Au, Cu, Al 蒸着膜の表面清浄度と Au ボールボンディング特性*

—表面清浄化超音波ボンディングに関する研究 (第2報)—

梶原 良一**, 高橋 敏幸***, 坪崎 邦宏****, 渡辺 宏****

Influence of Surface Cleanness on Ultrasonic Ball Bondability of Au Wire onto Au, Cu and Al Pads

—Study of Ultrasonic Bonding with Surface Cleaning by Ion Bombardment (Report 2)—

by Ryoichi KAJIWARA**, Toshiyuki TAKAHASHI***, Kunihiro TSUBOSAKI****,
Hiroshi WATANABE****

The effect of surface cleanness upon ultrasonic bondability was investigated, in order to obtain a reliable micro-bond with high strength and small deformation when bonding was done at low temperature and low energy conditions. Au, Cu and Al physical vapor deposition films on a Si wafer, which are materials with different oxidizing characteristics, were selected for bonding pads. At first, the bonding surfaces of the Au, Cu and Al films were treated for contamination by cleaning, and the surfaces were quantitatively analyzed by Auger electron spectroscopy. After that an Au wire was ultrasonic ball bonded onto each surface in air or pure N₂ gas, and the fracture mode of the Au ball bond in a pull test and the bond strength of it in a shear test were investigated. Then ultrasonic bondability was evaluated from the ultrasonic power by which the pull strength of the Au ball bond rose above the Au wire strength, and from the probability of which the pull strength of it rose above the Au wire strength at a ultrasonic power. Additionally, the surface cleanness of Au, Cu and Al films was investigated for the films exposed to pure N₂ gas or air after being cleaned by ion bombardment and the films with a contaminated surface obtained by immersion in water and acetone. Main results are as follows.

- (1) The ultrasonic ball bondability of an Au wire onto an Au film at 373K in air is improved by cleaning the Au film surface by ion bombardment before bonding, but it onto an Al film is not improved so much by cleaning the Al film surface.
- (2) The ultrasonic ball bondability of an Au wire onto Au and Al uncleaned films in pure N₂ gas was better than it onto Au and Al films cleaned by ion bombardment before bonding in air. This means that the ambient gas influences the bondability much more than the cleanness of a bonding surface.
- (3) Therefore, it is important to clean a bonding surface and change an ambient gas to a pure and dry gas for obtaining a reliable bond in ultrasonic bonding of an Au wire onto an Au pad at low temperature and low energy conditions, and it is important to change an ambient gas to a pure and dry gas in the case of an Al pad.

Key Words: Ultrasonic ball bonding, Surface cleaning, Ion bombardment, Au pad, Al pad, Cu pad, Au wire, Influence of surface cleanness on bondability

1. 緒 言

超音波を用いる Au ボールボンディングは、大気中で加熱を行いながら接合面を密着させて機械的に摩擦し、清浄な金属面を露出させて固相状態で圧接する方法である。従ってその接合性は、金属材料が持つ本質的な原子レベルの

結合性や機械的特性の他に、接合面の状態すなわち酸化皮膜や吸着した水分・有機物・無機物等の有無や量あるいはこれら接合阻害物質の排除の容易さに大きく依存する。従って、接合性を向上して低温・低エネルギーで高強度ボンディングを達成するためには、接合表面の清浄度を管理し、材料に適したボンディング環境を提供することが最も有効である。現在までに、表面を超高真空中で清浄化した圧接する研究¹⁻³⁾やプラズマクリーニングで有機物を除去後に大気中で超音波ボンディングする研究^{4,5)}が既に報告されている。しかし、酸化膜の厚さや吸着汚染の量とボンディング性について詳細に調べた報告は無い。

前報⁶⁾において、真空あるいは制御された雰囲気中で表面清浄化と超音波ボンディングを一貫して行え、そのプロセスの途中で接合表面の組成分析が可能な設備を開発した。そして、清浄化した Au 蒸着面の常温における超音波接

*原稿受付 平成9年5月19日 平成6年度秋季全国大会で発表
平成7年5月界面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.

