

半導体実装用高信頼性ボンディングワイヤの開発

Newly Developed High Reliability Bonding Wire for Semiconductor Packaging

江藤基稀*
Motoki ETO

小田大造
Daizo ODA

宇野智裕
Tomohiro UNO

山田隆
Takashi YAMADA

抄 録

半導体実装において素子と外部端子を電氣的に接続する配線材料としてボンディングワイヤが用いられている。この15年でワイヤボンディングに使われる材質が従来のAuからより低コストのCuやAgといった他材質へと代替が大きく進んできた。特に、Pd被覆Cu (PCC) ワイヤは民生用電子・情報機器向けの半導体実装において広く適用されている。一方、厳しい高温環境で長期信頼性が必要とされる車載用途では、それらの適用が未だ限られている。日鉄マイクロメタル(株)グループでは厳しい高温環境で長期接合信頼性を有する新型PCC ワイヤ (EX1R) およびAg合金ワイヤ (GX2s) を開発した。

Abstract

The electrical interconnection between semiconductor chip and outer lead is commonly made by bonding wire. For the past fifteen years, the shift from Au to low-cost materials such as Cu and Ag wires has progressed considerably. Especially, Pd coated Cu (PCC) wire is widely used in consumer devices now. However, the PCC and Ag wires are still not widely used in the automotive industry due to the reliability limitations under high temperature conditions. We have developed the new PCC wire (EX1R) and Ag alloy wire (GX2s) with long-term bond reliability under severe high temperature conditions.

1. 緒 言

パソコン、液晶テレビ、スマートフォンに代表されるように、電子機器は小型化、薄型化、高機能化、多機能化の一途をたどっている。これにともない、電子機器の発展に必要な不可欠であるLSI (Large Scale Integrated Circuit) の大規模化や高集積化、電子部品の小型化や基板の多層化、微細配線など実装基板全体の高密度実装化が要求されている。また、ハイブリッド式自動車 (HEV)、電気自動車 (EV)、および自動運転などの新規技術が急速に進化しており、それらの電子制御を担う車載用LSIではさらなる電子部品への需要と信頼性の高度化への要求が増加すると予想される。

図1にLSI半導体パッケージ内部構成の概略図を示す。構成部材を材料の視点からみると、大きく分けて金属 (ボンディングワイヤ、電極、はんだボール)、樹脂 (基板、封止樹脂)、およびセラミックス (封止樹脂に含まれるフィラー) というように、多岐にわたる材料から成り立っていることがわかる。この中でボンディングワイヤは半導体の機

能を外部に伝達する材料として使われ、その実装技術としてワイヤボンディング技術が広く適用されている。その実装技術を図2に示すとともに、具体的なプロセスを図の番号に沿って以下説明する。

(a) ボール形成

ボンディングワイヤの先端をアーク放電によって溶融し、表面張力の作用により球状化したボールを作製する。

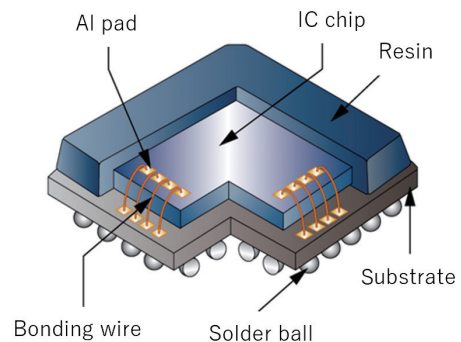


図1 LSI半導体パッケージの実装例
LSI package

* 日鉄マイクロメタル(株) 技術開発部 技術第二課 課長 博士(工学) 埼玉県入間市狭山ヶ原 158-1 〒 358-0032

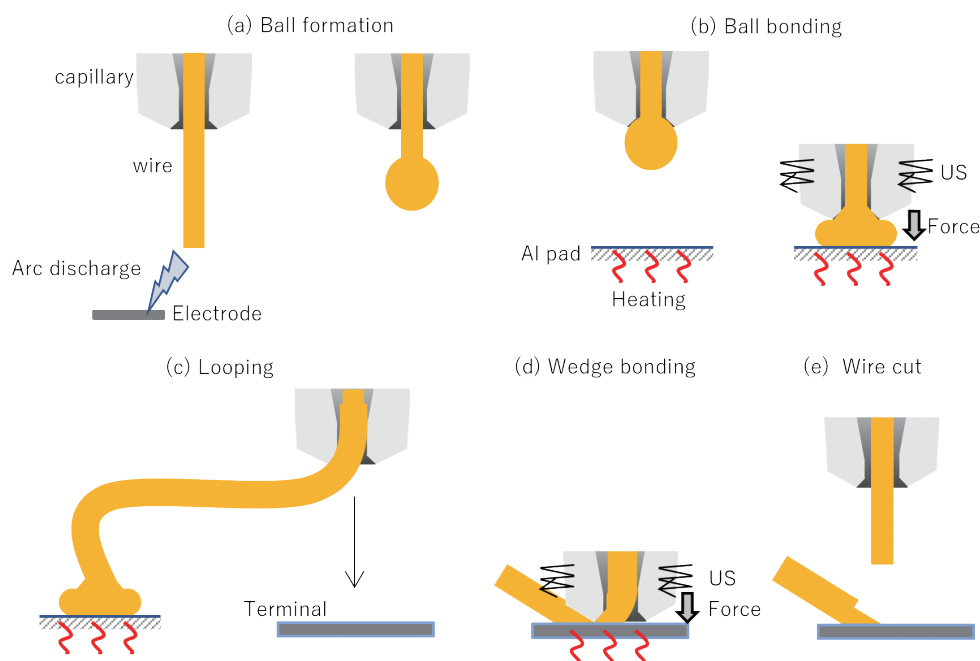


図2 ワイヤボンディング工程
Wire bonding process

(b) ボール接合

作製したボールをキャピラリと呼ばれる筒状のボンディングツールを用いて、素子上のAl電極に対し、超音波および荷重を印加して熱圧着（ボール接合）する。この時、Al電極は下部の加熱ステージにより150～250℃程度に昇温されている。この過程でボールとAl電極は固相拡散接合される。

