

半導体実装におけるAu/Al接合信頼性に及ぼす Al表面自然酸化膜の影響

Effects of a Generated Al_2O_3 Film on the Reliability of Au/Al Joint

柘 植 敦 子^{*(1)} 水 野 薫^{*(2)} 宇 野 智 裕^{*(3)} 巽 宏 平^{*(4)}
Atsuko TSUGE Kaoru MIZUNO Tomohiro UNO Kohei TATSUMI

抄 録

現在半導体デバイスで幅広く用いられているAu/Al接合に及ぼすAl表面自然酸化膜の影響について検討した。実験は、Au/ Al_2O_3 /Al薄膜を用いて、Al酸化膜を介した原子の拡散、及び金属間化合物生成について、25~500℃の範囲でオージェ電子分光法、X線光電子分光法、電気抵抗法及び ^{18}O を使用した2次イオン質量分析法によって調べた。その結果次のことを明らかにした。(1)AuがAl自然酸化膜中を拡散しAlと反応する。(2)加熱に従い、金属間化合物が界面のAl層側に島状に成長する。(3)その挙動が使用中の雰囲気中の酸素の有無で異なる。以上の結果を基に、Al自然酸化膜のAu/Al接合の信頼性に及ぼす影響について考察したので報告した。

Abstract

Effects of a generated film of Al_2O_3 in the system of Au/Al joint widely used in semiconductor devices at present have been studied. In the experiment, an integrated thin film of Au/ Al_2O_3 /Al was used, and the diffusion of Au atoms across through the Al_2O_3 film and the formation of intermetallic compound at temperatures between 25°C and 500°C were observed by using Auger electron spectroscopy, X-ray photoelectron spectroscopy, electric resistance method and secondary ion mass spectrometer with using ^{18}O as a tracer. It has been cleared from test results that, (1) Au diffuses through the Al_2O_3 film and reacts to Al, (2) as temperature rises up, the intermetallic compound grows up in shape of a banded structure at the boundary of the Al layer side, and (3) the behavior of its growth varies with the presence of oxygen in the atmosphere applied. On the basis of the above results, the effects of a generated Al_2O_3 film on the reliability of Au/Al joint are discussed in this paper.

1. 緒 言

近年、電子機器の小型化・高機能化が急速に進む中で、半導体パッケージの高密度化・高信頼化技術がますます重要視されている。半導体パッケージングは、LSIの電極端子を外部端子に電気的に接続すると同時に、外部使用環境からLSIを封止して保護する技術である。この電気的接続は従来よりAl合金で形成されたLSI電極薄膜上にAuボンディングワイヤを接合し、外部端子であるリードフレームや、基板に接続する方式が一般的に採用されている。

パッケージングの高密度化に伴い、電極間隔が80 μm 以下の狭ピッチ接続が要求されるようになり、その場合には、Auボールの径は50 μm にまで極小化され、長期的なデバイスの使用を保証する上でこの接合の信頼性の確保は重要な開発課題となっている。

AuボールとAl電極膜の接合の信頼性については、1970年代より議論されてきた¹⁻⁴⁾。使用中に不良を起こしたものの接合断面を観察

すると、写真1に見られるように、Au/Alの拡散が進行して、接合界面近傍に、ボイドが発生する場合があります、電気的に導通不良を起している⁵⁾。このボイドの発生のメカニズムについては、種々議論されてきた。界面に成長する金属間化合物の変化¹⁾や雰囲気の影響²⁾を調査したものが発表されてきたが、個々のデバイスでの不良発生の有無を統一的に説明できるまでには至っておらず、現在でも使用中の不良発生や出荷前の加熱試験での歩留まり低下の原因の一つとして問題視されている。

本研究では、このボイド発生が、接合後のAu/Alの界面での拡散状態と密接に関係することに着目し、更にその拡散状態が、接合界面に存在するAl表面酸化膜の分散状態、酸化膜中の拡散の有無により左右されていることを想定して、Au/ Al_2O_3 /Al系の拡散対(以下Au/ Al_2O_3 /Al対と略称)を試料としてその拡散挙動を詳細に調査した。

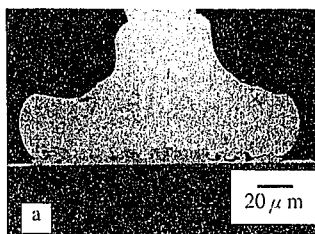
^{*(1)} 技術開発本部 先端技術研究所 解析科学研究部 研究員

^{*(2)} 技術開発本部 先端技術研究所 解析科学研究部

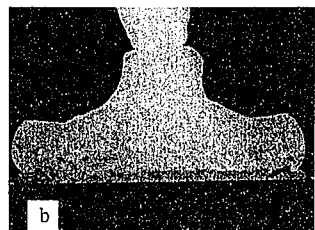
主任研究員

^{*(3)} 技術開発本部 先端技術研究所 新材料研究部 主任研究員

^{*(4)} 技術開発本部 先端技術研究所 新材料研究部 主幹研究員



(a) 大気中175℃100時間アニール(初期シェア破断強度0.37N)



