マイクロ接合におけるプロセス制御 ——その現状と将来への展望——

仲 田 周 次*

1. は じ め に

マイクロエレクトロニクスおよびそれらを応用した電子部品・機器は今後の情報化社会の中心となり、またあらゆる技術の中核的な位置を占めるコンピュータのこれからの行方を左右するものであり、社会への影響の大きさを考えると、現代の技術革新の最も重要なものの一つである。事実、このことは電子産業の1988年度の生産額が民生用、産業用電子機器および電子部品の三部門で約21兆円に達しようとしていることからもうかがえる。

ここでは、まず電子部品のなかで中核的な位置を占める半導体集積回路を中心として接合・実装技術における諸問題のうち、とかく誤解されていると思われるマイクロ接合の定義およびマイクロ接合と実装技術との関連について簡単に触れた後、マイクロ接合現象、接合プロセスの制御およびその接合部品質のインプロセス制御を取り上げ、その現状と将来を展望する。なお、電子部品・機器の接合・実装において用いられるマイクロ接合技術の概観・全容については他の解説⁽¹⁾⁽²⁾を参照していただきたい。

2. 電子部品・機器・システムにおける接合・実装の階層およびマイクロ接合技術と実装技術との関連

電子部品・機器・システムにおける実装における接合・接続は一般に次の4つの階層に分類される。

- 第1階層：半導体チップ内部での相互接合・接続
- 第2階層：半導体チップの端子とパッケージの導体（リード）の間の接合・接続
- 第3階層：パッケージ・部品などの外部リードと回

路基板との接合・接続

第4階層：回路基板相互の接合・接続によるシステムの構成

例えば半導体ボンディングは第2階層の段階に位置しており、またプリント配線板への電子部品の登載は第3階層に属し、これら接続・実装には種々のマイクロ接合法が採用されている。

これらモノリシック集積回路、ハイブリッド集積回路、プリント配線板における代表的寸法は図1⁽³⁾に示すようにほぼ1000~1μmの範囲にある。これらは年々微細化の傾向にあり、これに伴って接合・実装技術に対する諸要求も厳しくなってきている。

図1 プリント基板、ハイブリッド集積回路、モノリシック集積回路における代表的寸法の現状と将来。

3. マイクロ接合法の定義およびマイクロ接合技術と実装技術との関連性

マイクロ接合法(Micro joining)とは、接合対象部が微細・微小であるため、接合対象部の寸法が大きい場合には問題とならない接合部での溶解量、拡散厚さ、変形量、表面張力等により、接合性および接合品質(接合時およびその経時変化なども含めて)に無視し得ない影響を及ぼし、これらの寸法効果を特に考慮しなければならないような部位⁽²⁾⁽⁴⁾に適用される接合法の総称である。

* 大阪大学教授；工学部生産加工工学科

Inprocess Control in Micro Joining—Its Present and Future Trend—; Shuji Nakata (Faculty of Eng., Osaka Univ., Suita)

Keywords: micro joining, inprocess control, temperature measurement, tape automated bonding process, wire bonding, reflow soldering, eutectic bonding

1989年4月28日受理

当然のことながら、マイクロ接合法と通常の接合法との境界の寸法は、その対象とする接合法がもっている制御性に依存しており、接合工学・技術の進歩と共に変化していく性質を持つものである。

これらマイクロ接合技術は電子部品・機器の接続・組立・実装技術のなかの基盤技術の一つであり、実装技術の変遷に伴いマイクロ接合技術に新たな要求が生じてくる。マイクロ接合技術は実装技術としての集積化技術、接続技術、製造技術、構造設計技術など種々の基盤技術と密接な関係をもち、高密度化、高信頼性、低コスト化、高保守化などの目的とする機能を実現するものである。

マイクロエレクトロニクスなどでの接続・実装に採用されているマイクロ接合法としては、拡散接合法、熱圧着法、超音波接合法、サーモソニック法、ソルダーリング、レーザ接合法等多くの接合法があるが、接合機構からみると、固相-固相接合(固相拡散接合、反応拡散接合など)、液相-固相反応接合(ソルダーリング、ブレイジング、液相拡散接合、共晶接合など)、熔融接合、冷間接合(超音波接合など)、熱間接合等に分類される。

