

L-TM 77795
(1-11, 180)

FILE COPY

金線超音波熱圧着ボンディングにおける Al-Si₂元蒸着薄膜のボンディング性

Bondability of Al-Si Thin Film in Thermosonic Gold Wire Bonding.

中川興一*・宮田和明*・番條敏信*・島田 弥**

Koichi NAKAGAWA Kazuaki MIYATA Toshinobu BANJO Wataru SNIMADA

(Received April 26, 1978)

Bondability of two kinds of Al-Si thin film in thermosonic gold wire bonding is examined by the use of Push Test Process (micro shear test). One is formed by sputtering Al-2% Si alloy, and the other is made by successive layers method, in which 0.05 μm thick Poly-Si layer is deposited on SiO₂ by chemical vapor deposition (CVD) and 1.2 μm thick Al layer is evaporated on them.

After heat treatment (450°C x 30 min), crystallization of Si in Al-Si film is found. Grain size of crystallized Si affects thermosonic wire bondability. That is, in case of Al-2% Si sputtered film, good bondability is obtained under relatively small (1.0 μm) grain size condition. While in successive layers process, grain size of crystallized Si varies according to Poly-Si CVD temperature. Optimum CVD temperature is determined from the standpoint of bondability which corresponds to grain size.

1. はじめに

半導体集積回路（以下ICと略す）ではIC素子の電極配線と、外部リードを結線するためにワイヤボンディングと称するプロセスが採用されている。これはIC上のボンディングパッドと呼ばれる100 μm～150 μm平方の大きさのアルミニウム電極上に直径25 μm～50 μmの金線を1本ずつ熱間で圧接するプロセスであるが、ワイヤボンディングプロセスはIC組立工程に於ける最も複雑な工程であると同時に、ワイヤボンディングの良否がICの寿命を大きく支配する要因となっている。

近年のICの集積度の向上から生ずる要求として次のようなものがある。

- ① 1素子当たりのワイヤ数の増大
- ② 素子特性向上のための新電極材料の登場
- ③ IC表面におけるボンディングパッド面積占有率の減少
- ④ 自動機の導入による能率の向上

以上のような諸要求に応えるためIC組立工程上で解決していかなければならない技術的問題は次のようなものであると思われる。

(1) 圧接時間の短縮

一般にAu-Al系のマイクロ圧接で良好な初期接合を得るためには圧接時間は長いほど有

* 三菱電機(株) 北伊丹製作所 (〒 664 伊丹市瑞原 4-1)

Mitsubishi Electric Corporation(4-1, Mizuhara, Itami 664, Japan)

** 三菱電機(株) 生産技術研究所 (〒 661 尼崎市南清水大字中野80)

Mitsubishi Electric Corporation(80, Nakano, Minamishimizu, Amagasaki 661, Japan)

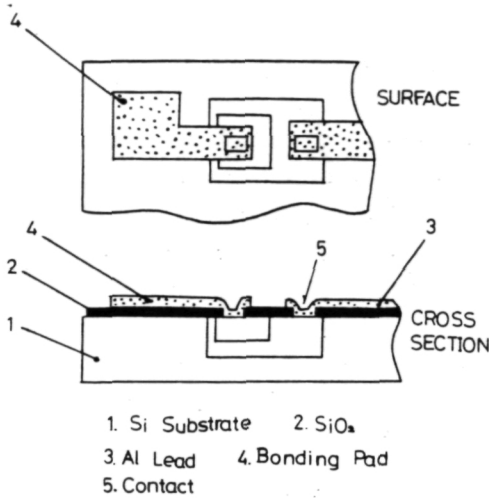


Fig. 2 Cross sectional illustration of IC chip.

