stage Ⅰ)は、粒子間のせん断変形が伴う粒子の再配列が起こり、40MPaで真ひずみ（ε_t)は0.16となる。
- 高応力領域(Stage Ⅱ)は、粒子間のせん断変形が伝播し、全体的な緻密化が進み、100MPaでε_tは0.29になる。

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.
The Future is Precious. TANAKA

Auめっきバンプの応力−歪曲線





めっきバンプの変形量は小さく、100MPaでε_tは0.05であった。Au粒子焼結体と比較し、段差吸収能が著しく小さい。

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.
The Future is Precious. TANAKA

まとめ (2)

平均粒径0.3μmのAu粒子は、大気中の無負荷環境下で150℃以上の加熱により、ネックの形成・成長が顕著になる。

室温で引張試験、応力緩和試験を行い、Au粒子焼結体の材料物性を測定した。ヤング率及び引張り強さは焼結温度が低いほど小さく、クリープ変形能は焼結温度が低いほど優れることが判った。

機械的せん断試験を行い、非線形ひずみ振幅量について有限要素法モデルを用いて解析した。せん断負荷で発生する相対変位は、Sn系はんだは塑性ひずみで、Au粒子焼結体は弾性変形で吸収することが判った。

室温で圧縮試験を行い、Au粒子焼結体の変形挙動を明らかにした。圧縮変形は粒子の再配列に加えて、粒子間のせん断変形が進行し、真ひずみは40MPaで εt= 0.16、100MPaで εt= 0.29に達した。めっきAuバンプの変形量は小さく、100MPaで εt= 0.05であった。

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.

発表内容

1. 次世代パワー半導体の実装材料
2. Au粒子の焼結挙動及びその機械的特性
3. Au粒子焼結体とAu膜間の接合状態
4. フリップチップ実装したLEDモジュール構造での Au粒子接合の高信頼性
5. まとめ

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.

AuRoFUSE™ペーストの目指す姿

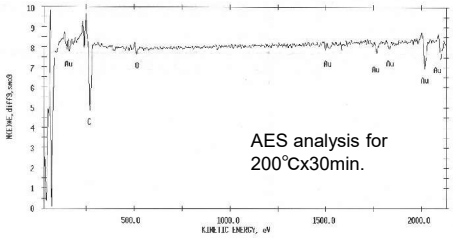
■ ペースト塗布、部材を載せ、無加圧で昇温し接合できること
■ Au粒子と溶剤から構成されるペーストであること
■ 接合後の洗浄工程は不要とすること

- Particle content: ＞95 mass%
- Purity of particle: ＞99.9 wt%
- Average diameter: 0.2-0.4μm
- Viscosity : 40-130 Pa･s
- Thixotropic index : 9-21

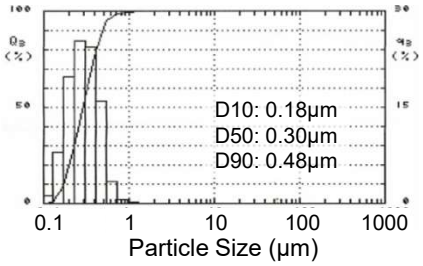
- Halogen free paste
- No resin content
- No cleaning process
- Easy reduction of outgas
- RT. storage

Au粒子の構成

High purity Au surface

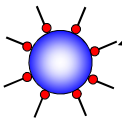


Particle size control



Surface preparation

Sub-micron particles



Surface active agent
(Physically bonded)

- Can be removed at lower temp.

Nano-particles

Organic shell
(Chemically bonded)

- Need to heat up to higher temp. to remove

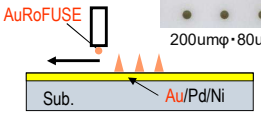
Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.

The Future is Precious. TANAKA

ダイボンド方法

1. Dispensing

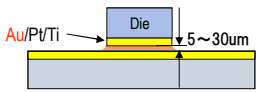
Nozzle diameter 200um
Pressure 0.1 MPa
Time 0.05 s



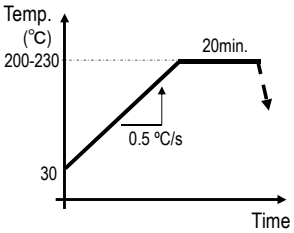
2. Die-mounting (RT)

