

# 半導体実装用高機能ボンディングワイヤの開発

## High Performance Bonding Wire for Semiconductor Packaging

宇野 智 裕\*  
Tomohiro UNO

小山田 哲 哉  
Tetsuya OYAMADA

山 田 隆  
Takashi YAMADA

小 田 大 造  
Taizo ODA

### 抄 録

LSI半導体実装の電氣的接続を得る基幹部材において、Auを代替する新型ボンディングワイヤを開発した。高機能と抜本的コストダウンを実現するPd被覆Cuワイヤ(EX1)を開発した。EX1は、Cuの欠点である耐酸化、接合性、長期信頼性を改善していることで、事実上の世界標準化が進み、世界トップクラスの企業で使用されている。最近では次世代高密度接続向けに細線の接合性を高めた多層構造の新製品EX1pを開発し、最先端のLSIで実用化が進行している。また、メモリー半導体向けに機能性を高めたAg合金ワイヤを開発している。

### Abstract

In LSI semiconductor packaging, we developed new types of bonding wires replacing gold which are key materials for making electrical connections in LSI. Pd-coated Cu bonding wire, EX1 was developed and it realized high performance and drastic cost reduction. EX1 improved oxidation, bondability and long term reliability which were disadvantage of Cu wires. EX1 has been established as the de facto standard and utilized in world's top ranking major customers. A new product EX1p has multi coating layers on Cu core which enhances bonding performance for next high density packaging. For memory semiconductor packaging, Ag alloy wire is developed.

## 1. はじめに

スマートフォン、デジタル家電の世界的普及により、LSI (Large Scale Integrated Circuit) の高機能・小型化のニーズが高まっている。またハイブリッド車 (HV)、電気自動車 (EV) の電子制御を担う車載用LSIでは、高信頼性が強く求められる。ここ数年間でIoT (もののインターネット)、AI (人工知能)、自動運転などが産業構造に大きな需要をもたらし、それを支える高機能な電子機器、半導体は新たな成長時代に突入することへの期待が膨らんでいる。より高度な半導体、電子機器などを支える実装技術の進展に期待するところも大きい。

LSIなどの半導体実装では、半導体素子と外部端子の間を電氣的に接続する配線が必要であり、この配線にはこれまで主に、高純度のAuを線径15~30 $\mu\text{m}$ 程度の極細線としたボンディングワイヤ (以下、ワイヤと称す) が用いられてきた。図1にLSIの実装例を示す。ワイヤは配線自由度、作業性などに優れており、半導体実装技術を支える基幹部材として今後とも使用拡大が期待されている。高密度実装、

高温耐性など要求性能の高度化の要請に対応し、ワイヤの開発においては高強度化、高温試験での長期信頼性確保などの高機能を、なるべく低コストで実現することが必要である。

1950年代に米国ベル研究所でトランジスタが開発されて以来、ワイヤの材質は一貫してAuが用いられてきた。一方、Au価格の高騰、半導体当たりのワイヤ長さ増加などの背景により、Auを代替する素材開発が強く求められるようになっていた。Au代替では、低コスト、高導電性の利点からCu、Agなど新たな素材が40年にわたって開発<sup>1,2)</sup>され

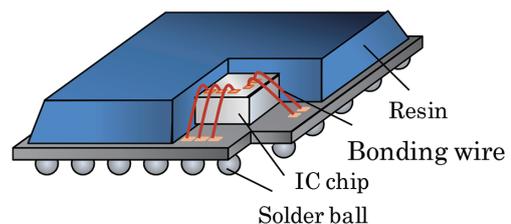


図1 半導体集積回路LSIの実装例  
LSI package

\* 先端技術研究所 新材料・界面研究部 上席主幹研究員 博士(工学) 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