***正 員 ㈱日立製作所計測器事業部 Member, Instrument Div., Hitachi Ltd.

**** ㈱日立製作所半導体事業部 Semiconductor & Integrated Circuit Div., Hitachi Ltd.

合性を調べ、表面清浄度の影響を定量的に明らかにした。本報告では、材質による Au ボールボンディング特性の違いを調べるため、Al, Cu, Au 膜に対して表面清浄度や雰囲気を変えてボンディングを行い、材料間の比較を行った結果を述べる。

2. 実験方法

2.1 供試材

本研究で使用した接合材料を、Table 1 に示す。パッド材には、酸化膜を全く形成しない Au, 酸化雰囲気下で水分や温度によって酸化膜が成長する Cu, 高真空中においても強固で化学的に安定な酸化膜を形成する Al の 3 種類を選択した。これらの膜は、いずれも Si ウェーハの上に真空蒸着及びスパッタ蒸着により約 $1\text{ }\mu\text{m}$ 厚さに形成し、 20 mm 角に切断して実験に用いた。Au 及び Cu の蒸着材料の純度は 4 N であるが、膜の密着性を上げる目的で下地膜に厚さ $0.05\text{ }\mu\text{m}$ の Ti を蒸着した。Al のスパッタターゲットには、半導体の配線材料に用いられている Al-1% Si の合金を用いた。蒸着膜の処理は、各種イオンを含む水に浸漬してからアセトン溶液で洗浄した後、乾燥してボンディング実験に用いた。ボンディングワイヤには高温特性を改善した直径 $30\text{ }\mu\text{m}$ の Au ワイヤを用い、放電によってワイヤの先端に直径約 $80\text{ }\mu\text{m}$ のボールを形成してボンディングを行った。Au ワイヤの室温での破断強度は 0.16 N 、伸びは 6% であった。

2.2 実験装置と手順

Fig. 1 に、本研究で用いた実験装置を示す。この装置は、真空中で表面清浄化処理を行った後、高純度雰囲気ガスを導入して超音波ボンディングを行うことができ、同時にボンディングプロセス中の接合表面の AES 分析 (Auger Electron Spectroscopy) と雰囲気ガスの組成分析が可能である⁶⁾。

Fig. 2 に、接合表面の清浄化処理、表面分析、ガス分析、ボンディングを行う実験手順を示す。清浄化面へのボンディングは、真空室に試料をセッティング後排気⇒表面清浄化処理⇒試料加熱⇒雰囲気ガス導入⇒超音波ボンディングの手順で行った。清浄化しない面へのボンディングは、上記の工程で表面清浄化処理を省略したプロセスで実験を行った。

雰囲気ガスの分析は、高純度窒素ガス及び空気について行い、ボンディング室の残留ガスも測定した。分析結果は、ガス分析室の残留ガスとボンディング室からの導入ガスの差分を求めて評価した。表面分析室の残留ガスは、その真空室の質量分析計で測定した。

各材質の表面汚染性の比較は、Au, Cu, Al 試料を 1 台の試料ホルダーに取付けて全く同一の処理履歴を加え、膜表

Table 1 Specifications of bonding specimen.

Specimen	Element	Specification (size, mechanical properties, etc.)						
Wire	Au	Diameter:30 μm, Tensile strength: 0.16N, Elongation: 6% (Unit : ppm)						
		Au	Ag	Ca	Cu	Fe	Mg	others
		>99.9wt%	1	<5	1	2	<1	<7
Pad	Au	Vaper deposition film on Si wafer, Film thickness: 1.0 μm					Previous treatment	
	Cu	Vaper deposition film on Si wafer, Film thickness: 1.0 μm					Water and Acetone	
	Al-1%Si	Sputter deposition film on Si wafer, Film thickness: 1.0 μm

Fig. 1 Schematic diagram of ultrasonic bonding apparatus.

Fig. 2 Experimental procedure for ultrasonic bonding, surface analysis and gas analysis.

