

公開用

第1章

パワーモジュールの実装技術動向と
各種モジュール構造

1. ウェッジボンディングワイヤ

従来の $T_j \leq 150^\circ\text{C}$ 条件で用いられるパワーモジュールにおいては、チップの主電極と外部電極の結線に $300 \sim 500 \mu\text{m}\phi$ の純 Al 太線が、また信号端子部には $125 \mu\text{m}\phi$ 以下の Al-Si 合金細線が用いられてきた。これらの Al ワイヤは、ウェッジワイヤボンダに備わる楔状ツールによってチップや基板に押し付けられ、荷重を加えて変形させた状態で、ワイヤ軸方向に超音波振動を印加することで常温接合される。

なお限定的ではあるが、Al ワイヤと同様のウェッジボンダ手法により、断面積の大きい Al リボンも採用されている。リボン形状にすることで単位当たりの電流量を大きくする、本数を減らすことで装置の処理能力を上げる、接合面積を増やして接合信頼性を高める、拡がり抵抗を減少させるなどの効果がある。

スイッチング動作時の半導体チップは発熱と冷却が繰り返されることで、熱膨張係数に差のあるチップと Al ワイヤ双方の伸縮によって接合界面にせん断応力が生じる。この応力が働くことで Al ワイヤには塑性歪みが発生し、界面近傍の Al ワイヤ内で結晶粒界に沿って破断が進み、最終的にワイヤリフトオフに至る。

従来のケースモジュール構造を用いて $\Delta T \geq 100 \text{ K}$ のパワーサイクル試験を行った場合、最初に起きる顕著な故障はこの Al ワイヤリフトオフで、Al ワイヤ接続寿命が素子寿命を規定しているともいえる。純 Al の再結晶化温度は 180°C ともいわれ、とりわけ $T_j \geq 175^\circ\text{C}$ 条件においては、何らかの対策を施してワイヤ接続寿命を延ばすことが必要になる。

1.1 Cu ワイヤボンディング

2010年に Infineon Technologies が Cu ワイヤを Al ワイヤに代えて用いるウェッジボンディング技術を、 $T_j = 175^\circ\text{C}$ 条件に対応する実装技術「XT Technology」の要素技術として発表した¹⁾。Cu は Al に比べるとチップとの線膨張係数差が小さく、熱伝導率は高く、降伏強度が高い。このためワイヤリフトオフは起こりにくく、Cu ワイヤボンディングは $T_j = 200^\circ\text{C}$ 条件にも耐え得る息の長い技術といえる。Cu は Al に比べて電気抵抗値が低く溶断電流値が高いためワイヤ本数を減らすことができるメリットもある。

しかしながら、Cu は Al に比べて硬く変形しにくい。このためウェッジボンダには高荷重に耐える Cu ワイヤ専用のボンダヘッドを備えた Cu ウェッジボンダが必要となり、従来用いられてきた Al ウェッジボンダを転用することができない。またチップの AlSi 電極に高荷重ボン

公開用

ディングを行うため、半導体チップ、特にトランジスタチップにダメージが加わる恐れがある。Infineon Technologiesは、チップダメージの対策としてチップ電極材料をCuに替え、電極形成のために半導体前工程に湿式の電解Cuめっきプロセスを導入している。

このような前工程投資を行わずにCuワイヤボンディングを導入する方策として、緩衝板(Bond Buffer)をチップ上面の主電極に接合して、緩衝板を介してCuワイヤボンディングを行い、チップダメージを防ぐ技術が実用化されている。この技術を最初に提案したDanfoss Silicon Power(2022年にSemikronと合弁会社Semikron Danfossを設立)は、 $T_j \geq 175^\circ\text{C}$ 条件で有望なダイアタッチ材である焼結Ag(ペーストもしくはフィルム)を用いて、Al電極にNi/Auめっきが施されたチップ上面に、同じくNi/Auめっきが施されたCu緩衝板を加圧焼結接合している²⁾。Cu緩衝板を用いることでワイヤリフトオフがなくなり、 $T_j = 175^\circ\text{C}$ 条件でのパワーサイクル寿命は大幅に延びる。ただし、パワーサイクル試験を継続すると、チップとCu緩衝板の熱膨張係数のミスマッチから、今後は主にチップ電極のAlSiメタライズ層内でクリープ疲労が進み、最終的には剥離に至ることが報告されている。パワーモジュールにおいて強度的に最も弱い接合部が、従来のワイヤ内部からCu緩衝板を接合するチップ電極に移ったわけであるが、より高温の $T_j > 200^\circ\text{C}$ 条件でパワーサイクル試験を行った場合、この電極部の剥離が早期に発生して、モジュールの品質保証上、致命的な故障に繋がる恐れがある。この故障の対策としては、緩衝板材料をCuに替えてCu/Invar/Cuクラッド材を用いて、チップと緩衝板の熱膨張係数を整合させることが日系企業から提案されている³⁾。

いずれにしてもCuワイヤボンディングを行うにはCu専用ボンダが必須となる。Cuウェッジボンディングの導入は欧州で先行し、Cu専用ボンダにおいてもHesseとKulicke & Soffa Industriesの欧米企業2社が先行している。Alに比べてCuが硬いため、当初はウェッジツールやワイヤカッターが数万ボンドしか持たず、ワイヤフィードチューブも擦り切れてしまうなど、パーツの寿命に問題が多かったが、最近では、ツール寿命は10倍以上に改善され、チューブもワイヤ牽引力を下げ安定化させることで擦り切れが少なくなっている旨が報告されている。

新しいCuワイヤボンダ装置としては、Hesseが赤外線ファイバレーザによってウェッジツールを加熱する熱アシストボンディングを実用化している。ファインワイヤを用いたボールボンディングが荷重、熱、超音波のエネルギーに因る接合技術であるのに対して、従来のウェッジボンディングは荷重と超音波による常温接合技術であったが、ここに熱アシストを加えることで、荷重、超音波エネルギーを2割下げて、Cuワイヤによるチップダメージのリスクも軽減している。