(b) 真空中175℃100時間アニール(初期シェア破断強度0.37N)

写真 1 Auボンディングワイヤ-Al電極接合の断面写真

2. Auボンディングワイヤ/Al電極接合に関するこれまでの知見^{5,6)}

ボンディングワイヤを接続するワイヤボンディング法では、ワイヤをキャピラリーと呼ばれる治具に供給し、その先端をアーク放電によりボール状にし、そのボールをAl電極に超音波を併用した熱圧着方法によって接合する。このときAl電極表面に存在するAl自然酸化膜はAuとAlの塑性変形によって破壊され、接合後のAu/Al界面は図1に示すように、AuとAlが活性面で接合された部分と界面にAl自然酸化膜が残存する部分とが存在している⁷⁾。

Al電極とAuボンディングワイヤの接合部の信頼性はICの長期寿命

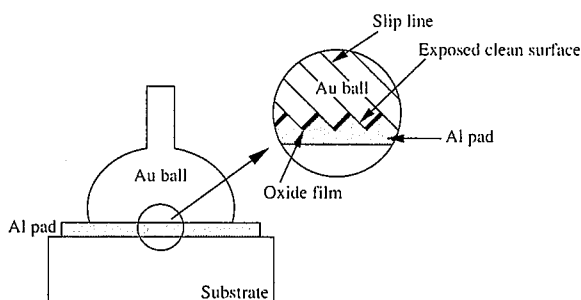


図 1 Au/Al界面における塑性変形によるAlの表面酸化膜の破壊を示す模式図

を保証するために非常に重要であり、寿命予測のためにしばしば加熱加速試験が行われる。その場合、図1に示した接合界面に存在するAl蒸着膜上のAl自然酸化膜がAu/Alの均一な拡散を阻害して接合界面にボイド形成を助長し、ICの動作不良の原因となることがある。

線径25 μmまで伸線したAuワイヤ(純度: >99.999%)の先端をアーク放電によりボール(75 μm φ)を形成し、これをSiチップ上のAl電極(膜厚: 1 μm)上に超音波併用熱圧着方式(初期シェア破断強度0.37N)で接合した拡散対を用いて実験を行った結果では、写真1に示すように真空中で加熱した場合はAu/Al界面における金属間化合物の生成は比較的均一に生じ、ボイドはほとんど発生しない

が、大気中で熱処理した場合はAu-Al拡散層中のボイドの発生が非常に顕著となる⁵⁾。また、一旦真空中で加熱して均一な金属間化合物が生じた場合は、その後大気中で加熱してもボイドの発生は観察されない。一方、最初に大気中で加熱され、不均一な化合物の成長が生じると、その後真空中で加熱してもボイドの発生を抑制することができない。このように同一のAl膜、Auワイヤを用いても、接合の条件や接合後の加熱時の雰囲気により界面に生成する金属間化合物の成長挙動やAu-Al拡散層中に形成されるボイドの発生は大きく異なる⁵⁾。これは、界面に存在するAl自然酸化膜が大気中でバリア層として働き、AuとAlの均一な相互拡散を阻害するために、過剰な原子空孔が消滅せず、クラスタ状になりボイドに成長するためではないかと考えられるが、その詳細は解明されていない。

3. 実験方法

3.1 試料の作製

本研究では、Al酸化膜を介したAu/Al対の拡散挙動を表面濃度変化から調べるため、蒸着によって作製した、多層薄膜を用いた。試料は、表1に示すように、Au膜が存在しない場合のAl酸化膜中へのAlの拡散挙動を明らかにするために(1)Al₂O₃/Al対を、(2)Al₂O₃膜の存在しないAu/Al対、(3)Au/Al₂O₃/Al対の3種類を用いた。作製法を以下に示す。

(1) Si基板上に形成したSiO₂膜上にAl(純度>99.99%)を膜厚1 μm真空蒸着した。蒸着後、真空中(<10⁻⁴Pa)で400℃、30分間焼鈍した後、大気中でAl自然酸化膜を形成させた。形成したAl自然酸化膜はXPS測定による電子取出し角変化法⁸⁾を用いて深さ方向分析を行った。Al酸化物と金属AlのAl-2pのピーク分離を行いその強度比の変化からAl酸化膜厚を求めた結果、約3.2nmであった。また、フーリエ変換赤外分光法(FT-IR)を用いた高感度反射測定法(IR-RAS法)によりAl酸化膜の構造はアモルファスであることを確認した。

(2) SiO₂/Si基板にAl膜を蒸着後、蒸着チャンバー内で連続してAl膜上にAu(純度>99.999%)を膜厚200nm又は50nm蒸着し、Au/Al界面にAl酸化膜が存在しない試料を準備した。