素子の高密度化に伴いコンタクト部のジャンクション深さは浅くなる傾向がある。ジャンクション深さはMOS型ICの場合、 $1\mu\text{m}$ 程度である。コンタクト部でのAl-Si反応が活性であるとAlがSi基板中に侵入し、P-N特性が破壊されることがある。このような破壊不良を防止するために、Al配線に前もって数%以下の濃度のSiを添加する。Si添加の方法には大別すると、Al-Si膜を1層に形成する方式と、SiおよびAlを順次形成しその後温度処理を加えることによって所定の濃度のAl-Si膜を形成する2層方式の2種類がある。

Al-Si膜形成法のどれを採用するかは、素子形成の難易度の他に、作成された素子の電気的特性や組立工程におけるワイヤボンディング性によって決ってくる。

以下それぞれのAl-Si膜形成法を簡単に説明する。

(i) Al-Si 1層方式 (蒸着法)

この方式では蒸着源としてAl, Siを別々に用意する2源蒸着法と、蒸着源にAl-Si合金を使用する合金蒸着源法とがある。合金蒸着源の場合は良く知られているようにAlおよびSiの蒸気圧が異なるために形成される薄膜の成分比が蒸着源の成分比とは異なる。また蒸着の進展につれて蒸着源の成分比も変化して

くるという致命的な欠陥がある。

2源蒸着方式では蒸着源の間の遮蔽を完全に管理しないと、蒸着源に他方の成分が入るため合金源と似たような問題が発生する。従ってここに述べた蒸着1層方式は製造技術的困難を有する。

(ii) Al-Si 1層方式 (スパッタリング法)

この方式ではターゲットに合金を採用し低温度でスパッタリングさせるために、蒸着法と比べると均一でかつ成分比の良い合金膜を得ることができる。その他にも蒸着に比較すると、Al原子の平均自由行程を抑えることができるために、まわり込みが良く、配線の微細化に伴う配線切れ不良、配線凹凸部でのダレ不良を防止することができる長所がある。

(iii) Al-Si 2層方式 (Poly-Si 下敷2層法)

2層方式は第1層にSi膜を形成後Alを蒸着して2層膜を形成する。この後、加熱処理を経て2層膜を得る。2層構造として実用的な方法は下層SiをCVD (Chemical Vapor Deposition) により形成するものである。この方法では素子の電気的特性の信頼性上、安定して製造できるPoly-Si膜の最小厚は $0.05\mu\text{m}$ (500\AA)程度である。またPoly-Si下敷2層構造方式には、後で詳説するようにAl-Si反応状態の不均一という問題がある。

以上の3種類のAl-Si膜形成法のうちで製造技術的に優位性のあるものとして、スパッタリング法、Poly-Si下敷2層法の2種を採りあげワイヤボンディング性を評価する。

3. ワイヤボンディング法およびボンディング性の評価

3.1 ワイヤボンディング法

ワイヤボンディング法としては超音波熱圧着方式 (Thermosonic Wire Bonding) を採用した。この方式は直径 $25\mu\text{m}$ のAu線をボール状に溶融した状態でキャピラリチップと称する治具により、AuボールをAl膜上に押さえ接合面に約60 KHzの超音波振動を加えて接合させるも

のである。特徴は、低温度でも接合を得ることができるが、AuAl系の相互拡散を充分に行える温度は300℃以上であるため、300℃以下の低温度でのボンディングの良否にはAl薄膜の表面の性質が大きなファクターとなる。

ワイヤボンディングの条件パラメータとしては、温度、荷重、超音波エネルギー、圧着時間、金ボールサイズなどがあるが、本実験ではこれらのパラメータのうちで圧着時間を0.1秒、金ボールサイズを75 μm φ、荷重65gに固定して実験を行った。

3.2 実験サンプル

実験サンプルとしてはSiウエハ上に熱酸化法によりSiO₂膜を形成後、次に示す方法により蒸着膜を3種類作成した。

サンプルI……(純Al)。Siウエハ上に純Alを1.2 μm 蒸着する。これはAl-Si膜との比較に用いる。

サンプルII……(スパッタ膜) Al-2%Si合金を1.2 μm スパッタデポする。

サンプルIII……(Poly-Si下敷2層法) Poly-SiをCVD法で500Å形成後、Alを1.2 μm 蒸着する。この時の組成比はおよそAl-5%Siに相当する。