てきたが、必要とされる使用性能が確保できないため、半導体の最大市場であるLSI用途でCuワイヤ、Agワイヤは実用化されていなかった。

本報告では、半導体業界の永年の念願であるワイヤ素材の脱Au化に応えるべく、新規開発した耐酸化・接合性に優れてLSI用途に使用可能な被覆CuボンディングワイヤEX1系列製品<sup>3)</sup>および、メモリー半導体向けに機能性を高めたAg合金ボンディングワイヤGX製品について紹介する。

## 2. ボンディング技術とワイヤ要求性能

ワイヤ要求特性と関連の深い連続ボンディング工程を簡単に説明する(図2)。専用ボンディング装置を用いて、①アーク放電によるボール形成、②半導体上のアルミニウム電極にボール接合(ファースト接合)、③ワイヤ変形によるループ形成、④外部端子へのワイヤ接合(セカンド接合)、⑤ワイヤ切断、という一連の操作を繰り返す。接合を助長するため荷重、超音波振動が印加され、1本当たり0.1秒以下の高速で接合されている。

このようなプロセスで使用されるため、ワイヤにはa) ボール真球形、対称性を確保するための放電時溶融、凝固の安定制御、b) ミリ秒単位の短時間で十分な接着強度に到達させる接合界面の拡散、金属接合の促進、c) 高速で安定した曲げ変形と直線性を両立する均質なワイヤ集合組織、d) 高温、高湿などの過酷な使用環境での長期信頼性、などを量産レベルで実現することが求められる。このため溶接、固相接合、集合組織など材料単体の機能向上から、多種部材で組立てられた実装後の長期信頼性の確保まで、総合的な材料開発が必要となる。

上記性能がどれか一つでも基準を満足しなければLSIへの適用はできないが、従来のCuワイヤ、Agワイヤでは多くの技術課題があり、実用化に至っていなかった。

## 3. Cuワイヤの技術課題と新製品開発

従来のCuワイヤには4つの大きな課題があった。即ち、①酸化による短い製品寿命、②接合性の低さ、③ボール形成時の水素ガス使用、④高温環境下での長期信頼性の欠如、である。従来はCu単層のワイヤ(以下、ベアCuと称す)が検討されていたが、この延長上では上記のいずれの課題も解決困難であった<sup>2)</sup>。一方、被覆構造のワイヤは、被覆により劣性となる作用が懸念され、技術難度が高いため商品化は困難とされていた。

我々はLSI向けの厳しい要求を満足するためには、被覆構造のCuワイヤの開発が必要と考え、これに挑戦した。素材選定、表面処理、表層構造などの材料設計から、顧客量産性、長期信頼性まで、総合的な材料技術開発に取り組んだ。

耐酸化性に有利である貴金属の中でも、アーク放電によるワイヤ溶融、接合性などの観点から、PdをCuワイヤの表層に用いることに着想した。高融点、高電気抵抗などPdの特異性が被覆に特有の課題をブレイクスルーする可能性を見出した。しかしCuワイヤに単にPd被覆を形成するだけでは、ボール形成での真球形低下や内部気泡の発生、被覆層剥離など多くの問題が発生した。

それぞれの不良機構に基づいた材料設計により、アーク放電の安定化、密着性向上などを実現できる被覆の最適構造を明らかにしていった。この知見に基づきPd被覆の膜厚、組織の適正化(厚さ0.1 $\mu$ m程度)、Pd/Cu界面の拡散層の活用、など独自の被覆構造を設計、開発した。さらに被覆を薄く均一に加工する製造技術の確立により安定製造が可能となった。こうした新しい被覆ワイヤ技術を開発し、世界で初めてLSI向けの厳しい使用性能を満足できる、Pd被覆Cuワイヤ(製品名:EX1)の開発、実用化に成功した<sup>3-7)</sup>。