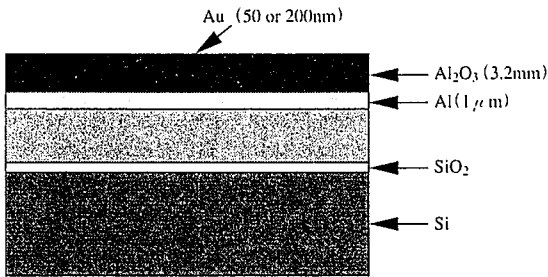
(3) 試料(1)の上にAuを膜厚200nm又は50nm蒸着し、図2に示すようにAu/Al界面にAl酸化膜をサンドイッチした試料とした。

3.2 超高真空チャンバーを用いた拡散実験における表面濃度変化の測定

オージェ電子分光法(AES: ULVAC-PHI AQM808, PERKIN-ELMER PHI600)とX線光電子分光法(XPS: PERKIN-ELMER PHI5500)装置の超高真空チャンバー内で、試料をその場加熱することにより、表面元素濃度の変化からAl酸化膜を介したAu/Al系における原子の拡散について調べた。AESでは局所領域(〜μm φ)の元素分析ができ、XPSでは表面の比較的広い領域(〜mm φ)での各元素の化学状態に関する情報が得られる特徴をもつ。また、超真空中で加熱し、その場観察することにより、特に酸化されやすい金属Al

表 1 試料

Sample No.	Film structure	Thickness of Au (nm)
(1)	Al ₂ O ₃ /Al	
(2)-1	Au/Al	200
(2)-2		50
(3)-1	Au/Al ₂ O ₃ /Al	200
(3)-2		50


 図2 Au/Al₂O₃/Al対の構造

の分析が可能となる。

AESでは電子銃、XPSでは電熱線方式の加熱装置を試料ホルダの下部に設置した。測定は、 10^{-7} Pa以下の真空中で行い、温度は200℃から500℃の範囲で変化させて、その影響を調べた。試料の表面温度は真空チャンパー内に取り付けた熱電対によって測定した。

3.3 遠赤外線炉を用いた拡散実験における電気抵抗変化の測定

電気抵抗測定を用いてAu/Al界面におけるAl酸化膜の有無による金属間化合物の生成過程の相違を調べた。電気抵抗測定は、Au/Al界面反応が生じて金属間化合物が生成されると、その種類や量によって抵抗が変化するため、金属間化合物の生成挙動を観察するのに有効な手段である。

試料は、幅2mm×長さ21mmに蒸着したAu/Al、及びAu/Al₂O₃/Al対を用いた。温度の影響を調べるために150℃～250℃の温度範囲において遠赤外線炉を用いて等温焼鈍を行った。また、焼鈍雰囲気の影響を観察するために、100℃～300℃の温度範囲において、真空中、及び大気中30分間焼鈍(等時焼鈍)を行った。焼鈍後の試料について室温大気中において4端子法で電気抵抗を測定した。温度の影響についてはCross-cut法により、金属間化合物成長の見かけの活性化エネルギーを求めた。なお、Au/Al対及びAu/Al₂O₃/Al対を真空及び大気中で250℃、30分間焼鈍した場合の金属間化合物の形状の変化についてはSEMを用いて観察した。

3.4 トレーサーを用いた拡散実験

2章で述べたように、Auボンディングワイヤ/Al電極接合対を真空中及び大気中で熱処理した場合はAu/Al界面における金属間化合物の生成に明らかに違いがあるという結果を得ている。そこで、更にAl酸化膜を介したAu/Al拡散に及ぼす熱処理雰囲気の影響を明確にするために雰囲気ガスにトレーサーを用い、金属間化合物生成の挙動を観察した。大気中で拡散対を熱処理したときに酸素がどこを拡散するか、また界面で新たに酸化物を生成するか検討するために、トレーサーとして¹⁸Oを用い、2次イオン質量分析法(SIMS: CAMACA IMS-3F型)によって酸化挙動解析を行った。酸化するときの雰囲気中に¹⁸Oを用いることにより、元々試料中に存在していたAl酸化膜中の酸素である¹⁶Oとの区別ができ、酸化時の酸素の拡散経路等の解析が可能となる。試料を¹⁸Oガスとともにガラス管に封入し、電気炉を用いて250℃、4時間焼鈍を行った後測定を行った。一次イオンとしてCs⁺を用い、二次イオンとして¹⁶O⁺、¹⁸O⁺、²⁷Al⁻、¹⁹⁷Au⁻を検出した。

4. 実験結果及び考察

4.1 Al酸化膜を介したAu/Al系における原子の拡散

図3(a)にAES装置内真空加熱実験の結果を示す。図中の■印は、Au/Al対(試料(2)-1)におけるAuに対するAlのピーク強度比(I

(Al)/I(Au))、○印は、Au/Al₂O₃/Al対(試料(3)-1)におけるAuに対するAlのピーク強度比(I(Al)/I(Au))、及び●印は、Au/Al₂O₃/Al対におけるAuに対するOのピーク強度比(I(O)/I(Au))である。測定ピークは他元素ピークと重ならないようにAu(239eV)、Al(1396eV)、O(503eV)を選択した。