2. ダイアタッチ材料

欧州連合における RoHS 指令(電気電子機器に含まれる特定有害物質の使用を制限する指令)により Pb の使用が規制され、183℃ の融点を持つ PbSn 共晶はんだは各種の Pb フリーはんだに代替された。しかしながら、パワー半導体チップをパッケージ基板に接合する「ダイアタッチ材料」(最近ではダイ上面に Cu リードを接合する「クリップアタッチ材料」にも言及されるようになってきている)として従来用いられてきた 300℃ 近い融点を持つ各種の高温 Pb はんだについては、汎用性の高い代替材が存在しないため、未だに適用除外用途としての使用が許容されている。ただし、Pb の使用は適用除外用途において無期限に認められるものではなく、科学・技術の進歩を反映して見直すこととされ、常に最長有効期限が設定されている。このため代替材の開発動向には特に注意を払う必要がある。

2.1 DA5(Die Attach 5) コンソーシアムで検討されている高温 Pb はんだ代替材料

DA5(Die Attach 5) コンソーシアムが定期的に公開している顧客向けプレゼンテーション⁸⁾は、高温 Pb はんだ代替材の開発動向を知る上で有用である。DA5は、現在 Infineon Technologies, Robert Bosch, STMicroelectronics, NXP Semiconductors, Nexperia の 5 社によって結成されており、代替材料の研究開発および規格化を合同で行い、顧客企業が必要とする検証時間を短縮し、できるだけ早く無鉛で環境にやさしいソリューションを提供することを目的としている。DA5 によって高温 Pb はんだ代替として検討されている材料カテゴリーは、

- ①「金属焼結」
- ②樹脂バインダを含んだ「焼結接着剤」
- ③「TLPS(Transient Liquid Phase Sintering : 遷移的液相焼結)」
- ④Pb を含まない高融点の「代替はんだ材」

の四つである。

このうち②「焼結接着剤」のレーティングが最も高く、メンバー企業中 4 社によって成功裡に評価が進み、パワーディスクリットなどの限定された用途において採用が進んでいる。しかしながら、依然四つのカテゴリーのいずれの材料も、コンソーシアムによって定義された Pb フリーダイアタッチ材料の要件仕様を満たせてはならず、今のところ広い用途でオールラウンドに用いることのできる代替材料は見つかっていない。

パワーモジュールにおける高温 Pb はんだ代替材料として最も有望視されているのは、Ag を用いた①「金属焼結」の技術である。従来のはんだ接合の技術では、接合材であるはんだ合金を溶融させ、被接合材との界面に金属間化合物を生成させて接合を行うため、プロセス温度は

公開用

どうしても接合層のはんだ合金の融点より30℃以上高くなる。一方Ag焼結接合技術を用いると、接合材料のAg粒子を融解させることなく、融点961.8℃よりはるかに低い230～280℃というプロセス温度で焼結させて、高い融点を持つAg単体で形成された耐熱性の高い接合層を形成することができる。特徴的なのは、この焼結層を微細なオープンボア(空隙)を持つポーラスな組織にできることである。ポーラス組織でありながら材料設計を最適化することで、密度の高い(つまり空孔率の低い)均質で緻密な焼結層が得られる。金属の中では最も熱伝導率の高いAgが用いられているため、ポーラス構造でありながら熱伝導率は従来のはんだ接合層の4～6倍に相当する200 W/mKを大きく上回り、中には300 W/mKを超えるものもある。またその弾性率は、バルクAgの組織とはかけ離れて低く、SACはんだ並みの数値を示すように設計することが可能である。熱膨張率差のあるパワー半導体チップと基板材料を接合するダイアタッチ材には、高温スイッチング動作で繰り返される加熱・冷却により生じる熱応力を緩和する役割が求められるが、最適化されたAg焼結層は高耐熱性、高熱伝導性ととも、この応力緩和特性も兼ね備えている。

Infineon Technologiesは2010年当初、 $T_j = 175^\circ\text{C}$ 条件に対応する実装技術「XT Technology」のダイアタッチにCu-Sn「液相拡散はんだ付け」を採用することを表明していた¹⁾が、2015年にAgを用いた「金属焼結」に切り替えている。拡散はんだ付けは、Ag焼結接合技術と同様に、低いプロセス温度で高融点の接合層を形成する技術であるが、最終的な接合層は接合材のSnCuはんだから生成される薄い高融点のCu-Sn金属間化合物 Cu_6Sn_5 で、具体的にはメタルマスクを用いて $20\mu\text{m}$ 程度の非常に薄いSnCuはんだ層を絶縁セラミック基板のCu回路に印刷し、その上に、裏面にCuをメタライズしたチップを真空気相はんだ付けすることで形成される。このプロセスにはPINK GmbH Thermosystem(以降、PINK)製真空はんだリフロー装置が用いられていると思われる。パワーモジュール用途で技術が変更になった背景には、モジュールに用いられている絶縁セラミック基板のCu回路は、接合時の熱履歴により表面には少なからず凹凸があり、 $10\sim 20\mu\text{m}$ の薄く平坦な接合層を作ることが難しかったのではないかと推測する。Cu回路の平坦化のためには、別途、表面研磨の工程が必要になると考えられる。

DA5によって高温Pbはんだ代替として検討されている③「TLPS(遷移的液相焼結)」も、「液相拡散はんだ付け」と同様に低いプロセス温度で高融点の接合層を形成する技術で、代表的なものはSnCuはんだ(もしくはSn)の粉末とCuの粉末(や微粒子)を混合した材料を用いて、Snが溶けるまで温度を上げCuと反応させて融点 415°C の Cu_6Sn_5 相を作り、これを介して最終的に融点 676°C の Cu_3Sn 相を得るものである。DA5で評価されているものは、金属でできた構造の隙間を樹脂(ポリイミドと思われる)が埋めるハイブリッド材料になる。

