

高密度50 μ m狭ピッチ接続におけるワイヤボンディング 接合技術の開発

50 μ m Fine Pitch Ball Bonding Technology

宇野智裕^{*(1)} 寺嶋晋一^{*(2)} 北村修^{*(3)} 巽宏平^{*(4)}
Tomahiro UNO Shinich TERASHIMA Osamu KITAMURA Kohei TATSUMI

抄 録

半導体の高機能化, 小型化が急速に進む中で, 高密度実装を実現するための微細接合技術が重要である。半導体チップ電極と外部端子との電気的接続を得る方法として, ワイヤボンディングが主流であり, 隣接ワイヤ間隔の縮小による狭ピッチワイヤ接続の要求が高まっている。現在は70 μ mピッチまで量産化され, 2005年には40 μ mピッチの実現が期待されている。ワイヤの高強度細線化, キャピラリ先端形状とボール径の適正関係, 接合条件の適正化などを行うことによる, 50 μ mピッチ接続における技術開発について述べた。

Abstract

Importance of fine pitch bonding technology for high-density assembly of semiconductor devices is increasing in the background of rapidly advancing downsizing and performance enhancement of the devices. Presently, the wire bonding method is dominant as a method of electric connection between semiconductor chip electrodes and external electrodes, wherein demands are increasing for connection in narrower pitches between adjacent wires. 70 μ m-pitch bonding has been applied to mass-produced devices and 40 μ m-pitch bonding is expected to come to commercial use by 2005. This paper describes technology developments of 50 μ m-pitch bonding involving high strength thin bonding wire, optimum relationship between the capillary shape and ball diameter, optimization of bonding conditions, etc.

1. はじめに

近年の本格的なマルチメディア時代の到来とともに, 携帯電話, ノート型パーソナルコンピュータなどの電子機器の高機能化, 小型化には目を見はるものがあり, 半導体素子においても高密度化, 高集積化に対するニーズが高まるばかりである。半導体パッケージ構造は多様化, 高機能化が年々進行しており, 例えば小型・薄型化, 入出力ピン数の増大, 高密度接続などが求められている。多ピン化, リードピッチの微細化, およびパッド電極ピッチの微細化に対応するための微細接合技術が重要な技術課題である。

LSIパッケージ内部構造を図1に示す。半導体デバイスの配線および電極は厚さ1 μ m程度のAl合金膜で形成され, その電極と外部端子を接続する手法としてワイヤボンディング法が主流であり, ボンディングワイヤ材料は直径18~40 μ mのAuワイヤが最も普及している。ワイヤ先端をアーク放電により溶融して形成されるボール部を, キャピラリと呼ばれる円筒状の押圧治具を用いて, 超音波振動を加えながら熱圧着によりAl電極上に接合する。ワイヤ接続されたICは, 外部環境からの保護のために熱硬化性エポキシ樹脂で封止される。

パッケージ構造では, 従来のリードフレームを用いたQFP (Quad Flat Package)の多ピン化, 薄型化が進み, また樹脂基板やテープ基板に半導体チップを搭載したBGA (Ball Grid Array)を追求したCSP (Chip Scale Package)などが普及し始めている。新型パッケージにおけるチップと基板との接続にもワイヤ接続が最も多く使用されており, 狭ピッチワイヤ接続の要求が高まっている。