Al酸化膜中のAlと金属Alとの表面濃度変化を図3中△印で示した。ここで、Al酸化膜中のAl(Al³⁺ 51eV)と金属Al(Al⁰ 68eV)のオージェスペクトルの間には図3(b)に示すような化学シフトが見られるためピーク分離が可能であり、それぞれのピーク強度から、Al酸化膜中のAlと金属Alの濃度を見積り比較した。

図に示すように、Au/Al対では、ピーク強度比I(Al)/I(Au)(■印)は、100℃から350℃の範囲では温度の上昇とともに増加し350℃で一定となる。一方、Au/Al₂O₃/Al対では、I(Al)/I(Au)(○印)は200℃以下では変化せず、200℃以上で増加し始める。このことから、Au/Al拡散が開始する温度は、Au/Al₂O₃/Al対ではAu/Al対に比較して約100℃高温側にシフトするのが分かる。これは、Al酸化膜がAu/Al拡散のバリアとして作用した結果と考えられる。

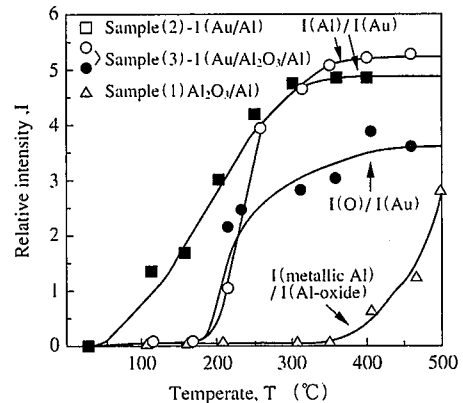
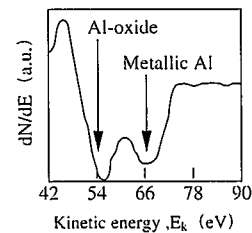


図3 (a) 表面濃度の温度依存性


 図3 (b) Al LMMのオージェスペクトル
図中矢印はAl酸化膜中のAl(Al³⁺ 51eV)と金属Al(Al⁰ 68eV)のピーク

更に、図中●印で示したようにAu/Al₂O₃/Al対では、200℃以上の表面においてOピークも観察された。検出されたOピークについてはAl酸化膜に起因するもの、もしくは吸着酸素によるものと考えられる。そこで、スパッタによって活性面を露出させたAlを真空チャンパー内に2h保持し吸着酸素の影響を調べたがOピークは検出されず、吸着酸素の影響は無視できることを確認した。従って実験中に検出されたOピークはAl酸化膜に起因すると考えられる。これは加熱前にAu/Al界面に存在していたAl酸化膜が表面に露出したことを、すなわち、AuとAlの拡散反応により金属間化合物が生成されたならばそれは、Al酸化膜の下部に生成された可能性を示している。

一方、△印で示すように、金属Alは350℃以下では $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 対の表面では観察されず、表面は350℃までAl酸化膜で覆われている。Al酸化膜上にAu膜が存在するAu/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 対では、Alが表面で観察される温度は200℃であり、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 対における検出温度より約150℃低温である。これらのことから、Au/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 対においては、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 対におけるAlがAl酸化膜中を拡散する温度より低温で、AuがAl酸化膜中へ拡散することにより、金属間化合物が生成していると考えられる。

更に、AuのAl酸化膜中への拡散を確認するために、250℃、30分間焼鈍したAu/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 対の断面をSEMを用いて観察した結果を写真2に示す。この熱処理条件は、図3(a)よりAu/Al拡散の初期段階に相当すると考えられる。SEM像では、Au-Al金属間化合物が、Al膜中に扇形に広がっている。これは、局所的にAuがAl酸化膜中を拡散してAl層に到達した所から、金属間化合物がAl膜中に成長したことを示している。なお、Au-Al金属間化合物は AuAl_2 、 AuAl 、 Au_2Al 、 Au_5Al_2 、 Au_4Al の5種類あることが知られているが⁹⁾、今回の実験においてAuが消失した段階で生成された層はX線回折により、 Al_2Au 構造であることを確認した。

以上の結果から推測されるAu/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 対の拡散過程を模式的に図4に示す。AuがAl酸化膜中を局所的に拡散してAl膜に達し、到達箇所とAlと反応して Al_2Au を生成し、 Al_2Au はAl膜中に成長すると考えられる。また、 Al_2Au は表面のAuの供給を受けて島状に成長する。その結果Al酸化膜が拡散バリアとして作用していた部分のAuも次第に消失して、Al酸化膜が表面に露出することになる。