面の AES 分析を行って吸着元素の種類と量を調べて評価した。試料の処理は、表面分析室で一度完全に表面を清浄化した後ボンディング室に試料を移し、 $2.6 \times 10^{-5}\text{ Pa}$ の高真空中、高純度窒素中あるいは空気雰囲気中に約 2 h 曝露してから、再度分析室に移して AES 分析を行った。空気雰囲気

気に曝す場合、まず高純度窒素で大気圧にした後に空気を導入して評価した。

2.3 イオン照射条件及びボンディング条件

Table 2 に、表面清浄化のためのイオン照射条件を示す。ボンディング室のイオン銃は、ビーム照射口径 1 mm、発散角 5° の自然放射型の銃で、試料面上のエッチング寸法は 5.2×8.2 mm の長円である。分析室のイオン銃は、ビーム径：500 μm 以下の焦点型の銃で、ラスターをかけて 10 mm 角の領域をエッチングした。加速電圧はいずれも 2 kV とした。イオン照射時間の設定は、それぞれの材料において表面の C や O の量がゼロになるか、あるいは変化しなくなる時間とした。Fig. 3 に各蒸着膜の初期とボンディング室でイオン照射した後の試料表面の 2 次電子像を示す。蒸着膜表面の初期の凹凸は Cu が最も大きく、イオン照射によって凹凸は拡大している。表面清浄化に必要な照射時間が Au や Al に比べて Cu の方が長いのは、表面の凹凸の影響が大きいためと考えられる。

Table 3 に、各材質のボンディング条件を示す。表面清浄

化を行わない汚染面へのボンディング雰囲気は、Au、Al、Cu の各材質に対して空気及び高純度窒素中とした。一方、表面を清浄化した場合のボンディング雰囲気は、Au と Al に対して空気及び高純度窒素中とし、Cu に対しては熱酸化の影響が明らかなので高純度窒素中のみとした。ボンディング荷重と超音波印加時間を一定とし、ボンディング温度と超音波出力を変えてボンディングを行い、汚染面及び清浄化面における各材質間のボンディング性の違いを調べた。

Fig. 4 に、本研究で用いた超音波ボンディング機構の無負荷時の振動特性を示す。本研究で用いた装置の振動特性は、超音波電源の出力 1.6 mW でツール先端の振幅が 0.2 μm、150 mW で約 1.9 μm、900 mW で約 3.5 μm であった。この振動特性には、キャピラリ先端の振動振幅 Δ と電気的入力エネルギー E の間に $\Delta = A \cdot E^{1/2}$ (A は定数) の関係があることから、本装置は 1～500 mW の範囲内で電気エネルギーから振動エネルギーへの変換率が一定であると判断できる。同図には 60 kHz の市販装置の無負荷時の振動特

Table 2 Surface treatment conditions.

Pad material	Bonding		Surface analysis	
	Au, Al	Cu	Au, Al	Cu
Ion bombardment	Divergent angle : 5° Work distance : 60mm		Beam dia.: <500 μm Raster : 10×10 mm	
Accelerating voltage	2 kV		2 kV	
Emission current (ion)	0.2 mA		20 mA (2-3 μA)	
Bombardment time	1.8 ks	3.6 ks	3.6 ks	7.2 ks
Ambient gas (pres.)	Ar (8×10 ⁻² Pa)		Ar (2×10 ⁻⁵ Pa)	

Table 3 Bonding conditions.

Pad material	Au	Cu	Al-1%Si
Ambient gas (pres.)	(0.5-1×10 ⁵ Pa)		
Uncleaned surface	Air, pure N ₂ (>99.9995 vol%)		
Cleaned surface	Air, pure N ₂	pure N ₂	Air, pure N ₂
Bonding temp.	273, 373, 473 K		
Frequency	74 kHz		
Ultrasonic power	0-150 mW	0-900 mW	0-150 mW
Bond force	0.5 N		
Bond time	20 ms

Fig. 3 Secondary electron microscope image of Au, Cu and Al pad surfaces before and after ion bombardment.

Fig. 4 Vibration characteristics at the tip of the capillary tool in a 60 kHz conventional bonder and the 74 kHz bonder developed in this study.

性を参考値として示すが、74 kHz の振動特性は、60 kHz の装置に比べて同一の電気的入力で 1/2~1/3 の小振幅特性となっている。

2.4 ボンディング部の評価

ボールボンディング部の強度評価は、2nd ボンディング部を切断してからワイヤをクランプして引っ張る 90° 引張試験と剪断試験で行った。90° 引張試験の結果は、破断モードすなわち破断位置がワイヤ部か接合界面かで分類して評価した。本研究では、引張試験を行った全試料に対してワイヤ部で破断した試料の比率をボンディング成功率と定義し、接合性評価の指標として用いた。引張試験した試料数は 10 個で、引張試験でワイヤ破断した試料について剪断試験を行った。剪断試験結果は強度の絶対値で評価し、同時に剪断破面の SEM (Secondary Electron Microscope) 観察も行った。