蒸着膜作成後、サンプルは450℃、30分の加熱処理を行いAl-Si反応を起こさせる。

3.3 ボンディング性の評価

各サンプルのAl-Si反応を調査するために蒸着膜をリン酸でエッチングしてAlを除去した後残ったSi粒径、密度を観察した。次に各サンプルを超音波熱圧着ワイヤボンディングした後、接合部の強度を測定するためにプッシュテスト法により接合部の剪断強度を測定した。ここに用いたプッシュテスト法はAuボールと蒸着膜の接合面に平行な力を加え接合部が剪断破壊する強度を測定する方法である。最後に低強度で剥離した面の観察を行い接合機構の検討を行った。

4. Al-Si反応状態の観察結果

Al-Si薄膜をリン酸でエッチングすると蒸着膜中のAlが溶けて消失しSiが残る。この残ったSiの状態を観察することによりAl-Si反応状態を推定することができる。

4.1 スパッタ膜の場合

Alをエッチングした後の外観をFig. 3に示す。Si粒は大きさが約1 μm で、粒子分布密度は5.8 $\times 10^8$ 個/cm²であるが、サンプル内で均一に分布していることがわかる。

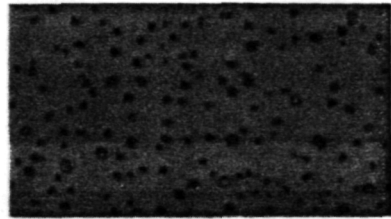


Fig. 3 Photomicrograph of Al-2% Si sputtered film after chemical etching

4.2 Poly-Si下敷2層構造膜の場合

Fig. 4にPoly-Si下敷2層構造膜のエッチング後の写真を示す。2層膜の場合はFig. 4-(1), (2), (3)に示すように異なる反応状態が現われるが、この反応状態の差は主としてPoly-Si膜形成時のCVD温度に依存することが実験の結果明らかになった。すなわちCVD温度が600℃ではPoly-Si膜とAlの反応はほとんど見られず、2層構造の状態がそのまま残っているものと推定される。

これに対しCVD温度630℃ではAl-Si反応はサンプル内で一様に起っていて、Si粒径は約2 μm で粒子分布密度は約4.8 $\times 10^8$ 個/cm²である。この状態はスパッタ膜の場合に類似している。ただし2層膜のサンプルではSi濃度が大きいいため、スパッタ膜よりSi粒径は大きい。Fig. 4-(3)はCVD温度650℃の状態であるが、Al-Si反応は一様に起きていないことがわかる。ある部分ではSi粒径が5~7 μm に成長しているが、一方では反応が進行していない部分がある。またCVD温度650℃の場合の蒸着膜表面にはSi粒子が折出していることが観察される。以上説明したPoly-Si膜とAl蒸着膜との反応の断面構造

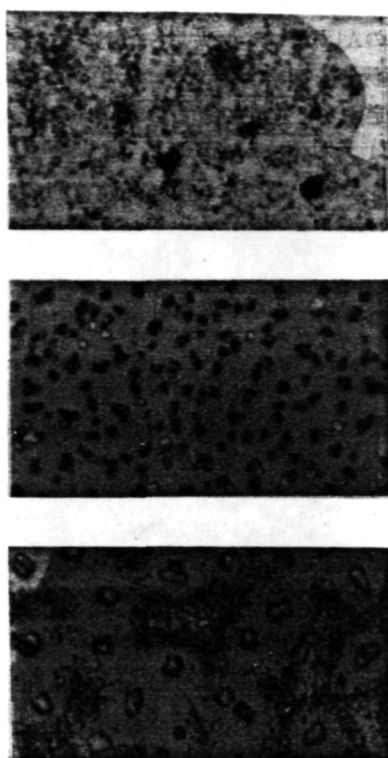


Fig. 4 Photomicrographs of Al-Si film formed by successive layers process after chemical etching.

