

UFP めっき装置を用いた三次元実装用 シリコン貫通電極形成のための銅めっき技術

長井 瑞樹* 玉理 裕介* 安田 慎吾*
下山 正** 斉藤 信利* 栗山 文夫**

Copper Electroplating of High Aspect Ratio Through-silicon Via for 3D Packaging using an UFP Tool

by Mizuki NAGAI, Yusuke TAMARI, Shingo YASUDA, Masashi SHIMOYAMA, Nobutoshi SAITO, & Fumio KURIYAMA

A new electroplating technique has been developed for the EBARA UFP series, a highly productive and reliable wafer electroplating system series. This series, mainly applied for soldering and bumping, as well as for distribution lines, is in high demand by various Asian and domestic leading-edge semiconductor manufacturers. Ebara has gone a step further by developing a new electroplating technique which makes this series capable of copper filling of high aspect ratio TSV (Through-Silicon Via) for 3D packaging. The following introduces and discusses this new technique.

Keywords: Copper plating, Electroplating, 3D packaging, Through silicon via, Plating tool, Filling, Additives, Agitation, Flow rate

1. はじめに

半導体の微細化技術は、これまで高速化と大容量化を同時に実現させてきたが、日々進化するパソコンや携帯電話などに代表されるエレクトロニクス機器では、更なる小型化や大容量化、高性能化が要求されている。これを実現させるため、微細化技術を更に進める一方で、微細化とは別の技術として複数の半導体チップを多層に積み上げて一つのパッケージにする三次元実装技術が注目されている。既にワイヤボンディング技術を用いて積層する方法が実用化されているが、ミリメートル単位の配線で半導体チップ間を接続することになるので、大容量化は達成できても高速化という点では多くを期待することはできないとされている。こうしたことから、半導体チップを貫通する電極、いわゆる“Through Silicon Via” (TSV) を介して最短距離で接続させる方法が検討され、一部のデバイスで採用され始めている。これにより配線遅延が小さくなり、高速化と小型化、大容量化が

同時に達成できるものと期待されている^{1~3)}。

このTSVは反応性イオンエッチング (DRIE) などで形成された深いビアに導電性材料を充填して形成するが、特に導電性の優れた金属銅を電気めっきによって充填する技術が検討されている^{4~6)}。

当社では既に実装用めっき装置として写真1に示す「EBARA UFPシリーズ」を製品化しており、米国、アジア各国及び国内の最先端半導体デバイスメーカーへの納入実



写真1 実装用電気めっき装置「UFP-300A」
Photo 1 Electroplating system for packaging [UFP-300A]

* 精密電子事業カンパニー 装置事業部 めっき装置事業室
プロセスグループ

** 同 同 同
同 博士 (工学)

績がある。これまでUFPめっき装置は、主に銅、はんだなどのバンプ形成や再配線形成用に使用され、高い生産性と信頼性をもつめっき装置として世界各国で使用されている⁷⁾。

本報では、このUFPめっき装置をTSV形成用のめっき装置として適用できる銅めっき技術を確立することができたので、以下に紹介する。

2. TSVによる三次元実装

三次元実装のためのTSV形成方式は、TSVを半導体製造工程のどの段階で形成するかによって大別され、トランジスタ形成前又は回路配線工程の前にTSVを形成するビアファーストプロセス（配線工程の前にTSVを形成するプロセスをビアミドルプロセスと呼ぶこともある）と配線工程が完了した後でTSVを形成するビアラストプロセスに分かれる。ビアファーストプロセスでは導電性材料としてポリシリコンやタンゲステンが用いられ、ビアラストプロセスでは一般的に電気めっきによる金属銅でTSVを形成することが多い。図1にTSV形成工程の一例を示す。まず、配線層が形成されたウェーハにDRIEなどでビアを形成し（図1-a）、絶縁用酸化膜、バリアメタル層、更に導通用シード層を成膜した後（図1-b）、