(c) ループ形成

キャピラリがループの高さまで上昇し、外部端子側に移動する。この時のキャピラリの移動により、ボンディングワイヤ自身は湾曲し、図に示すようなループが形成される。

(d) ウェッジ接合

キャピラリがボンディングワイヤを外部端子に押し付け、さらに超音波および荷重を印加して熱圧着（ウェッジ接合）する。

(e) ワイヤ切断

ワイヤクランプを閉じてキャピラリが上昇することによりボンディングワイヤを切断する。その後、アーク放電によりせん断されたボンディングワイヤの新生端には新たなボールが形成され、次の接合工程へと移る。

この一連のプロセスを、ワイヤ1本あたり0.1秒以下の高速で繰り返している。このような複雑なプロセスに耐えられるだけのボンディングワイヤの量産技術을考えた場合、ボールの真球性、接合界面における相互の構成材料の拡散・金属接合条件の制御、高速のループ形成で安定した曲げ変形と直進性の両立等を数10ppmオーダー以下の不良発生率に抑えるだけの特性制御技術が求められる。

ワイヤボンディング技術開発以降、ボンディングワイヤ

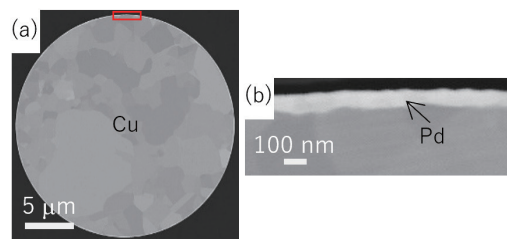


図3 PCCワイヤのC断面SEM像 (a) 全体, (b) 被覆層拡大
(a) Cross-sectional SEM images in PCC wire, (b) Enlarged image for coating layer

の材質として化学的に安定なAuが用いられてきたが、Au価格高騰を背景として、この15年で脱Au化の動きが大きく加速してきている。2007年におけるワイヤ材質毎の出荷量シェアはAuワイヤがほぼ100%を占めていたが、2022年には29%にまで大きく低下している。脱Au化を支えるものとして、Cu、特にPd被覆Cu (PCC: Pd coated Cu) ワイヤの技術革新が大きい。CuはAuに比べて低コスト、高電気伝導性、および高熱伝導性を有する。そのため、Auワイヤ代替の第一候補として初期から検討されていたものの、単相Cuワイヤ（以下、ベアCuワイヤ）は大気保管時および接合プロセスにおいて酸化の影響を受けやすいという弱点を有しており、さらに、多種の部材とともに実装された後の長期信頼性確保が困難であった。これらの技術課題を解決するものとして開発されたのがPCCワイヤである^{2,3)}。図3に一般的なPCCワイヤの断面SEM反射電子像を示す。図3(a)は断面全体、(b)は(a)中の赤枠で囲まれたワイヤ最表面領域の拡大像である。(b)中の白いコントラストがPdに対応しており、PCCワイヤは直径数10μmのCuワイヤ表面に数10nmの厚みを持ったPd被覆層を持

Needs	Au alternative	High density packaging	Automotive High reliability	Memory LED	Automotive High reliability
Products	EX1	EX1p	EX1R	GX2	GX2s
Wire structure					

図4 ワイヤ構造模式図
Schematic images of wire

つことを特徴としている。耐酸化性、接合性、および長期信頼性に優れたPCCワイヤ（日鉄マイクロメタル(株) EXシリーズ）はすでに最先端のパソコンやスマートフォンといった民生用電子・情報機器への適用にまで拡大している。また、PCCワイヤ自身も改善・改良が加えられており、第一世代のPCCワイヤ（EX1）に対し、接合性を向上させるためにPCCワイヤの最表面にAuを極薄で被覆したAuPCCワイヤが第二世代（EX1p）として現在の主流になっている。本報告ではPCCワイヤとAuPCCワイヤを合わせてPCCワイヤと呼ぶ。図4に主要なワイヤの構造を模式的に示す。

また脱Au化を支えるものとして、CuワイヤだけでなくAgワイヤの適用も進んでいる。AgはCuと比較して低ヤング率、低硬度、低波長域における反射率が高いという特性を活かし、メモリアイスやLED用途においてAu代替の候補材となっている。メモリアイスでは高容量化を目的とし、一つのパッケージに数10 μm まで薄くした素子（ダイ）を多数積層した構造が用いられる。その積層構造では素子が部分的に中空になっている箇所があり、そのような不安定な箇所に連続で、かつ素子へのダメージなくワイヤボンディングをする必要がある（図5）⁴⁾。AgワイヤはCuワイヤに比べ軟質であり、素子へのワイヤ接合時に変形しやすいため、Auワイヤに近い条件で接合が可能であり、素子へのダメージの影響を最小限にすることができる。しかしながら、純Agワイヤは高温高湿環境における耐食性に劣るという欠点を有しており、実用化は難しい。従来技術では高濃度（5~12atomic%）の合金化により耐食性を向上させているものの、同時に電気抵抗の上昇をともなうため、高速通信を必要とする最先端のメモリアイスへの適用は困難であり、その用途は限られていた。日鉄マイクロメタルグループでは新規合金設計に取り組み、Auワイヤ同等の低い比抵抗と、高温高湿環境における長期信頼性とを両立する新型Agワイヤ（GXシリーズ）を開発⁵⁾、量産化している。

上述した通り、民生用・情報機器LSI半導体パッケージではAuワイヤ代替としてPCCワイヤやAgワイヤの適用が急速に進んでいる。一方、車載用半導体の実装技術では依然としてAuワイヤが多く使用されている。近年、自動