- 4-(1) In case of Poly-Si CVD temperature 600°C
- 4-(2) In case of Poly-Si CVD temperature 630°C
- 4-(3) In case of Poly-Si CVD temperature 650°C

をFig. 5に模式的に示す。またCVD温度とSi粒子の大きさ、粒子密度との関係をFig. 6に示す。これから2層模形成後の加熱処理が450°C、30分の場合にはAl-Si反応が主としてPoly-Si膜のCVD温度に支配されていることがわかる。反応はCVD温度の低い範囲では少なく、この時はSiがAl膜の粒界に沿って拡散しているものと思われる。CVD温度の上昇とともに反応は促進され、2層構造は消失してしまう。このようにPoly-SiのCVD温度がAl-Si反応状態に影響を与える原因は明らかではないが、Poly-Siの膜構造(結晶性、粒径等)がCVD温度により異なっているものと予想される。Fig. 4,

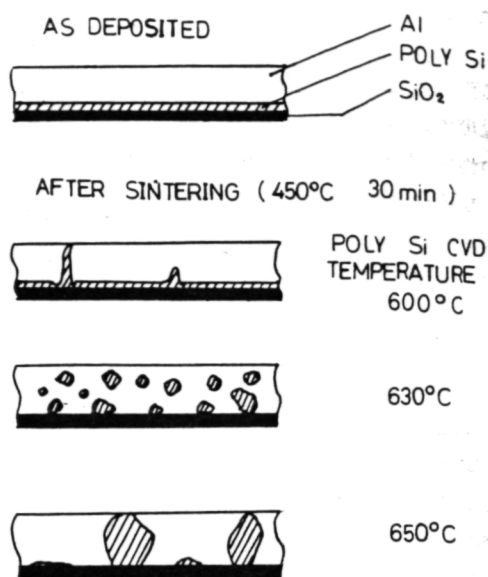


Fig. 5 Cross sectional illustrations of Al-Si film formed by successive layers process.

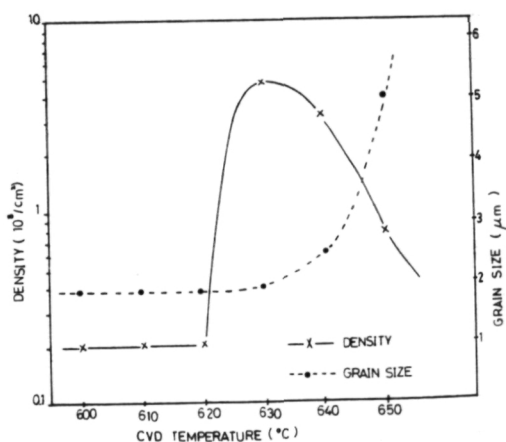


Fig. 6 Effect of Poly-Si CVD temperature on grain size and density of crystallized Si in Al-Si film formed by successive layers process.

Fig. 5, Fig. 6に示した例はAl蒸着前のPoly-Si膜の界面処理を行っていない場合であり、実際に量産的に製造する場合は界面処理によってその反応性は温度特性にして±10°C程度の範囲で微妙に変化する。このようなPoly-Si膜とAl蒸着膜との反応の異常性は例えば文献^{3),4)}で報告されており、成長したSi粒子は単結晶状であると

いわれている。

5. ワイヤボンディング実験結果

Al-Si 反応状態とワイヤボンディング性の関連を知るために、金線超音波熱圧着ワイヤボンディングを行いボンディング強度を調べた。すなわちボンディング条件として温度を 250°C 一定にした時に超音波エネルギーを変化させたものと、超音波エネルギーを 50mW 一定にした時にボンディング温度を変化させたものの 2 種類である。

サンプルとしては次に示す。

- サンプル I 純Al膜
- サンプル II スパッタ膜
- サンプル III-1 Poly-Si 下敷 2 層構造
で Si 粒径の小さいもの
- サンプル III-2 Poly-Si 下敷 2 層構造
で Si 粒径の大きいもの

5.1 ボンディング強度の超音波エネルギー依存性

Fig. 7 にボンディング強度の超音波エネルギー依存性を示す。ボンディング温度は 250°C であって、Au-Al 系の拡散接合可能温度 (300°C) 以下である。超音波エネルギーが 70mW の条件では、各サンプルとも良好なボンディング強度を得ているが、エネルギーが低い条件ではサンプル間で