「TLPS」、「液相拡散はんだ付け」という呼称はしばしば混同して用いられているように思え

3. 絶縁回路基板とパワーモジュール構造

3.1 絶縁回路基板の種類

絶縁回路基板はパワーモジュールに用いられる高放熱性の回路基板材料で、チップを実装して電気回路の役割を果たす導体材料と絶縁材料が複合化され、「内絶縁」のモジュールパッケージの絶縁信頼性を担保している(モジュールパッケージが絶縁性を備えず、パッケージを実装する際に絶縁材料を外付けする「外絶縁」構造には、絶縁回路基板は使われない)。導体材料と絶縁材料を一体化しておくことは、組立工程の簡略化、低コスト化にも貢献できる。

導体回路材料としては、CuやAl、またはそれらを主とした合金が用いられ、絶縁材料としては、絶縁セラミック(白基板)や絶縁樹脂が用いられている。

絶縁セラミック材料には、酸化物セラミックの Al_2O_3 (アルミナ)、ZTA(Zirconia Toughened Alumina：ジルコニア強化アルミナ)、高熱伝導性窒化物セラミックの AlN (窒化アルミニウム)、 Si_3N_4 (窒化ケイ素)があり、これら4種類のいずれかの両面に導体材料CuまたはAlが接合される。回路となるチップ側だけでなくセラミックの反対側にも導体が接合されるのは、導体とセラミックの熱膨張係数差による熱反りを防ぐためである。導体材料がCuの場合には、DBC(Direct Bonded Copper：銅直接接合、酸化銅液相接合)もしくはAMB(Active Metal Brazing：活性金属ロウ付け)、Alの場合にはDBA(Direct Brazed Aluminum：アルミロウ付け)もしくはMCB(Metal Casting directly Bonding：溶湯接合)という接合法が用いられる。通例ドクターブレード法で製造される絶縁セラミック(白基板、プレーン基板)の厚さは材料によっても異なるが、0.25～0.8 mmと薄い。接合されるCu導体回路材料の厚さはセラミック材料の破壊靱性値によっても左右されるが、長らく0.3 mmが主流であった。最近になって三点曲げ強度と破壊靱性値の高い Si_3N_4 が登場したことで、0.8 mmのCu回路も貼られている。回路のCu材料の熱膨張係数は、Siなどのチップ材料に比べて一桁大きいですが、チップに近い熱膨張係数を持つセラミック基板に貼ることで、Cu表面の熱膨張を抑制し、ダイアタッチ材の疲労寿命を改善する効果がある。ただしセラミック基板に破壊靱性値の低いアルミナや AlN を用いた場合は、熱サイクルによってCu接合部で基板割れが生じる懸念がある。一方、Al導体回路材料の厚さは、0.3 mmのCu回路に比べて電気伝導率が低いことから当初0.4 mmと厚めに設計されたが、Al回路がCu回路に比べて熱サイクル負荷を受けた場合に変形応力が小さく、サイクル数が増えてもセラミックにかかる負荷の変化が小さいことから、セラミック基板を壊さずに2～3 mmのAl板を貼ることも可能である。ただしCu、Alいずれの導体回路パターンも通常はエッチングにより作成されるため、回路が厚くなると回路スペースが大きくなってしまう。

基板の絶縁材料に樹脂を用いる場合は、多くは絶縁フィラーを含む熱硬化性のエポキシ樹脂

シートで、一部でポリイミドのような高耐熱樹脂を用いた例もある。これら接着性を持つ絶縁樹脂によって放熱ベース板とCu導体配線が接着される。放熱ベース板はAlもしくはCuの1~3 mmの厚板で、導体配線は従来、105 μ m程度より薄いCu箔であった。そのような基板はIMS (Insulated Metal Substrate : 金属ベース基板) と呼ばれていたが、最近では絶縁樹脂層の高熱伝導化に伴い、Cu導体をリードフレーム並みに厚くした高性能基板が登場して、IMB (Insulated Metal Baseplate) と呼ばれている。

3.2 絶縁セラミックを用いた回路基板とモジュール構造

3.2.1 Cu回路絶縁セラミック基板(1) -アルミナ・ZTAを用いたDBC基板とベースレス構造

Cuと絶縁セラミックを接合した回路基板においては、1970年代初頭にGEで考案されたDBC基板が嚆矢となる。Cu板とアルミナ白基板を接触させて配置し、不活性雰囲気中でCu-Oの共晶温度1,065 $^{\circ}$ C以上かつCu融点1,083 $^{\circ}$ C以下に加熱して、液体になったCu₂O(亜酸化銅)でCuとアルミナを濡らして、冷却することで両者を接合する。共晶体の形成に必要なOは、接合雰囲気中に導入、もしくはCu材を予め酸化することによって供給する。接合材や、接合材をセラミックに濡らすための中間層を用いることなく安価にCuを酸化物セラミックに接合することができる。しかしアルミナの熱伝導率は20 W/mK台で、はんだ材と比べても低く、Cuの386 W/mKと比較すると大いに見劣りする。このためモジュールの放熱系を構成する材料の中で大きな熱抵抗層となっている。

DBC基板の低熱抵抗化対策としては二つのアプローチがある。一つは熱抵抗層となるアルミナ白基板を薄くすることで、もう一つは両面のCu導体部を厚くして熱密度を下げることである。DBC基板のベース基板として用いられているアルミナ白基板を、アルミナにジルコニアを添加して三点曲げ強度と破壊靱性値を高めたZTAに替えることで、この二つを同時に実現できる(上述した四種類の絶縁セラミック全てを量産している世界唯一のサプライヤーであるMARUWAのホームページ¹⁹⁾から特性値を抜粋して比較表(表2)にまとめたので参照頂きたい)。具体的にはセラミック白基板を0.635 mmから0.32 mmへと半分にできる。ZTAは熱伝導率でアルミナと大差はないが、厚さを半分にすれば熱抵抗は半分になる。また両面のCu導体部の厚さを、アルミナを用いたDBC基板(以降アルミナDBC基板と略す)の0.3 mmより厚くすることができる。熱はCu断面を45度の角度で拡がるため、従来、熱が基板裏面のCu導体面積に対して片側0.3 mm分ずつ拡がっていたものが、片側0.6 mm分に拡げることができる。