4. マイクロ接合におけるプロセス制御

半導体などマイクロエレクトロニクスにおける接続・実装においては、接合対象部位の形状・寸法が微小・微細であるため、通常の溶接・接合法とは違った特性が要求される。さらに接合速度が速い、多点同時接合であるなどの特異性が接合品質のモニタリングや制御の実用化を困難にしている。

マイクロ接合プロセスにおける接合品質を損なう主要な現象は、表 1⁽⁵⁾に示すように接合強度の低下、接合部の変形、材料機能の低下などがあり、これらの防止には接合時における入熱の精密な制御などが要求される。

TAB (Tape automated bonding process)は高信頼性の半導体チップの実装技術として開発されたものであるが、これは図 2⁽⁶⁾にみるように半導体チップ上の電極

図2 TAB プロセスにおける半導体チップの実装。

部に作られた金バンパと、長尺のフィルム(ポリイミドなど)に張り合わされた銅箔をエッチングしてつくられた多数のリード線(Au, Snなどをめっきしている。サイズは $0.035(t)\text{mm} \times 0.10(W)\text{mm}$ 程度)とを $623 \sim 723\text{K}$ 程度に別途加熱されたチップ(ボンディングツール)で多点を同時接合するものである。なお、半導体チップのアルミ電極端子(パッド)に金属の接合のための突起部(バンパ)(Au, Pb/Sn, Cuなど)が設けられており、その突起部(バンパ)の構造は接合金属および接合金属とパッドの間にある金属のバリア層—密着用金属層(Cr, Ti, Niなど)と拡散バリア用金属層(Cu, W, Pt, Niなど)一からなる。またバンパ金属およびリード表面金属の選択・組合せについては接合性、耐腐食性などの観点より選択され、接合法としては一般には熱圧着法、共晶接合法などが採用されている。

図 3⁽⁷⁾は金バンパと錫めっき銅リードとの接合界面での元素の挙動におよぼす接合温度の影響を示したものである。この場合、接合温度は直径 $30\text{ }\mu\text{m}$ アルメル・クロメル熱電対により測定している。接合温度が 523K 以下と低い場合、接合界面はSnとAuとの濡れが悪く、多くの隙間が観察されるが、接合温度の上昇と共に

表 1 各種マイクロ接合プロセスと品質不良の原因。

代表的なマイクロ接合法	接 合 の 原 理	品質を損う現象
		入熱不足 ↔ 入熱過大
共晶圧接	熔融層形成・排出による固相接合	部分熔融 ↔ 排出過多 材料変形
はんだ付	はんだの熔融および材料へのなじみ	なじみ不良 ↔ くわれ
マイクロ抵抗溶接	通電回路で発生するジュール熱による熔融または熱拡散	部分熔合 ↔ 脆化合金層成長 基材の熱劣化
ワイヤボンディング	材料間の界面すべりによる凝着および熱拡散	部分接合 ↔ 変形過大 (電極はみだし)
マイクロビーム融接	高密度ビーム熱源による局部熔融	溶込み不足 ↔ 熱影響 (変形, 変質)

図3 金バンプと錫めっき銅リードの接合部での各種元素の挙動とその接合温度依存性。

に、接合状態は良好になる。この場合、553 K 以下では Au と Sn が共晶合金を作り、共晶接合をなしている。553 K 以上の高温では、Au-Sn 融体の中に Au, Sn がとけ込むことにより、Au-Sn-Cu 合金ができ、それらがバンプとリードの接合に寄与している。それら合金の形成は固相反応で進み、Sn は Au と Cu の相互拡散の媒介の役割を果たしている。このように接合温度により接合界面での接合状態も大きく変化しているが、しかし現実にはチップ温度が一定でも接合界面温度を一定に保っている保証はない。

図4⁽⁸⁾は一定温度に加熱・制御された加熱ツールとしての電極チップによってアルミナ基板上に焼成された Ag/Pd 厚膜導体(10 μm 厚)と二種の銅合金リード(150 μm 厚)を接合した場合のリード・厚膜間電圧(接合界面温度)と加熱チップ温度との関係を示したものである。