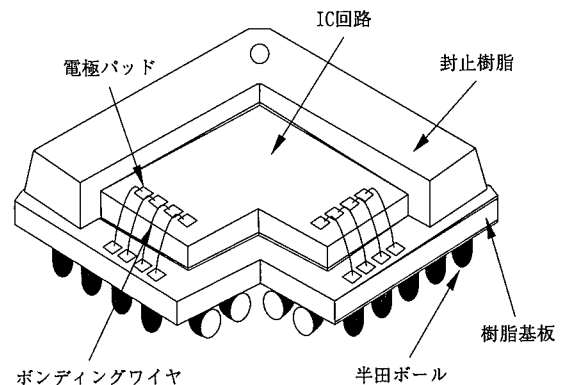


図1 LSIパッケージ内部構造

*⁽¹⁾ 技術開発本部 先端技術研究所 新材料研究部 主任研究員 工博
千葉県富津市新富20-1 ☎293-8511 ☎(0439)80-2932

*⁽²⁾ 技術開発本部 先端技術研究所 新材料研究部 研究員

*⁽³⁾ 日鉄マイクロメタル 生産技術部 担当部長

*⁽⁴⁾ 技術開発本部 先端技術研究所 新材料研究部 主幹研究員 Dr.-Ing

ワイヤボンディング技術に関する米国SIA (Semiconductor Industry Association)のロードマップ(2000年)によると、隣接ピッチ間隔は現行主流である70 μm ピッチから狭ピッチ化が進行し、2005年には40 μm ピッチの実現が予測されている。現在は60 μm ピッチの量産が開始された段階であり、今後50 μm ピッチ接続技術を早期確立することが課題である。

本論文では、狭ピッチ化による接合部の課題を整理し、50 μm ピッチ接続を実現するための高強度ワイヤ、キャピラリ、接合条件などの選定、高温信頼性を中心に報告する。

2. 狭ピッチワイヤボンディングにおける課題

半導体実装において、一部では、ワイヤボンディングでの狭ピッチ化への対応限界が認識され、微細接続に適した金属突起物(パンブ)を使用するTAB法(Tape Automated Bonding)、FC法(Flip Chip)などが実用化されている。しかし、生産性、配線自由度、信頼性などに優れたワイヤボンディング技術への要求は高まるばかりであり、リードフレーム、基板、キャピラリ、ボンディング装置などの開発の進展とともに、更なる狭ピッチワイヤボンディング材料、接続技術の開発が強く望まれている。例えば、接合性を高めるための超音波の高周波化、微細加工に適したボトルネック型キャピラリ、樹脂封止時のワイヤ変形を抑制するためのリード端子の微細化によるワイヤ長の短縮や、流動性を改善する封止樹脂などの検討が進み、ワイヤボンディングをとりまく環境も変化している。

狭ピッチ化を実現するワイヤボンディング技術には、細線化、小ボール形成、接合面積の縮小、ワイヤ変形の抑制、接合信頼性などを達成することが重要である。これらの要求を満足するには、線径、ボール径、キャピラリ寸法を単純に小さくしただけでは解決できない問題も多く、狭ピッチボンディングの技術課題を整理する必要がある。第一に、細線化しても樹脂封止時に隣接するワイヤと接触する不良を抑えることのできる、高強度、高弾性率のワイヤ材料が求められる。第二に、ボール接合面積を縮小して、隣接ボール部と接触することなく、しかも十分な強度が得られるような接合技術の探索が不可欠である。第三に、接合部の微細化、樹脂基板における低温接合、高周波化によるIC発熱量の増大などの厳しい環境でも、接合部は十分な長期信頼性を保つことが一層重要となる。

これまでも70 μm 、60 μm ピッチ接続について報告¹⁾されており、従来の比較的広いピッチ接続では、キャピラリの先端加工、ワイヤ径、接合条件の適正範囲などに比較的余裕があったため、経験的な条件選定でも対応可能な場合が多かった。しかし、これまでの微細化の設計規準をもとに最新の材料、装置、条件を組み合わせただけでは、50 μm ピッチにおける量産性、信頼性を確保するのは困難である。なかでも小ボール接合では、接合面積の縮小と接合強度の確保を両立することが一層難しくなっており、それを改善するには、ボール部と電極材との表面性状、硬さ、組織などの適正関係を明らかにし、それら材料特性を最大限に引出すためのキャピラリ設計、接合条件の適正化にまで取り組むことが必要となる。50 μm ピッチ接続技術を確立し、さらに微小ボール接合における考え方を明確にすることが重要である。

