銅電析による微細孔埋め込みにおける アセトニトリルの役割

小野 俊昭^{***}, 薦田 康夫^{*}, 板垣 昌幸^{**}

^{*}三井金属鉱業(株) 総合研究所(〒362-0021 埼玉県上尾市原市 1333-2)

^{**}東京理科大学 理工学部(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

Role of Acetonitrile in Via-Filling by Copper Electrodeposition

Toshiaki ONO^{***}, Yasuo KOMODA^{*} and Masayuki ITAGAKI^{**}

^{*}Corporate R and D Center, Mitsui Mining and Smelting Co., Ltd.(1333-2, Haraichi, Ageo-shi, Saitama 362-0021)

^{**}Faculty of Science and Technology, Tokyo University of Science(2641, Yamazaki, Noda-shi, Chiba 278-8510)

Copper electrodeposition from the electrolyte composed of acid copper sulfate and acetonitrile was investigated with electrochemical techniques. The current efficiency of the copper electrodeposition was measured by the rotating disk electrode, and it was found that the current efficiency decreased with the increase of the rotation rate and the decrease of current density. These results indicated that the electrodeposition with the electrolyte composed of acid copper sulfate and acetonitrile was able to fill the Vias with copper by selecting of the proper flow rate and current density.

Keywords : Acetonitrile, Via-Filling, Copper, Electrodeposition

1. 緒 言

半導体デバイスの高集積化, 微細化は急速な進展を見せており, これまでのアルミニウム配線に代わり, 低抵抗でありエレクトロマイグレーション耐性に優れた銅配線の実用化が進められている^{1)~3)}。銅ではアルミニウムとは異なり, ドライエッチングで微細な配線パターンを形成することは困難である。そのため, 絶縁体層の配線パターンに相当する箇所には孔や溝を形成した後, 孔(溝)を銅で充填し化学機械研磨(CMP)により余分な金属を取り除いて配線を形成する, いわゆるダマシン法が用いられる^{1),3),4)}。

この微細な孔への銅の埋め込みめっき用電解液には, 酸性の硫酸銅電解液が広く使用されている。酸性硫酸銅電解液中には, キャリア(サブレッサ), ブライトナ(アクセラレータ), レベラといわれる3種類の有機添加剤と塩化物イオン(Cl⁻)が必要とされ, 効果はそれぞれ以下のように説明されている。ポリエチレングリコール(PEG)やポリプロピレングリコール(PPG)などが知られているキャリアは, 電析反応を抑制する効果を有するといわれている^{5),6)}。たとえばPEGは, Cl⁻存在下においてCu(I)と錯体を形成し, 銅表面に吸着することによって電析反応を抑制させる働きがあると報告されている^{7)~9)}。PEGやPPGは, 高分子であるため微細孔の底部に入り込み難く, ウエハ表面に溜まる性質を有しているといわれている^{10),11)}。Takadaら¹⁰⁾は, PEG(分子量4000)の大きさについて具体的には記していないが, 実験に用いたウエハのトレンチの幅が250 nmであるので, それ以上の大きさであることを示している。そのため, ウエハ表面に比べて

微細孔底部の電析速度を相対的に速める効果を有する。ビス-3-スルホプロピルジサルファイド 2 ナトリウム(SPS)や3-メルカプト-1-プロパンスルフォネート(MPS)などが知られているブライتناは, めっき作用を促進する働きがあるといわれている^{5),6)}。SPS(分子量309)に関しては, 前述のキャリアに比べ分子量が小さいので, 孔の内部にもスムーズに進出し, 孔底部における銅電析速度を促進させるといわれている¹⁰⁾。ヤーナスグリーンB(JGB)やチオ尿素, ベンゾトリアゾールなどが知られているレベラは, キャリアと同じ表面に吸着して電析を抑制する働きがあるといわれている^{5),6)}。JGBに関しては, 吸着作用が拡散により支配され, 流速が大きい部分に多量に吸着して電析反応を抑制する¹⁰⁾。よって, 流速の小さい孔底部などでは吸着が少なくなり電析反応が促進され, 流速の大きい表面部ほど多量に吸着し, 電析反応を抑制する。その結果, 銅電析膜はレベリングの高いものになるといわれている。Cl⁻は, アノード溶解を促進しアノードスライム発生を抑制させる働きをもつといわれている^{10),11)}。このように, それぞれの添加剤の機能の組合せによって埋め込みを実現させている。