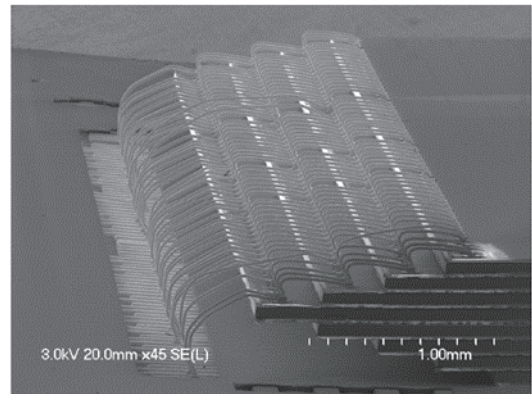


図5 ワイヤボンディングにより配線した積層ダイの外觀SEM像⁴⁾
SEM image of wire bonded multi-stack die⁴⁾

車の電子化への流れにともない、自動車1台あたりの半導体搭載数は増加傾向にある。当然のことながら、搭載数が増加したとしても高温、高湿、および振動などをともなう厳しい車の使用環境において人命を預かる必要があるため、半導体の故障率は限りなくゼロに抑えなければならない。したがって、高い品質および長期信頼性が求められる車載用途では、安定した特性を持つAuから他の材質への代替がなかなか進まないという事情がある。

半導体パッケージの信頼性を高めるためには外部ストレスに対する製品の耐性を向上させ、その許容度を増大させるとともに、不良に至る要因を解明し対策を行う必要がある。大半の半導体パッケージの寿命は、通常使用環境では長期間にわたるため、寿命およびその故障原因の確認には年単位の時間を要することになる。そのため、上記ストレスを増大させることにより、潜在的な故障発生を加速させ、故障発生の原因を識別しやすくすることにより、故障モードを防止するための対策を講じている。半導体パッケージで一般的な加速要因は温度および湿度であり、環境ストレス試験はそれらの条件が加速された条件下で行われる。車載用電子部品の環境ストレス試験規格（AEC-Q100, AEC-Q006）では、グレードにより動作保証温度が区分され、各動作温度グレードに合わせた環境ストレス試験の条件が設定されている。保証温度が最も高いグレード0（-45~150 $^{\circ}\text{C}$ ）では、高温条件における長期的な信頼性を判断する

HTSL (High Temperature Storage Life) 試験を例にすると、175℃の熱処理条件において 2000h の高温・長期間の条件が設定されている。こうした環境ストレス試験の高温長期化にともない、これまで民生用半導体用途での環境ストレス試験では発現しなかったボンディングワイヤの不良モードが報告されている。

日鉄マイクロメタルグループでは、車載半導体パッケージ向けの厳しい要求を満足するため、合金設計、被覆設計、製造プロセスの最適化など独自の技術を確認することで、長期信頼性を担保した新型 PCC ワイヤ EX1R⁶⁾ および新型 Ag 合金ワイヤ GX2s⁸⁾ の開発に成功した。以下、その性能を紹介する。

2. 高信頼性Pd被覆CuワイヤEX1R

2.1 評価手法

性能評価には、開発材である EX1R、比較として汎用の PCC ワイヤ、ベア Cu ワイヤの 3 種類を用いた。EX1R は接合信頼性向上を企図し、Cu 芯材に添加元素を含むことを大きな特徴としている (図 4)。Cu 芯材への元素添加は比抵抗上昇、ワイヤ硬度上昇、FAB 真球性の悪化、ウェッジ接合性悪化等を招く可能性があるが、EX1R の添加元素はそれら実用性能を落とさないことを前提として選定した。その上で EX1R は比抵抗が $3.0\mu\Omega\text{cm}$ になるように添加元素量を調整している。車載用途で用いられる 2N (純度 99%) Au ワイヤの比抵抗 $3.0\mu\Omega\text{cm}$ と同値であり、代替に対して問題ない比抵抗値を有している。テストチップは TEG (Test Element Group) を使用した。TEG 上の Al 電極の組成は Al-1%Si-0.5%Cu とし、厚みは $1.5\mu\text{m}$ である。パッケージタイプは 144 pin QFP (Quad Flat Package) とし、リードフレーム表面には安定した信頼性を確保することができる Ni/Pd/Au めっき処理を選択した。ワイヤボンディング装置には一般的な自動ワイヤボンダ装置 (ProCu, Kulicke & Soffa 製) を用いた。高温高湿耐性の評価には環境ストレス試験として HAST (Highly Accelerated Stress Test) を用いて 130℃, 85%RH, 3V bias で行った。HAST では、試験条件加速を目的とし、ワイヤボンディングされたサンプルを不良の一因となる CI を多く含んだエポキシ樹脂 (加圧抽出分析: $\text{Cl}^- = 21\text{ppm}$, $\text{SO}_4^{2-} < 1\text{ppm}$, $\text{pH} = 6.7$) を用いて封止した。高温耐性の評価には環境ストレス試験として HTSL 試験を用いて 175℃で行った。封止樹脂は汎用品 (加圧抽出分析: $\text{Cl}^- = 4\text{ppm}$, $\text{SO}_4^{2-} < 1\text{ppm}$, $\text{pH} = 6.8$) を使用した。

2.2 高温高湿耐性

図 6 に HAST 48h 毎の各サンプルにおける Cu ボール/Al 電極接合部の接合強度変化を示す。評価対象 3 水準のワイヤ線径はいずれも $18\mu\text{m}$ である。接合強度は封止樹脂をレーザーおよび混酸を用いて除去した後、ボールシェアテストを用いて取得した。ベア Cu ワイヤの接合強度は試験開始