チップから放熱器に至る放熱系の熱抵抗を下げるには、DBC基板裏面にはんだ付けされている放熱ベース板を取り除いて、基板裏面を直接ヒートシンクに固定して放熱冷却する「ベースレ

公開用

第2章

高耐熱・高信頼性実装のための材料と
プロセス技術動向

第1節 ワイヤーボンディングプロセスの開発動向

ヘッセ・メカトロニクス・ジャパン(株) 橋爪 二郎

はじめに

ワイヤーボンディングは、半導体チップ上の電極間、半導体チップと基板の回路やリードフレームなどとの間を、金属ワイヤーで電氣的に接続するプロセスである。ワイヤーボンディングの工法は主にボールボンディング方式とウェッジボンディング方式がある。

ボールボンディング方式はその方式上、細線(主に $40\mu\text{m}$ 以下)のみに使用され、ワイヤーは主に金・銅・その他銀ワイヤーなどをボンディング可能である。ウェッジボンディング方式は一般的に使用される $18\sim 500\mu\text{m}$ という太線も含めた幅広いワイヤーサイズのボンディングが可能であり、更にリボンと呼ばれる断面が長方形のワイヤーもボンディングできる。ワイヤーは主にアルミ・金・その他プラチナワイヤーなどをボンディング可能である(金ワイヤーは一般的に $75\mu\text{m}$ 以下のみ)。近年では大電流化・高信頼性の要求に応えるため、銅ワイヤーや銅リボンボンディングの研究・実用化が進められている。

大電流を扱うパワーモジュールにはウェッジボンディングが使用されるため、本稿ではウェッジボンディングについて解説する。

1. ウェッジボンディングとは

ウェッジボンディングは、およそ1960年代にマイクロエレクトロニクス業界で実用化が進められ始め、その後、金ワイヤー向けのボールボンディングが実用化されるまでは、ほとんど全てのデバイス向けに使用されていた。現在では一部の細線でも使用されているが、パワーモジュールなどのパワーデバイスに用いる太線の接合はウェッジボンディングが使用されている。以降では太線のウェッジボンディングプロセスに関して解説する。

アルミ太線ウェッジボンディングは、一般的に常温で行われる。デバイスやワイヤーを加熱してボンディングするとボンディング性は良くなるが、アルミワイヤーに対して常温でのボンディング品質が十分であるため、アルミワイヤーに対しては古くから常温でボンディングが行われてきた。

ンスデューサーを固定する部分であり、Cはホーンと呼ばれる。ホーンはテーパー状に先端を細くすることもあり、その場合は振動が増幅される。Dがウェッジツールである。曲線は超音波振動を模式的に表している。ウェッジツールの先端はテーパー状に細くなっており、振動が増幅されていることを曲線で示している。このウェッジツールの先端でワイヤーをボンド対象に押し付けた状態で超音波振動を加え、ワイヤーを接合するのである。

1.3 ワイヤーボンドの例

図3に、ウェッジボンドのSEM写真を示す。アルミ同士の接合性が最も良く、アルミ太線をボンディングするチップのボンドパッドは、通常アルミを材料として使用し、厚みは約 $4\mu\text{m}$ 前後である。DBC基板には直接銅の回路にアルミ太線をボンドし、端子などの硬い銅には接合性を考慮してニッケルメッキを施すのが一般的である。図4に、パワーモジュールでのウェッジボンド部の写真も示している。本稿では具体的に解説しないが、ワイヤーの接合に関する内容以外に、ワイヤーのループ形状の安定性も非常に重要であり、デバイスのパフォーマンスや信頼性に影響を与える要素である。

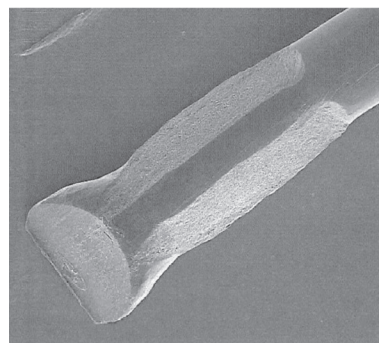


図3 ウェッジボンドSEM写真

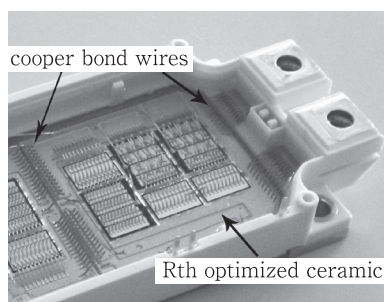


図4 パワーモジュールにおけるウェッジボンド部の写真

1.4 ウェッジボンディングの現状

半導体チップと基板回路の接合技術には、クリップボンディングなどウェッジボンディングを置き換えるプロセスがあるが、ボールボンディングも含めてワイヤーボンディングは非常に汎用性が高く、特に少量多品種のような用途には生産効率とコストの両面で最も良いプロセス

である。パワーモジュールの技術の進歩とともに、求められるループ形状を達成するための技術や、小型化・大電流化のためにアルミリボンボンディング技術が開発されるなど、ワイヤーボンディングの技術も進歩してきた。

現在では電気自動車向けに非常に多くのIGBTモジュールの需要があるが、アルミワイヤーやアルミリボンワイヤーでは許容電流値や信頼性、高温動作の点において限界点に達しており、アルミ合金ワイヤーやアルミ銅クラッドワイヤー、銅ワイヤーなどの材料面での改善に加え、ボンディングプロセスの進化が必要となっている。以降では、その中でも最も信頼性向上と高温動作化への効果が得られる銅ワイヤーボンディングについて解説する。