3. 高強度細線ワイヤ

多様化するパッケージ構造に対応するボンディングワイヤとして、長ワイヤ化、低ループ化、細線化、高信頼性などの要求が厳し

くなっている。従来のワイヤ材質は高純度4N(>99.99%)を基本とし、100ppm以下の微量な元素添加および加工技術の適正化による特性向上が中心であった。近年の高強度細線化、高信頼化に対応するために、4N系の濃度域を超えて2N(>99%)程度まで元素添加した合金系ワイヤも開発され、一部のパッケージにおいて実用化されている。

4N系の高強度細線ワイヤとして開発されたNTシリーズは、高強度、高弾性率であり、ループ部の変形を抑制したり、細線化に有利である。図2には、50 μm ピッチ接続対応のNT5材をはじめ代表的なワイヤ製品について、引張破断強度と線径との関係を示す。NT5材は、汎用ワイヤT1材よりも強度が3割以上増加しており、同一強度を確保しつつ線径を2 μm 程度細くすることができる。また、高強度でありながら、汎用ワイヤと同等の接合性、ループ制御性、電気伝導性などを確保しており、最新の高速ボンディング装置を使用しても優れた量産使用性を発揮できる。

図3には、NT5ワイヤの先端に形成されたボール部のSEM像を示す(線径:23 μm 、ボール径:34 μm)。高強度化のために添加された元素が、ボール溶融時の酸化や凝固組織に影響して、引け巣の発生や、真球性の低下などの問題が懸念される。NT5材ではそうした不良は発生することなく、線径の1.5倍以下の小径ボールでも、安定して真球性、表面清浄性などの良好な状態を得ることが可能である。

図4には、ボール部および熱影響域の断面組織を示す。NT5材とT1材と比較すると、再結晶部の長さはそれぞれ40、70 μm 程度で

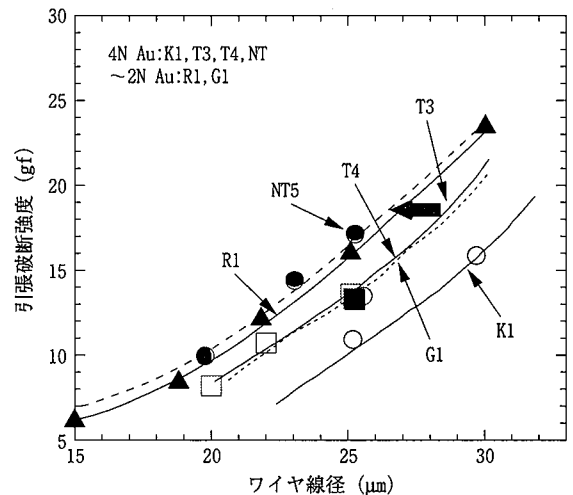


図2 ボンディングワイヤ製品の強度

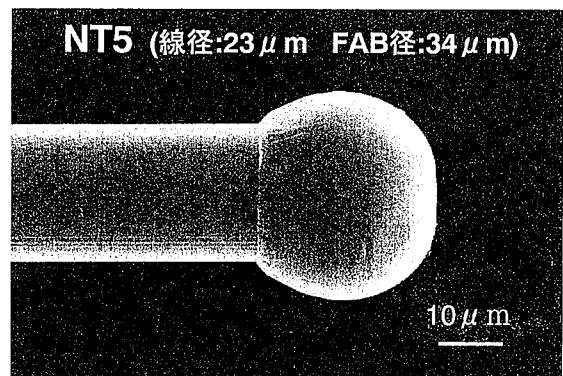


図3 ワイヤ先端に形成したボール部のSEM像

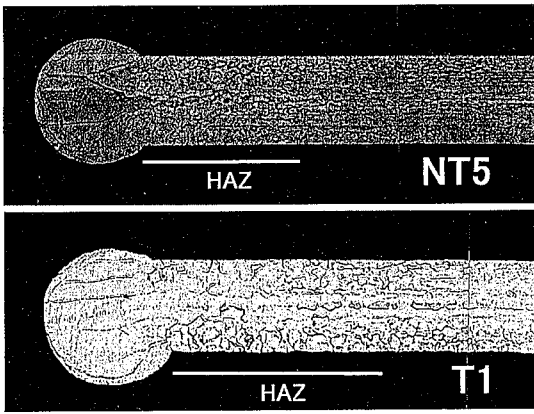


図4 ワイヤのボール部および熱影響部(HAZ)の組織写真(線径: 23 μ m, FAB径: 34 μ m)