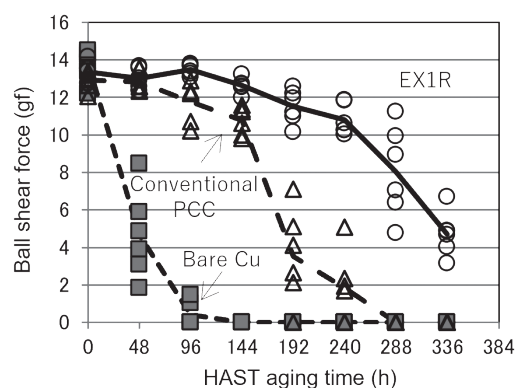


図 6 HAST 48 h 毎の Cu ボール/Al 電極接合部強度変化
Change of ball shear force at Cu ball/Al pad in HAST

直後から急速に低下した。汎用 PCC ワイヤの明らかな強度低下は 192h 経過後に確認され、過去の研究同様、ベア Cu ワイヤに対する汎用 PCC ワイヤの優位性が示された²⁾。EX1R は 240h 経過後も強度の平均値が初期の 80% 以上を維持しており、汎用 PCC ワイヤに対して接合信頼性が大幅に改善していることが示された。図 7 に各サンプルの HAST 192h 後の Cu ボール/Al 電極接合部断面 SEM 像および Pd 元素マッピング像を示す。図 7 (a), (c), および (f) 中に示す矢印は接合部において腐食が進展していた幅を示している。また、図 7 (b), (e), および (h) はそれぞれ (a), (c), および (f) の四角で囲まれた領域の拡大像である。ベア Cu および汎用 PCC ワイヤは Cu ボール/Al 電極との界面に腐食層が接合部全体にわたって形成し、腐食層からは Cl が検出された。一方、EX1R は接合外周部において一部腐食発生が確認されたものの、接合中央部は良好な接合状態を維持していた。図 8 に EX1R において接合外周部に発生している腐食領域の TEM 像および対応する領域の元素マッピング像を示す^{9,10)}。Pd は IMC (Inter-metallic compound) 中にやや濃化傾向がみられた。EX1R の Cu 芯材に添加している元素は Cu-Al IMC と Cu ボール界面近傍において周囲よりも高い濃度で検出された。

高温高湿環境における PCC ワイヤのベア Cu ワイヤに対する優位性は、Cu ボール/Al 電極接合部に生成する IMC 中に Pd が濃化し、その濃化層が Cu と Al の相互拡散を抑制することで易腐食性 IMC の形成を抑制し、さらに耐食性のある Cu-Al-Pd 化合物および CuPd 固溶体を形成することで接合信頼性を向上させているとの報告がなされている³⁾。一方、図 7 に示すように、汎用 PCC ワイヤと EX1R で接合部の Pd 分布に大きな有意差はないが、シェア強度低下および腐食進展に大きな有意差が確認される。これは Pd だけでなく EX1R の特徴である Cu 芯材に添加した元素が腐食反応の抑制に有効に働いていることを示唆している。EX1R に添加した元素は IMC と Cu ボール界面近傍において周囲よりも高い濃度で検出されている (図 8 中白矢印)。この添加元素が濃化した領域は Cu ボール/Al 電極接

