表面を清浄化した Au 膜の超音波ボールボンディング特性*

梶原 良一**, 高橋 敏幸**, 加藤 光雄**, 高橋 和弥***, 渡辺 宏****

Ultrasonic Ball Bondability of Au Wire to Au Film with Cleaned Surface by Ion Bombardment*

by Ryoichi Kajiwara**, Toshiyuki Takahashi**, Mitsuo Katoh**,
Kazuya Takahashi*** and Hiroshi Watanabe****

To investigate the effect of surface cleanness upon ultrasonic bondability, ultrasonic micro-bonding apparatus was developed, which consisted of three vacuum chambers for bonding, surface analysis and gas analysis. The bonding chamber has an ultrasonic ball bonding system with ultrasonic power source oscillating at the range from 10 kHz to 300 kHz, a surface cleaning system of ion bombardment and laser irradiation, a heating system, and a pure-gas-introduction system. The surface analysis system consisted of an Auger electron spectroscopy analyzer, an ion gun with 500 μm in ion beam diameter, and a mass spectroscopy analyzer. Gas analysis was done by a quadrupole mass spectrometer.

For this apparatus, mechanical vibration characteristics of the bonding system was measured. Then, using this apparatus, ultrasonic bondability of Au wire to Au thin film deposited by physical vapor deposition was investigated. Bonding procedure was that at first Au thin film was cleaned in vacuum, next pure N_2 gas was introduced about 1×10^5 Pa and Au ball was formed at the tip of a bonding wire by arc discharge, and then Au ball was ultrasonic-bonded to the cleaned surface with a ceramic capillary tool in pure N_2 gas atmosphere. An initial surface, a cleaned surface, and a exposed surface in pure N_2 gas were analyzed by AES. Main results were as follows;

(1) Au surface, which was coated with an organic resist film for preventing plating and cleaned by acetone and water, is covered with two layers of a surface carbon-rich layer and an under layer including more water.

(2) An organic material layer of two or three nanometers in thickness including water lubricates between Au film and Au ball in ultrasonic bonding, and so it deteriorates ultrasonic bondability.

(3) Ultrasonic ball-bonding of Au wire 30 μm in diameter to Au surface cleaned by ion bombardment makes failure strength of bond more than wire strength under conditions of 0.38 μm : vibration amplitude, 6 mW: ultrasonic power, 10 ms: bonding time, 0.5 N: bonding load and 20°C: bonding temperature in pure N_2 atmosphere.

Key Words: Ultrasonic bonding, Ball-bonding, Surface cleaning, Ion bombardment, Au wire, Vacuum, Au thin film, Bondability, AES analysis

1. 緒 言

最近の有機薄膜デバイスの実装分野では、接続端子の微細化と量産化のニーズに対応して、常温の Au 超音波ボンディングが重要となっている。また、半導体デバイスの実装分野では、狭ピッチ化に対応した微細ワイヤの低変形・高強度ボンディング、あるいは脆い化合物半導体に損傷を与えないソフトなボンディング技術の開発が将来的に重要である。

現在の半導体実装に使われているワイヤボンディングは、大気あるいは雰囲気ガス中で加熱を併用し、接合面を密着させて機械的に摩擦し、固相状態で圧接する方法である。本来、清浄な金属表面は非常に活性で、単にそ

の面同士を接触させるだけで接合が達成される¹⁾。しかし実際には、全ての金属表面が酸化膜や有機物・水分・ガス等の吸着汚染物で覆われており、接合性が低下している。超音波振動は、これら接合阻害物質を接合界面から排除して清浄な金属面の形成を促し、熱は、原子の拡散を促進して界面に残存する不純物を分散させる役割を担う。従って、低温かつ低超音波エネルギーの条件下で良好な接合性を得るには、初期の接合表面の酸化膜や吸着汚染物を最小限に抑えることが最も有効である。