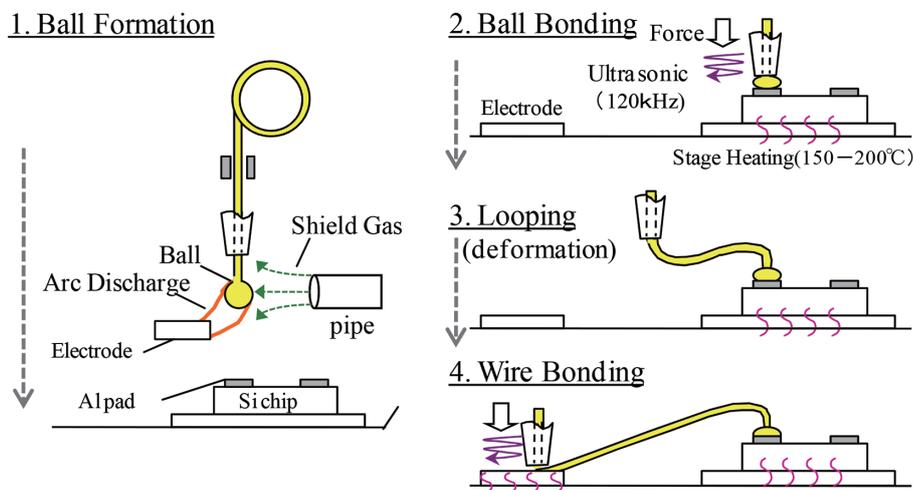


図2 ワイヤボンディング工程  
Wire bonding process

#### 4. 高機能被覆CuワイヤEX1の特徴

被覆 Cu ワイヤ EX1 は、ベア Cu では解決不可能であった上記 4 課題を解決し、①耐酸化性付与によるワイヤ寿命向上、②高い接合性、③ボール形成時の水素フリー化、④高湿加熱環境下での接合信頼性向上などを達成し、Au ワイヤと同等の高い性能を実現している<sup>2)</sup>。以下、EX1 の特長を説明する。

##### 4.1 耐酸化と接合性向上

ベア Cu ワイヤの製品寿命が短い原因は、ワイヤ表面が酸化して、接合性が低下するためであった。図 3 に、接続前にワイヤが大気中で保管された日数と、プル試験の破断強度（ワイヤ接続強度に該当）の関係<sup>4)</sup>を示す。ベア Cu では初期の接合強度が低いことに加え、7 日程度の大气放置により表面酸化が進み、接合強度の低下、剥離などの不良発生が避けられない。

これに対し EX1 では、初期の接合強度が高いと共に、長期放置後に使用しても接合強度が低下せず、60 日以上放置しても良好な接合性が確保されている。これは Pd 表層の最適な膜厚、構造により酸化抑制機能を効果的に引き出すことに成功したためであり、接合界面における接着強度の上昇、製品寿命の延長など、ベア Cu よりも著しく優れた性能を実証できた。また、高温、加湿環境に保管する劣化加速試験においても、EX1 の耐酸化性が優れていることが確認された。

##### 4.2 ボール形成ガスの水素フリー化

ベア Cu ワイヤではボール溶融時の酸化防止のため、アーク放電が生じるワイヤ先端に水素を含む特殊ガス (N<sub>2</sub>+5% H<sub>2</sub>) 吹付けが必要であり<sup>4,5)</sup>、コスト増加と安全管理などが

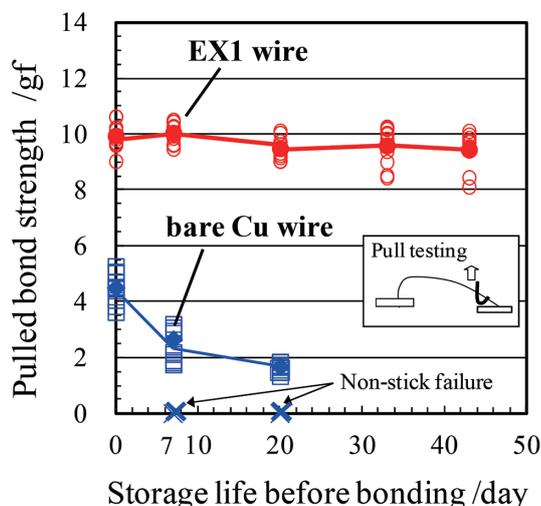


図 3 大気放置された Cu ワイヤのプル破断強度 (線径 25 $\mu$ m, プル引張試験)  
Pulled strength at wire bonds of Cu bonding wires (diameter: 25 $\mu$ m, pull testing at wire bonds)