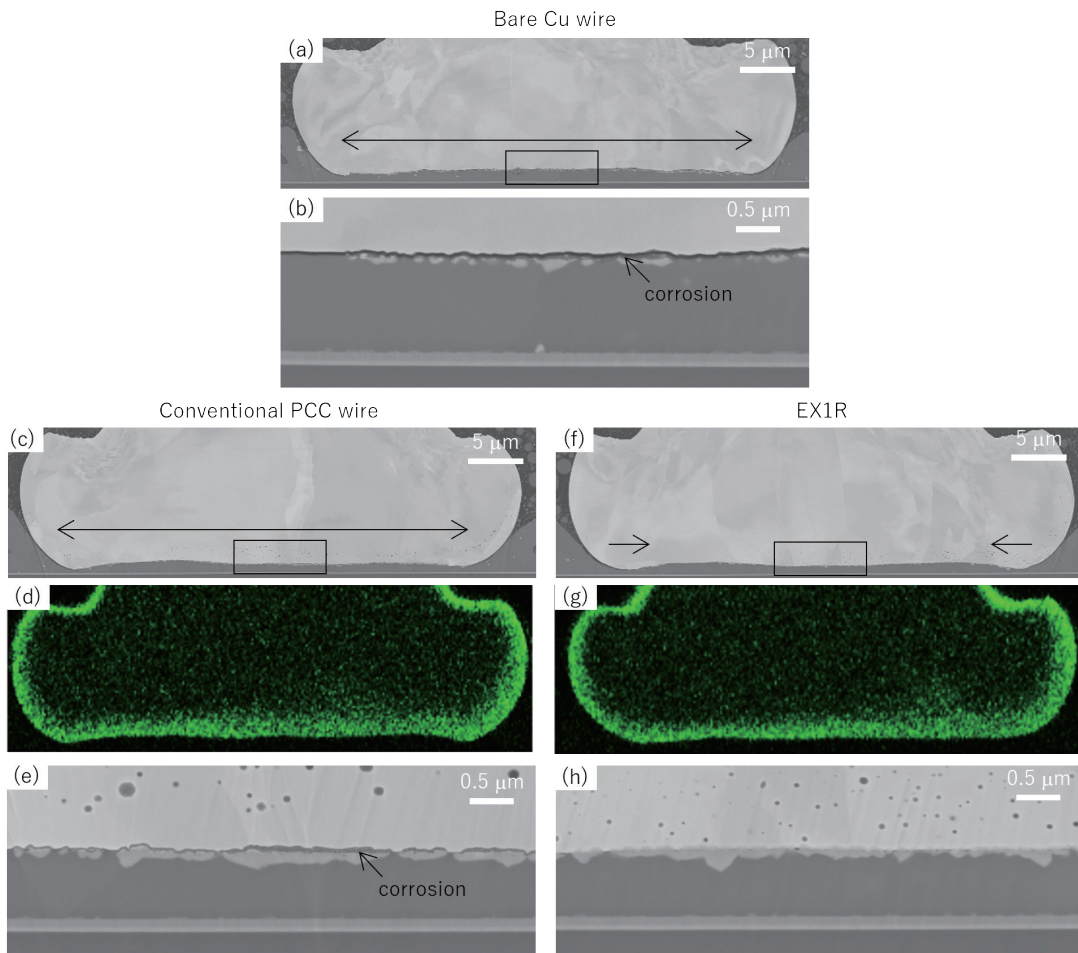


図7 ベア Cu ワイヤ、汎用 PCC、および EX1R における HAST 192h 後の Cu ボール/Al 電極接合部断面 SEM 像および対応する Pd 元素マッピング像

(a) ベア Cu ワイヤ接合部断面像, (b) (a) 中の四角領域拡大像, (c) 汎用 PCC ワイヤ接合部断面像, (d) (c) に対応する Pd 元素マッピング像, (e) (c) 中の四角領域拡大像, (f) EX1R 接合部断面像, (g) (f) に対応する Pd 元素マッピング像, (h) (f) 中の四角領域拡大像

Cross-sectional SEM images and corresponding Pd EDS mappings at Cu ball/Al pad area, and enlarged SEM images (b), (e), and (h) for area indicated by area in (a), (c), and (f) after HAST 192 h

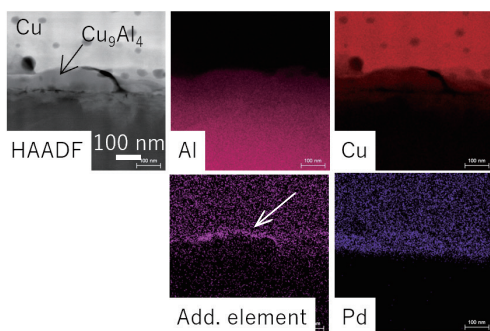


図8 EX1R Cu-Al IMC 領域における TEM 像および対応する領域の元素マッピング像

Cross-sectional TEM image and corresponding EDS mappings obtained from Cu-Al IMC in EX1R

合界面において腐食が進展する先端と一致している¹⁾。EX1R の Cu 芯材に添加した元素が IMC の腐食過程 (Al の選択溶解) において、Cl 耐性を有する添加元素を含んだ安定な酸化膜を形成し、Al 溶解を抑制することにより耐食性を向上させていると考えられる。EX1R は比較的高濃度に

Cl を含む樹脂においても優れた高温高湿耐性が確認された。

2.3 高温耐性

図9に HTSL 試験 175℃, 1000h 毎の各サンプルにおける Cu ボール/Al 電極接合部の接合強度変化を示す。評価対象3水準のワイヤ線径はいずれも 20μm である。ベア Cu ワイヤは 2000h 後に明らかな強度低下が確認され、3000h 後には樹脂を除去した段階で Cu ボールが Al 電極から剥離するボールリフトが発生していた。汎用 PCC ワイヤは 2000h 後も初期接合強度を維持しているが、3000h 後以降徐々に接合強度の低下が確認された。EX1R は 4000h 後も十分な接合強度を維持していた。EX1R は前項で述べた高温高湿環境だけでなく、高温長時間の環境でも Cu ボール/Al 電極接合部の長期信頼性を維持できることを確認した。

図10に HSTL 試験 175℃, 3000h 後のウェッジ接合部

断面 SEM 像を示す。図 10(c)および(e)はそれぞれ図 10 (b) および (d) 中に示す枠内の拡大像である。図 10 (a) に示すように、ベア Cu ワイヤは特異な組織は確認されなかった。汎用 PCC では図 10 (c) に示すようにウェッジ接合により大きくワイヤが変形した領域の最表面近傍に数 μm サイズのポイドの生成が確認された。一方、EX1R はウェッジ接合部でごく微小なポイドが確認されたが、ワイヤ領域にわたる広い視野で粗大なポイドは確認されなかった (図 10 (d) および (e))。

これまで PCC ワイヤにおいて、民生用電子・情報機器パッケージ用途として実施されていた 150°C 以下の HTSL 試験では、図 10 (c) に示すポイド生成は報告されてこなかった。一方、車載用途適用を目的とした HTSL 試験では PCC ワイヤにおいて同様のポイド生成が報告されている^{12,13)}。日鉄マイクロメタルグループでは封止樹脂有無および HTSL

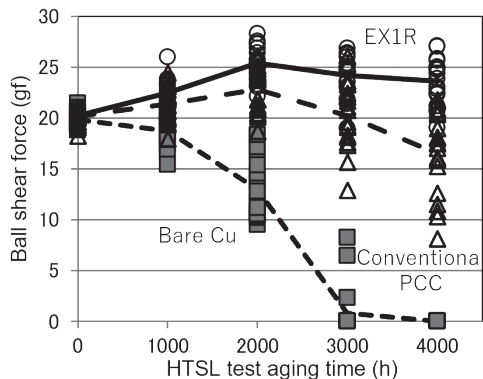


図 9 HTSL 試験 175°C 、1000h 毎の Cu ボール/Al 電極接合部強度変化
Change of ball shear force at Cu ball/Al pad in HTSL test at 175°C

試験雰囲気(大気もしくは真空)の影響をより細かく評価し、Cu ポイド発生に影響を与えている要因を特定するとともに、その不良メカニズムについて考察した^{7,14)}。図 11 に模式図で示すとともに以下要約する。