表面の清浄化と接合強度の関連については、樹脂からの有機系蒸気で汚染された面に対してプラズマクリーニングを行う方法が検討され²⁻⁴⁾、その効果が確認されている。また酸化膜の影響に関しては、膜厚が数 nm と厚い領域においてボンディング性の検討⁵⁾が行われている。しかし、ボンディングはいずれも大気中で行われており、清浄な雰囲気中で生じる微量の吸着や酸化に関しては検討されていない。今、我々が目指す薄膜デバイスや半導体の常温・ソフトボンディングでは、清浄表面に微量に吸着した表面汚染レベルが問題になると考えられる。そのため、接合表面の吸着物質や量をボンディング性に対応させて詳細かつ定量的に調べることが重要である。

そこで本研究では、高純度に規定した雰囲気中で表面

*原稿受付 平成6年4月27日 平成5年度春季全国大会で発表、平成5年5月 マイクロ接合研究委員会 で発表

**正 員 ㈱日立製作所日立研究所 Member, Hitachi Research Lab., Hitachi Ltd.

***非 会 員 ㈱日立製作所日立研究所 Non-member, Hitachi Research Lab., Hitachi Ltd.

****非 会 員 ㈱日立製作所半導体事業部 Non-member, Semiconductor & Integrated Circuit Div., Hitachi Ltd.

状態を制御すると共に、in-situ でその表面を評価しつつ超音波ボンディングが可能な研究設備を開発し、まず Au ワイヤと Au 膜の接合性について基礎的な検討を行った。

2. 表面清浄化超音波ボンディング研究設備の開発

2.1 装置の全体構成と仕様

Fig. 1 は、今回開発した表面清浄化超音波ボンディング研究設備の概略構成を示す。設備は超音波ボンディング室と表面分析室、ガス分析室の3室から成る。ボンディング室と表面分析室はゲートバルブで、ボンディング室とガス分析室はゲートバルブを介した直結ラインと、バリアブルリークバルブを介した減圧ラインの2つのラインで結ばれている。各室の到達真空度は、 6.7×10^{-6} Pa, 2.0×10^{-8} Pa, 1.0×10^{-7} Pa である。Fig. 2 に本設備の全体システム構成、Table 1 に機能及び仕様を示す。超音波ボンディング室は、接合表面を清浄化するためのイオン銃を備え、上部にボールボンディングのための放電によるボール形成機構と超音波ボンディング機構を備えている。イオン銃の最大加速電圧は10 kV、試料電流は最大100 μ A、動作 Ar ガス圧は $1.5 \sim 10 \times 10^{-2}$ Pa であ

る。また、外部には雰囲気気を作るための2系統のガス導入機構を備えている。表面分析室は、極表面の組成分析に適する走査型のオージェ電子分光システムと、収束ビーム型のイオン銃、質量数400までの質量分析計を備えている。またガス分析室は、質量数200までの質量分析計を備えている。オージェの分析径は十数 μ m、イオン銃の最大加速電圧：4 kV、ビーム径：500 μ m 以下、ラスター：10 $\times$ 10 mm である。

2.2 超音波ボンディング機構とその振動特性

本設備では、ボンディング機構を真空室内に設置した。その概略構成を Fig. 3 に示す。また Fig. 4 に電気系のシステム構成を示す。機構部品を真空対応かつチャンバーのペーキング温度 (150°C) 以上の耐熱性を有する材料で構成した。振動子は、2個の圧電セラミックの両側に金属板を挟んだランジュバン型とし、接着剤にはポリイミド系を用いた。ステージの上下動、荷重調整、放電電極の駆動はフランジ上部に設置した一軸導入系により操作可能とした。

Fig. 5 に、超音波振動特性の測定方法とキャピラリ先端における振動振幅の周波数依存性を示す。振動子、ホーン、キャピラリで構成した接合ヘッドの振動特性は、ピーク間電圧15 V の正弦波を圧電セラミックに加えた

Fig. 1 Schematic diagram of developed apparatus.

Table 1 Specifications of the ultrasonic bonding and surface evaluation apparatus.