3. 実験結果とその検討

3.1 各材質の表面汚染性の比較

蒸着膜 Au, Cu, Al の各種環境における表面汚染レベルを調べるため、清浄な試料を各種雰囲気中に曝してから表面の AES 分析を行った。Fig. 5 に Si ウェーハ上に各材質の蒸着膜を形成してから水及びアセトン中に浸漬した後の、試料表面のオージェ分析結果を示す。この表面状態は、ボンディング実験における清浄化処理をしない汚染面と同じ状態である。各材質の汚染レベルをみると、酸化しない Au の場合に有機物と無機物の吸着量が 66at% と最も多く、次いで Cu の 48at%, Al の 34at% の順に少なくなっている。特に Al の場合は、Au や Cu に吸着している S, Cl, Ca の無機物が全く検出されておらず、表面が化学的に最も安定な酸化膜を形成しているため、無機系の吸着汚染が少なか

Fig. 5 Auger electron spectra of Au, Al and Cu films after immersion in water and acetone.

ったものと考えられる。また、Au と Cu の無機系の吸着物を比べると、Au では Cl に比べて S が著しく多く、Cu では Cl の方がやや多いというように、材質による吸着元素の選択性が認められる。

Fig. 6, 7, 8, 9 は、各材質の試料表面を表面分析室のイオン照射により清浄化した後、ボンディング室で高真空、窒素、空気に順次約 2 時間曝した場合の試料表面のオージェ分析結果を示す。また Fig. 10 は、各雰囲気と表面分析室のガス分析結果及びそのときのガス圧力を示す。各試料の処理作業は同時に行われているため、曝露雰囲気及び曝露時間は全ての材質において完全に同一である。

Fig. 6 の Au 膜表面では、高真空、窒素、空気雰囲気の順に 4.1, 36.3, 40.2at% と C 吸着量が増し、窒素及び空気雰囲気では S, 空気雰囲気では O の吸着が認められる。しかし、いずれも Cl の吸着は認められない。高真空雰囲気中には 80 vol% の水分 (Fig. 10) があるものの Au 表面にも吸着しておらず、水分より有機物の吸着性の方が高いことが分かる。空気雰囲気での O の吸着は、窒素中に比べて空気中の水分量が 2 桁多く存在していることから、有機物を介した水分の吸着⁹⁾によると考えられる。

Fig. 7 の Cu 膜では、高真空雰囲気から既にわずかな O と C の吸着が認められる。O は Cu の酸化によるものと考えられる。窒素及び空気雰囲気では、O と C の吸着量の増加の他に、新たに Cl, S, N の吸着が認められる。Cu は、Au と違って S より Cl の吸着量が多く、明らかに Cl の方

Fig. 6 Auger electron spectra of Au surface after ion bombardment and 2-hour exposure in a vacuum (10^{-5} Pa), N₂ gas (10^5 Pa) and air (10^5 Pa).

Fig. 7 Auger electron spectra of Cu surface after ion bombardment and 2-hour exposure in a vacuum (10^{-5} Pa), N₂ gas (10^5 Pa) and air (10^5 Pa).

を吸着しやすい性質がある。また、C吸着量は真空雰囲気以外ではAuより少なく、Cu酸化膜の形成によって有機物の吸着性が低下したと推測される。

Fig. 8及び9のAl膜では、分析室でのイオン照射面から68 eVの金属Alのピークが検出されているが、 10^{-5} Paの高真空雰囲気では金属Alのピークの他に53 eVのAl酸化物のピークが強く検出されており、Oの量も多いことからAlの明瞭な酸化が認められる。オージェ電子の脱出深さは材質によって異なるが、Alの53, 68 eVの場合で <0.9 nm⁷⁾であり、Alの最短原子間距離が0.286 nmであることから、酸化膜厚は2~3原子層以下であると考えられる。この膜厚は、窒素雰囲気でも金属Alが検出されていることから、3原子層を越えてはいないと考えられる。空気雰囲気では金属Alのピークが消失し、酸化膜厚の成長が認められる。しかし、十分厚い酸化膜が形成されている初期表面のスペクトル波形 (Fig. 9-(A)) と比較すると酸化Alのピークの右肩が下がっており、金属Alの影響が推測される。この状態では、オージェ電子の脱出深さ以上の酸化膜が形成されていると考えられるが、水とアセトンに浸漬し