- (a) PCC ワイヤにおいて伸線加工およびウェッジ接合工程で Pd 層が一部欠落し、下地の Cu が露出する。
- (b) 高温環境において封止樹脂から H_2O 、 O_2 、および S 系ガスが放出され、結露して水膜が生じ、Cu 露出部と Pd 層とを電気的に接続する。

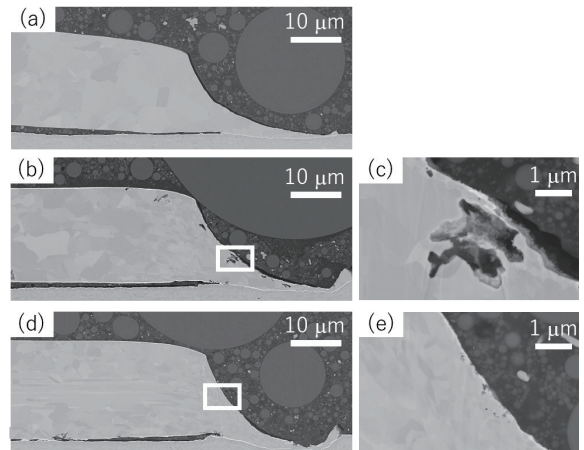


図 10 ベア Cu ワイヤ、汎用 PCC ワイヤ、および EX1R における HTSL 試験 175°C 、3000h 後のウェッジ接合部断面 SEM 像
(a) ベア Cu ワイヤ接合部全体像、(b) 汎用 PCC ワイヤ接合部全体像、(c) (b) 四角領域拡大像、(d) EX1R 接合部全体像、(e) (d) 四角領域拡大像
Cross-sectional SEM images (a) bare Cu wire, (b) conventional PCC wire, (c) enlarged SEM image indicated by area in (c), (d) EX1R, (e) enlarged SEM image indicated by area in (d) after HTSL test at 175°C for 3000 h

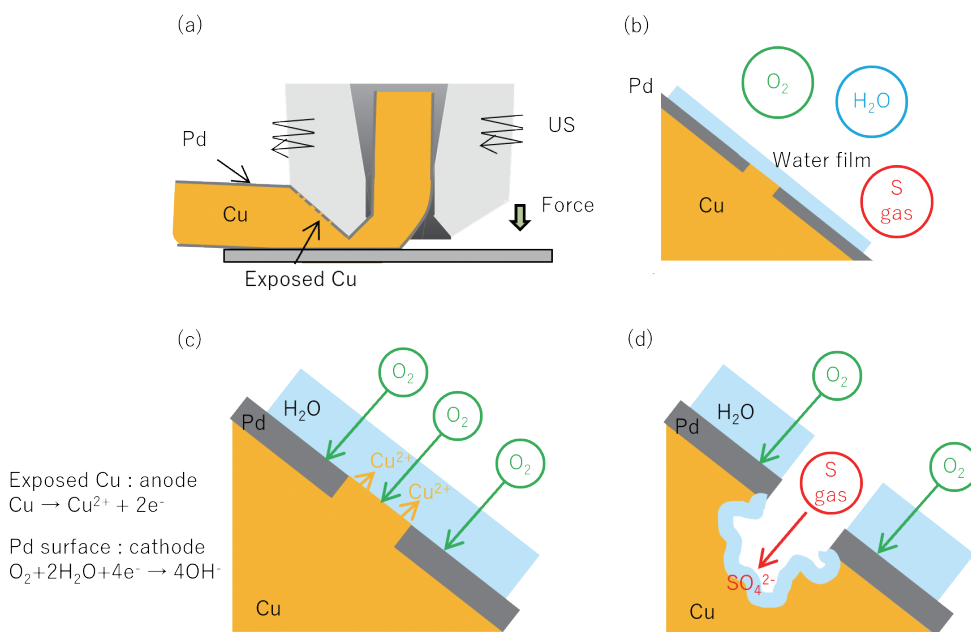


図 11 高温環境における PCC ワイヤの Cu 局部腐食過程を示す模式図
Schematic images of corrosion process for PCC wire under high temperature

- (c) 酸素還元によるカソード反応は Cu および Pd 両者の表面で起こるが、Cu の方が Pd よりも卑であるため、アノード反応により下地 Cu が選択的に溶解する。
- (d) Cu ボイドが深くなるにともない、最深部では Cu^{2+} が濃化して加水分解により pH が低下する。さらに、アウトガスとして樹脂から放出された S 系ガスが水膜に溶解して SO_4^{2-} を生じる。 SO_4^{2-} が Cu ボイド内で濃化して硫酸を生成し、酸化膜の生成を妨げることにより Cu の溶解を加速させ、Cu ボイドが粗大化する。

150℃ 以下の温度では封止樹脂からの S 系アウトガス発生が少なく、また反応速度も低いため、この不良モードが顕在化していなかったと考えられる。この不良モードは Cu ボール/Al 電極界面の IMC で発生する腐食と異なり、Cu ワイヤの内部で発生することから、半導体自体の電気特性に与える影響は少ないものの、接合強度の低下や外観上の問題が懸念される。この腐食反応の要因である PCC ワイヤ表面での Pd 層欠落はワイヤボンディングプロセス起因であり対策が難しい。他の要因である封止樹脂中に含まれる S 化合物を減らすことにより腐食反応の抑制が期待されるが、反面、封止樹脂中の有機成分とフィラーまたはチップ、リードフレーム界面の密着性の低下が懸念される。腐食低減と密着性向上はトレードオフの関係にあるため、封止樹脂中の適切 S 化合物量の管理が必要である。一方、ベア Cu ワイヤでは同様の不良形態が確認されなかった。ベア Cu ワイヤの表面には Cu 酸化膜が存在しており、表面での酸化還元反応が進行し難い。たとえ、ワイヤボンディングプロセスでワイヤ表面が損傷したとしても、Cu 酸化膜がすみやかに生成し、高温環境においても内部への局部腐食進展は起こり難いと考えられる。しかしながら、ベア Cu ワイヤは高温環境で Cu ボール/Al 電極接合部において形成された Cu-Al IMC の耐食性に乏しく高信頼性が求められる用途での実用化は困難である (図 9)。