ところで, 著者らはアセトニトリル(AN)を含む酸性硫酸銅電解液(AN電解液)を用いることによって, 111面の優先結晶配向性銅膜が得られることを報告した¹²⁾。その試験において, この電解液は, 電流密度や流速の差異によって, 電流効率が大きく変化することがわかった(未発表)。よってAN電解液を用い, 流速や電流密度を制御することにより, 電流効率, つまり銅の電析量を局所的に制御できると考えられる。先に挙げた微細孔への埋め込み用電解液に用いられる添加剤

は、電流効率を変化させるものではないのに対し、AN 電解液は電流効率を変化させるものであり、先の 4 種類の添加剤とは異なる作用を有する添加剤として期待できる。そこで本報では、AN 電解液の分極曲線や電流効率の測定を行い、微細孔への銅埋め込み用電解液としてすでに報告されている典型的な組成^{13)~16)}と比較しながら AN 電解液からの銅電析の電流効率に変化する様子とそのメカニズムについて考察した。さらに、AN を添加した電解液を用い微細孔への銅埋め込みを行い、新たな機能を有する添加剤としての可能性を検討した。

2. 実 験

2. 1 分極曲線の測定

電解液の調製は、硫酸銅五水和物(CuSO₄・5 H₂O) (和光純薬, 特級), 硫酸(H₂SO₄) (和光純薬, 特級) およびアセトニトリル(CH₃CN) (和光純薬, 特級)を用い, 脱イオン水により調製した。電解液の銅濃度および硫酸濃度は、微細孔への銅埋め込み用として報告されている組成(CuSO₄ 0.24 mol/dm³ および H₂SO₄ 1.8 mol/dm³) に統一した^{13)~16)}。分極曲線の測定に用いた 3 種類の電解液組成を表 1 に記す。なお、本実験では AN 電解液中に Cl⁻ を添加していない。緒言で述べたように、一般的な電解液では Cl⁻ を添加しないとスライムが発生するが、AN 電解液では、Cl⁻ がなくてもスライムは発生しない。これは Cu(I) が AN と安定的な錯体を形成するためと考えられる(3.4 節参照)。

分極曲線の測定は、回転ディスク電極装置(北斗電工, HR-201 および HR-202)により行った。対極は銅線(ニラコ, 99.9%), 参照極は飽和カロメル電極(SCE) (東亜 DKK, HC-205 C)を使用した。なお、本報での電位はすべて SCE 基準である。電極面積 0.2 cm² の白金ディスク電極(北斗電工, HR-D 2)上に、30°C の CuSO₄ 0.5 mol/dm³ および H₂SO₄ 1.0 mol/dm³ からなる電解液を用い、-0.4 V の一定電位で 30 s 間銅を電析したものを作用極とした。カソード分極曲線の測定には、表 1 に示した 3 種類の電解液を用い、0, 500 および 2000 rpm の電極回転数にて浸漬電位から卑な方向に 100 mV/min の電位走査速度で行った。電解液の温度は 30°C とした。

2. 2 電流効率の測定

電流効率は、回転ディスク電極装置を用い、電析電気量と溶解電気量の比から算出した。電流効率は、電析および溶解のいずれにおいても、式(1)に示す反応で進行するとして計