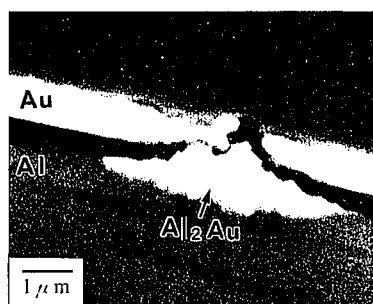


写真2 Au/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 対の断面SEM像

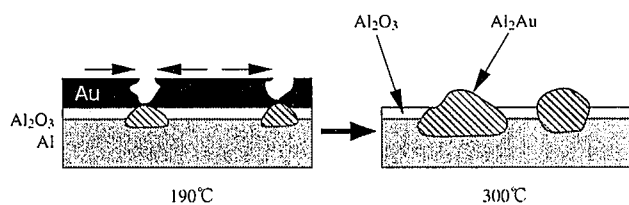


図4 Au/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 対における拡散過程の模式図

4.2 Au/Al拡散及びAu/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 拡散における金属間化合物層成長の見かけの活性化エネルギー

AES内加熱実験により、Au/Al拡散において大気中放置により作製したAl酸化膜が拡散のバリアとして働くことが示された。更にAl酸化膜の有無によるAu/Al拡散について定量的に検討を行なうために、等温焼鈍を行い電気抵抗の時間変化からAu/Al拡散及びAu/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 対における金属間化合物層成長の見かけの活性化エネルギーを求めた。

図5(a)は、Au/Al対をそれぞれ160℃(■)、210℃(▲)、250℃(●)の温度で保持したときの電気抵抗の時間変化を示す。また図5(b)はAu/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 対を200℃(▲)、220℃(■)、235℃(●)の温度で保持したときの電気抵抗の時間変化を示す。Au/Al対においても、Au/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 対においても、時間経過に従い電気抵抗は高くなり一定値に近づく。この電気抵抗の上昇はAuとAlが拡散し金属間化合物層が形成された結果と考えられる。

次に、Cross-cut法に従い、 $1/T$ (T : 焼鈍温度)に対して総変化量(250℃で150min熱処理したときの変化量)の約30%になるのに要した時間を t の対数 $\ln(t)$ をプロットして図6に示す。●印はAu/Al対、▲印は、Au/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 対におけるアレニウス・プロットである。各直線の傾きより金属間化合物層成長の見かけ上の活性化エネルギーは、それぞれ72kJ/mol(0.75eV)、110kJ/mol(1.1eV)と得られた。この活性化エネルギーの相違は、金属間化合物の生成挙動がAl酸化膜の有無によって異なることを示しており、更にAu/ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$ 対における活性化エネルギーの値が大きいということは、Al酸化膜がAu/Al拡散のバリアとして作用している結果と考えられる。

Au/Al拡散による金属間化合物成長の活性化エネルギーについては、これまでいくつかの報告がなされている¹⁰⁻¹⁵⁾。本実験で得られたAu/Al拡散の金属間化合物成長の活性化エネルギー72kJ/mol(0.75eV)は、Kashiwabaraら¹⁰⁾がAu/Alワイヤ対を用いて測定した75.42kJ/mol(0.78eV)と良く一致している。しかし、他の報告による活性化エネルギー値は、53.0kJ/mol(0.55eV)¹⁴⁾、115.8kJ/mol(1.2eV)¹⁵⁾などの異なった値が報告されている。今回の測定結果から明らかにように、Al自然酸化膜の存在する場合としない場合とでは、Au/Al拡散による金属間化合物層成長の活性化エネルギーが大きく異なる。従って試料作製時にAlが大気にさらされる等、Al酸化膜が形成される可能性がある場合

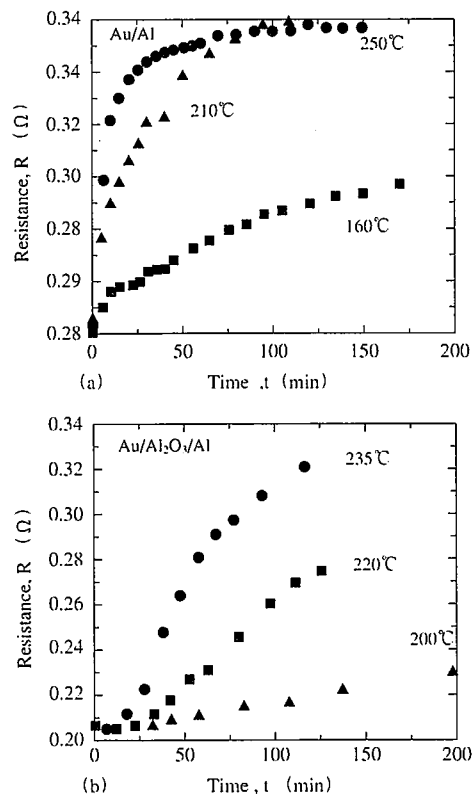


図5 各温度における電気抵抗変化のアニール時間依存性(室温測定)