電気めっきによってビア内部に銅を充填する（図1-c）。ウェーハ表層に析出した余剰の銅をCMPで取り除くとともに平坦化し（図1-d）、その後ウェーハ裏面を削り込んで薄板化し、裏面まで貫通するTSVを形成する（図1-e）。これをはんだなどの接合層を介して積み上げることで一つのパッケージとなる（図1-f）。

この技術を実用化させるためには、加工コストをいかに抑えるかが大きな課題である。当社のめっき装置に求められるのは、できるだけ短い時間で空隙（ボイド）なくビア内部を銅で充填するとともに、次工程のCMPの負荷を軽減するため、ウェーハ表層の余剰なめっき膜厚を最小限にすることである。

3. 銅めっき技術によるビアフィリング

3-1 フィリング形状の比較

銅めっき技術を使ったフィリング方法は、1997年のIBM社による銅配線技術の発表以来、半導体微細配線層の形成工程で配線用トレンチや層間を接続するビアを充填するために用いられている。またプリント基板においても高密度化に対応するため、コア材の上下に配線層を積層するビルドアップ配線板が多く用いられ、層間接続用のブラインドビアをビアフィリングめっきによって充填している。半導体微細配線のトレンチやビアのサイズは、サブミクロンオーダーからナノオーダーに移りつつある。また、ビルドアップ配線板の一般的なビアサイズは、開口径が100 μm 前後で、深さが50～200 μm 、ビア深さに対する開口径の割合（アスペクト比）は1～2程度となっている⁸⁾。

TSV形成用の銅めっきもこれらの技術を応用することができるが、TSVのビアサイズは、開口径が5～50 μm 、深さが50～200 μm で、アスペクト比は2から大きいもので10以上となり、半導体配線やビルドアップ配線板のビアサイズと異なる。このため、TSVのビアサイズに適した新たな銅めっきプロセスが必要となる。

TSVのフィリングめっき例を写真2に示す。写真2-aは一般の銅めっき液を使用したもので、ビア底部からV字形状をしながら埋まっているが、ビア開口部のめっき膜が厚くなり、閉塞し始めている。一方、写真2-bは、今回TSV形成用に開発された銅めっき液（以下、荏原TSV用銅めっき液）でめっき処理を行ったTSVの断面SEM写真である。ビア底部から優先的にめっき成長する「ボトムアップ成長」に加え、ビア開口部のめっき成長を抑え、閉塞によるボイド発生が改善されている様子が分かる。両者のめっき量（クーロン量：電流値と時間の積）

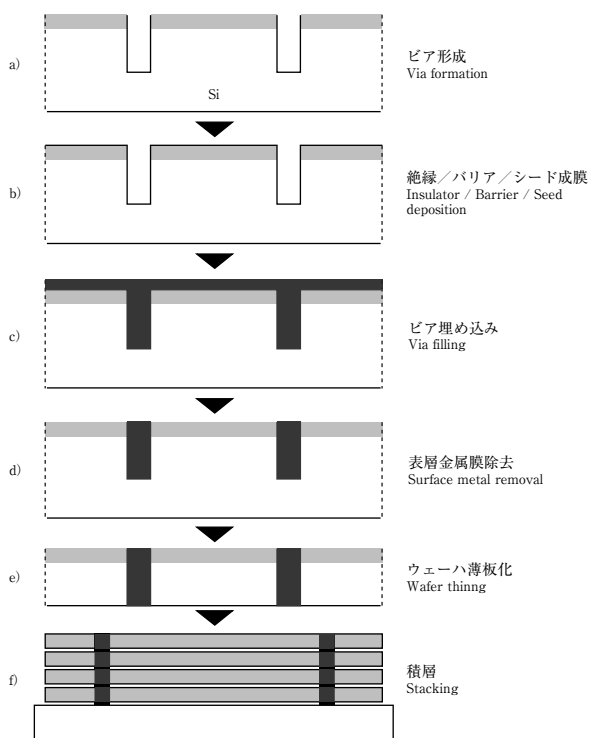
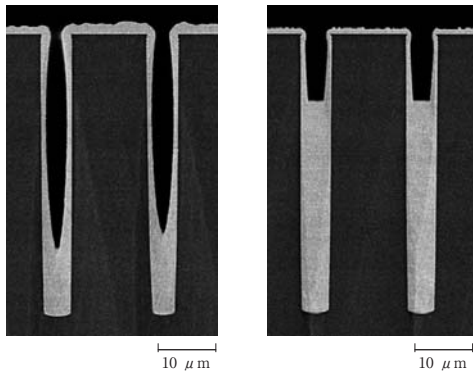