算した。

電極上への銅の電析には、表 1 に示した 3 種類の電解液を用い(電解液の温度は 30°C), 作用極は電極面積 0.2 cm² の白金電極, 対極は銅線(ニラコ, 99.9%), 参照極は SCE を使用した。それぞれの電解液で電流密度を制御し、電極回転数は 0, 500 および 2000 rpm で電析させた。このとき、通電電気量は 6.75 C/cm² の一定とした。銅の電析量は、アノード分極し、その溶解反応に消費された電気量より算出した。銅が電析した電極を CuSO₄ 0.5 mol/dm³ および H₂SO₄ 1.0 mol/dm³ の溶液中において、0.2 V で白金電極上の銅を電気化学的に溶解させ、溶解電流密度が 2 mA/cm² 未満となったときを終点とし、流れた電気量をクーロンメーターにより測定した。

銅の電析量を溶解電気量から算出する方法を採用したのは、誘導結合プラズマ発光分析装置(ICP)などの分光分析法に比べて分析時間を短縮できるためである。なお、本法によって求められる銅の電析量は、銅を溶解後、ICP(エスアイアイナノテクノロジー, SPS 3000)で求めた値と比較し、常に 4 %低い値となった(ICP で 100 % のとき、本法では 96.02 % および 95.96 %)。よって本報で求めた結果で差を議論する場合、10%以上の差がある場合とした。

2. 3 微細孔への銅の電析

銅の埋め込みは、窒化タンタル、タンタルバリア層を順次形成し、最表面に約 10 nm の銅シード層を形成させた微細孔(径: 150~200 nm, 深さ: 約 700 nm)を有する加工済みのシリコンウエハ(グローバルネット社製)を 1.5 cm×1.1 cm に切り出し、カソード電極として使用した。微細孔への銅電析はシリコンウエハ用精密めっきセル(山本鍍金試験器, マイクロセル I 型)を使用した。露出面積が 1.4 cm² となるように、1.4 cm×1.0 cm の窓を設けたテフロン製マスクでシリコンウエハカソードを被覆した。アノードには銅板を使用し、アノード電極窓の面積は 0.96 cm² とした。電解液の温度は 25°C, 電解液量は 0.25 dm³ とした。表 1 に示した 3 種類の電解液を用い、アノードとカソードの間の電解液を約 0.8 あるいは 2.5 Hz でかく拌棒を揺動させながら、ポテンシオスタット(北斗電工, HA-151)を使用し、所定の電流密度にて電析した。電解液中への電極浸漬と同時に所定の電流を印加した。通電電気量は、1.44 C/cm² の一定とした。電析後のウエハ電極を水洗し乾燥させ、試料の断面観察を集束イオンビーム加工観察装置/走査型イオン顕微鏡(FIB-SIM) (エスアイアイナノテクノロジー, SMI 9200)により行った。

3. 結果および考察

3. 1 分極曲線の測定

表 1 に示した典型電解液(A 浴), 添加剤フリー電解液(B 浴)および AN 電解液(C 浴)を用い、電極回転数を変化させた場合のカソード分極曲線測定を行った。その結果を図 1 に示す。図 1 において、A 浴では 0~-0.3 V の電位領域で、電極回転数の増加にともない電流値が減少する傾向が観察された。この傾向は、Kondo ら¹⁷⁾ および Miura ら¹⁸⁾ により報告されている結果とよく一致しており、電析反応抑制剤とし

Table 1 Composition of electrolytes used for copper electrodeposition.

	Typical electrolyte (Bath A)	Additive-free electrolyte (Bath B)	AN electrolyte (Bath C)
CuSO ₄	0.24 mol/dm ³	0.24 mol/dm ³	0.24 mol/dm ³
H ₂ SO ₄	1.8 mol/dm ³	1.8 mol/dm ³	1.8 mol/dm ³
CH ₃ CN			2 mol/dm ³
Cl ⁻	50 ppm		
PEG	300 ppm		
MPS	2 ppm		
JGB	5 ppm		