2. 銅太線ボンディング

25 μm 前後の細線のボールボンディングにおいて、コストダウンのために、既に非常に多くのデバイスで金ワイヤーから銅ワイヤーに置き換わっている。一方、太線のウェッジボンディングでは事情が異なり、アルミワイヤーから銅ワイヤーに置き換えるとコストアップになる。ただし、銅ワイヤーを使用するとアルミワイヤーよりも信頼性が数倍～数十倍高くなるという研究結果もある。アルミワイヤーでは難しい175 $^{\circ}\text{C}$ 以上の高温環境での動作や大電流化、また大電流化に伴うモジュールの小型化にも対応できることにより、研究が進められている。

2.1 銅太線ボンディングの実際

特定の非常にハイエンドなパワーモジュールでは、銅太線ボンディングは、既に量産に適したものとされている。

銅ワイヤーは非常に硬いため、アルミワイヤーと比較するとボンディングが非常に難しい。500 μm のアルミ太線のボンディングでワイヤーにかける荷重が一般的に1.2 kg程度であるのに対し、銅太線の場合は3.5 kg程度と約3倍の荷重が必要になる。もちろん超音波の出力もそれに伴って大きくなり、ボンディング中にシリコンチップ、特にIGBTのような脆いチップは非常に高い確率で破壊される。そのため、銅太線をボンディングするチップは、チップ上に銅などの硬い材料でパッドを作り、かつその厚みも20 μm 前後が必要となる。

アルミ太線から銅太線への置き換えに伴う接合条件の変更やチップ上への厚みのある銅パッドの形成は、どちらもコストアップ要因となる。

チップ上に銅薄板をAg焼結などでマウントする製品も提案されている。例えばチップの形状に合わせて設計した厚み200 μm の銅板を、Ag焼結でチップの上にマウントするものである。こうすることでチップ自体の設計変更はせず、銅ワイヤーをボンディング可能な表面を作

第2節 ダイアタッチ材料と接合技術動向

[1] パワーデバイス向けはんだ材料・Ag焼結材料の現状と展望

千住金属工業(株) 菊池 真司

はじめに

電子機器に囲まれた現代社会は、パワーデバイスによって支えられているといっても過言ではない。パワーデバイスの内部でダイアタッチに用いられている接合材料には、高い耐熱性や放熱性が要求される。そして、ワイドバンドギャップ(WBG)半導体の実用化により、接合材料に求められる特性はますます厳しくなるだろう。

また、はんだ合金に関わる大きな時代の潮流として、Pbフリー化が挙げられる。高温はんだ合金は現在でもPbリッチ組成が主流だが、代替となる接合材料の開発が盛んに行われ、パワーデバイス分野でもPbフリー化への過渡期に入っている。

本稿では、はんだを中心としたダイアタッチ用接合材料の概要と技術動向について紹介する。そしてパワーデバイス向けに開発されたはんだ製品例をいくつか挙げ、次世代パワーデバイスの接合材料として期待されているAg焼結接合についても紹介する。

すでに始まりつつあるWBG半導体と高温Pbフリーはんだの時代に向けて、接合材料を選択する参考になれば幸いである。

1. パワーデバイスに使用されるはんだ

1.1 現代社会とパワーデバイス

パワーデバイスは電力の変換・制御を行う素子であり、あらゆる電子機器に広く用いられている。エアコンや冷蔵庫などの家電、スマートフォンやパソコンといった身近な製品をはじめ、自動車・鉄道・飛行機などの輸送用機器、工場で稼働する産業機器、そして発電や送電などのインフラにいたるまで、電気エネルギーを使用する装置には十中八九、パワーデバイスが組み込まれており、日々その恩恵を受けている。

特に、多大な電力を使用する機器の回路には、パワーデバイスを複数搭載したパワーモジュールが不可欠である。パワーモジュールが効率よく電力を供給することで、機器は省電力かつ、状況に応じて適切に動作することができる。

現代社会では世界的な人口増加や生活水準の向上に伴い、物質やエネルギーの需要は増加の

一途をたどっている。それはとどまることなく、電力消費がさらに増えていく未来は想像に難くない。

その一方で、地球温暖化に代表されるような、環境問題に対する意識が各国で高まっており、化石燃料の使用削減など、カーボンニュートラルに力を入れる企業も増えてきた。

これら相反する要求を満たしながら、安定したエネルギーを供給し続けられる、持続可能な社会の実現を目指す中で、電気エネルギーを効率よく利用するためのパワーデバイスは活躍の場が広がり、来たる時代に向けてますます需要が伸びると予想される¹⁾。

パワーデバイスは様々な場所や形で毎日の生活の中に存在しており、その内部で接合材料として用いられているはんだも、パワーデバイスの機能を支える要素の一つとして現代社会と大きく関わっている。

1.2 パワーデバイスにおけるはんだの用途

図1はパワーデバイスの模式図の一例である。半導体チップを基板に実装する接合技術はダイアタッチと呼ばれる。一般に、パワーデバイスには、個別の機能を持つ小型部品のディスクリートと、複数の素子を組み合わせてパッケージングしたパワーモジュールがあるが、はんだはどちらのダイアタッチにも使用される。

チップ上面はワイヤボンディングにより電氣的接続がされており、近年ではワイヤボンディングに代わって、金属クリップやリードフレームをはんだによって接続し、放熱性や接合信頼性を向上させたものもある。

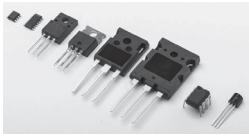
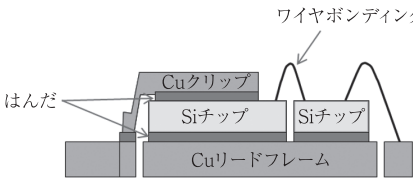