図1 TSV形成フロー

Fig. 1 Process flow of TSV formation



a) 一般銅めっき液
Normal Cu plating solution
b) 荏原 TSV 用銅めっき液
EBARA Cu plating solution for TSV

11-01 02/230

写真2 銅めっきによる TSV フィリング

Photo 2 TSV filling by copper plating

表1 荏原 TSV 用銅めっき液標準組成

Table 1 Standard composition of EBARA Cu plating solution for TSV

成分 Constituent		濃度 Concentrations	
基本液 Base solution	TSV 用基本液 Base solution for TSV	Cu	50 ~ 70 g/L
		H ₂ SO ₄	40 ~ 60 g/L
		Cl	40 ~ 60 mg/L
有機添加剤 Organic additives	TSV 用添加剤-A (Suppressor)	4 ~ 8 mL/L	
	TSV 用添加剤-B (Accelerator)	0.4 ~ 1.0 mL/L	
	TSV 用添加剤-C (Leveler)	4 ~ 15 mL/L	

は同じであるが、ビア内に充填されているめっき量に差がある。このように TSV のフィリングめっきには荏原 TSV 用銅めっき液のようなボトムアップ成長が有効であるといえる。

3-2 荏原 TSV 用銅めっき液の標準構成

荏原 TSV 用銅めっき液によるボトムアップ成長は、めっき液中に添加される添加剤の働きとめっき液の攪拌によってもたらされる。表1に荏原 TSV 用銅めっき液の標準的なめっき液組成を示す。荏原 TSV 用銅めっき液の添加剤は、TSV 用添加剤-A、TSV 用添加剤-B、TSV 用添加剤-C の3成分から構成され、TSV 用添加剤-Aは、ポリエチレングリコールに代表されるポリエーテル化合物からなり、Suppressor (抑制剤) として作用する。TSV 用添加剤-Bは SPS (ビス3-スルホプロピルジスルフィド) に代表される硫黄系化合物からなり、Accelerator (促進剤) として作用する。TSV 用添加剤-Cは一般に Leveler (平滑剤) と呼ばれるもので、ポリアミン誘導体を用いている。これ