図4 リフロソルダリングにおける接合界面温度とチップ温度との関連性。

なお、接合界面温度はリード・厚膜導体間で発生する熱起電力によって計測したものである⁽⁹⁾。これにみるように、チップ温度一定の場合でも接合界面温度は大きく変動する場合があります。またリード表面のめっきの有無にも影響を受けている。さらにチップの加圧力変化によっても接合界面温度も変化する。

普通接合部の温度はチップ先端の温度により調整・管理するが、表面粗さ、酸化状態など表面状態、密着度により加熱ツールと接合対象材の間での熱伝達率の影響をうけるため、チップ温度と接合部温度は異なり、その結果、接合部温度を条件管理の手法で管理することは困難となる。そこで接合部温度を何らかの手段でリアルタイムに計測するか、または別途の方法で保証することが必要となる。

図5⁽¹⁰⁾はパラレルシーム接合によりリードと Ag/Pd 厚膜導体(厚さ20 μm)を接合する場合の電極チップおよび接合部の電圧分布を示したものである。これにみるように、発熱源は主に電極・リード界面およびリード自体にあり、接合界面の温度上昇はこれら発熱源よりの熱伝導によりもたらされるものであることが理解される。

図6⁽¹⁰⁾はほぼ接合部が形成される条件下での接合中の

図5 パラレルギャップ接合部の形状寸法と電圧分布(発熱分布)。

図6 接合中での銅リード・Ag/Pd 厚膜の接合界面温度の挙動。

接合界面温度の時間的変化を熱起電力法により計測した結果である。この接合法では、ある程度接合強度が確保される条件下では、接合界面温度は数 ms の短時間の間に急激に上昇する。この場合、接合界面での Sn の挙動を観察するとき、図 7⁽¹⁰⁾に見るように Sn の拡散が接合部形成に大きな役割を果たしているが、入熱量の大きな電力 ($I \cdot V$) = 500 W の条件下では約 3 ms でほぼ拡散してしまっており、接合部にボイド形成の危険などがある。これらの結果は接合状態の制御には接合温度および接合時間のかかなり精密な制御が必要であることを示している。

またプリント配線板での電子部品実装に採用される VPS マイクロソルダリングにみられるマンハッタン現象のように配線板上の加熱の不均一性に起因する現象もある⁽¹¹⁾。この加熱の不均一性は加熱方法よりも加熱される物の熱容量の差異によるものであり、対象物の熱容量に適応した加熱法が重要であることを物語っている。

上述のように、接合部品質の信頼性向上のためには、そのプロセスでの接合部温度を精密に必要な値に制御する必要があるが、今後接合過程に接合界面または直径数 100~10 μm の微小部の温度を非接触かつリアルタイムで計測する技術、さらには広範に分布した接合対象物の熱的特性に適応して必要な温度に加熱する柔軟な加熱方法を開発することが望まれる。

次に、接合中における酸化介在物の生成による接合部欠陥の形成現象と接合時での雰囲気制御の必要性について二、三の例を挙げる。

マイクロ接合においては、接合対象材の機能性を損わないため、接合に伴う熱的損傷の低減化、変形度合および加圧力の低減などの制約があるため、一般に固相接合法、共晶接合法などが多く採用されているが、これらの接合法においては接合過程では接合部は比較的高温状態にあり、周囲の雰囲気中の酸素などと接合対象材の反応が起こり、接合界面に酸化介在物など接合欠陥の形成がもたらされ、さらにこれら介在物の品質に対する影響

の度合は溶融接合-溶接に比較して大きいなどの問題がある。ここでは半導体集積回路製作時のワイヤボンディング法および電磁開閉器などの接触子製作時での共晶接合法での諸問題を取り上げる。

ワイヤボンディング法とは、集積回路などの半導体チップ表面上に形成された約 80 μm × 80 μm 程度の大きさのアルミ電極と外部への導体端子との間を直径数十 μm の金、アルミ、銅などの金属細線により接続・結線する接続・実装技術の一種であり、接合法としては、熱圧着法、超音波接合法、サーモソニック法がある。このうち、熱圧着法は、金属ワイヤの先端をごく短時間アークなどで溶融、その先端にボールを形成し、チップ上の電極あるいは基板上のリードに加圧、接合する方法である。なお、接合時にはキャピラリおよび基板を適切な温度（たとえば 25 μm の金ワイヤの場合、キャピラリ 573~623 K、基板 433~453 K）に加熱され、同時にワイヤはチップまたはリードの端子に一定の加圧力（690~980 N）でごく短時間（約 0.1 s）加圧され、接合される。