懸念された。安価で作業性の高い純 N<sub>2</sub> 中における、安定したボール形成が切望されていた。

純 N<sub>2</sub> 雰囲気中で形成したボール形状を図 4 に示す。ベア Cu では、ワイヤに対するボール位置が非対称となる偏芯不良が多発し、純 N<sub>2</sub> は使用不可である。この偏芯の原因は、トーチ電極側の Cu 表面にアークが拡張することであり、ワイヤ表面の Cu 酸化物がアーク拡張を助長すると考察した。ベア Cu では、アーク収縮効果のある水素が、偏芯抑制の観点からも必要である。

上記考察より、アーク放電がワイヤ表面性状に支配される機構に着目して開発を進めたが、Cu ワイヤの単なる Pd 処理ではボール形成は安定化しなかった。そこでさらに Pd 表層の表面組成、組織の適正化を行い、アーク放電をワイヤ先端に効率的に集中させる技術を確認した。この結果 EX1 では、純 N<sub>2</sub> 中であっても図 4 に示す真球・対称性の良好なボールを安定して形成可能となった。こうしたアーク放電の溶融、凝固を制御するナノレベル被覆の設計技術は、EX1 の実用化を後押しすると共に、その後に、小径化を追求する小ボール接合あるいは、後述する後継品における複層被覆の最適化などの基盤技術として活用されている。

##### 4.3 接合信頼性の向上

車載用 LSI などの過酷な環境を模擬した高温・高湿評価では、ワイヤとアルミニウム電極との接合部における不良が発生するケースが多い。Cu 酸化は水分により加速されるため、高湿加熱評価条件下における信頼性低下<sup>6)</sup>はベア Cu ワイヤの実用化の大きな障害となっていた。

図 5 に 121 $^{\circ}$ C-100%RH (相対湿度) の高湿加熱試験の結果を示す。評価手順は、ワイヤ接続 → エポキシ樹脂封止 → 高湿加熱 → 樹脂除去 → ボール接合部のシェア強度測定の間に行った。ベア Cu では 250h 以下の短時間に強度が著しく低下する。これに対し EX1 では、1000h 程度まで強度が低下せず、接合信頼性が大幅に改善している<sup>4,6)</sup>。

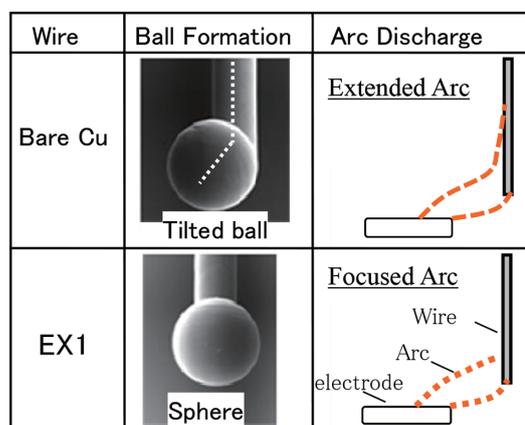


図 4 純 N<sub>2</sub> ガス中でのボール形成とアーク放電挙動  
Ball formation and arc discharge behaviors

