銅ワイヤボンディングによる高信頼半導体 デバイスの開発

弘田 実保^{*1)} 渋谷 洋子^{*1)} 杉村 敏治^{*1)}
町田 一道^{*2)} 奥田 滝夫^{*3)}

1. はじめに

樹脂モールドタイプの量産半導体のワイヤボンディングには、従来から金ワイヤが使用されているが、デバイスを許容最高温度を超えて長時間使用すると、ワイヤとアルミ薄膜電極の接合部における金・アルミ金属間化合物層が拡散成長して、ワイヤ剥離を発生しがちであった。しかも、金(地金)の価格変動が激しいため、デバイスのコスト安定性を阻害するなどの欠点を有しており、これらの問題を解決できる新しいワイヤ材料の適用が望まれてきた。これに対し、銅、アルミニウム、銀などを用いたワイヤボンディングプロセス技術の基礎検討やワイヤ材質(添加元素)の比較検討が数年前から行われてきた^{(1)~(4)}。

このような背景のもとで、電気導体としての特性に優れ、かつアルミ薄膜電極との接合部における拡散速度が、従来の金・アルミのそれよりきわめてゆるやかな銅に着目し、接合プロセス、材料特性、信頼性など多岐の技術分野にわたる困難な課題を解決して、従来の金ワイヤを用いた場合に勝る高い信頼性を有する半導体デバイスの開発に成功した⁽⁵⁾。本稿では、主に銅ワイヤによる接合プロセスおよびデバイスの信頼性について述べる。

2. 材料選定のための基本的検討

銅、アルミニウム、銀の3種類のワイヤ材料に対し、ワイヤボンディングにおいて必須のボール形成特性、およびデバイスの長期信頼性に影響を与えるSiチップ上のアルミパッドとの拡散性について基本的検討を行った。その結果から、ボール形成の安定性が高く、しかもデバイスの拡散による劣化に対して有利な銅を選定し、ボンディング用の $\phi 25 \mu\text{m}$ 銅ワイヤを開発した。

* 三菱電機株式会社生産技術研究所

1) 所員 2) グループマネージャー 3) 部長
Development of High Reliability Semiconductor
Devices by Copper Wire Bonding; J. Hirota, Y. Shibutani,
T. Sugimura, K. Machida, T. Okuda (Mitsubishi
Electric Corp.)

1988年1月29日受理

3. 銅ワイヤボンディングプロセスの開発

銅ワイヤボンディングを実用化するためには、いかに軟かいボールを形成し、かつ低応力下で安定なボンディングを達成し得るかが大きな課題である。

(1) ボール形成の検討

一般的なワイヤボンディングプロセスを図1に示すが、ボール形成においては、ワイヤと電極の間に高電圧を印加し、放電によりワイヤ先端を溶融、球状化する。ここでは、とくに銅ボール形成現象に及ぼす放電極性の影響を調査し、その結果をもとに、放電用電源を開発した。なお、ボール形成はアルゴンシールド下で行った。

ボール形成の進行を示すSEM写真を図2に示す。ワイヤが正の場合は、ワイヤ先端から溶融を開始し、球状を保ちながら、その溶融体積を増加させていく。一方、従来の金ワイヤの場合のようにワイヤが負の場合では、初期においてワイヤの表皮部が優先的に溶融し、ボール

図1 ワイヤボンディングの基本プロセス。

図2 ボール形成過程の比較.

下方につの状の非溶融部が残存する傾向を示す. この非溶融部は徐々に消失するが, 完全に球状を得ようとすると, 許容できるボールサイズ(ワイヤ径の3倍程度)を超える確率が高くなる. しかも, このボールは, その内部に未溶融部が確認され, その部分の硬さの値は高い. このような極性のちがいによるボール形成特性の差は, 図3に模式的に示した入熱形態のちがいに起因すると推察される. すなわち, ワイヤが正の場合は, 電子が前述のような最も短い距離で到達できるワイヤ先端に集中して陽極点が形成されるため, 安定な溶融モードが確保される. これに対し, ワイヤが負の場合では, 熱電子放出がより安定に起こる点すなわ仕事関数の小さい表面酸化被膜を求めて陰極領域を広げようとするため, アークはワイヤ上方まではい上がり, 熱は表皮部から投与される. つまり, 金とは異なり銅ワイヤでは, その表面にある程度の酸化被膜が形成されていることを物語っている.

図3 ワイヤへの入熱形態の比較.

(2) ボールボンディングの検討

ボールボンディングは, Si チップ上の厚さ約 $1\mu\text{m}$ のアルミ薄膜電極上に超音波併用熱圧着法により行われるが, このプロセスにおいて最も重要な課題は, 金よりわずかに硬い銅ボールを Si チップに全く損傷を与えることなく, 安定に接合しうる技術の開発である. このような損傷は, 表面の微小クラックとしてまれに現われるが, これは接合条件の1つである超音波出力(振幅)に強

く影響を受ける. そこで, 安定な接合結果を得るうえでの超音波出力の低減を目的として, いくつかの検討を行った. その結果, アルミ薄膜電極の硬さを最適化することが最も得策であることを明らかにした.