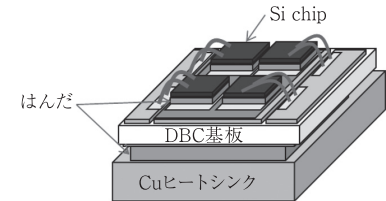
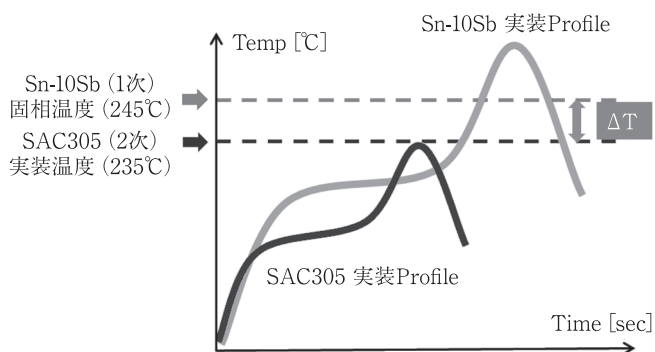
種類	模式図	はんだ付け箇所
ディスクリート 		<ul style="list-style-type: none"> ・Siチップ/Cuクリップ ・Siチップ/Cuリードフレーム (ダイアタッチ)
パワーモジュール 		<ul style="list-style-type: none"> ・Siチップ/DBC基板 (ダイアタッチ) ・DBC基板/Cuヒートシンク

図1 パワーデバイスの構造



工程	はんだ	固相温度	液相温度	実装温度
1次	Sn10Sb	245°C	266°C	280°C
2次	SAC305	217°C	220°C	235°C

1次工程の固相温度245°C
 2次工程の実装温度235°C 温度差ΔT 10°C
 部品内部の再溶融は起こらない

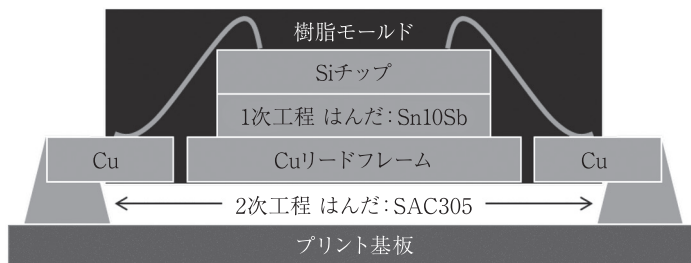


図4 ステップソルダーリング 部品内部接合

本工法の利点はすでに汎用展開しているはんだで高温Pbフリー化が叶えられる点にある。材料に対する抵抗が極めて低く、接合のための設備投資なども不要であるため検証から実用化までが最短距離で見極めることができる。

2.4 高温Pbはんだ代替：SnSbAgCu はんだ

WBG半導体の登場により、チップと基板の接合箇所は現在以上に高温となる。その場合、SnSb系合金を高温はんだとして適用するには、Sbの添加量を増やし、さらに融点を上げる必要がある。

Sn-Sbは固溶限界を超えると1:1量比での化合物を生成する。これは低温相として残りやすいSnに対して効率的な消費を図ることができ、生成した化合物も想定しうる実装温度の範囲

内に収まる利点を持つ。そこで、SnとSbを主成分として合金組成を最適化し、高温Pbはんだに匹敵する300℃を超える液相線を持った、SnSbAgCuはんだ合金の開発も行っており、有力な代替材料候補となっている。

また、SnSbAgCuはんだは、ダイアタッチのみならず絶縁基板実装向けにも適用可能である。セラミック基板と放熱板の接合は比較的大きな面積での実装を必要とし、ソルダプリフォームの適用が多い。そして大面積であるが故に、接合部に加わる熱応力は増幅し、はんだの耐久も一段階上の性能が求められる。Sbの添加量が増えるに伴い化合物量も増えて硬くなり、はんだの強度が上がり有利になる。

その一方で、ソルダプリフォームの製造においては伸展性が重要になってくる。当社では、信頼性および製造の観点からSb添加量を設計し、優れた伸展性と高強度を併せ持つ高耐熱はんだを開発、量産している。

SnSbAgCuはんだは、Si半導体の実装のみならず、SiCなど今後を担う最先端エレクトロニクスに対しても、接合材料として支えることができると考えている。

2.5 Sbへの認識

Sbは高温Pbフリーはんだのカギとなる元素であるが、Sbの使用に対して懸念の声をしばしば聞く。これは、Sbの酸化物である三酸化二アンチモンが発がん性を有し、厚生労働省から規制物質に定められたことが主な原因である。

誤解なきよう、まず明確な事実を述べると、現時点で規制対象となっているのはあくまで三酸化二アンチモンであって、Sbの使用自体は規制されていない。この事実を咀嚼した結果、安心する人がいる一方、「Sbが組成に含まれていれば、その酸化物も合金内に存在しうるのではないか」という考えにいたる人もいるだろう。

しかし、Snに配合されたSbはSnSb化合物を形成するため、Sb単体がはんだ中に存在することはない。そのため、Sbの酸化物が生じる可能性も極めて低く、実際Sbが30%以上含まれる合金のXRD回折(図5)においてもSb単体およびSb酸化物は検出されていない。

Sbは高信頼性はんだにも含まれており、一時、車載メーカーをはじめとする電子デバイス業界においても、Sb酸化物規制への懸念からSbフリーの動きがあった。しかし、Sbが有する温度シフトや強度向上の性能は他金属元素では代替が効かず、昨今では車載や電鉄に用いられるはんだにおいて、主要添加元素として広く展開している。

以上、「Sb自体は規制されていない」「Sb酸化物ははんだ合金中に検出されない」という2つの状況を踏まえてSbへの懸念を払拭し、はんだ合金に対し有用な元素として認識すれば、接合材料の選択肢は大幅に広がる。

〔2〕 高耐熱ナノソルダー接合材料

パナソニック ホールディングス(株) 古澤 彰男 石谷 伸治 高尾 茜

はじめに

パワー半導体は産業界を支える基盤技術であり、その市場は拡大を続けている。今後は、電力損失の低減や小型化が可能な GaN, SiC の増加が見込まれ、それに伴い、動作温度は 175～200℃ に上昇する。このようなデバイスの組み立てには、接合材料としてはんだ材料を使用しているが、動作温度が 175℃ 以上になると接合信頼性を保つことができない。

