

耐酸化・接合性・長期信頼性に優れた 高機能複層 Cu ボンディングワイヤ EX1 の開発

宇野 智裕¹⁾ 寺嶋 晋一²⁾ 木村 圭一²⁾

1. はじめに

LSI (Large Scale Integrated Circuit) などの半導体実装では、半導体素子と外部端子の間の配線が必要であり、この配線にはこれまで主に、高純度の Au を線径 15~30 μm 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。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。最近では、携帯電話、デジタル家電の普及により、LSI の高機能・高密度小型化のニーズが高まっている。またハイブリッド車、電気自動車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ている。これらの要求性能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年代に米ベル研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、最近の Au 価格高騰、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きている。Au 代替では、低コスト・高導電性の利点から Cu ワイヤが40年にわたって開発⁽¹⁾⁽²⁾されてきたが、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・長期信頼性に優れた LSI 用途に使用可能な複層 Cu ボンディングワイヤ EX1 について、特性および改善機構などを紹介する。

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1)。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)、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(1)ボール真球性・対称性を確保するための放電時溶融・凝固の安定制御、(2)ミリ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、(3)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、(4)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事が求められる。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 ワイヤには以下の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)

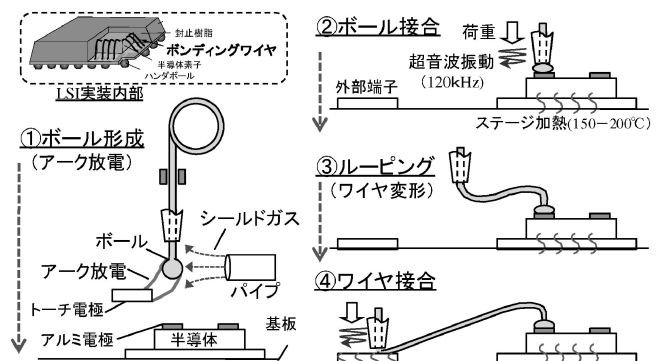


図1 LSI実装内部およびワイヤボンディング工程。

* 新日本製鐵株式会社技術開発本部 先端技術研究所：
1) 新材料研究部主幹研究員 2) 新材料研究部主任研究員
Development of Enhanced Bondability and Reliability Multi-Layer Cu Bonding Wire EX1; Tomohiro Uno, Shinichi Terashima and Keiich Kimura (Nippon Steel Corporation, Advanced Technology Research Laboratories)
2010年10月28日受理

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⁽²⁾。一方、複層構造のワイヤは、技術難度が高く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、複層構造の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の特異性が表層に特有の課題をブレイクスルーする可能性に注目した。しかしCuワイヤに単にPd表層を形成するだけでは、ボール形成での真球性低下や内部気泡の発生、表層剥離など多くの問題が生じた。そこでそれぞれの不良発生機構を検討し、アーク放電の安定化、密着性向上などを実現できる表層の最適構造を明らかにしていった。この知見に基づきPd表層の膜厚・組織の適正化(厚さ0.1 μm 程度)、Pd/Cu界面の拡散の活用、表層を薄く均一に加工する製造技術など独自の複層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被覆された複層Cuワイヤ(製品名:EX1)の量産に成功した⁽³⁾⁽⁴⁾。

4. 高機能複層CuワイヤEX1の特徴

複層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を達成し、Auワイヤと同等の高い性能を実現している⁽²⁾。以下、EX1の特長を説明する。

(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2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⁽⁴⁾を示す。ベアCuでは初期の接合強度が低い事に加え、7日程度の大気放置により酸化が進み、接合強度の低下、剥離などの不良が避けられない。

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、90日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。

(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($\text{N}_2 + 5\% \text{H}_2$)吹付けが必要であり⁽⁵⁾、コスト増加と安全管理の問題が有った。このため安価で作業性の高い純 N_2 中における、安定したボール形成が切望されていた。

純 N_2 雰囲気中で形成したボール形状を図3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_2 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事であり、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。そこで更に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_2 中であっても図3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り、これまで特殊ガスに頼っていたボール形成の改善に、ワイヤ表面改質が有効であることを実証できた。水素フリーで安定した真球を形成できるCuワイヤ製品は、EX1のみである。

(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⁽⁶⁾はベアCuワイヤの実用化の大きな障害となっていた。

図4に121 $^{\circ}\text{C}$ -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一連を行った。ベアCuでは250h以下の短時間に強度が低下する。これに対しEX1では、1000hr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⁽⁴⁾。この耐久性向上の原因を

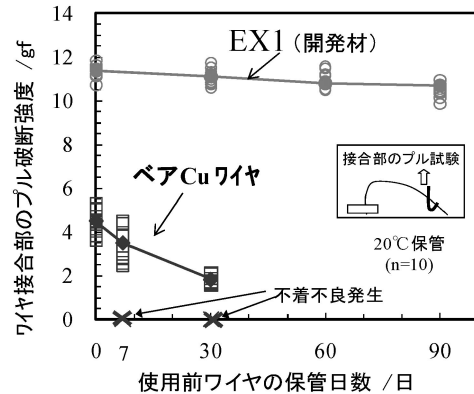


図2 大気放置されたCuワイヤのプル破断強度(線径25 μm , プル引張試験)。

ワイヤ	ボール形状	アーク放電現象
ベアCuワイヤ	× 偏芯不良	アーク拡張型
EX1	○ 真球	アーク収縮型 ワイヤ アーク トーチ電極

図3 純 N_2 ガス中でのボール形成とアーク放電挙動。

解明するため、加熱後の接合界面の断面 TEM 観察を行った。結果を図 5 に示す。ペア Cu の接合部には、連続的なクラックが発生しており、強度低下の原因である事がわかった。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。この結果からペア 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究明した。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と予想される。