この場合、Au ホールの塑性変形によりボール表面に生成したすべり線の凹凸がアルミ上に刻印され、接合界面に微細なしわ状の凹凸が形成され、これにともないアルミ表面の酸化皮膜が破壊され、清浄面が形成される。そしてこの場所で Au と Al の拡散・反応が生じ、接合が形成される⁽¹²⁾。

上述の Au と Al との反応は AuAl_2 など脆い金属間化合物が形成され、これに封止材よりの応力が掛かり、また場合によっては、接合界面 (Au_5Al_2 相の金に近い側) に沿って空孔の集合体（カーケンダルボイド）が発生し、加熱冷却サイクルの中で割れが発生し、接合部の剝離の原因となっている。これが Au ワイヤと Al 薄膜接合部の信頼性低下の原因である。この問題の解決法としては、現在 Al ワイヤまたは、銅ワイヤを採用することが行われている。

これらワイヤを用いてボールボンディングするには、まずワイヤ先端に適正な形状のボールを安定に形成する必要がある^{(13)~(15)}。これらボールの形状を支配する最も重要な因子はボールの表面に形成される酸化膜の厚さであり^{(14)~(16)~(18)}、酸化を防止するために、1000 ppm 以下の酸素量のアルゴン（銅ワイヤの場合）あるいは水素を含んだアルゴン雰囲気中で形成する必要がある^{(16)~(18)}。しかし、アルミ線の場合は、金線および銅線の場合に比較して、ボール形成時でのシールドガス中の酸素純度の低減が求められること、さらにボールの形成に必要なアークの放電条件が 5 A, 0.38 ms (50 μm) と大電流条件⁽¹⁶⁾となり、アルミの軟化部の発生、アーク力のためボール形成の安定性に問題があるものと考えられる。なお、金ワイヤ (50 μm) の場合、最適アーク放電条件は 15 mA, 30 ms であり⁽¹⁶⁾、銅ワイヤの場合のそれは約 75 mA, 3 ms

図7 パラレルギャップ接合部における各元素の挙動。

図8 銀と鉄分散型銅合金の共晶接合部におけるEPMAによる線分析結果。
(a) 介在物, (b) 健全な接合部。

程度である⁽¹⁷⁾。

さらに、アルゴンシールドガス中の酸素量が接合界面での酸化介在物形成に大きな影響を与えることが知られている⁽¹⁹⁾。

小型閉閉器の接触子の製作においては、2.5%鉄分散型銅合金と99.99%銀の共晶接合が行われている。

図8⁽²⁰⁾は大気中でのこれら共晶接合部の接合界面での介在物および健全部でのEPMAによる線分析結果である。これにみるように、接合界面ではCuとAgの共晶組成の合金層が形成され、かつ大気中の酸素による銅合金中でのFeの酸化介在物も観察されており、このために強度など品質の低下が認められている。しかし、接合工程で接合部に10~20%エタノール水溶液を少量添加し、接合部での熱により気化させ、その蒸気により接合部を大気よりシールドすることにより酸化介在物の生成を防ぎうる⁽²⁰⁾。しかし、この蒸気シールド方式は、その方法上適用対象材の形状・寸法に限界がある。今後より一層の発展・展開が望まれる。

5. 超高真空中での常温マイクロ接合

電子材料の多様化のなかで接合時での熱による接合対象材料の機能性の損傷防止、接合に伴う変形の抑制、異種材料の接合に伴う接合界面での熱応力の低減などのため接合プロセスの低温化、さらに化合物半導体のような脆性材料では接合加圧力による材料損傷防止のための加圧力低減化が求められている。

これらの諸要求に対して、常温でかつほとんど加圧することなく接合することが可能となる接合方法として超高真空中での接合法が研究・開発されている。超高真空技術を用いた接合装置は、準備室と接合室よりなり、準備室内でArイオンによるスパッタリングで接合対象材