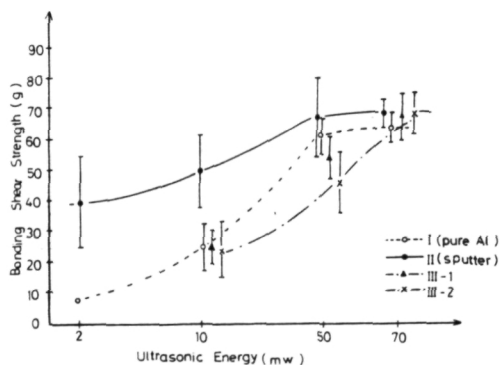


Fig. 7 Effect of ultrasonic energy on bonding shear strength.

Bonding Conditions.

- Bonding Time, 0.1sec
- Bonding Force, 65g
- Bonding Temperature, 250°C

ボンディング強度に有意差が出る。スパッタ膜の場合は、超音波エネルギーの低い条件でも良好なボンディング性を示すが、純AlおよびPoly-Si 下敷 2 層膜の場合はスパッタ膜の場合よりボンディング強度が低くなっている。更に詳細に検討すると超音波エネルギー 50mW の条件におけるボンディング強度はサンプル III-1, III-2 は純Al膜の場合よりそれぞれ平均強度で 7 g, 15 g 低くなっていることがわかる。すなわち Poly-Si 下敷 2 層膜の場合は分散 Si 粒子の大きさによってボンディング性が異なるといえる。

5.2 ボンディング強度のボンディング温度依存性

Fig. 8 にボンディング強度のボンディング温度依存性を示す。ここでは超音波エネルギーを 50 mW 一定にしている。純Al膜とスパッタ膜の間には超音波エネルギーを変化させた場合ほどの有意差はないが、一般的に Poly-Si 下敷 2 層膜品はボンディング強度が低くなっている。

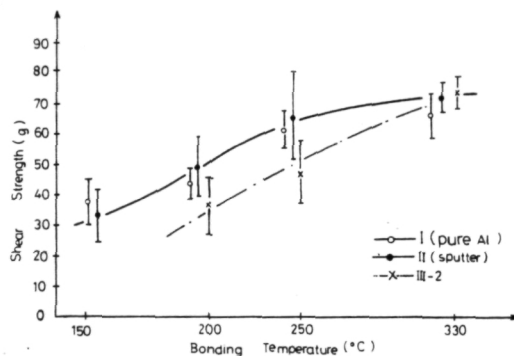


Fig. 8 Effect of bonding temperature on bonding shear strength.

Bonding Conditions.

- Bonding Time, 0.1sec
- Bonding Force, 65g
- Ultrasonic Energy, 50mW

また Fig. 7 の超音波エネルギー 70mW の場合の強度と Fig. 8 のボンディング温度 330°C の場合の強度とを比較すると、ほぼ同程度であることから、超音波熱圧着法によりボンディング温度を従来の 300°C 以上からかなり低下させることがわかる。

5.3 ワイヤボンディング剥離面の観察

Fig. 7の超音波エネルギーが低い条件下で接合不能のため剥離したAl膜表面の外観をFig. 9に示す。これを見るとAl膜が金ボールに押えつけられた部分が凹んでおり、凹みの周囲にはAlが盛り上っていてAl膜が大きく塑性変形していることがわかる。Fig. 9-(2)はスパッタ膜の場合の剥離面であるが、ここでは純Al膜のような大きな塑性変形は認められない。このことからスパッタ膜は純Al膜より硬度が高いと判断できる。

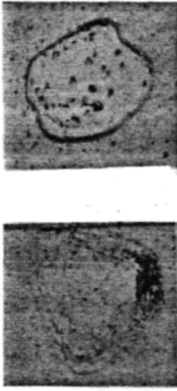


Fig. 9 Example of photomicrograph of bond lift off pattern.
9-(1) Bond lift off pattern on pure Al film.
9-(2) Bond lift off pattern on Al-2% Si sputtered film.