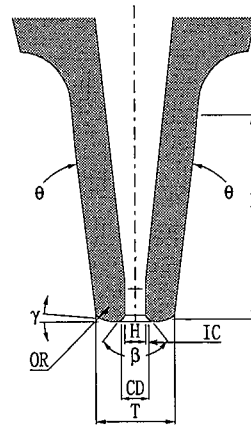


図6 キャピラリの先端形状と使用品の寸法

記号	名称	寸法*
H	ホール径	28 μ m
CD	チャンファー径	33 μ m
T	チップ径	65 μ m
θ	ボトルネック角	90°
γ	フェイス角	90°
β	チャンファー角	90°

*本実験で使用

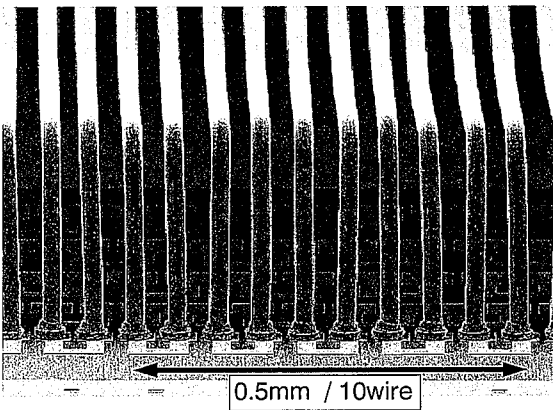


図5 50 μ m狭ピッチ接合部のSEM写真(線径: 23 μ m, ワイヤ長さ: 約5mm)

あり, またNT5材の再結晶粒の方が少し微細であった。再結晶長さはボール直上におけるループ高さに関係しており, NT5ワイヤは低ループ化に適している。また通常, 熱影響部の強度はワイヤの強度に比べて低下しており, ループ形成時にこの部位での倒れや損傷などが問題となる。熱影響域の引張破断試験を評価すると, NT5材の強度がT1材よりも1割程度高いことが確認された。再結晶領域の微細化, 高強度化により, この部位での損傷や隣接ワイヤとの接触などを抑えることで狭ピッチ接続に好適である。

図5には, 線径23 μ mのNT5ワイヤを使用して狭ピッチ50 μ m間隔で接続された接合部の外観を示す。良好なボール接合形状, 隣接ワイヤとの接触することのないネック部, ループ形状, 直線性などが確保されていた。さらに, NT5ワイヤにおける樹脂封止時のワイヤ変形は, 従来ワイヤよりも減少されていた。

4. 狭ピッチ接続におけるキャピラリー選定

キャピラリーは, ボンディング工程でのワイヤをガイドする役割に加えて, 1st接合部のボール圧着形状, ループ形状などに大きく関わることから, 狭ピッチ接続技術に重要な役割を担う。図6には, 先端部が微細加工されたボトルネック型の一例を示す。狭ピッチ接続に対応する先端形状, 微細加工, 耐久性などが要求される。高強度細線ワイヤの特性を有効に活用するためにも, ワイヤの寸法, 材質, 特性に適応したキャピラリーを選定することは欠かせない。

表1に, それぞれのピッチ間隔に適したワイヤ径, 初期ボール(FAB: Free Air Ball)および圧着ボール径の寸法, さらに代表的

表1 狭ピッチ接続に適したワイヤ, キャピラリーの寸法形状

電極ピッチ(μ m)	80	70	60	50	45	40
ワイヤ						
線径(μ m)	27	25	25	23	20	20
FAB径(μ m)	55	48	36	34	32	30
圧着ボール径(μ m)	60	55	47	42	38	35
キャピラリー先端形状						
チップ径(T/ μ m)	110	95	75	65	65	56
ホール径(H/ μ m)	38	33	30	28	25	26
チャンファー径(CD/ μ m)	50	45	35	33	31	29