Chamber	characteristics and functions
Ultrasonic bonding chamber	Bonding system
	Ultrasonic frequency : 10k~200kHz
	Ultrasonic power : max.2W
	Boning load : 0.2~1.3N
	Ball formation at the tip of wire by arc discharge
Surface treatment system	Ion beam bombardment
	Laser beam irradiation
	Heating system
	Heating temperature : max.773K
Surface analysis chamber	Auger analysis spectroscopy
	Analysis dia.: 10~15 μ m
	point, line, surface, depth analysis
	Secondary ion mass spectroscopy (<400 amu)
Gas analysis chamber	Mass spectroscopy (<200 amu)
	Etching with a concentrated ion beam
Gas analysis chamber	Mass spectroscopy (<200 amu)
Gas supply system	Purifier (O ₂ , H ₂ O, CnHm <50 ppb)

Fig. 2 Schematic diagram of developed ultrasonic bonding and surface evaluation apparatus.

Fig. 8 Experiment procedure of ultrasonic bonding, surface analysis and gas analysis.

Table 4 Ion bombardment conditions.

	Bonding	Surface analysis
Accelerative voltage	1kV	3kV
Bombardment time	3.6ks	0.6, 1.2ks
Atmosphere	Ar ($2 \sim 8 \times 10^{-2}$ Pa)	Ar (2×10^{-5} Pa)

レジストを塗布し、その後、水及びアセトンで洗浄して実験に用いた。

3.2 実験手順

Fig. 8 に、試料の表面処理、表面分析、ガス分析、ボンディングを行う場合のフローを示す。図の左側はガス分析室、中央がボンディング室、右側が表面分析室の操作内容である。試料はボンディング室から搬入する。清浄化面へのボンディングプロセスは、①接統端子側のボンディング試料をボンディング室にセッティング、② 2.6×10^{-5} Pa 以下の真空度まで排気、③ Ar ガスを $2 \sim 8 \times 10^{-2}$ Pa 導入して Table 4 の条件でイオンビームを照射、④純度 5 N の窒素ガスを大気圧近くまで導入、⑤放電によりワイヤ先端にボールを形成、⑥ボールに荷重を加えて超音波ボンディングし、さらに 2nd ウェッジボンディング後ワイヤ切断、の 6 工程を行う。同一試料へボンディングする場合は、⑤⑥を繰り返す。清浄化を行わない実用表面へのボンディングプロセスは、③の工程を省略し、④の工程で空気を導入して⑤⑥ボンディングを行う。

表面分析の手順は、接合プロセスの各段階で試料を表面分析室に送り、オージェ分析を行うことになる。清浄化処理を行わない初期状態の表面（以下は未処理表面と表す）を分析する場合、①の後すぐに分析室に試料を送り、 6.7×10^{-8} Pa の真空度まで排気して分析を行い、次にイオン銃から分析室に Ar ガスを約 2×10^{-5} Pa まで導入し、Table 4 の条件でのイオン照射とオージェ分析を交互に行い深さ方向の分析を行う。清浄化面の場合は、イオン照射した面をボンディングの雰囲気中に約 30 分間さらした後に試料を分析室に移し、 6.7×10^{-8} Pa の真空度まで排気してから分析を行っている。また、ガス分析は、ボンディング時の雰囲気ガスを減圧ラインを介して分析室に 5×10^{-4} Pa 程度導入して、質量分析している。

Table 5 Bonding conditions.

Bonding surface	Initial	Cleaned
Atmosphere	Air (1×10^5 Pa)	pure N ₂ ($\sim 1 \times 10^5$ Pa)
Bonding load	0.5N	0.5N, 0.2N
Bonding temp.	293K	
Frequency	74kHz	
US Power	6~27mW	
Bonding time	10~100ms

Fig. 9 Mass spectra of gas in bonding chamber.

Fig. 10 Shape and dimension of a capillary tool.