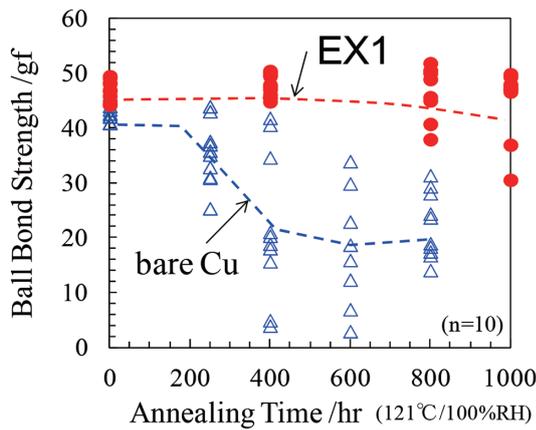


図5 高湿加熱後の接合強度の変化  
(線径 25 $\mu\text{m}$ , 汎用エポキシ樹脂封止)  
Bond strength after high humidity heating  
(diameter: 25 $\mu\text{m}$ , molded with commercial epoxy resin)

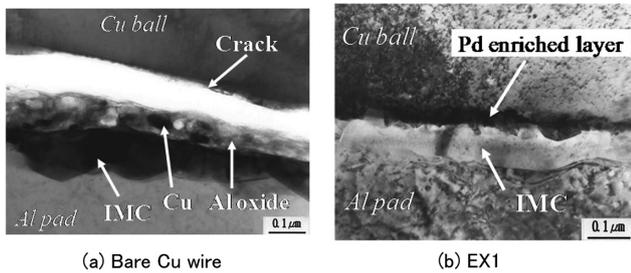


図6 高湿加熱後のボール接合界面のTEM観察  
(加熱時間 400h)

TEM observation of ball bond interfaces after high humidity annealing test

この耐久性向上の原因を解明するために、加熱後の接合界面の断面TEM (Transmission Electron Microscope) 観察を行った。結果を図6に示す。ベアCuの接合部には、連続的なクラックが発生しており、強度低下の原因となっていることがわかった。またその近傍にはAl酸化物、塩素などの生成物が検出された。この結果からベアCuの不良機構は、接合部に形成されたCu-Al系金属間化合物 (Inter-Metallic Compound : IMC) の一部が封止樹脂に含まれる不純物 (塩素) と化学反応を起こす腐食が原因であることを明らかにした<sup>9)</sup>。封止樹脂に吸湿された水分が塩素イオンの移動を助長している。特定のIMC相が優先的に腐食されることを究明し、IMC相の成長を支配する拡散挙動を制御する手段として被覆のPd成分が有効であることを明らかにしている。

一方EX1の接合界面では、クラック、ボイドは発生せず良好な界面形成が確認された。EX1では、加熱中に接合界面にPd濃化層が形成され、この濃化層の拡散バリア機能を有効に引き出すことで、腐食され易いIMC相の成長抑制、塩素侵入からの保護がなされ、接合信頼性を向上している<sup>9)</sup>。このように被覆ワイヤEX1の開発では、ワイヤ表面の酸化防止だけでなく、接合部の長期信頼性を向上させる機能付与まで取り込んだ材料設計を行い、ベアCuとの

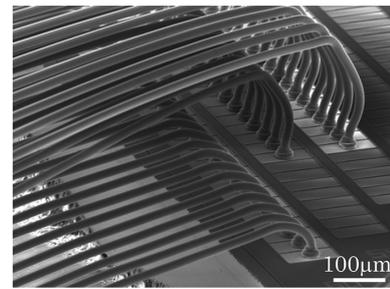


図7 EX1の実装例  
(線径 18 $\mu\text{m}$ , ワイヤ間隔 50 $\mu\text{m}$ , 多段接続)  
EX1 for LSI package  
(diameter: 18 $\mu\text{m}$ , wire pitch: 50 $\mu\text{m}$ , multi-layer bonding)