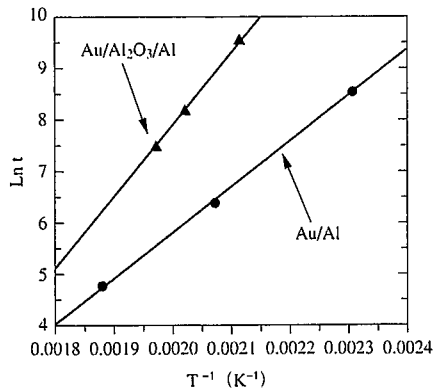


図 6 Au/Al 及び Au/Al₂O₃/Al における T⁻¹ に対する Ln t のアレニウス・プロット

には、Al酸化膜の存在やその構造を明確にして、金属間化合物層成長の活性化エネルギーを考察する必要がある。

4.3 Au/Al₂O₃/Al 拡散における雰囲気内酸素の影響

3.4節で述べた熱処理を施した試料のSEM像を写真3に示す。写真(a)真空中で熱処理したAu/Al対、(b)真空中で熱処理したAu/Al₂O₃/Al対、(c)大気中で熱処理したAu/Al₂O₃/Al対である。界面にAl酸化膜が存在しないAu/Al拡散(a)においては、金属間化合物は均一に生成する。しかし、界面にAl酸化膜の存在するAu/Al₂O₃/Al対(b)、(c)では、局部的に拡散が生じ金属間化合物は島状に生成する。特にその局所的な拡散は、大気中で熱処理したときに顕著となる。大気中で熱処理を行った場合、金属間化合物が生成する箇所は、真空中で熱処理を行った場合と比較して減少しているのが分かる。

次にAu/Al₂O₃/Al対を真空中及び大気中で250℃、30分間熱処理した後、XPS測定を行った結果得られたAu-4fピークの変化を図7に示す。真空中で加熱した場合、ピークは高エネルギー側にシフトしておりAl₂Auに相当する金属間化合物が生成したことを示している。

一方、大気中で加熱した場合、Au-4fのシフトはほとんど見られずピーク幅だけが広がっていた。これは、金属状態のままのAuとAl₂Auが混合していることを示す。XPSスペクトルが数mm径の測定領域からの平均情報であることを考慮すると、このAu-4fスペクトルは、面積比の大きいAl酸化膜の上に拡散せずに残存しているAuからの情報が大部分を占め、これに若干のAl₂Auが重なっているものと考えられる。

更に、Au/Al₂O₃/Al対とAu/Al対を真空中及び大気中で100～300℃、30分間焼鈍した後、室温大気中で電気抵抗測定を行った結果を図8に示す。図中●印は真空中でAu/Al₂O₃/Al対を焼鈍した電気抵抗の変化率($\rho_T - \rho_0$)/ ρ_0 を示し、○印は大気中でAu/Al₂O₃/Al対を焼鈍した電気抵抗の変化率を、更に▲印は真空中で酸化膜の存在しないAu/Al対の電気抵抗の変化率を示す。Au/Al拡散の結果より(▲)、AuとAlが反応して金属間化合物が形成されるに従い電気抵抗の変化率は増加する。また、このとき100～200℃及び250℃以上の温度範囲にステージが見られるが、低温側のステージに関してはAlAu₂の生成過程に、また高温側はAl₂Au生成に対応していることをX線回折により確認しており、電気抵抗の増加は金属間化合物の成長過程に相当すると考えられる。

図8の結果より、大気中で熱処理した場合の電気抵抗の変化(○)は、真空中で熱処理した場合の変化(●)よりも高温側にシフトする。これは、大気中で熱処理した場合は金属間化合物の生成が遅れ

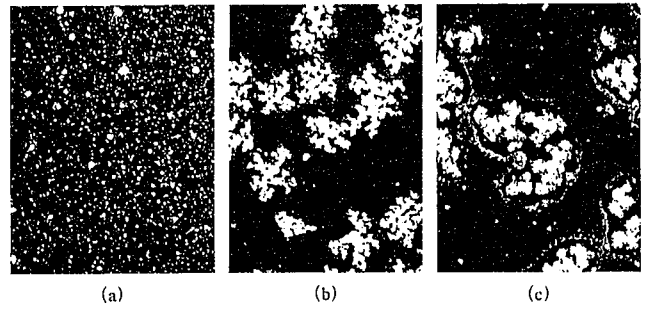


写真 3 SEM像(a)真空中アニール処理のAu/Al対(b)真空中アニール処理のAu/Al₂O₃/Al対(c)大気中アニール処理のAu/Al₂O₃/Al対

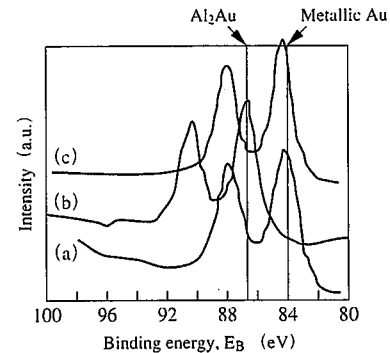


図 7 Au/Al₂O₃/Al 対の Au-4f ピーク
(a) アニール前 (b) 真空中アニール (c) 大気中アニール

たとえられ、その原因としてAuとAlの反応過程で、大気中ではAl酸化膜がバリアとしてより強く作用し、Al酸化膜中へのAuの拡散が、より局在化すると考えられる。この結果は、図7に示したXPSの結果とも良く一致している。