3.3 接合条件

Table 5 に、接合条件を示す。接合方式はボールボンディングである。接合温度：293 K、接合荷重：0.5 N 一定で、超音波出力 6~27 mW、ボンディング時間を 10~100 ms の範囲で変えている。なお、ボンディング雰囲気は、未処理表面へのボンディングの場合が空気中で、清浄化表面の場合が高純度窒素中である。その時のガス分析結果を、Fig. 9 に示す。図の上段はボンディング室内を真空度： 2×10^{-5} Pa まで排気した状態のガス組成を示す。残留ガスは、H₂O, N₂, O₂, Ar, CO₂ ガスから成る。空気を 1×10^5 Pa 導入した場合には、 5×10^3 Pa の水分と 5×10^1 Pa の炭化水素が検出され、高純度の N₂ を導入した場合には、数 Pa の水分と 10^{-1} Pa 程度の炭化水素が検出される。

Fig. 10 に、ボンディングツールの寸法と形状及びボールの寸法を示す。ボール径は80 μm 、ツールの孔径は46 μm で先端外径は203 μm である。

4. 実験結果とその検討

4.1 Au 膜表面の清浄化による接合性の改善

Fig. 11 に、超音波出力 6 mW、ツール先端の無負荷時における振動振幅 0.36 μm の条件で、Au 膜の未処理表面及び清浄化表面に Au ボールボンディングした場合の、接合時間と垂直方向の引張強度の関係を示す。同一条件におけるボンディング点数は 5 点である。図において、黒塗記号はいずれもワイヤ部で破断したことを示す。未処理表面について見ると、接合時間 30 ms 以下の条件では全く接合されていない。50 ms になると 5 点中 2 点がワイヤ破断を呈し、接合開始時によく見られる強度的に不安定な状態を示している。これに対して、表面清浄化処理を行うと、接合時間 10 ms の条件から 5 点中全てがワイヤ強度以上の接合強度に達しており、接合性の著しい改善が認められる。

Fig. 12 に、接合荷重：0.5 N、接合温度：293 K 一定の条件において、ワイヤ強度以上の接合強度が得られる超

Fig. 11 Influence of surface treatment for Au film on the relation between bonding time and 90° pull failure force (Bonding atmosphere is air for initial surface and pure N₂ gas for cleaned surface).

Fig. 12 No peeling-off condition for bonding time and ultrasonic power at initial and cleaned bonding surface.

音波出力と接合時間の条件領域を示す。未処理表面の場合は、5 点全てがワイヤ破断となる領域が超音波出力 27 mW、接合時間 50 ms 以上の領域であるのに対し、表面清浄化処理を行った場合では、その領域が 6 mW-10 ms まで低下している。エネルギー的には、未処理表面の場合に比べ 1/20 以下で同レベルの接合が達成できると言える。

4.2 Au 接合表面のオージェ分析結果

Fig. 13 は、Au の初期表面と分析室でその表面に所定時間イオンビームを照射した後の表面のオージェ電子スペクトルを示す。初期表面には約 94 at% の C と S、O が数% 存在し、オージェ電子の脱出深さ⁶⁾ から判断して Au 表面が平均 1 nm 程度の厚みの有機物等で覆われていると考えられる。イオンビームで表面をスパッタしていくと C は減少するが O は反対に増加し、最終的に Au のみの表面になっている。Au は酸化しない金属であることから O は水分に起因するものと考えられる。すなわち、初期表面では Au 面の直上に水分の吸着率が高い層があり、その上に有機物の層が覆っている構造をしていると考えられる。

Fig. 13 Auger electron spectra of Au surface before and after ion bombardment.

Fig. 14 Auger electron spectra of Au surface after various treatment.