差別化を明確にしている。

EX1の開発によって被覆Cuワイヤの高性能が実証されたため、LSI用Cuワイヤの新たな市場が急速に立ち上がると共に、AuからCuへの置き換えを加速している。高密度多ピン系の最先端実装に線径20 $\mu\text{m}$ 以下の極細のEX1が適用(図7)されるなど、ベアCuでは不可能だった高い使用性能が実証されている。

## 5. 接合性を高める多層被覆Cuワイヤの進化

最新のLSI開発では、Auでも対応が困難とされる高密度配線および3次元実装など最新の実装構造へのEX1の適用が進むに従い、要求性能は厳しくなる。高密度接続による線径20 $\mu\text{m}$ から18 $\mu\text{m}$ への細線化、あるいは難接合材への実装など適用範囲の拡大に対応するため、ワイヤ接合性をさらに向上する要求が強くなる。EX1の機械的特性、Pd厚さの適性化だけでは限界があるため、接合性を究める被覆構造の設計に取り組んだ。

その結果、Pd層の外側にAu-Pd合金域を設けた多層構造である高機能被覆ワイヤ(製品名: EX1p)を開発した。図8には、主要なワイヤの断面構造を模式的に示す。Pd層は酸化抑制、ボール形成に有効であるが、硬質、高融点のため接合相手との拡散接合がやや遅いことが懸念される。そこで比較的軟質であり拡散接合にも有利であるAu-Pd合金を表面に形成することにより、接合強度を向上させることができる。

図9には、被覆Cuワイヤによる接合部の接合強度を示す。横軸のスクラブとは、加圧接合時に試料ステージを水平移動させる接合条件であり、変形には有効であるが、接合時間を短くするために低回数であることが望ましい。EX1pではスクラブ回数を1回以下に低減しても十分な接合強度が得られており、全体的に接合強度がEX1よりも高く安定していることが特長である。Au-Pd合金域が接合界面での変形、拡散接合を補助する重要な役割を果たしている。EX1pは樹脂基板への低温接合にも有利である。

前述したPd層がボールを安定化させる被覆効果を有効にするため、Au-Pd合金域の厚さはPd層より薄く設計して

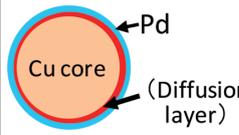
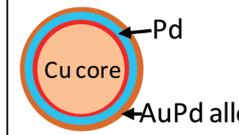
Needs	Au alternative	High density packaging	Memory LSI	Conventional
Product	EX1	EX1p	Ag alloy wire	Au wire
Wire Cross-section				
Coating	Pd	AuPd / Pd	(Ag core)	(Au core)

図8 高機能ボンディングワイヤの断面構造  
High performance bonding wire images

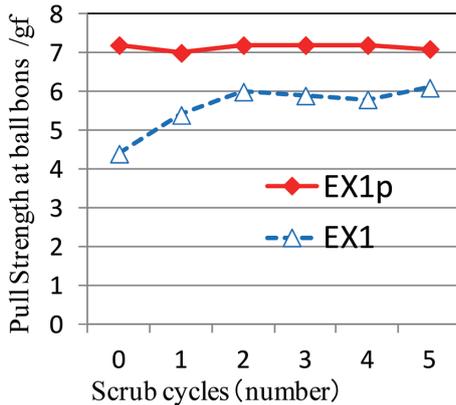


図9 2層被覆 Cu ワイヤ EX1p の接合強度  
High bond strength of EX1p

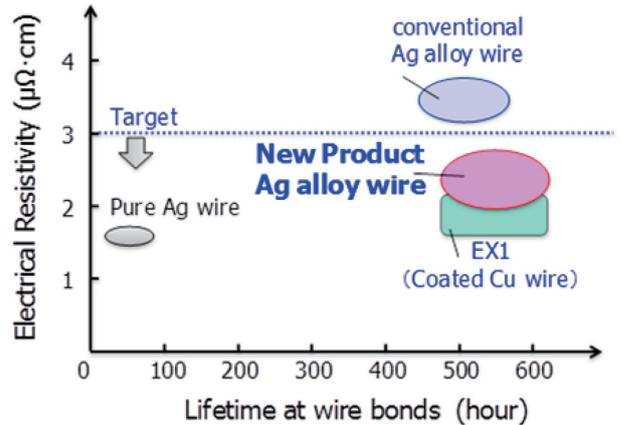


図10 Ag ワイヤの接合部寿命と電気抵抗の関係  
Bond lifetime and electrical resistivity of Ag bonding wires