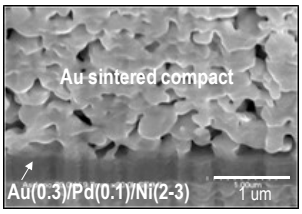
Tack-free time : 24 hour

Loading : 0.5 N



3. Heating without loading





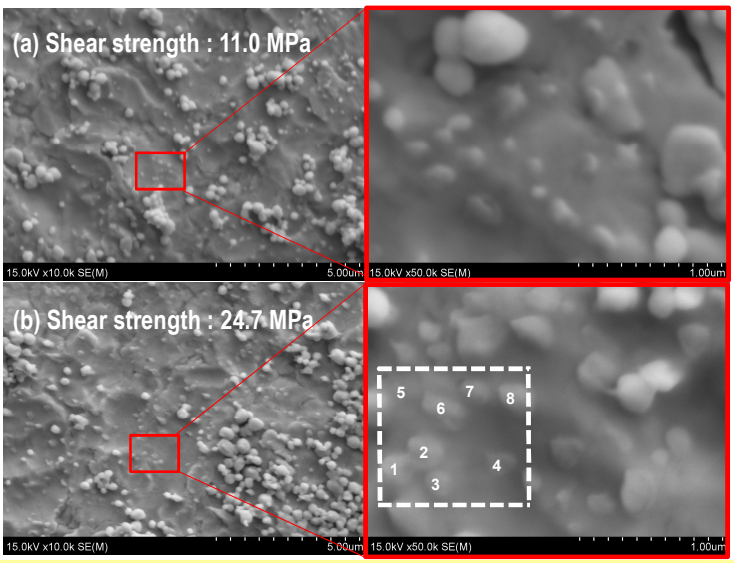
Bond interface after 230℃ heating

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.
The Future is Precious. TANAKA

せん断強度測定後の剥離面のSEM観察

230℃/20min

230℃/20min
+
200℃/1hr



せん断強度は、Auの強度×粒子接合径×接合点数で決まる。

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.
The Future is Precious. TANAKA

まとめ (3)

サブミクロンAu粒子を用いてペーストを試作、230℃加熱後の接合界面を観察した。
接合強度は、Au粒子がAu膜表面に拡散し、ネック部を形成することで出現する。

200℃・1時間の熱処理を施すと、Au粒子とAu膜のネック部は広がり、接合強度は11.0MPaから24.7MPaへ上昇した。

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.
The Future is Precious. TANAKA

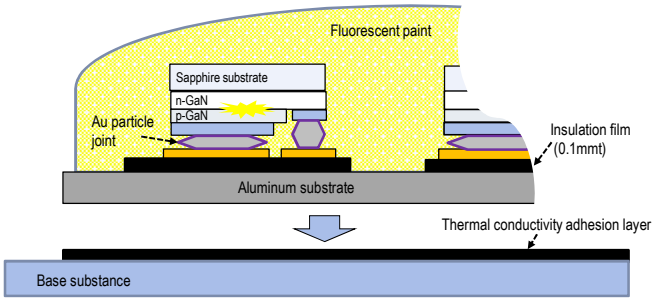
発表内容

1. 次世代パワー半導体の実装材料
2. Au粒子の焼結挙動及びその機械的特性
3. Au粒子焼結体とAu膜間の接合状態
4. フリップチップ実装したLEDモジュール構造でのAu粒子接合の高信頼性
5. まとめ

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.
The Future is Precious. TANAKA

照明用LEDモジュールによる評価

LEDチップをアルミニウム基板にフリップチップ接合する構造は、チップからの放熱に優れることから、実装面積の小型化に有効な構造である。しかしながら、異材間の熱膨張差により接合部近傍のチップダメージが入り易いことから、Au粒子接合の適応可能性を評価した。

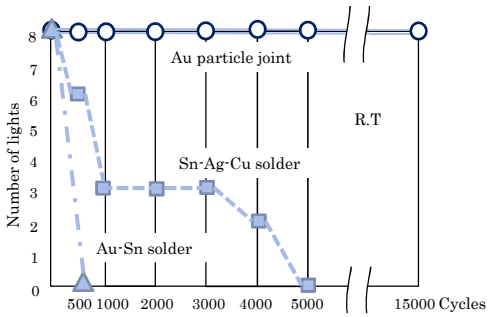


Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.

The Future is Precious. TANAKA

LEDモジュールのON/OFFテスト結果

フリップチップ接合材料として、Au粒子ペースト、Sn-Ag-Cuはんだ、AuSnはんだの3種類を用意した。8個のLED素子を直列に実装したLEDモジュールを製作し、負荷電力24ボルト、350mA、負荷時間15分の点灯・消灯試験による熱ストレス試験を実施した。LED点灯時の全光束(lm)が初期値の90%に低下した段階で故障と判断した。



故障品では、主に順電圧(V_F)が低下したので、電気的リークが発生したものと考える。即ち、アルミニウム基板とLEDチップ間に誘起される熱膨張差に起因した接合部近傍のチップ内ダメージが原因だと推測された。

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.

まとめ (4)

LEDチップとアルミニウム基板をAu粒子で接合したフリップチップ構造体に関して、点灯・消灯試験による熱ストレス試験を行った結果、15000サイクルまで正常に点灯した。異材間の熱膨張差で生じる応力を緩和する点で、Au粒子接合はSn系、Au系はんだより優れていることを確認した。

以上の結果から、サブミクロンAu粒子による焼結接合が、次世代パワーデバイスの実装に適すると結論した。

Copyright ©TANAKA KIKINZOKU KOGYO K.K. All Rights Reserved.