て作用する JGB の吸着が拡散支配によるためと説明されている。一方、B 浴および C 浴では、そのような傾向は観察されなかった。また、図 1 (b) および (c) を比較し、AN の添加の効果を見ると、浸漬電位が、B 浴では 0.044 V であるのに対し、C 浴では -0.076 V であり、大きく卑側にシフトしていた。

3. 2 電流効率の測定

表 1 に示した 3 種類の電解液をそれぞれ用い、回転ディスク電極装置によりさまざまな電流密度における電流効率を測定した。なお、電極回転数は 500 rpm とした。結果を図 2 に示す。図 2 より、A 浴では、100 mA/cm² 以下の電流密度領域において 80% 以上の電流効率を維持し、200 mA/cm² で電流効率が 26.5% まで低下した。同様に B 浴でも 100 mA/cm² 以下の電流密度領域において 80% 以上の電流効率を維持し、200 mA/cm² で電流効率が 72% にまで電流効率が低下した。これらの電流効率の低下は、図 1 に示した分極曲線測定結果からわかるように、副反応である水素発生による。一方、C 浴では、10 mA/cm² 以下の電流密度において銅は電析されず、10 mA/cm² から 200 mA/cm² まで、電流密度の増加にともない電流効率が 0% から 67% まで増加した。電流密度が大きくなるにしたがい、電流効率増加の傾きは小さくなった。

B 浴と C 浴では、流速(電極回転数)に対する電流量の変化に違いはみられなかった(図 1)が、電流効率においては両者に大きな違いがあることがわかった(図 2)。

Fig. 2 Current efficiencies of the electrodeposited Cu on Pt rotating disk electrode at 30°C. The rotation rate was 500 rpm. The total charge was 6.75 C/cm². Electrolytes were (a) typical electrolyte, (b) additive-free electrolyte and (c) AN electrolyte.

Fig. 1 Polarization curves of Cu rotating disk electrode at the rotation rates of (i) 0, (ii) 500 and (iii) 2000 rpm. Potential sweep rate was 0.1 V/min. Electrolytes were (a) typical electrolyte, (b) additive-free electrolyte and (c) AN electrolyte. The temperature of the electrolyte was 30°C.

3. 3 電流効率に対する流速の影響

銅の電流効率に対する流速の影響について検討した。表 1 に示した 3 種類の電解液を用い、電極回転数を 0 および 2000 rpm と変化させた場合の電流効率を測定した。なお、図 2 の電極回転数が 500 rpm の場合の結果も併せて図 3 に示した。A 浴および B 浴では、電極回転数が 500 および 2000 rpm において、実験を行った 0~20 mA/cm² のすべての電流密度においてともに高い電流効率を維持し、有意な差はなかった。しかし、電極回転数が 0 rpm の場合、電流密度が大きくなるにしたがい電流効率は大きく低下した。これは、前節で記したように、水素発生反応が起こっているためである。一方、C 浴では、電極回転数が 500 および 2000 rpm において電流効率は 16% 未満と著しく低く、10 mA/cm² 以下の電流密度においては銅の電析は起こらなかった。しかし、電極回転数が 0 rpm の場合、5 mA/cm² においても銅の電析が観察され(電流効率 25%)、電流密度が 20 mA/cm² では電流効率が 63% であった。これは、同じ条件下での AN を含まない A 浴の 42%、B 浴の 53% よりも高い。AN 電解液では、流速が小さいほど電流効率が高くなる特徴があることがわかった。

3. 4 電流効率に影響を与える要因

銅の電析反応は、一般には以下の反応で表される¹⁹⁾。

AN 電解液では、電流効率が約 60% 以下であり、電流密度や流速でその電流効率が大きく変化した(図 2 および図 3)。つまり、AN 電解液を用いた電析においては、式(2)および(3)で示される銅の電析以外の反応も寄与していると考えられる。

AN は Cu(I) と錯体を形成するため、AN を含む硫酸溶液中においては Cu(I) が安定となり、以下の均化反応(不均化反応の逆反応)が起こる^{20)~22)}。