た初期表面の酸化膜よりは薄いと考えられる。これは、表面に緻密な酸化膜が形成された後の酸化膜の成長が、水分が関与しない場合に非常に遅いため⁸⁾と考えられる。

AlにおけるCの吸着量は、窒素及び空気雰囲気でCuの場合と同程度であり、有機物の吸着に関しては酸化膜の材質間の差が少ない。一方、無機物の吸着に関しては、初期の汚染表面の場合と同様にAu, Cu, Al間でいずれの雰囲気においても全く異なり、無機物の吸着性に関して材質依存性が高いことが分かる。なお、Alの場合には表面からArが検出されているが、これはイオン照射過程でArイオンがAl内に打ち込まれたもので、表面の吸着特性には影響しないと考え検討から省いた。

Fig. 11に、各材質の蒸着膜における表面清浄化処理前後及び清浄化後に各種雰囲気に暴露した後の元素濃度の変化を示す。各処理は時系列的に行われているため、各段階の処理を行う直前の表面状態は、前段の処理を経た後の表面状態と同じである。Alは非常に活性であるため高真空中において既に酸化がかなり進んでいる。Cuの酸化や各材質へのC, S, Clの吸着はほぼ1気圧の窒素雰囲気中で最も進行

Fig. 8 Auger electron spectra of Al surface after ion bombardment and 2-hour exposure in a vacuum (10^{-5} Pa), N₂ gas (10^5 Pa) and air (10^5 Pa).

している。大気中に 2 h 暴露した場合と 2 カ月間暴露した場合を比較すると、全ての材質で C の吸着量がわずかに増加し、Au で S が増加しているが他の吸着元素の変化は少ない。

以上の結果から、各材質の表面吸着性は有機物に対して $Au > Cu \approx Al$ 、無機物の S に対して $Au > Cu > Al$ 、Cl に対して $Cu > Au > Al$ の順で高く、酸素を除く有機物と無機物の吸着総量は $Au > Cu > Al$ の順で多い。つまり、化学的に安定な酸化膜面は吸着汚染が少なく、酸化していない金属面は汚染されやすいことが分かる。また、メカニズムはよく分からないが、材質によって吸着し易い元素が異なることから、酸化の有無に依らず金属表面は吸着物に選択性をもつことが確認された。

また、金属 Al 表面の酸化膜の成長は、AES 分析における金属 Al ピークの観察から、高真空及び 1 気圧の窒素雰囲気中で 2 ~ 3 原子層以下の膜厚しか成長しないことが分かった。

Fig. 9 Auger electron spectra of Al surface before and after ion bombardment, and after exposure in vacuum (10^{-5} Pa), N₂ gas and the air.

3.2 Au, Cu, Al 膜の表面清浄度とボンディング性

Fig. 12 に、接合温度が各材質の高純度窒素中でのボンディング性に与える影響を示す。縦軸のボンディング成功率は、90° 引張試験において界面剥離ではなくボールネック部あるいはワイヤ部で破断した割合で、換言すれば接合界面の剥離強度が 0.16 N 以上となる割合を示す。各材質の接合面は、蒸着膜形成後に水とアセトンに浸漬して乾燥させた汚染面である。Au の場合は、ボンディング成功率が 100% に達する超音波出力が常温で 55 mW、373 K で 1.4 mW であり、473 K では加圧のみの条件で 0.16 N 以上の接合が達成されている。Cu では超音波出力 1000 mW においても、接合温度 373 K 以下でボンディング成功率が 100% に達していないが、473 K では加圧のみで 100% が得られ、昇温によって急激なボンディング性の改善が認められる。これは、

Fig. 10 Mass spectra of gas in bonding and analysis chambers.