いる。被覆構造が多層化することで、アーク放電によりボールを形成するときに、多くの被覆を効率良く溶解、合金化して真球を形成することが難しい。Au-Pd 合金域および Pd 層の厚さ、組成分布などを精緻に適性化することで、それぞれ単独では得られない相乗作用を引き出している。さらに多層の被覆構造をナノレベルの極薄で高精度に造り込む加工、熱処理のプロセス技術を確認することにより、量産化に成功した。多岐の要求性能を高める EX1p の高度な接合性は、極細線化、小面積接合、高信頼化など最新の半導体実装において EX1 より高機能化を発揮する。その優位性は世界多くの企業で高く評価され、被覆 Cu ワイヤの更なる普及を牽引する。

## 6. メモリー用 Ag 合金ワイヤ

小型・薄型化、大容量化に対応して、数十μm まで薄くした薄型メモリー素子を多数積層させる 3 次元実装が用いられる。メモリー向けワイヤ接続は少し特殊であり、薄型メモリー素子の上に 2 度接合することが多い。接合時に素子に与える損傷が問題となるため、ワイヤは変形し易い軟質材料が望ましい。またデータ処理の高速化に対応して、低い電気抵抗が必要となる。芯材が Cu である EX1 は硬質であるため、メモリー用途では実用化は遅れており、Au ワイヤが引き続き使用されていた。

メモリー用の脱 Au 材には軟質である Ag が候補となる

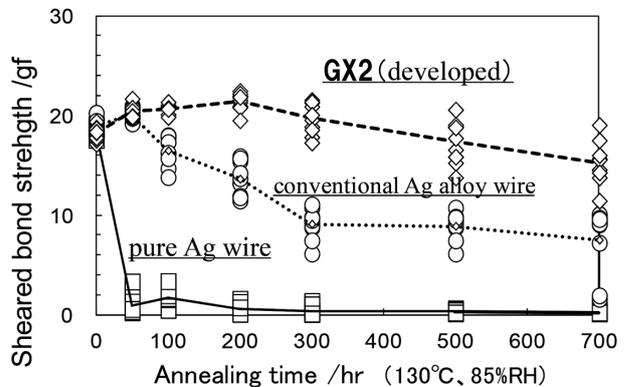


図11 Ag ワイヤの接合部の高湿加熱試験  
Bond strength at Ag wire bonds after high humidity testing

が、純 Ag ワイヤは Al 電極との接合部の信頼性が低いことが問題となり、実用化は断念されていた。従来の Ag 合金ワイヤでは、高濃度 (~5mol%) の合金化により電気抵抗が高くなるため用途は限定されている。そこで低濃度添加により接合寿命を改善する合金設計に、高機能 Ag 合金ワイヤ (製品名: GX2) を開発した。図 10 には、Ag ワイヤの電気抵抗と接合寿命を比較する。GX2 の電気抵抗は目標とする 3.0μΩcm 以下に低減されている。

図 11 に 130°C-85%RH (相対湿度) の高湿加熱試験における Ag ワイヤと Al 電極の接合強度の変化を示す。純 Ag では 50h 以下の短時間で強度が急激に低下するのに対して、