アルミ薄膜電極の硬さと, 良好な接合状態を得るために必要な超音波出力の関係を図4に示すが, アルミ薄膜電極の硬さをヌーブ硬さ(H_K)で45程度に調質すると, 最も低い超音波振動条件下で安定に接合が達成されることがわかる. これは適正な薄膜の硬さを選定することによって, ボンディングの基本的な接合機構である凝着現象をより安定に促進できたことによるものと考えられる. なお, 蒸着条件(速度および温度), アニール条件, 不純物濃度などを制御することにより, 所望の薄膜硬さを確保できる. また, キャピラリチップを加熱して接合時の銅ボールの硬さを低減することによっても, 補助的な効果が認められた.

以上, 薄膜の硬さの改善とそれに伴う超音波出力条件の最適化によって, Si チップに何ら損傷を与えることなく, 目的とする高品質な接合層を安定に形成することができるようになった.

図4 アルミ薄膜電極硬さの接合性に及ぼす影響.

(3) ウェッジボンディングの検討

結線端末部でのウェッジボンディングは, 従来からの銀めっきリードに限らず, めっき処理を施さないリードへの直接ボンディングも可能である. すなわち, 各種の銅合金製リードへの接合性は, 同じ材種同士の組合せゆえにきわめて優れており, リード表面に所定の平面度と清浄性を確保することにより, 安定性の高い直接ボンディングが実現できた.

4. デバイスの量産性および信頼性

製造ラインの全自動ボンダにより, 専用 IC およびト

ランジスタの連続ボンディングを施工した。これらを封止工程を通して製品の形にし、半導体に対する一連の標準試験法によって初期特性および長期信頼性を調査した。

ボンディング直後の専用 IC の外観を図 5 に示すが、接合部および結線形状がともに良好であり、高い量産安定性を物語っている。

トランジスタについて行った信頼性試験の結果を表 1 に示すが、初期特性および長期信頼性ともに優れた結果が得られている⁽⁶⁾。

この信頼性試験におけるプレッシャー・クッカーテスト (PCT) 後の接合部断面写真を図 6 に示すが、金に比べて拡散層の成長は著しく遅い。

図 5 ボンディング後の IC 外観。

表 1 信頼性試験結果(トランジスタ)。

試験項目	条件	サンプル数	不良数
X線透過		200	0
初期特性	125°C	200	0
温度サイクル	-55°C~125°C 30min 300cycle	50	0
熱衝撃	-55°C~125°C 5min 300cycle	50	0
プレッシャ・クッカー	121°C Max 500hr	40	0 0 0 0 0 0
高温高湿バイアス	85°C 85%Vces=Vceo Max 1000hr	30	- 0 0 0 0 0 0
高温逆バイアス	150°C Vces=Vceo Max 1000hr	30	- 0 0 0 0 0 0

銅ワイヤ

図 6 プレッシャ・クッカーテスト後の接合部断面の比較。

著しく成長した
金属間化合物層

金ワイヤ

図 7 高温保持にともなう接合強さの変化

さらに、200°Cでの高温保存にともなうボールボンディング部の接合強さ(せん断試験での破断荷重)の変化を図 7 に示す。金-アルミのボンディング部では、200 時間以内で強さが急激に低下して、300 時間を超えると要求される接合強さを全く満たさなくなるほどに劣化が進行する。これに対し、銅-アルミのボンディング部は、800 時間程度でまだ強さの低下がなく、高い高温信頼性が実証された。

5. 実績と将来性

これまでに、生産ラインでの量産試作および苛酷な条件下での加速試験による信頼性評価が繰り返され、いずれも良好な結果が確認された。現在、専用 IC への実用化段階に入っている。

なお、銅ワイヤにより配線されたデバイスは、信頼性および価格安定性の点で従来の金ワイヤを用いたものを凌ぐばかりでなく、銅の材料特性から、①強さが高く、電気抵抗率が低いいため、極細線化に有利、②強さ/比重の比が大きく、結線特性が優れているので高速ボンディングに有利、などの将来展望を有しており、今後、量産メモリや多ピンのゲートアレイなどにおいても、金ワイヤから銅ワイヤへの転換が加速されることは間違いない所と期待している。

6. 特 許

国内：公開 48 件。

米国：出願 3 件(うち 1 件登録 4705204)。

西独：出願 3 件。

文 献

- (1) K.I.Johnson, et al.: Solid State Technology, 4(1977), 91.
- (2) J.Kurtz, et al.: 34th ECC Proceedings, (1984), 1.
- (3) J.Onuki, et al.: 34th ECC Proceedings, (1984), 7.
- (4) A.Kamijo, et al.: 35th ECC Proceedings, (1985), 91.
- (5) J.Hirota, et al.: 35th ECC Proceedings, (1985), 116.
- (6) 井上他: 第 15 回日科技連信頼性・保全性シンポジウム, (1985), 371.