図 10 (d) に示す通り、EX1R における局部腐食の程度はベア Cu 同等レベルにまで改善している。EX1R は高温高湿耐性向上と同様、Cu 芯材への元素添加によって、上記 Cu 局部腐食抑制のワイヤ側からの改善を企図した製品である。この添加元素は Cu の局部腐食が進行する過程で、

腐食耐性のある薄い酸化被膜を形成していることが TEM 解析により明らかになっている (図 12)¹⁰⁾。この作用により Cu の溶出を抑制し、腐食耐性の向上につながっている。

3. 高信頼性 Ag 合金ワイヤ GX2s

一部パッケージでは素子が脆弱であるため、ワイヤボンディング時の素子へのダメージが懸念され、Cu ワイヤの適用が困難な場合がある。そのため、高信頼性が要求される車載用途でも軟質な Ag ワイヤの適用可能性が検討されている。日鉄マイクロメタルグループではメモリ向けに開発した GX2 をベースに高温信頼性を強化した GX2s を開発した⁸⁾。GX2s は EX1R 同様、接合信頼性向上を目的とした添加元素を加えており、比抵抗は $2.4 \mu\Omega\text{cm}$ となるように合金設計している。この値は 4N (純度 99.99%) Au ワイヤと同値であり、低抵抗化も実現している。GX2s の高温高湿および高温耐性を簡単に紹介する。性能比較として 4N Ag および 4N Au ワイヤも同時に評価した。封止樹脂は汎用品を用いた。線径は $50 \mu\text{m}$ とした。図 13 に HAST (130℃, 85%RH, 4V) 240h 後のボール/Al 電極接合部断面 SEM 像を示す。図 13 (a) および (b) 中に示す矢印は接合部において腐食が進展していた幅を示している。4N Ag は接合部全体にわたって腐食層が生成していた (図 13 (a))。腐食層から Cl が検出されたことから、Ag-Al IMC と Cl による腐食反応が起こったと推定される。この機構は Cu ワイヤでの不良機構と一部共通している。一方、図 13 (b) に示すように GX2s は接合外周部のごく一部領域で腐食が発生しているのみで安定した接合状態を維持していた。

図 14 に HTSL 試験 175℃, 2000h 後のボール/Al 電極接合部断面 SEM 像を示す。図 14 (a) および (b) 中に示す矢印は接合部において腐食が進展していた幅を示している。4N Ag は接合部全体にわたって腐食層が生成していた (図 14 (a))。腐食層から S が検出されたことから、Cu ワイヤ同様、Ag-Al IMC と高温環境で封止樹脂から発生する S 系アウトガスが腐食反応を起こしたと推定される。一方、図 14 (b) に示す通り、GX2s は接合外周部のごく一部領域で腐食が発生しているのみで、接合強度の低下や導通不良等なく、安定した接合状態を維持していた。4N Au ワイヤで

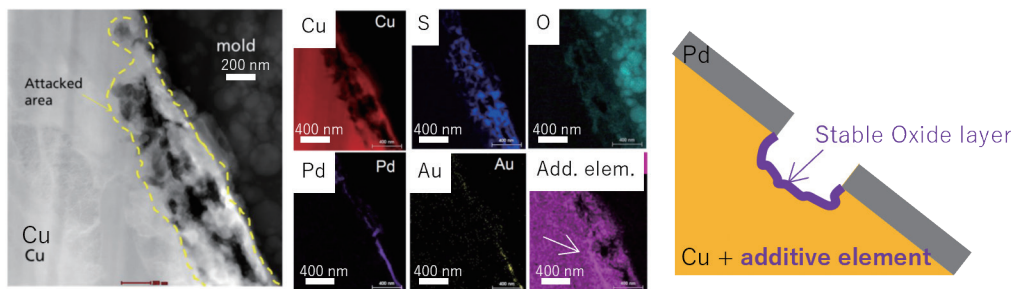


図 12 EX1R 局部腐食発生領域における TEM 像と対応する領域の元素マッピング像および模式図

Cross-sectional TEM image, corresponding EDS mappings, and schematic image obtained from localized corrosion are in EX1R

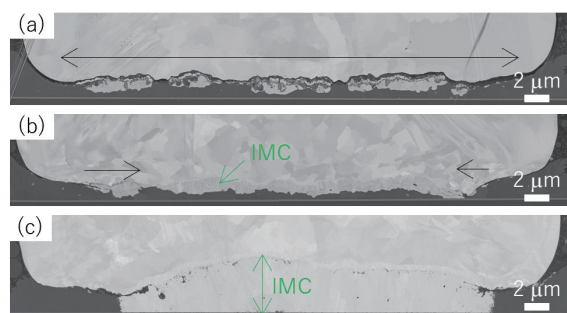


図13 (a) 4N Ag, (b) GX2s, (c) 4N AuにおけるHAST 240h後のボール/AI電極接合部断面SEM像
Cross-sectional SEM images (a) 4N Ag, (b) GX2s, (c) 4N Au after HAST 240 h

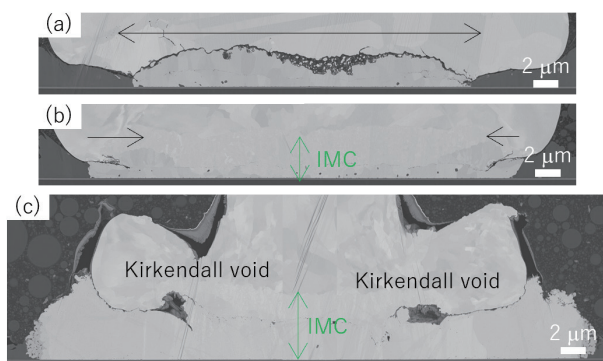


図14 (a) 4N Ag, (b) GX2s, (c) 4N AuにおけるHTSL試験 175°C, 2000h後のボール/AI電極接合部断面SEM像
Cross-sectional SEM images (a) 4N Ag, (b) GX2s, (c) 4N Au after HTSL test at 175°C for 2000 h