GaN, SiC に使用可能な接合材料として Ag ナノ焼結材, AuSn, PbSn がある。これらは耐熱温度に違いがあり、200℃ まで使用できるのは Ag ナノ焼結材のみである。しかしながら、Ag ナノ焼結材は固相拡散によって接合するため接合が完了するまでの時間が長いという問題がある。パワー半導体の組み立てプロセスにおける消費エネルギーを調査すると、加熱炉で 14.0 kW のエネルギーを消費しておりプロセス全体の 97% を占めていた。そのため、はんだ材料を Ag ナノ焼結材に置き替えると組み立てプロセスの消費エネルギーが 9.4 倍に増加する。消費エネルギーの削減には、低温化かつ短時間で接合可能な新たな接合材料が必要である。本稿で解説するナノソルダー接合材料は、遷移的液相焼結法 (TLPS) を利用している。この技術によって接合プロセスの低温化と短時間化が可能となるため、パワー半導体製造プロセスの消費エネルギーを削減することができる。

1. 短時間焼結ナノソルダー接合材料

1.1 材料設計

当社は、SnBi マイクロ粒子と Sn ナノ粒子と Cu ナノ粒子を複合化させたナノソルダー接合材料を開発した¹⁾。ナノソルダー接合材料は、式(1)に示す反応プロセスを採用している。



図1に示すように、ナノソルダー接合材料を 200℃ に加熱すると SnBi マイクロ粒子が液相となり、固相の CuSn 粒子との間で相互拡散が起こることにより金属間化合物として Cu₃Sn (融点 676℃) および Cu₆Sn₅ (融点 415℃) を形成する²⁾。これによって接合部の再溶融温度が高くなり、最高使用温度を高くすることができる。また、CuSn 粒子をナノサイズにすることで比表面積

が大きくなり、短時間接合を可能とした。このようにナノ solder 接合材料は低温・短時間の加熱プロセスと、耐熱性を両立させることに成功した。

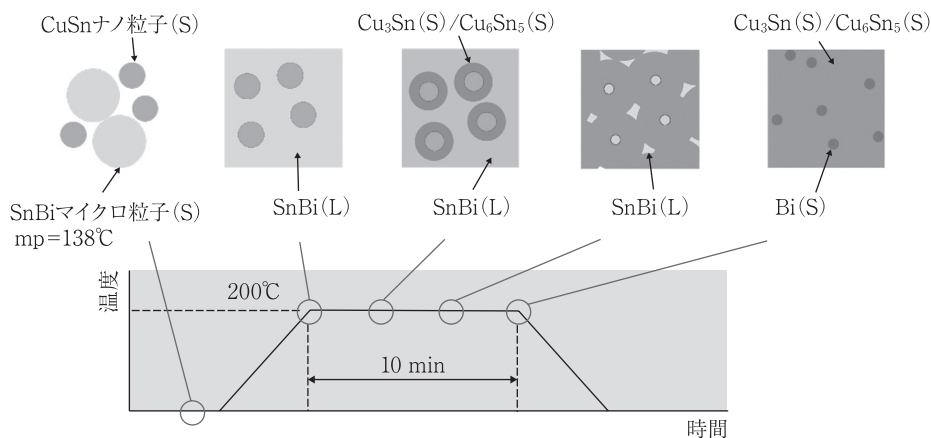


図1 ナノ solder 反応プロセス

1.2 接合検証

ナノ solder ペーストの外観写真を図2に示す。ナノ solder 接合材料の接合品質の検証は、5 mm × 5 mm の Si チップと DBC 基板にて実施した。接合サンプルは、図3に示す 200°C で 10 分間の加熱条件で作製した。接合層は図4の断面 SEM 像に示すように、CuSn 相に Bi 相が点在している構造であることが確認された。このように CuSn と Bi の海鳥構造であることにより、強度の高い接合を形成することができる。作製した接合サンプルに -40°C / 200°C の温度サイクル試験を実施したところ、3,000 サイクル後の接合断面の破断進展は 15% であり、目標である 1/3 以下をクリアした。また、ナノ solder ペーストの粘度変化は冷凍保存条件で 3 週間後に 12% であり、目標値の 30% 以内であった。



図2 ナノ solder ペースト
(カラーの図は巻頭ページに掲載)

[4] パワーエレクトロニクスデバイスの加圧焼結プロセスおよび シンタリング装置

ピンク・ジャパン(株) 渡邊 和也

PINK GmbH Thermosysteme Simon Merkert

はじめに

本稿では、加圧焼結に関する基礎理論の説明およびドイツに拠点を持つPINK GmbH Thermosysteme社(以降PINK社)のシンタリング装置を用いたパワーモジュールの製造工程を簡単に紹介する。

1. パワーエレクトロニクスモジュールの焼結

1.1 焼結の定義

焼結またはシンタリングは、原子拡散に基づく固体材料の物質移動プロセスである。焼結プロセスの原動力は、総表面エネルギーの減少であり、その後の界面エネルギーの減少である。この原動力は、外圧によってサポートすることができる¹⁾。

1.2 材料と予備焼結プロセス

現在、パワーエレクトロニクス部品の焼結接合には様々な材料が利用可能となっている。最も一般的な材料は、メーカーから提供されているマイクロおよびナノスケールの銀ペーストであると思われる。また近年では、銀に代わるより費用対効果の高い接合材料として、銅が科学技術の観点および産業界において注目を集めている²⁾。

焼結材料には様々な適用方法がある。最も一般的に使用されるのは、ペースト状の焼結材料を基板、たとえばダイレクトボンド銅基板(DBC)またはアクティブメタルブレージング(AMB)基板にスクリーン印刷またはステンシル印刷するプロセスである。印刷後、乾燥工程によりペーストに含まれる溶剤を蒸発させる。次に、チップを予備乾燥ペーストに適用することで製品は焼結の準備が整う。焼結される製品の準備のための様々なプロセスは、参考文献³⁾によって詳細に説明されている。固相プロセスであるため、インプリントされた空隙が圧縮された焼結層に残る可能性が高く、印刷エラーを回避する必要がある。乾燥が不十分であると焼結中に溶媒が急速に蒸発するため、焼結層に空隙が生じる可能性がある^{4,5)}。焼結材料はペー