一方 EX1 の接合界面では、クラック、ポ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、この層の拡散バリア機能を有効に引き出すことで、被腐食 IMC 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。このように複層ワイヤ 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、ペア Cu との差別化を図っている。

5. 特許および実用化状況

新製品 EX1 の製品・用途等の特許を国内外合わせて 50 件以上出願済み⁽⁷⁾である。国内 10 件が公開され、欧米・アジアを中心に多数の国にも出願されている。複層構造の基本特許の一部が国内 3 件⁽⁸⁾、海外 4 件で既に登録されている。

EX1 は新日鉄関連会社である日鉄マイクロメタルで量産製造され、世界各地で用量が急激に伸びている。世界トップクラスの主要顧客の 20 工場以上に採用され、良好な使用実績を挙げており、LSI に使用可能な初めての Cu ワイヤとして認知されてきている。高密度多ピン系の最先端実装に線径 20 μm 以下の極細の EX1 が適用 (図 6) されるなど、ペア Cu では不可能だった高い使用性能が実証されている。

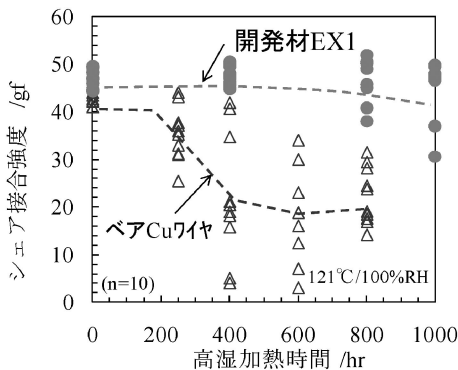


図 4 高湿加熱後の接合強度の変化 (線径 25 μm , 汎用エポキシ樹脂封止)。

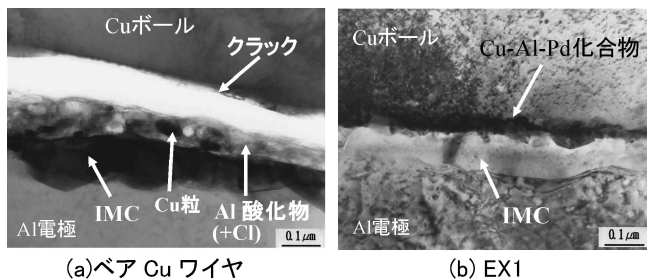


図 5 高湿加熱後のボール接合界面の TEM 観察 (加熱時間 400 hr)。

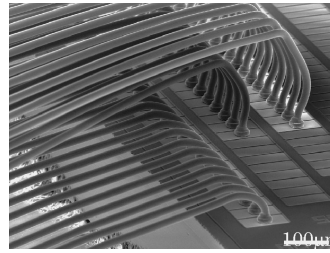


図 6 開発品 EX1 の実用例 (線径 18 μm , ワイヤ間隔 50 μm , 多段接続)。

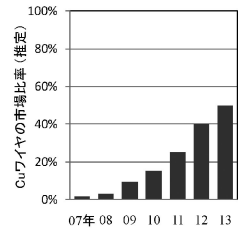


図 7 Cu ワイヤの市場シェア予測⁽⁹⁾。

表 1 開発ワイヤ EX1 の主要特性 (Au, Cu と対比)。

主要特性	ワイヤ	EX1	従来 Cu	Au
		複層	単層	単層
接合強度 (相対値)		1.3-1.8	1	≥ 1.8
大気放置寿命		>60 日	≤ 7 日	≥ 90 日
巻長さ		~5000 m	500-1000 m	~5000 m
ボール形成ガス		純 N ₂	N ₂ +5% H ₂	不要
接合信頼性 (高湿)		>1000 h	<250 h	>1000 h
電気伝導度 (相対値)		≥ 1.2	≥ 1.2	1

EX1 の開発によって複層 Cu ワイヤの高性能が実証されたため、LSI 用 Cu ワイヤ市場が急速に立ち上がると共に、Au から Cu への 40 年振りの転換が大幅に加速している。永年 2% 以下と低調であった Cu ワイヤの市場シェアは最近急増し、2013 年頃にシェア 50% に達するとの業界予測⁽⁹⁾も出されている (図 7)。

6. まとめと今後の展望

新製品 EX1 は、世界で初めて最先端の超高密度 LSI に量産採用された Cu ボンディングワイヤである。Pd 被覆の最適化を含めた EX1 の複層構造制御は、従来のペア 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事を可能とした (表 1)。現行 Au ワイヤと同等の高機能を 1/4 程度の低価格で実現する EX1 の採用は、LSI 製造コストの削減に大きく貢献できる。

また今後の展望では、Au より 2 割高い EX1 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、低炭素社会に向けて注目されるパワー系半導体や、今後益々成長する LED 分野での導入促進も見込まれている。

文 献

- (1) J. Hirota, *et al.*: Proc. 35th ECTC, (1985), 116-121.
- (2) I. Singh, *et al.*: Proc. 55th ECTC, (2005), 843-847.
- (3) 宇野智裕他: 電子材料 (2008) 8 月号別冊, 80-83.
- (4) T. Uno, *et al.*: Proc. 59th ECTC, (2009), 1486-1495.
- (5) H. Ho, *et al.*: Proc. 7th EPTC, (2005), 292-297.
- (6) C. Tan, *et al.*: Appl. Surf. Sci., (2002), 62-73.
- (7) 特願 2002-527565, 特願 2007-6446 他.
- (8) 特許番号 JP4542203, 特許番号 JP4554724 他.
- (9) 半導体産業新聞, 特集記事 (2010.9.8).