なキャピラリー形状因子の推奨値を示す。ワイヤ, キャピラリーの幾何学的関係およびボンディング装置能力, ボンディング生産における信頼性要因などを十分考慮して適正值が求められる。

主な設定規準として, 安定してFAB形成およびボール変形ができること, 接合部が電極の開口部からはみ出ることなく, 十分高い接合強度を確保できること, キャピラリーが隣接するワイヤ, ボール接合部に接触することなく接合できることなどを最低限満足しなくてはならない。表中の50 μ mピッチ接続では, ワイヤ径Wを23 μ mと20 μ mの2種類でそれぞれ検討している。これは, W=23 μ mの方が樹脂封止時のワイヤ変形を抑制する効果がより高いこと, W=20 μ mの方がFABを安定して小さくでき, 量産時の適正マージンを確保しやすいこと, などの理由による。また, 次世代ターゲットとなる45 μ m以下の超狭ピッチ接続においても, 現状技術をベースにしたときの推奨条件を加えてある。こうした狭ピッチ化における総合的アプローチは, 開発ワイヤおよび接合技術の普及を促進するうえでも重要である。

5. 50 μ mピッチ接合技術

狭ピッチ接続では, 接合強度を高めるために接合面積を増やすと, 隣接ボール接合部と接触する可能性が高くなる。50 μ mピッチでは3~5 μ m程度まで接近する場合もあり, 平均的なボール圧着径の管理だけでは十分でなく, 個々のボール変形のばらつきまで含めた管理が必要となる。しかし, ばらつきを無くすることは困難であることから, 超音波熱圧着によるボール変形をできる限り等方的にすることが望まれる。こうした変形挙動の制御には, FAB寸法, 接合荷重, 超音波印加などを個別に調整しただけでは不十分であり, キャピラリー先端の複雑な形状因子とボール変形挙動との関係

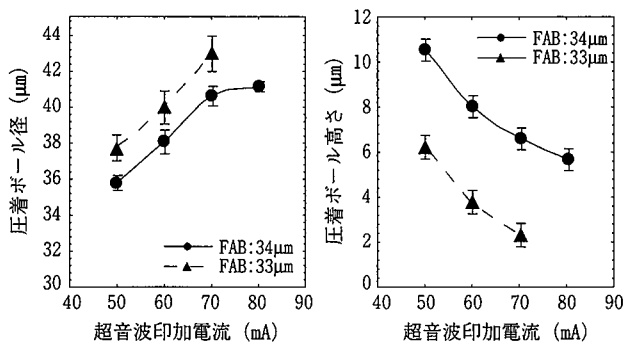


図7 圧着ボール径および高さの変化(ワイヤ: NT5, 線径: 23 μm)