真空中 (酸素分圧: 9.2×10^{-7} Pa-Fig. 10) での昇温過程で酸化膜が還元されることと材料の軟化が主な理由と考えられる。Al の場合は常温で100%に達する超音波出力が6.1 mW, 373 K では加圧のみで100%に達している。従って、通常の大気中で水及びアセトン洗浄された表面では、Al > Au > Cu の順でボンディング性が高く、接合温度を上げることで全体的な材質でボンディング性が改善されることが分かる。ちなみに、超音波出力: 10~100 mW の範囲でボンディング成功率100%が得られる接合温度は Al で常温, Au で373 K, Cu で473 K である。

Fig. 13 に, Au, Cu, Al の表面清浄化処理が高純度窒素雰囲気中のボンディング性に与える影響を示す。Au と Al では、清浄化しない場合でも優れたボンディング性を有するため、清浄化の効果が小さいように見える。清浄化しないときのボンディング性が低い Cu では、清浄化によってボンディング性の大幅な改善が認められる。Au と Al の清浄化面では、超音波を印加しなくても加圧のみで全てワイヤ破断以上の界面強度が得られている。各材質間のボンディング性の違いは、Au ボールと比較した場合の材料の硬さや酸化膜の有無とその強さ、金属原子自体の活性度の違いに依ると考えられる。すなわち、Cu は硬い下地の表面に酸化膜を形成しているため、清浄な金属面の露出が進み難くボンディング性が悪い。Al は Au に比べて軟らかいため

- 1: After immersion in water and acetone
- 2: After ion bombardment in ultra-high vacuum
- 3: After exposure to ultra-high vacuum for 2h
- 4: After exposure to ultra-high vacuum for 2h
- 5: After exposure to air for 2h
- 6: After exposure to air for 2 months

Fig. 11 Atomic concentration of Au, Cu and Al pad surface after each surface-treatment (1-6).

下地が変形して表面の薄くて硬い酸化膜が容易に破壊され、しかも材料自体の活性度も高いためボンディング性が最も優れる結果になったと考えられる。

Fig. 14 に, Au と Al の表面清浄化処理が大気雰囲気中のボンディング性に与える影響を示す。Cu は大気中では酸化して表面清浄化の効果が表れないと考え省略した。Au は、大気中のボンディングにおいても清浄化処理を行うことでボンディング性が改善されており、100%のボンディング成功率が得られる超音波出力が151 mW から15 mW にまで減少している。また、超音波出力の小さい領域で清浄化の有無によるボンディング成功率の差は拡大している。両者の吸着汚染物の量は67at% : 45at% (Fig. 5 (A) と Fig. 6 (d)) であり、Au の場合にはこの程度の汚染の違いがボンディング性に影響を与えていることになる。一方、Al の場合は、超音波出力が小さい領域でわずかに有意差が認められるものの、超音波出力が10 mW 以上の領域では表面清浄化の効果がほとんど認められない。Al では、大気に曝した後の吸着汚染量が清浄化面と汚染面で28.9と34.2at% であり Au に比べると絶対汚染量が少なく差も少ないこと、酸化

Fig. 12 Successful bonding rate for Au ball onto Au, Cu and Al pads under different bonding temperature conditions as a function of ultrasonic power.

Fig. 13 Influence of bonding surface cleanliness on bondability of Au ball onto Au, Cu and Al pads in N₂ gas.

皮膜は清浄化処理面でも大気中に曝すと 1 nm 以上の酸化膜がただちに形成されることの 2 つの理由によって、表面清浄化の効果が表れなかったものと考えられる。前項で述べたように清浄化の有無で酸化膜厚に差はあると考えられるが、ボンディング性を決定する酸化皮膜の破壊の進み方は下地の軟らかい Al 膜の変形挙動でほぼ決まるため、ボンディング性に酸化膜厚の影響があまり表れなかったものと考えられる。

Fig. 13 の窒素中と Fig. 14 の大気中のボンディング結果を同じ表面処理同士で比較すると、いずれの場合も窒素中の結果が著しく良くなっている。さらに、窒素中での汚染面のボンディング性と大気中での清浄化面のボンディング性を比較しても、前者のボンディング性の方が優れた結果となっている。このことは、表面清浄度以外の要因がボンディング性に影響していることを示唆している。その要因

として、雰囲気ガスの影響が大きいと考えられるが、雰囲気ガス中の何がどのように作用しているかについては、今後の検討課題である。

3.3 Au と Al 膜上の接合部の剪断強度と破断形態

Fig. 15 は、Au 及び Al 膜の清浄化面と汚染面におけるボールボンディング部の剪断強度と超音波出力の関係を示す。清浄化面のボンディング雰囲気は高純度窒素、汚染面の雰囲気は大気であり、ボンディング性に最も大きな差がある組合せである。試験数 n は 5 で、 $n=10$ の引張試験後に残された Au ボールに対して測定した。引張試験で剥離した場合の剪断強度は 0N として平均強度を算出した。Au 及び Al 膜のいずれにおいても、同じ超音波出力条件では平均剪断強度が清浄化面の方が高く、汚染と雰囲気が重畳した影響が顕著に認められる。材質間で比較すると、清浄化

Fig. 14 Influence of bonding surface cleanness on bondability of Au ball onto Au and Al pads in air.