式(4)は、カソード反応およびアノード反応で構成され、それぞれの反応は以下である。

AN 電解液中では、式(4)で示されるように、Cu(II) による銅の溶解反応が起こっており、これが電流効率が低下する原因になっていると予想される。そこで、本条件下において AN 電解液中で銅の溶解が起こるのか溶解試験を実施した。6.75 C/cm² の銅が電析した白金ディスク電極を、電極回転数 500 rpm にて 30°C の C 浴中に浸漬させた。白金と銅では浸漬電位が異なるため、溶解の終点では浸漬電位が貴に遷移する。12 min 後、電位が急激に貴側へ変化し、白金電極面が露出していった。この浸漬電位の変化より、銅が溶解するま

Fig. 3 Effect of current density on current efficiency of Cu electrodeposited on Pt rotating disk electrode at 30°C. Electrolytes were (a) typical electrolyte, (b) additive-free electrolyte and (c) AN electrolyte.

での時間を求め、金属銅がCu(I)で溶解する式(5)の平均電流密度を算出した。その値は4.7 mA/cm²となり、図1(c)の500 rpmでターフェル直線と浸漬電位の交点から決定した腐食電流密度の約5 mA/cm²とほぼ同じ値となった。これより、図2(c)で示したAN電解液の電流効率が約60%以下であり、また図1(c)において浸漬電位が卑側にシフトしていたのは、銅の溶解反応を含む均化反応(式(4))が起きているためと考えられる。

3. 5 電流効率に影響を与える要因の考察

以上の結果より、本論文では図4に示す反応モデルを仮定する。AN電解液中における銅の電析反応は、Cu(II)のバルクから電極表面への物質移動(過程I)、Cu(II)_sのCu(I)_sへの還元(過程II)およびCu(I)_sからCuへの還元(過程IV)を経て進む。なお、添字sは電極表面付近のイオン種を示す。前節で考察したように、式(4)の均化反応も起きている(過程V)。図4において、IIおよびVの反応経路により生成したCu(I)_sは以下に示すようにバルクへの拡散(過程III)あるいは金属銅へ還元(過程IV)される。

ここで、添字bは溶液バルクのイオン種を意味する。AN電解液を用いた銅の電流効率は、図4の過程I～Vの速度のバランスで決定される。

AN電解液を用いた銅電析において、電流密度が一定(電析速度(過程IIとIVの和)が一定)のとき、流速が大きいほど電流効率が減少するのは、流速が大きいと過程Iが加速され、さらに過程Vが加速されることで、銅の溶解速度の割合が電析に比べ大きくなるためと考えられる。流速が一定(過程IおよびIIIの物質移動速度が一定)のとき、電流密度が小さいほど電流効率が減少するのは、過程IIとIVで表される電析速度が小さいので、過程Vによる銅の溶解で相殺されるためと考えられる。

以上の検討から、C浴では銅電析の電流効率に影響を与える要因は、大きく2つあることがわかる。一つは、①流速が大きいほど電流効率が低下する効果(流速の効果)であり、もう一つは、②電流密度が小さいほど電流効率が低下する効果(電流密度の効果)である。一般的な電解液の電流効率は、水素発生が起こらない領域において流速や電流密度に影響を受けない。典型電解液においても電流効率はほぼ100%(図3

Fig. 4 Reaction scheme in the electrolyte composed of acid copper sulfate and acetonitrile. The subscripts “b” and “s” indicate the species in the solution bulk and near the electrode surface, respectively.