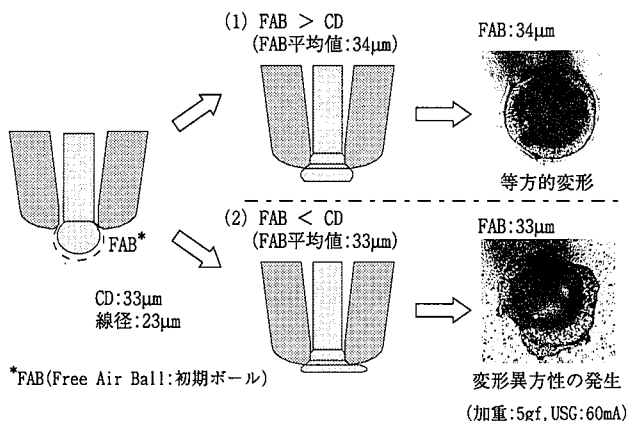


図8 狭ピッチ接続のための初期ボール径とキャピラリ形状の関係

を理解したうえで接合条件を適正化することが重要となる。以下に一例を紹介する。

図7には、線径23 μm のワイヤ先端に形成されたボール接合部の圧着径と圧着高さの変化を示す。ボンディング装置はK&S社製8028型を使用した。横軸の超音波出力が大きくなるほど圧着径も大きくなることは通常の変化であるが、他方でFABの平均径が34 μm 、33 μm と比較すると、33 μm の小さいボールの方が圧着径は大きく、圧着高さは薄くなっていった。これは、従来よく観察されたFABが小さいほど圧着径も小さくなる変化とは逆転している。さらに、33 μm ボールの方が変形異方性は顕著であり、ランダムな方向に凹凸が発生することが確認された。こうした変形をもたらす要因は、特に、キャピラリ寸法因子であるCD(Chamfer Diameter)とFAB径との大小関係が密接に関与すると推察される。

図8に、ボール変形挙動をFAB寸法とCDとの大小関係で分類して示す。(a) FAB > CD、(b) FAB < CDのどちらであるかによって、キャピラリの穴部と外周部のそれぞれのボール変形のバランスが大きく変化することで、ボール部の変形挙動に差異が生じたと考えられる。

まず(a) FAB > CDの場合には、キャピラリ穴の外側でのボール変形が主体となる、本来の接合挙動が得られることで、ボール部が等方的に変形される。それに対し、(b) FAB < CDの場合には、大半のボール部変形がキャピラリの穴部(Hall部とChamfer部)で起こるため、キャピラリ外周で変形されるボール部は少なくなり、その少ない体積のボール外周部に同じ荷重が付加されることで圧着径は増加する。その結果、多数の結晶粒からなるボール部の変形異方性が助長されたものと考えられる。図7の実験に用いたキャピラリのCDは公称33 μm であることから、FAB=34 μm の場合は常に

FAB > CDの関係を満たし、一方FAB=33 μm の場合にFAB下限近傍ではFAB < CDの関係となりやすい。

こうした変形異方性について、従来はワイヤ材質、荷重・超音波条件などの影響が大きいと考えられており、その影響も確認しているものの、FAB寸法とCDの適正関係にも左右されることが明らかとなった。この寸法関係は、表1の狭ピッチ化のデザイン設計にも反映されている。

6. Au/Al接合部の接合信頼性

Auボンディングワイヤの要求特性の一つとして、ICチップ上のAl電極との接合部における高温での長期信頼性も重要な特性である。近年の接合面積の縮小、IC発熱量の増大、高温使用環境などに伴い、より高い接合信頼性が要求される。以前から、高温加熱されたAu/Al接合部の接合強度の低下、あるいは電気抵抗の上昇などが、半導体の不良原因の一つとして懸念されている。著者らの研究により、接合信頼性を低下させる要因を大別すると、(1)接合界面でのポイド生成^{2,3)}、(2)金属間化合物と封止樹脂成分との腐食反応⁴⁾に分類できる。信頼性には、材料、接合条件、界面構造、パッケージ形態、使用環境など多数の因子が関わっており、狭ピッチ化における信頼性を向上するための考え方を明らかにしておくことが重要である。

Auワイヤ/Al電極薄膜の接合部を窒素中にて473Kで加熱した後、接合部を上方に引張るプル強度を測定した結果を図9に示す。

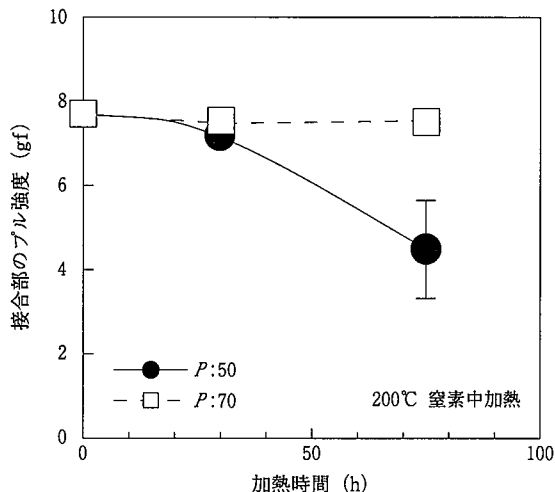


図9 ポールシェア強度の加熱による変化(線径: 23 μm , FAB径: 34 μm)