面の場合、飽和剪断強度は Au と Al 共に約 0.5 N と等しいものの、超音波出力がゼロの圧着条件で見ると Au の方が Al に比べて強度が高く、ボンディング成功率はいずれも 100% (Fig. 13) であるが、Au の方がボンディング性に優れていると言える。一方、汚染面では超音波出力が 1.4 mW と低い領域で Al に比べ Au の強度の方が低くボンディング性が悪い。Au の方が表面の清浄度の影響を強く受けている。

Fig. 16 は、Au 膜上のボンディング部の外観及び剪断破面を示す。超音波出力は汚染面が 1.4 mW、清浄化面が 0, 1.4, 15 mW の場合である。超音波出力が 1.4 mW 同一の場合を比較すると、ボール圧着外観では大きな有意差が無いが、剪断強度が 0.25 N の汚染面の破面では、部分的な Au ボールの凝着部が存在するもののほとんどの領域で接合界面破断を呈しているのに対し、剪断強度が 0.49 N の清浄化面の破面では Au ボール内破断が 5 割以上を占めており、破断形態は大きく異なっている。両者の界面剥離した領域を比較すると、Au ボールの凝着率が清浄化面で多くっており、界面の接合面積率が増加して強度が向上していることが分かる。この現象は、超音波出力を上げた場合にも同様に認められる。

Fig. 17 は、Al 膜上のボンディング部の外観及び剪断破面を示す。超音波出力は 1.4 mW と 15 mW の 2 条件である。SEM 像の視野角は全て 45 度である。破面 A の中央の白枠部を拡大した像が破面 B である。大気雰囲気中で汚染面

Fig. 15 Relationship between shear strength of ball-bonds and ultrasonic power for Au and Al pads.

へボンディングした試料の剪断破面は、Al 膜が左右に押し出されたような状況が観察され、内部には起伏の大きい凹凸が観察される。左右への押し出し幅は超音波出力が大きくなると広がっており、振動振幅の大きさが影響していることが分かる。また、破面内部には部分的に延性破断したディンプル模様が観察される領域があるものの、Au ボールが単に押しつけられて形成されたような未接合の平坦な面も観察される。これに対して清浄化面の剪断破面には、Al が押し出された状況が観察されず、破面内部は一様で全面に亘って延性破断したディンプル模様が観察される。Fig. 18 は、Fig. 17 で超音波出力が 1.4 mW の場合の剪断破面の EDX (Energy Diffraction X-Ray micro-analysis) 分析結果を示す。汚染面の剪断破面から、部分的に Au の存在が確認される。Au の存在は、その分布と Fig. 17 の SEM 像の対比から、超音波印加時に Au ボールから脱離した Au が残ったものと考えられる。また、Al 及び Si の濃度分布から判断して、左右の Al 膜厚が厚く中央部の Al が薄くなっており、超音波振動によって Au ボール下の Al が振動方向に押し出されたことを示している。一方、清浄化面の剪断破面からは Au が全く検出されておらず、完全に Al 膜内破断であることが確認される。また、Al 及び Si の濃度分布から Al が押し出された形跡が小さく、破断部の Al が薄くなった原因が剪断時に Au ボール側に付着して取り去られたためと考えられる。Al 膜内で破断する原因は、Au/Au と

(Bonding conditions : Temperature: 373K, Bond force: 0.5N)
(US: Ultrasonic power, SS: Shear strength)

Fig. 16 Secondary electron microscope image of Au ball bond and shear fractured surface on Au pad with cleaned or uncleaned surface.