Poly-Si 下敷2層構造の場合は純Al膜に似た剥離状況を呈するが、蒸着膜表面にSi粒子の析出している場合は、Si粒子の周囲Al部分での接合不良が発生する。

低ボンディング強度での試片における接合剥離面の観察結果から、金線超音波熱圧着ボンディングの接合機構を次のように考えることができる。まず、第1段階ではAuボールが蒸着膜に圧接されることによってAuボールとAl蒸着膜が塑性変形する。第2段階としては接合部での界面での摩擦によりAl酸化被膜が破壊されてフレッシュなAlが露出し、AuとAlが部分的に凝着される。最終段階ではAuとAlの凝着部を支点としてAu-Al間の摩擦が進行し凝着部を拡大しながら更にAuボールが塑性変形する。ここでAl膜の塑性変形に消費されるエネルギーはAl膜の硬度に

よって決ってくる。スパッタ膜の場合は純Al膜より内部が緻密で、かつSiの混入により硬度が高く、塑性変形量が小さい。逆に純Al膜では軟質で緻密ではないためスパッタ膜より塑性変形に消費しなければならないエネルギーが大きくなる。従って超音波エネルギーの低い段階では純Alの場合、エネルギーの大部分をAl膜の塑性変形に消費してしまうため接合不良となるものと思われる。Poly-Si 下敷2層膜のSi粒子が大きい場合は、Al膜中にSiが柱状に配列しており、その間を埋めるように存在するAlは、純Al膜と類似する性質を有すると考えられる。このような膜上へのボンディング性は純Al膜と比較すると、次のような点で劣ると思われる。第1に接合部界面にSi粒子が析出しているためAu-Alの真実接合面積が減少すること。第2に良好なボンディング強度をえるためには、Si柱の間のAl部は純Al膜同様大きな塑性変形量を必要とするが、分散しているSi柱の硬度はAl膜より大きく、通常のボンディングエネルギー程度では変形しない。このためSi柱より離れた部分のAlは十分な塑性変形量をえるが、Si柱の周囲のAl部分では変形量が小さく、Au-Alの十分な接合をうることが困難になると予想できる。Poly-Si 下敷2層膜の場合、良好なボンディング性を得るためにはSi粒が小さく、かつ均一に分布するようなAl-Si 反応状態を得ることが必要である。

6. まとめ

種々のAl-Si 2元薄膜について金線超音波熱圧着ワイヤボンディングを行い、Al-Si 反応状態とワイヤボンディング性の関連を調査した。ここでAl-Si 2元薄膜の形成手段として実用性のある製造法は、スパッタリング法とPoly-Si 下敷2層法である。ボンディング性の評価の結果、次のことがわかった。

- (1) スパッタ膜では結晶化したSi粒子は均一に分散しており、その大きさは約 $1.0\mu\text{m}$ であり比較的小さい。
- (2) Poly-Si 下敷2層構造では 450°C 、30分の加熱処理後のAl-Si 反応に種々の形態が現わ

れるが、その状態はPoly-Si膜形成のCVD (デポジション) 条件、特に温度に依存する。

(3)スパッタ膜へのボンディング性は接合温度が低い条件の場合、純Al膜より良好である。これはスパッタ膜の硬度が純Al膜より高いためと思われる。

(4)Poly-Si 下敷2層膜のボンディング性は蒸着膜中のSi粒子の析出状態に依存しており、一般に純Al膜よりボンディング性が劣る。比較的良好的なボンディング性を得るためには、Si粒子を均一かつ微細に形成することが可能なCVD条件の選択が必要である。

最後に実験サンプルの作成および実験結果の検討に御助力いただいた三菱電機北伊丹製作所水津克己主任その他関係諸氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 島田他：高温学会誌, Vol. 3, Nos. 2-3(1977), 72-78
- 2) Shimada et al.; International Conference on Welding, Soldering and Brazing in Electronics, 1976, 127-132
- 3) Nakamura et al.; J. Applied Physics, Vol. 46, No. 11, Nov. 1975
- 4) Harris et al.; J. Applied Physics, Vol. 48, No. 7, July. 1977, 2897-2904