(a))であり、AN電解液が特異的な性質を持っているといえる。

3. 6 微細孔への銅の埋め込み性

これまでの検討結果より、AN電解液を微細孔への銅埋め込みに適用する場合には、流速の効果と電流密度の効果のバランスによって埋め込み性が変化すると考えられる。そこで、微細孔を有する加工済みシリコンウエハに銅を電析し、断面観察を行った。その結果を図5(b)に示す。比較としてB浴(添加剤フリー電解液)でシリコンウエハ上へ銅電析を行った結果を示す(図5(a))。図5より、B浴では、孔上部からの埋め込み率が70～80%であった。しかし、C浴を用いた場合、孔の底部においては銅が電析せず、孔の上部(30～40%)にのみ銅が電析した。ところで、濡れ性が良いと微細孔への液の侵入が容易となり、埋め込み性が向上すると考えられる。ANが添加されているC浴は、B浴よりも濡れ性が向上している。しかし、図5の結果より、ANを添加した電解液においては逆の効果を示しており、ANを添加する効果は濡れ性の変化が主な要因ではないことがわかる。前節の考察より、図5(b)の孔上部にだけ銅が電析するのは、②の流速の効果より①の電流密度の効果が優先となっていると考えられる。つまり、微細孔の底部の電流密度が銅が電析できるほど小さくなく、孔上部にだけ銅が電析したものと考えられる。ところで、AN電解液にCl⁻を100 ppm添加すると、埋め込み性がさらに悪くなる結果を得た。一般的にCl⁻は硫酸銅電解液中で銅の溶解を促進させる^{10),11)}が、AN電解液中においても銅の溶解を速め、微細孔底部に銅がより電析しなくなったものと予想できる。

逆に②の流速の効果を支配的にできれば、孔埋め込みができるはずである。図3(c)より、電流密度が10 mA/cm²で流速の違いによる銅の電析量の比が最大となり、埋め込みに

Fig. 5 FIB-SIM images of the electrodeposited Cu on the substrate at 25°C under 10 mA/cm². Agitation frequency was approx. 0.8 Hz. Electrolytes were (a) additive-free electrolyte and (b) AN electrolyte.

Fig. 6 FIB-SIM images of the electrodeposited Cu on the substrate at 25°C. Electrolyte was AN electrolyte. Agitation frequency was approx. 0.8 Hz. Current densities were (a) 20 mA/cm², (b) 30 mA/cm² and (c) 40 mA/cm².

好都合となる。しかし、実際の微細孔上部と底部での流速に相当する電極回転数は具体的にわからず、また微細孔上部と底部での電流密度差も底部の方が小さいのは確かであるが、定量的な議論はできない。そこで、電流密度を変化させて銅の電析を行い、埋め込み性を調べた。ただし、図 5 (b)において微細孔底部に銅が電析していないことから、図 5 (b)の電流密度よりも高い電流密度で実験を行った。その結果を図 6 に示す。図 5 (b)で示した電流密度 10 mA/cm² の場合、孔上部からの埋め込み率が 30~40%であったのに対し、図 6 より電流密度 20 mA/cm² では 65~75%、電流密度 30 mA/cm² では 65~80%、電流密度 40 mA/cm² では 65~90%と、電流密度の増加にともない埋め込み率が増加した。

次に、微細孔への銅の埋め込みに対する流速の影響について検討を行った。流速が大きいと、電流効率(銅の電析量)が低下する。よって、ウエハ上部の流速をより大きくすれば微細孔内外での流速差が大きくなり、孔上部に比べて孔底部の電析がより優先的になると考えられる。そこで、図 6 (c)で示した電流密度でかく拌棒の揺動周波数を約 0.8 Hz から約

Fig. 7 FIB-SIM image of the electrodeposited Cu on the substrate at 25°C under 40 mA/cm². Electrolyte was AN electrolyte. Agitation frequency was approx. 2.5 Hz.