更に、AuがすべてAlと反応し最終的にAl₂Auが生成した350℃では、Au/Al₂O₃/Al対の電気抵抗変化率の方がAu/Al対と比較して大きい。これは、写真3に示したSEMの観察結果から推測すると、金属間化合物の形状の違いによるもの、すなわちAu/Al対では金属間化合物は均一に生成するが、Au/Al₂O₃/Al対では島状に生成する結果と考えられる。

以上の結果を基に図9に真空中及び大気中の焼鈍による金属間化合物生成過程を模式的に示す。界面に酸化膜が存在しない場合は拡散は均一に生じる。界面に酸化膜が存在する場合の拡散は島状に局在化される。これは、Al酸化膜がAu/Alの拡散を障害し、金属間化

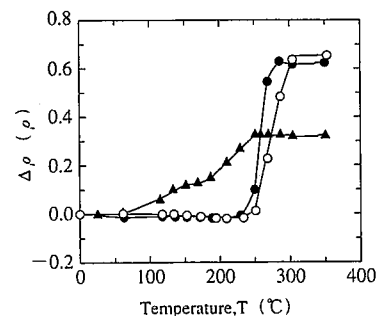


図 8 アニール温度と比抵抗の関係
○大気中で熱処理したAu/Al₂O₃/Al対
●真空中で熱処理したAu/Al₂O₃/Al対
▲真空中で熱処理したAu/Al対

化合物はAuがAl酸化膜中のクラックやピンホールを拡散し、Alと反応して生じるためと考えられる。更に、Al酸化膜が界面に存在する場合でも、真空中で熱処理を行った場合は、大気中で熱処理した場合と比較してより多くの場所で、AuがAl酸化膜中を拡散しAlと反応して金属間化合物を形成する。しかし、大気中で熱処理を行った場合は、Al酸化膜中のAuの拡散可能な経路が真空中の熱処理と比較して減少し、その結果金属間化合物の生成はより局所化され、その成長は島状になる。これは、大気中で熱処理した結果、酸素の供給も同時に生じ、Al酸化膜中のAl-richな領域や、Al酸化膜の下にAl膜を酸化するために、Al酸化膜が連続的になり、Auの拡散経路が減少したと考えられる。

図10は ^{18}O 雰囲気中で熱処理した、Au/Al $_2$ O $_3$ /Al対の断面における(a) ^{18}O の分布、(b)Alの分布を示したものである。図10(b)より、熱処理後の拡散対では、熱処理前のAu/Al $_2$ O $_3$ /Alの層構造は壊れ、Au膜中でもAlが検出され、図9で模式的に示したように、金属間化合物の生成はAl酸化膜を介し部分的に生成している。また、図10(a)よりAu/Al界面付近に ^{18}O がライン状に存在しているのが分かる。これは、熱処理中に ^{18}O がAu中を拡散し界面でAlと反応したと考えられる。すなわちAu/Al $_2$ O $_3$ /Al対を大気中で熱処理することにより、酸素はAu中を拡散し、Al酸化膜の存在するAu/Al界面でAlを更に酸化する。この酸化により、Al酸化膜は連続的になり、Auの拡散経路が減少するのではないかと考えられる。すなわち、Al酸化膜が連続的になることによりバリアとしてより有効に作用し金属間化合物の形成を妨げると考えられる。

以上の結果から、薄膜を使用した実験より、Au-Al金属間化合物の生成は、Al酸化膜の影響を受けて、真空中と大気中とは異なること

が明らかとなった。この違いはAuボンディングワイヤ/Al電極界面におけるAu/Al拡散において見られた結果と一致する。前述したが、Auボンディングワイヤ/Al電極接合対を真空中で熱処理すると、金属間化合物は均一に生成するが、大気中で熱処理すると不均一となりボイドの発生が見られる。このボイドの発生は、Au/Al相互拡散による層の成長方向の不均一性によってカーケンダルボイドが成長して発生したと考えられる⁵⁾。更に今回の実験結果から考察すると、大気中で熱処理を行った場合、酸素の供給によって界面でAl酸化膜は連続的になり、バリアとしてより有効に作用するため、Al酸化膜が起因となってAu/Al相互拡散の不均一が生じたと考えられる。