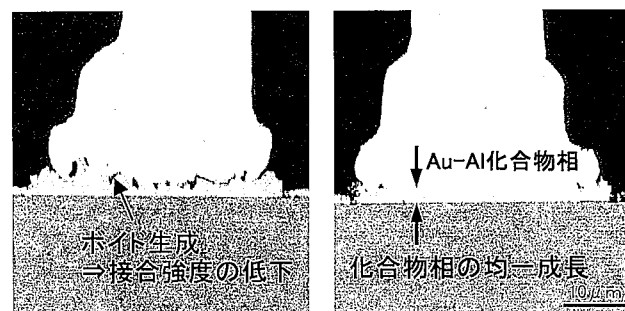


図10 ポール部の加熱後(200 $^{\circ}\text{C}$ -75h)の断面観察(線径: 23 μm , FAB径: 34 μm)

超音波印加電流 P は50, 70mAで比較している。 $P=70\text{mA}$ の高い場合は加熱後も接合強度が低下しないのに対し、 $P=50\text{mA}$ の低い場合は接合強度が低下していた。473Kで75h加熱した接合部断面を図10に示す。超音波出力 $P=50\text{mA}$ の試料(a)では、化合物が不均一に成長してポイドが生成したのに対して、 $P=70\text{mA}$ の接合部(b)では、化合物は界面全体に均一成長しており、ポイドは成長していなかった。

接合部におけるポイド生成は、Au, Al原子の拡散速度の差によるカーンダル効果に起因しており、金属間化合物相の成長挙動と密接に関連する。接合部に成長する化合物相の分析により、初期に優先的に成長する相は Au_5Al_2 相であり、接合部直下のAl膜が消失した後はAuの多い Au_4Al 相へと変化する。従来の広いピッチの場合でも、Au-Al化合物の成長により常にポイド生成するのではなく、化合物相成長が不均一なときにポイド成長が助長され、接合強度が低下することを明らかにしている²⁾。

Au/Al接合界面の局所域で化合物相成長が抑制された要因は、Al表面の酸化膜および汚染層が接合界面に介在したためと考えられる。接合直後のAu/Al界面における微視構造の模式図を図11に示す。通常、Al表面の酸化膜は、接合時の荷重変形および超音波振動により破壊されて微細分散され、Al新生面を露出させて金属接合が得られる。それに対し、酸化膜の破壊が不十分な場合には、界面に連続的に介在する酸化膜がAu, Al原子の相互拡散のバリアとして

作用したと考えられる³⁾。

こうしたポイド生成を抑制する方策として、酸化膜を十分破壊させるための接合条件の適正化、化合物の均一成長を促進する加熱処理などが有効である。前者では、荷重、超音波印加により、接合時に酸化膜を微細均一に分散させておけば、その後の加熱においても化合物の均一成長が促進される。初期の接合界面状態を制御することにより十分な信頼性が得られる。後者では、真空中などの加熱により、化合物の均一成長を促すことで、ポイド生成を軽減できることも明らかにしている。

接合面積の縮小にともない、ボール部とは直接接触しないキャピラリ穴部の接合部全体に占める割合が高まり、化合物相が中心域に成長しないことが懸念される。図12は、50 μm ピッチのボール接合部で、Al膜をエッチング除去し、ボール部を裏面観察した結果である。化合物はほぼ界面全体に成長しており、懸念された化合物成長の中抜けなどは発生していなかった。ボール部の圧縮変形性、電極材の表面状態、硬度などを考慮して、接合界面での酸化膜の破壊、拡散を促進する接合条件の探索が必要である。