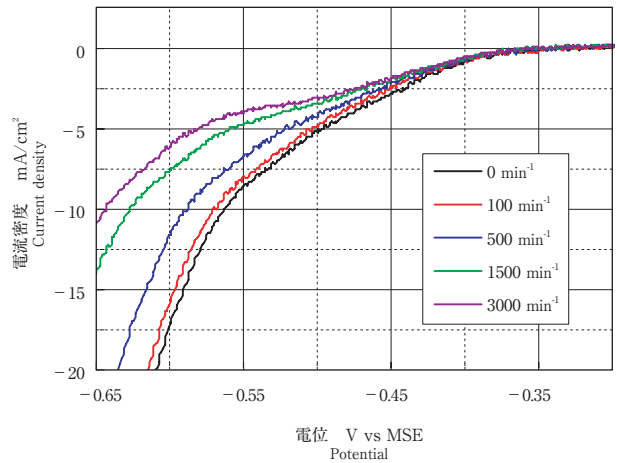


図2 回転電極によって測定した電流-電位曲線

Fig. 2 Current-Voltage curves analyzed using a rotating disk electrode

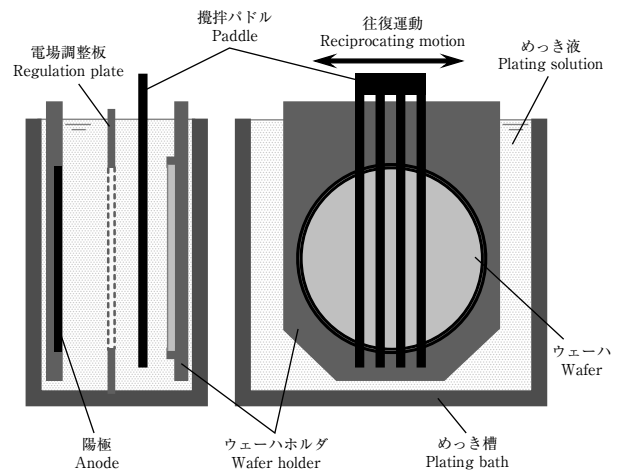


図3 UFPめっき装置のめっき槽概略図

Fig. 3 Schematic diagram of the plating bath on UFP tool

らの添加剤を硫酸銅と硫酸を主成分とする基本液に塩化物イオンとともに適正な濃度で加えることで、優れたボトムアップ成長が得られる。

3-3 電気化学測定と流体解析

荏原 TSV 用銅めっき液の特長を示す一例として、図2にこのめっき液の電流-電位曲線を示す。ポテンシostatを使用し、回転電極の回転速度を変えて電気化学測定を行っている。電極回転速度が大きくなるに従って電圧をスイープさせたときに流れる電流値が低くなっているのが分かる。これは添加剤の抑制作用によるもので、電極回転速度の大きい、すなわち電極表面の流速が大きいほど抑制作用が強く働くことを示している。

図3にUFPめっき装置におけるめっき槽の概略図を

示す。UFPめっき装置ではウェーハ近傍でパドルを往復運動させることによってめっき液を攪拌している。そこで、**図4**に示すようなビアモデルについて、パドルによる攪拌を使った場合のビア近傍及びビア内部の流速分布について流体解析を行った。その結果、**図5**に示すように開口部ではパドルの攪拌によるめっき液の流れが生じ、往復速度を大きくすることで速い流れを得ることができる。一方、ビア内部の流速は、開口径10 μm のビア内部ではほとんど流速がなくなり、開口径が30 μm 、50 μm と大きくなるとパドルの往復速度が大きくなるに従って、攪拌による液の流れがビア内部にまで発生していることが分かる。