公開用

感な部分は、保護マスクで覆われている。ベースプレートの左側には温度記録用のデータロガーがある。

図4に、PINK社のシステムでの典型的な焼結プロセスを示す。酸化を防止するために、排気とプロセスガス(本説明内においては窒素)を充満させることにより、チャンバー内雰囲気気を2回交換する。次にベースプレートがツールと接触し、圧力が上昇する。素早い圧力の立ち上がりと良好な温度伝達

により、所望のプロセスパラメータが迅速に達成され、加熱ステップでの焼結の原動力の損失が最小限に抑えられる。圧力は記録され、焼結時間全体にわたって再調整される。焼結プロセスの後、キャリアは焼結システムの冷却ゾーンに移動し、冷却プレートと接触して急速な冷却を達成することで高いスループットを達成する。冷却パラメータは、ユーザーの要件に合わせて調整することも可能である。

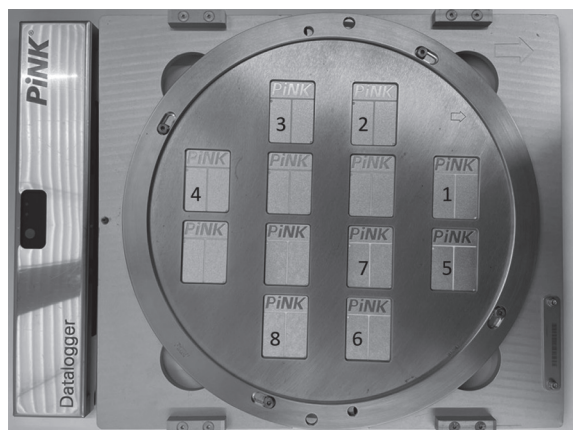


図3 プロセス開発用のPINK社製温度測定キャリア
DBC基板上的番号は、図4の測定位置(CH1～CH8)を示している。(カラーの図は巻頭ページに掲載)

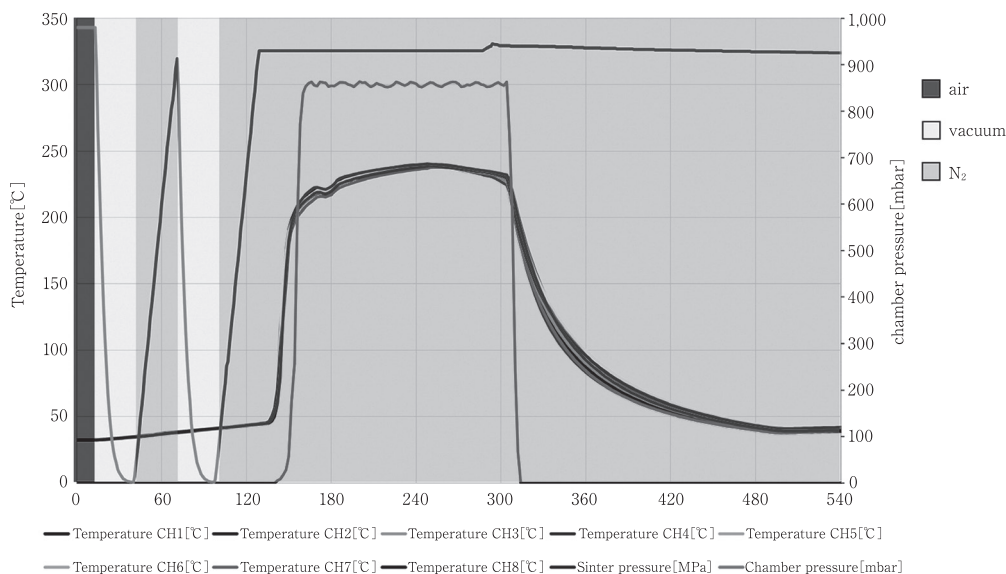


図4 PINK社製シンタリングシステムSIN 200+での典型的な焼結プロセス
製品の温度とチャンバーの圧力が時間に対してプロットされる。プロセスの雰囲気気を色別に表示している。なお、この図のプロセス圧力は一例である。また、熱電対が破損するため温度測定中に加圧は行わない。(カラーの図は巻頭ページに掲載)

3. PINK社製シンタリング装置

PINK社は、パワーモジュールの接合技術において20年以上の経験を有する。真空リフローシステムで最もよく知られているPINK社は、非常に信頼性が高く、熱伝導性の高い接合のためのシンタリング装置も製造している。SIN 200+システムは、長年にわたって大量生産用に十分に確立されているが、より小型のSIN 20システムは、実験室および研究開発用のソリューションへ提供されている。

3.1 SIN 20研究開発用シンタリング装置

図5に示すSIN 20は、研究開発、プロセスの最適化およびプロトタイプを組み立て用に最適な、非常にコンパクトな装置である。あらゆるクリーンルームや製造現場に収まる小型サイズにもかかわらず、真空チャンバー、ギ酸ガス供給タンク、PINK社製ソフトツールなど、PINK社の主要な技術と機能をすべて備えている。銅焼結ペーストを使用する場合、良好な接合を形成するために、還元によって粒子表面の酸化物を除去する必要がある¹⁰⁾。ギ酸雰囲気での焼結により粒子表面の還元を確実に行うことができ、酸化物の除去を達成することができる。次世代の銅ペーストも処理が可能である。

プロセス領域は最大62 mmで、最大200 kNで30 MPaの加圧が可能である。プロセスは冷却ゾーンから開始されるため、焼結前に低温環境にてチャンバー内雰囲気を交換することにより、望ましくない酸化を回避することができる。冷却プレートによって高速(またはユーザーにて調整可能)の冷却ができ、高いスループットが実現される。



図5 研究開発およびプロセス開発用のSIN 20コンパクト型シンタリングシステム
真空焼結チャンバー、ギ酸タンク、PINK社ソフトツールなどのすべての機能を含む。