図9 超高真空中での銅ボールと銀板の接合部断面状況。

表面の汚染層を除去した後、接合室(10~9 Pa)で接合している。

図9⁽²¹⁾は平坦な銀板(99.99%)と銅ボール(99.999%, 80 μm dia.)との超高真空中での接合部を示したもので(接合加圧力: 40+10 μm, 加圧時間: 10 s), また図10⁽²¹⁾は超高真空中で純銀(99.99%)と純銅ボール(99.999%)および透明なサファイアと純銅ボールを接合した場合の接合半径(実測値)を比較したものである。なお、図中の計算値は弾性接触理論に基づく接触半径である。この接合部は、引張試験において母材で破断することが観察され、しかも超高真空中での接合では、理論値よりも接合面積の増加する現象が観察されている。なお、大気中での接合では、接合面積の実験値は理論値と一致していることが確かめられている。

このように超高真空技術を採用することにより、常温において、かつ殆ど加圧することなく、すなわちほとんど変形を与えることなく接合する可能性を与えるもので、材料の多様化が迫られているマイクロエレクトロニクスにおける接続・実装技術において大きな未来をもつ

図10 超高真空および大気中での銅ボールと銀またはサファイア板の接触状態の比較。

た方法であり、今後の発展・展開が期待される接合プロセスの一つである。

6. マイクロ接合におけるインプロセス制御

マイクロ接合のみならず生産加工の種々の分野において、そのプロセスの自動化、生産性の向上などの要請に伴い接合品質の信頼性向上のための方策が重要な課題の一つとなっている。その解決策としてその加工プロセス中にその品質に関係する種々の物理量を検出し、制御パラメータを時々刻々制御することによって要求する品質を実現するインプロセス制御が注目されている。

マイクロ接合品質のモニタリングおよび制御に利用しうる量としては、表 2⁽⁵⁾に示すように熔融金属の排出量ならびにそれに伴う材料の移動、接合部の電圧・抵抗、接合部の変形などの諸量がある。品質制御上での予想される問題点として、接合現象が極短時間で終了すること、移動量が少ないこと、接合界面での接触状態が大きな影響があるなどがある。

最後に、マイクロ接合における品質のモニタリングおよびインプロセス制御について二、三の例および問題点を挙げ、今後の動向について述べる。

リード・厚膜間電圧検出方式によるリフロー・ソルダーリング接合部品質のモニタリングについての試みが行われている。この方式は、接合中にリード・厚膜間に発生する熱起電力を計測することにより、接合界面の温度などの諸情報がえられることに基づくものである。定められた接合時間においてはリード・厚膜間電圧の実効積分値を接合中に計測することで図 11⁽⁸⁾にみるように接合品質(せん断強度)をモニタリング出来ることを示している(接合時間など他の因子の管理も必要である)。しかし、温度測定が接触式であること、多点同時接合への応用の可否、溶ダ・ペーストと Sn めっき銅リードとの界面反応など検討すべき問題がある。

フィルムコンデンサの端子(亜鉛・ハンダなどの溶射膜)とリード線のパラレルギャブソルダーリング法におい

図11 リード・厚膜間電圧の実効積分値と接合部の引張せん断強度の関係。

て、接合品質はピール強度とコンデンサの電気的特性により決定されるが、この品質は、溶射膜が多孔質でありかつその厚さが大きくばらついているため、リード線の溶射皮膜への進入深さが変化することにより大きく変動する。そこで接合品質と進入深さとの関係を基礎として進入深さを一定になるように電極間電圧の変化を検出し、通電時間を制御することによって所定の品質をインプロセスでえている。この方式は適用分野が限定されることに問題を持っている。

銀系接点材と銅基金材の蒸気シールド加圧接合法における接合品質のインプロセス制御においては、図 12⁽²²⁾に示すように接合界面の熔融・排出量を電極間変位により計測し、接合界面での共晶合金の熔融・排出量の最適化をはかるとともに図 13⁽²²⁾に示すように最終電極変位量すなわち接合界面における熔融排出量を適正量範囲に制御することによって接合品質の安定性・信頼性の向上を実現し、さらには無人化接合システムを構築