開発材 GX2 では 250h 程度まで強度が低下せず、接合寿命が大幅に改善している<sup>8)</sup>。接合断面の解析により、純 Ag で起きている Ag-Al 系の IMC 相と塩素による腐食反応が、GX2 では抑制されていることを確認した。合金元素が接合界面の拡散制御を引き出すことで、本来は成長速度は遅いが耐食性に強い IMC 相の形成を促進している。これは前述した EX1 の Pd 被覆の作用と一部共通しており、それを Ag の合金設計により実現していることが特長である。

## 7. まとめ

Pd 被覆の最適化を含めた EX1 の被覆構造制御は、従来のベア Cu ワイヤでは改善困難であった耐酸化・接合性、長期信頼性等の相反する特性を大幅に向上することを可能とした。EX1 は Au 同等の高性能と抜本コストダウンを両立して、世界で初めて最先端の超高密度 LSI の量産に採用された Cu ボンディングワイヤである。

EX1 製品群、Ag 合金など多様なボンディングワイヤ製品は、新日鐵住金(株)関連会社である日鉄住金マイクロメタル(株)で量産製造されている。世界トップクラスの主要顧客の 40 工場以上に正式採用され、事実上の世界標準化された商品である。EX1 および後継品 EX1p は、スマートフォン、タブレット端末などの電子制御を担う最新 LSI に使用できる高機能が評価され、本格的な需要の増大期を迎えている。導電性が高いため極細化に有利であり、Au よりも次世代高密度実装の適用範囲が拡大される。Au ワイヤから EX1 製品群への置換えによる波及効果として、地球的希少資源である貴金属のトータル使用量を 99%削減できる。Au から Cu への素材転換をもたらす EX1 の開発は社外でも高く評価されており、2012 年に市村産業賞“本賞”

を鉄鋼メーカーでは初めて受賞している。

世界に先駆けて開発した被覆構造の知的産財化では、重要特許が国内外延べ 100 件以上登録され、グローバルに特許網を構築している。これまで世界最大手ワイヤメーカーにライセンス供与するなど、日本発の革新的技術による新日鐵住金市場の刷新を推進している。

また今後の展望では、Au より 2 割高い EX1p の電気伝導性、高い耐熱性と耐久性などの優れた性能を活かし、HV、EV など次世代自動車への適用拡大および、低炭素社会に向けて注目されるパワー系半導体での導入促進も見込まれている。

EX1 が切り拓いた Au 代替素材の用途はさらに拡大している。メモリー用途向けに機能性を追求した Ag 合金ワイヤ GX2 は、低電気抵抗と高い接合信頼性を両立する初めての Ag 製品であり、大手メーカーでの実用化が予定されている。フラッシュメモリーはメモリーカードから産業機器に至るまで幅広い製品に使用されており、世界の情報量の急速な拡大を支える基幹部品として今後も市場成長が見込まれる。

## 参考文献

- 1) Hirota, J. et al.: Proc. 35th ECTC. 116-121 (1985)
- 2) Singh, I. et al.: Proc. 55th ECTC. 843-847 (2005)
- 3) 宇野智裕 ほか：電子材料. 2008 年 8 月号別冊, p. 80-83
- 4) Uno, T. et al.: Proc. 59th ECTC. 1486 (2009)
- 5) Uno, T. et al.: Microelectronics Reliability. 51, 88 (2011)
- 6) Uno, T. et al.: Microelectronics Reliability. 51, 148 (2011)
- 7) 宇野智裕 ほか：まてりあ. 50, 30 (2011)
- 8) Oyamada, T. et al.: Proc. 67th ECTC. (2017) to be published.



宇野智裕 Tomohiro UNO  
先端技術研究所 新材料・界面研究部  
上席主幹研究員 博士(工学)  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



小山田哲哉 Tetsuya OYAMADA  
先端技術研究所 新材料・界面研究部  
主任研究員



山田 隆 Takashi YAMADA  
日鉄住金マイクロメタル(株)  
技術開発部長 博士(工学)



小田大造 Taizo ODA  
日鉄住金マイクロメタル(株)  
技術開発部 課長