2.5 Hz に増加させ、微細孔への銅の電析を行った。その結果を図 7 に示す。これより、流速を大きくさせることによって、孔の底部まで銅の電析が起こることがわかった。

緒言で記したように、典型的な微細孔への銅埋め込み用電解液は、キャリア、ブライтна、レベラや塩化物イオンによって分極を増大あるいは減少させ、電析速度を局所的に制御し、埋め込みを実現させている。しかし AN は、これら添加剤とは異なる機能で埋め込みを可能にすることがわかった。

4. 結 言

AN 電解液の電流効率の特徴は流速の効果と電流密度の効果の 2 つあり、これは AN 電解液中での銅の溶解反応が関係していた。AN 電解液を微細孔への埋め込みに適用すると、流速と電流密度を適切に組み合わせることにより、微細孔内部へ銅を埋め込むことができた。

孔埋め込み用の典型電解液の添加剤は、機能からキャリア、ブライтна、レベラの大きく 3 種類に分類されるが、AN はそれらにない電流効率を制御する新しい添加剤であることがわかった。

(Received June 8, 2007 ; Accepted October 1, 2007)

文 献

- 1) K. Kondo ; *J. Surface Finish. Soc. Jpn.*, **55**, 907 (2004) (in Japanese).
- 2) H. Nawafune, M. Awano, K. Akamatsu, S. Mizumoto, E. Uchida and T. Hosoda ; *J. Surface Finish. Soc. Jpn.*, **53**, 59 (2002) (in Japanese).
- 3) Y. Kaneko, Y. Hiwatari, K. Ohara and T. Murakami ; *J. Surface Finish. Soc. Jpn.*, **53**, 250 (2002) (in Japanese).
- 4) H. Takatsuji ; *Materia Japan*, **38**, 36 (1999) (in Japanese).
- 5) P. M. Vereecken, R. A. Binstead, H. Deligianni and P. C. Andricacos ; *IBM J. Res. & Dev.*, **49**, 3 (2005).
- 6) W-P. Dow, H-S. Huang, M-Y. Yen and H-H. Chen ; *J. Electrochem. Soc.*, **152**, C 77 (2005).
- 7) K. Oyamada and H. Honma ; *J. Surface Finish. Soc. Jpn.*, **55**, 911 (2004) (in Japanese).
- 8) M. Yokoi, S. Konishi and T. Hayashi ; *DENKI KAGAKU*, **52**, 218 (1984).
- 9) J. J. Kelly and A. C. West ; *J. Electrochem. Soc.*, **145**, 3477 (1998).
- 10) Y. Takada, K. Oyamada, S. Miura and H. Honma ; *J. Jpn*

- Inst. Electron. Packag.*, 4, 219 (2001) (in Japanese).
- 11) T. Kikkawa ; *Japan Soc. Appl. Phys. (Oyo Butsuri)*, 68, 1215 (1999) (in Japanese).
- 12) T. Ono, Y. Komoda and Y. Itagaki ; *J. Surface Finish. Soc. Jpn.*, 58, 482 (2007) (in Japanese).
- 13) H. Nawafune ; *Hyomen Gijutsu*, 52, 34 (2001) (in Japanese).
- 14) H. Nawafune and K. Akamatsu ; *Electrochemistry*, 70, 880 (2002) (in Japanese).
- 15) S. Miura, K. Mihara, T. Fukushi and H. Honma ; *J. Jpn Inst. Electron. Packag.*, 5, 246 (2002) (in Japanese).
- 16) J. J. Kelly and A. C. West ; *Electrochem. Solid-State Lett.*, 2, 561 (1999).
- 17) K. Kondo, K. Hayashi, Z. Tanaka and N. Yamakawa ; *J. Jpn Inst. Electron. Packag.*, 3, 607 (2000) (in Japanese).
- 18) S. Miura, K. Oyamada, Y. Takada and H. Honma ; *Electrochemistry*, 69, 773 (2001).
- 19) E. Mattsson and J. O'M. Bockris ; *Trans. Faraday Soc.*, 55, 1586 (1959).
- 20) F. Farha, Jr. and R. T. Iwamoto ; *J. Electroanal. Chem.*, 8, 55 (1964).
- 21) D. M. Muir, A. J. Parker, J. H. Sharp and W. E. Waghorne ; *Hydrometallurgy*, 1, 61 (1975).
- 22) A. J. Parker ; *Electrochim. Acta*, 21, 671 (1976).
- ~~~~~