4. 結 言

Au/Al接合に及ぼすAl酸化膜の影響について、新たな実験手法として蒸着によってAl酸化膜の存否を制御したAu/Al $_2$ O $_3$ /Al薄膜のモデル系を作製し、超高真空中での加熱表面分析、電気抵抗の変化測定、及び ^{18}O を使用した酸化機構の解析を実施した。その結果、以下のことを明らかにした。(1)AuがAl自然酸化膜中を拡散し、Alと反応して金属間化合物が界面のAl層側に島状に成長する。(2)Al自然酸化膜はその反応のバリアとなる。(3)熱処理雰囲気中に酸素が存在する場合はAl酸化膜は連続的となり、バリアとして有効に作用するため、金属間化合物の生成はより局在化する。

Auボンディングワイヤ/Al電極界面における接合はAl酸化膜を接合時に破壊してAu/Al金属接合を行うことが必要であるが、本研究により、その場合界面に存在する自然酸化膜中の拡散も最終的な接合状態に影響していることが明らかとなった。本実験で使用したAl酸化膜としては比較的欠陥の多いアモルファスの、約3.2nm厚の薄いAl自然酸化膜を使用して基本的現象を明らかにしたが、実工程におけるAu/Al接合の信頼性を議論する場合には、Al表面酸化膜の状態、更にはデバイスの製造工程中にAl電極上に厚い酸化膜や結晶化したAl $_2$ O $_3$ 膜、ふっ化物等が形成される可能性等、十分に考慮する必要がある。

参考文献

- 1) Philofsky, E. : Solid-State Electronics. 13, 1391 (1970)
- 2) Rossiter, T. J. : Annual Reliability Physics Sym. 186 (1970)
- 3) Gerlling, W. : Proceedings IEEE Electron Component Conference. 13 (1984)
- 4) Fooyner, P. K., Richards, B. P., Stephens, C. E., Amos, C. T. : IEEE/IRPS. 102 (1986)
- 5) Uno, T., Tatsumi, K., Ohno, Y. : Proceeding of the Joint ASME/JSME Advances in Electronic Packaging. 2, 771 (1992)
- 6) 龔宏平, 宇野智裕, 柘植敦子 : 第47回マイクロ接合委員会試料, MJ-254-95, 17 (1995)
- 7) 石坂彰利, 岩田誠一, 山本博司 : 日本金属学会誌. 41, 1154 (1977)
- 8) Briggs, D., Seah, M. P. : Practical Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, (1983), 165p
- 9) Majni, G., Nobili, C., Ottaviani, G., Costato, M. : J. Appl. Phys. 52 (6), 4047 (1981)
- 10) Kashiwabara, M., Hattori, S. : Review of the Electrical Communication Laboratory. 17, 1001 (1961)
- 11) Weaver, C., Brown, L. C. : Phil. Mag. 7 No.9, 1 (1961)
- 12) Fouracre, R. A. : Thin Solid Films. 135, 189 (1986)
- 13) 大西正巳, 福本弘一 : 日本金属学会誌. 38, 148 (1974)
- 14) Chen, G. K. C. : IEEE Trans. on Parts, Materials and Packaging PMP-3. No4 (1967)
- 15) Campisano, S. W., Forti, G., Rimini, E. : Phil. Mag. 31, 903 (1975)

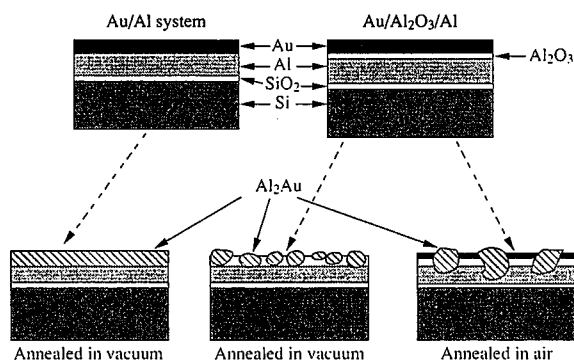


図9 各熱処理雰囲気におけるAu-Al金属間化合物成長モデル

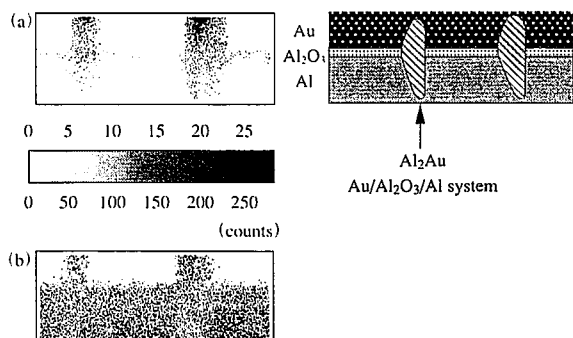


図10 ^{18}O 雰囲気中で200℃、2時間アニール処理したAu/Al $_2$ O $_3$ /Al対の断面におけるイオン・イメージ、(a) ^{18}O イメージ(b)Alイメージ