は腐食層は確認されなかったものの、Au-Al IMCの成長が大きく進み、AuとAlの相互拡散速度の違いに起因した粗大なカーケンダルポイドが接合の外周部に生成していた。過去の報告では高温環境におけるAu-Al IMCの腐食が報告されているが、封止樹脂中に含まれるBrとの化学反応によるものと考察されている¹⁵⁾。近年の封止樹脂はBrフリー化が進んでおり、顕著な腐食反応が起こらなかったと推定される。

GX2sは日鉄マイクロメタルグループ独自の合金設計により高温高湿および高温環境における耐食性が4N Agと比較し著しく向上しており、Auワイヤ同等の接合信頼性を有することが確認された。

4. 実用化に向けた取り組み

一般的にボンディングワイヤはスプールに巻き取られ、巻装体とされた後出荷され、半導体の組み立て工程においてワイヤボンディング装置に供される。ワイヤボンディング装置を用いた接合条件や接合対象、さらに封止樹脂の種類も各メーカーによって多種多様であり、その中でボンディングワイヤには安定した接合性、配線時のループ形成性、これまで述べた長期信頼性などを量産レベルで実現するこ

とが求められる。規格要求の厳しいパッケージへの新規材料適用のためには、半導体パッケージ組み立てメーカーと材料メーカーの共同開発も重要になってくると考えられる。このような観点から、日鉄マイクロメタル、半導体パッケージ組み立てメーカーおよび評価・解析に独立した第三者機関(独 Fraunhofer)の3社が協働し、半導体パッケージを量産条件で作製、AEC-Q006の要件に沿った試験を実施し、日鉄マイクロメタルグループ開発材 EX1R および GX2s の適用可能性について評価を実施した^{16,17)}。EX1R, GX2sともに既存材同等の初期接合性を有し、環境ストレス試験ではAEC-Q006の要求を十分に満足することが実証されている。

5. 結 言

日鉄マイクロメタルグループ独自の合金設計により開発したEX1R および GX2s は厳しい高温環境である車載用途にも耐え得る長期接合信頼性維持を実現している。本製品は市場での技術課題に対し、不良に至る要因の特定を詳細に行ったうえで、合金設計含めた対策を講じている。顧客において既存のワイヤから大きな条件変更なしで適用が可能であり、すでに一部車載用途での量産も始まっている。Auワイヤの代替を低価格で実現する本製品の採用はコスト削減のみならず、希少価値の高いAuの使用量削減につながり、持続可能な社会の実現に大きく貢献できるものとする。また、開発材の知的財産化では、重要特許が国内外のべ20件以上登録され、グローバルに特許網を構築している。

ワイヤボンディングは、配線の自由度やコストの面で優れており、半導体実装技術の主流を占めているとともに、今後も多種のパッケージで使用されるのは疑いようがない。今後の半導体パッケージング技術は高密度実装化がさらに進展すると予測され、配線材料として用いられているボンディングワイヤ技術に対しても、細線化や各種部材との接合面積の低下が避けられない。それにともない、接合信頼性、ルーピング性能の安定性、ボール形成の安定性等で新たな課題が顕在化してくる可能性もある。それらの課題解決のためには不良因子の理解を深め、それを材料設計および接合技術の開発にフィードバックしていくことが重要であると考えられる。日鉄マイクロメタルではそれら市場ニーズにワンストップで対応できる製品群を構築していく。

参考文献

- 1) TechSearch International, Inc. and SEMI: Global Semiconductor Packaging Materials Outlook. 38 (2023)
- 2) Uno, T.: Microelectron. Reliab. 51, 88 (2011)
- 3) Uno, T.: Microelectron. Reliab. 51, 148 (2011)
- 4) Qin, I. et al.: Proc. 67th ECTC. 1309 (2017)
- 5) Oyamada, T. et al.: Proc 67th ECTC. (2017)

- 6) Eto, M. et al.: Proc 21st EMPC. (2017)
- 7) Eto, M. et al.: Proc 67th ECTC. 1297 (2017)
- 8) Araki, N. et al.: Proc 52nd IMAPS. 524 (2019)
- 9) Klengel, S. et al.: Proc 69th ECTC. 175 (2019)
- 10) Klengel, S. et al.: Proc 22nd EMPC. (2019)
- 11) Eto, M. et al.: Microelectron. Reliab. 118, 114058 (2021)
- 12) Krinke, J. et al.: Microelectron. Reliab. 54, 1995 (2014)
- 13) Lee, C. et al.: Proc 66th ECTC. 606 (2016)
- 14) Eto, M. et al.: Microelectron. Reliab. 120, 114125 (2021)
- 15) Uno, T.: Microelectron. Reliab. 40, 145 (2000)
- 16) Klengel, R. et al.: Proc 72nd ECTC. 489 (2022)
- 17) Klengel, R. et al.: Proc 73rd ECTC. 195 (2023)



江藤基稀 Motoki ETO
日鉄マイクロメタル(株)
技術開発部 技術第二課 課長 博士(工学)
埼玉県入間市狭山ヶ原158-1 〒358-0032



宇野智裕 Tomohiro UNO
日本製鉄(株)
先端技術研究所 主席研究員 博士(工学)



小田大造 Daizo ODA
日鉄マイクロメタル(株)
技術開発部 部長



山田 隆 Takashi YAMADA
日鉄マイクロメタル(株)
代表取締役社長 博士(工学)