表 2 接合部品質のモニタリング・制御からみた接合現象の特徴と問題点。

代表的なマイクロ接合法	モニタリングに利用しうる接合時の特徴的な現象	モニタリングまたは品質制御上の問題点
共晶圧接	熔融金属を排出およびそれにともなう材料が移動	排出現象が早い(10 ms 以下) 移動量が小さい(10 μm レベル)
はんだ付	はんだの熔融にともなう材料(部品)が移動	移動量が小さい(10 μm レベル) 移動となじみの関連性(材料表面、基板温度の影響)
マイクロ抵抗溶接	通電回路の電圧および抵抗が変化	電圧、抵抗の変動が複合的に作用 (接触状態、材料変形の影響)
ワイヤボンディング	材料(ワイヤ、ボール)が著しく変形	変形量(材料寸法)が小さい(10 μm レベル) 変形量と凝着面積の関連性(材料表面の影響)
マイクロビーム融接	熔融池を形成	熔融・凝固現象が早い(数 ms) 熔融池外観と溶込みの関連性(間隙の影響)

図12 電極変位測定による接合品質制御方式の基本構成と動作原理。

図13 インプロセス制御による電極変位の変動の低減効果。

している。この方式もその原理上適用が限定されるのが問題であろう。

以上のように、マイクロ接合の分野においてもインプロセス制御の研究・開発が行われているが、ごく一部の分野で適用されているに過ぎないのが現状である。マイクロ接合部品質の信頼性向上のためにも今後より一層の発展が望まれる。

7. お わ り に

マイクロエレクトロニクスにおける実装においての基盤技術の一つであるマイクロ接合技術のうち接合現象およびプロセスの制御について幾つかの問題、さらに接合品質のモニタリング、インプロセス制御の例を取り上げ、概説した。接合精度など紙数の関係で割愛した重要な問題も多々あるが、本稿が何等かの参考になれば幸いである。

文 献

- (1) 仲田周次：日本時計学会誌，No. 116(1986)，38.
- (2) 溶接学会マイクロ接合研究委員会編：マイクロ接合技術(第I，II，III編)，溶接学会，(1987).
- (3) 本多 進：電子材料，(1985. 5)，22.
- (4) 岡本英男：HYBRIDS，3(1987)，2.
- (5) 町田一道：溶接学会講演概要，39(1986)，23.
- (6) 日本マイクロエレクトロニクス協会編：IC 化実装技術，工業調査会，(1982).
- (7) 平野幹夫，原田征喜，川野辺 徹：電子通信学会論文誌，J68-C(1985)，1074.
- (8) 仲田周次，西川 徹，斉藤 茂：溶接学会マイクロ接合研究委員会資料，MJ-72-87，(1987).
- (9) 仲田周次，王春青：溶接学会マイクロ接合研究委員会，MJ-78-87，(1987).
- (10) 仲田周次，辛永 議，鶴沢 直：溶接学会講演概要，44(1989)，196.
- (11) 安部可伸，高橋孝夫：溶接学会マイクロ接合研究委員会資料，MJ-S-20-88，(1988).
- (12) 石坂彰利，岩田誠一，山本博司：日本金属学会誌，40(1977)，1154.
- (13) T. Okuda and K. Machida: IIW CR MICRO-19-86，(1986).
- (14) J. Okunuki, M. Suwa and T. Iizuka: 34th Electronic Components Conference，(1984)，7.
- (15) J. Hirota, K. Machida, T. Okuda, M. Simotomai and R. Kawanaka: 35th Electronic Components Conference，(1985)，116.
- (16) 諏訪正輝，大貫 仁，飯塚富雄，沖川 進：Nikkei Electronics Microdevices，(1984. 6. 11)，95.
- (17) 弘田実保，町田一道，奥田滝夫：溶接学会マイクロ接合研究委員会資料，MJ-39-85，(1985).
- (18) 渥美幸一郎，安藤鉄男：溶接学会マイクロ接合研究委員会資料，MJ-56-86，(1986).
- (19) 中根守久：学位論文(大阪大学) (1988).
- (20) 町田一道，奥田滝夫，仲田周次：溶接学会論文集，5(1987)，458.
- (21) Y. Kashiba, K. Machida, T. Okuda, W. Shimada and S. Nakata: Conf. Material Research Society，108(1987)，371.
- (22) 町田一道，奥田滝夫：溶接学会論文集，6(1988)，116.