Au/Al と Al/Al の結合強度では Al/Al が最も弱く、Au/Al の接合面積率が低い場合は接合界面近傍で破断するものの、接合面積率が高くなった場合には最も弱い Al 膜内で破断するようになるためと考えられる。

Au ボール下の Al 膜の押し出し現象は、Au ボールと Al 膜が滑りを生じたときに大きくなり、Au ボールと Al パッドの摩擦係数が非常に大きくて滑りにくいかあるいは短時間に凝着が進んだ場合に小さくなると考えられる。Au ボールと Al 膜の滑りは、Al 膜表面に有機物や水分等の潤滑剤

の膜がある場合によく滑ると考えられ、清浄な面では Au と Al₂O₃ の界面となって摩擦抵抗が大きくなり、酸化皮膜の破壊が早く進行して接合も短時間に達成されると考えられる。

4. 結 言

Au, Cu, Al 膜の表面清浄化処理を行って、材質間の汚染活性度及びボンディング性を比較検討し、以下の結論を得

Fig. 17 Secondary electron microscope image of Au ball bond and shear fractured surface on Al pad with cleaned or uncleaned surface.

た。

1) Au は, Cu や Al に比べて高真空中, 高純度窒素中, 大気中のいずれの雰囲気においても有機物及び無機物の吸着量が最も多く, 汚染活性度が高い。

2) 清浄な Al 金属表面は, 10^{-6} Pa の高真空中で表面に酸化膜を形成するが, その膜厚は 2 h の露出時間において 1 nm 以下 (3 原子層以下) である。また, 1 気圧の高純度窒素中に 2 h 露出しても, 形成される酸化膜厚は 1 nm 以下で

非常に薄い。

3) 無機物の吸着に関して, Au は S, Cu は Cl を吸着しやすい性質があり, Al はいずれも吸着しない。すなわち, 金属表面は吸着元素に関して選択性を持つ。

4) 水及びアセトンに浸漬して汚染された各蒸着膜のボンディング性は, 大気中及び高純度窒素中の雰囲気によらず, 常温, 373 K のいずれの接合温度においても $Al > Au > Cu$ の順で優れる。

Fig. 18 SEM image and element distribution by EDX of shear fractured surface on Al pad with cleaned or uncleaned surface.

5) 表面清浄化処理を行った各蒸着膜のボンディング性は、大気中及び高純度窒素中の雰囲気での接合温度373 KにおいてAu>Al>Cuの順で優れ、汚染面の場合の順序と比較してAuとAlの順序が入れ替わる。

6) Auの表面清浄化処理を行って高純度窒素中、接合温度373 K、接合荷重0.5 Nでボンディングを行うと、加圧のみで0.4 Nの剪断強度が得られ、超音波出力15 mWの条件では剪断強度が0.5 Nで破断位置が全てAuボール内となる良好な接合部が得られる。

7) Alの表面清浄化処理を行って高純度窒素中、接合温度373 K、接合荷重0.5 Nでボンディングを行うと、加圧のみで0.22 Nの剪断強度が得られ、超音波出力：1.4及び15 mWにおいては剪断強度が約0.5 Nで破断が全てAl膜内の延性破断となる良好な接合部が得られる。

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) T. Suga, T. Fujiwaka, G. Sasaki: Surface Activated Bonding and Its Application on Micro-Bonding at Room Temperature, Proc. 9th Euro. Hybrid Microelectron. Conf., (1993), 314-321.
- 3) 大橋 修, 目黒 奨: アルゴンイオン衝撃表面処理のCuまたはTiの拡散接合への影響, 日本金属学会誌, Vol. 60, No. 3, (1996), 324-330.
- 4) Buckles S.L.: Use of Argon Plasma for Cleaning Hybrid Circuits Prior to Wire Bonding, Proc. 5th Int. Microelectron. Conf., (1988), 383-387.
- 5) H. Haji, T. Morita, K. Arita, H. Nakashima and H. Yoshinaga: Bondability of Gold Wire to Gold-Plated Electrodes, Materi. Trans., JIM, Vol. 34, No. 10, (1993), 960-965.
- 6) 梶原良一, 高橋敏幸, 加藤光雄, 高橋和弥, 渡辺 宏: 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, 溶接学会論文集, Vol. 13, No. 1, (1995), 150-155.
- 7) C.R. Brundle: The application of electron spectroscopy to surface studies, J. Vac. Sci. Technol., Vol. 11, No. 1, (1974), 212-224.
- 8) 柴田雄次, 木村健太郎: 無機化学全書, 丸善, (1975), 131.