Au/Al接合部でのポイド生成の要因には、上記の不均一な化合物成長挙動の他に、Auワイヤへの合金元素添加も影響する場合もある。例えば、高濃度添加されたPd元素によりポイド成長が促進されることや、Ag元素添加により、通常生成しない化合物相(AuAl_2)の成長により接合強度が低下することを確認している⁵⁾。狭ピッチ用ワイヤ開発では、強度増加のための合金元素添加が重要であるが、接合部での拡散挙動に及ぼす影響まで把握したうえで材料設計を行わなくてはならない。NT5ワイヤでは、材料起因のポイド生成を抑制して、現行4N系と同等の良好な長期信頼性が確保されていることを確認している。

7. まとめと今後の課題

最先端の半導体実装を支える狭ピッチワイヤ接合技術について、50 μm ピッチ接続におけるボール接合性、長期信頼性などを中心に評価を行った。高強度化されたワイヤ、先端を微細化したキャピラリ、最新ボンディング技術を用いることで、50 μm ピッチ接続への適応性を確認した。接合面積の縮小とシヤ強度の確保とを達成するには、初期ボールFAB径とキャピラリCDとの適正関係が重要であることを明らかにした。また、接合条件の適正化により、高温加熱でのポイド生成を抑制して信頼性を向上できることを確認した。こうした材料開発、接合技術は50 μm ピッチのみに限定されるものではなく、次世代の狭ピッチ化にも十分適用可能な技術である。

今後、樹脂封止時におけるワイヤ変形を抑えるための最適封止樹脂、封止条件の選定、また低温、低衝撃ボンディングなどによる製造歩留まりの向上、次世代Cu配線への適用性の検討などにより、次世代の40 μm 極狭ピッチボンディングを実現するワイヤ材料、接合技術の開発が求められる。

参考文献

- 1) 巽宏平, 宇野智裕, 尾上浩三, 北村修: 新日鉄技報. (363), 32(1997)
- 2) Uno, T., Tatsumi, K., Ohno, Y.: Proc. of ASME/JSME Joint Conf. on Electronic Packaging, 2.771(1992)
- 3) 宇野智裕, 巽宏平: 日本金属学会誌, 7.828(1999)
- 4) 宇野智裕, 巽宏平: 日本金属学会誌, 3.406(1999)
- 5) 宇野智裕, 巽宏平: Mate'98 (5th Microjoining and Assembly Technology in Electronics), 1999, p.25

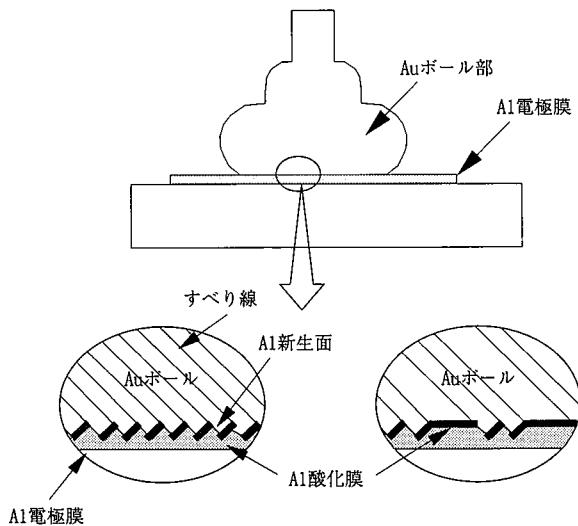


図11 Auワイヤ/Al電極膜の接合界面の模式図

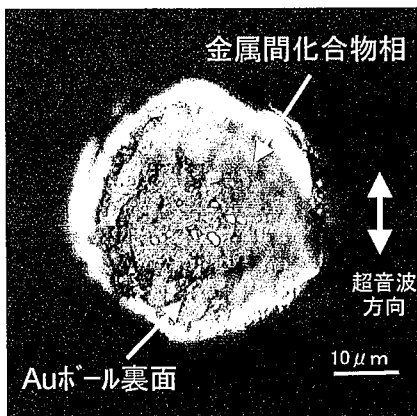


図12 ボンディング直後のボール裏面観察 (NT5ワイヤ, FAB径: 34 μm)