Fig. 14 は、ボンディング時の表面清浄化プロセスにおいて、各工程途中の表面状態をオージェ電子分光により調べた結果を示す。ボンディング室において初期表面に対して60分間イオンビームを照射することにより、初期に吸着していた有機物や水分を完全に除去できている。また、ボンディング雰囲気である高純度 N_2 中に30分間さらすと、約30 at%のC、すなわちC量換算で1原子層レベルの表面吸着層が生じていることが分かる。この有機物は、Fig. 9 の雰囲気ガスの分析結果から判断し、炭化水素 C_2H_6 が吸着したものと考えられる。しかしOのピークは存在せず、水分の吸着は無いことも分かる。従って、清浄化面では有機物のみが1分子層程度吸着した状態になっていると考えられる。

4.3 接合部破断面の観察

Fig. 15 に、未処理表面と清浄化面へボンディングした場合の接合部外観と引張破断面を示す。両者の超音波エネルギーは同じであるが、接合荷重と接合時間は清浄化面の方を低くしている。これは、清浄化面では接合性が高く未処理表面と同一条件では、界面剥離試料が得られなかったためである。破断面で白く見える領域は、ディンプルパターンが観察されることから、接合していた領域を示すと考えられる。未処理表面の場合の破断面では、清浄化面の場合に比べて、白く見える接合領域がボールの圧痕面積に比べて少なく、接合率が低くなっている。また、未処理表面の場合では超音波振動と同じ一定の方向に擦れた跡が認められるが、清浄化面の場合では方向性のある模様は認められない。これらのことから、Au 表面を清浄化処理して表面の吸着水分の除去と有機物の量を1 nm から1/3程度低減させることにより、接合面の凝

着性を著しく向上できることが分かる。また、吸着水分や有機物は、ボンディング過程において潤滑剤的役割を果たし、接合界面におけるAuの新生面の形成を妨げ、接合の進行を阻害していることが分かる。

5. 結 言

次世代に要求される低温・低損傷の超音波ボンディング技術を目指して、接合面の清浄化処理・in-situの表面分析・高純度雰囲気中での超音波ボンディングが可能な研究設備の開発を行い、Auを対象に表面清浄化による大気圧下の接合性向上について検討した結果、以下の結論を得た。

1) 酸化皮膜を形成しないAuでも、接合表面を一度清浄化処理することにより、1気圧の N_2 雰囲気中における常温での接合性を大幅に向上できる。

2) 大気中に取り扱われるAu膜の表面には、Au側に水分の多い層があり、その上に有機物が覆った2層構造をしている。その厚さは1 nm程度である。また、有機物及び水分を完全に除去した清浄なAu表面を、1気圧で純度4 N程度の N_2 雰囲気中にさらすと、有機物が1分子層程度吸着した表面となる。このレベルの表面吸着物の種類と厚さの差が接合性に大きく影響する。

3) 有機物の吸着が1分子層程度となるように清浄化処理を行ったAu蒸着膜では、常温における超音波ボンディングの条件として接合荷重: 0.5 N, 接合時間: 10 ms以上とした場合、ツール先端の無負荷時の振動振幅: 0.36 μm 程度以上を加えれば、ワイヤ強度以上の接合強度が得られる。

6. 謝 辞

本研究の遂行に当たり御協力頂いた三吉忠彦博士、山田一二博士、河野誠博士、また設備の開発に御協力頂いた園部幸男氏、井崎直幸氏に対し深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Y. Kashiba, K. Machida, T. Okuda, W. Shimada and S. Nakata: Energy-Free Bonding of Materials with Fine Controlled Surfaces in Ultrahigh Vacuum, Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 108 (1988), 371-376.
- 2) M. Ohzono: Plasma Cleaning for Fine Connection, ICMCM Proceedings '92, (1992), 491-498.
- 3) Buckles S.L.: Use of Argon Plasma for Cleaning Hybrid Circuits Prior to Wire Bonding, Proc. 5th Int. Microelectron. Conf., (1988), 383-387.
- 4) Baranyi A.D., Seto L. and Change S.: Plasma Cleaning to Improve Wire Bonds, Electron. Pack. Prod., Vol. 28, No. 1, (1988), 79-81.
- 5) 藤本公三, 真鍋俊樹, 升谷雄一, 仲田周次, 藤井淳彦: 第35回マイクロ接合研究委員会資料, MJ-192-92, (1992), 9-22.
- 6) 染谷禮, 安盛岩雄: 表面分析, 講談社, (1983), 136.

Fig. 15 Appearance of Au ball bond and fractured surface on Au film.