前述の電気化学測定の結果からも明らかなように荏原TSV用銅めっき液は流速の大きいところでめっき成長

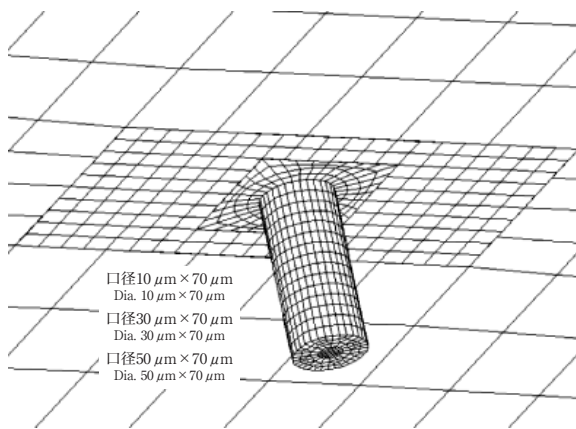


図4 流体解析に用いたビアモデル
Fig. 4 Via model for fluid dynamic analysis

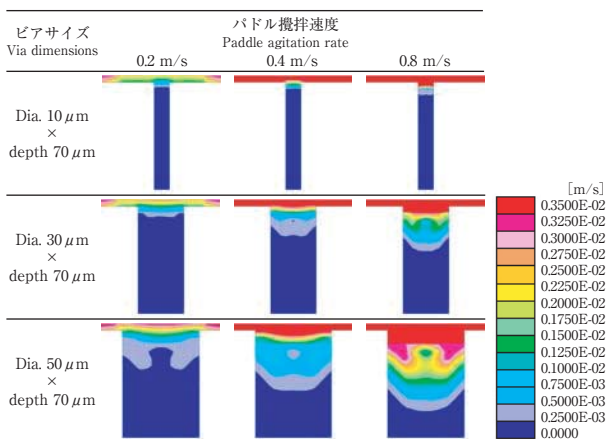
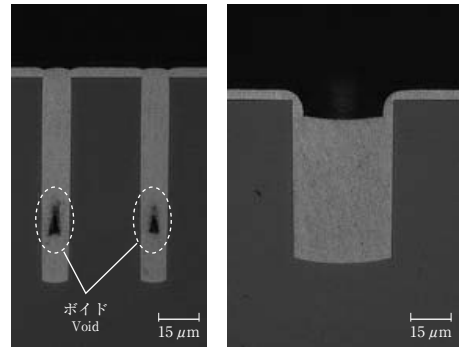


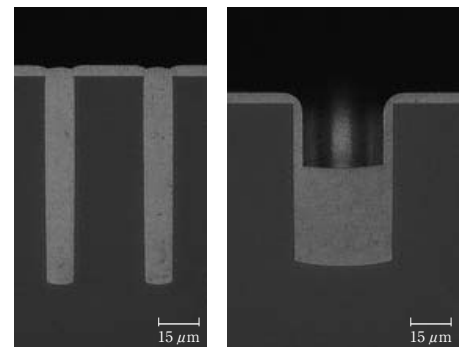
図5 ビア内部におけるめっき液流速の解析結果
Fig. 5 Calculation result on velocity of plating solution in via

が抑制されるため、UFPめっき装置を使用した実際のウェーハめっきの場合、パドル攪拌によって生じためっき液流速の大きいウェーハ表面やビア開口部付近では添加剤の抑制作用によってめっき成長が抑えられ、流速の遅いビア底部では抑制作用が小さくなることから優先的にめっきが成長することになる。流体解析の結果から開口径の小さいビアではパドル往復速度を大きくしてもビア内部への影響は少ないが、開口径が大きくなるに従ってパドル攪拌による流れがビア底部まで影響するため、往復速度を大きくし過ぎると逆にビア底部からのめっき成長を妨げてしまう恐れがある。

写真3にパドルの往復速度を変えた場合のビアフィリング状態を観察した結果を示す。開口径10 μm 、深さ85 μm のビアでは、往復速度の小さい0.2 m/sでビア底部にボイドが発生し、往復速度を0.8 m/sまで大きくすることでボイドがなく完全に充填されるようになる。開口径の小さなビアでは往復速度を大きくし、開口部付近の流れを大きくすることで添加剤による抑制作用を強め



a) パドル攪拌速度：0.2 m/s
Paddle agitation rate: 0.2 m/s



b) パドル攪拌速度：0.8 m/s
Paddle agitation rate: 0.8 m/s

11-01 03/230

写真3 TSV フィリングにおけるパドル攪拌速度の効果
Photo 3 Effect of paddle agitation rate on TSV filling
[左 Left: Dia. 10 μm × depth 85 μm ,
右 Right: Dia. 40 μm × depth 70 μm]

て閉塞を防ぐ必要がある。一方、開口径40 μm 、深さ70 μm のビアでは往復速度を大きくすることで逆にフィリング性能が低下している。これは流体解析の結果から、開口径の大きなビアではパドル攪拌による流れがビア内部にまで及ぶため、添加剤の抑制作用がビア内部でも働き、ビア底部からのめっき成長を抑えているものと考えられる。このように荏原TSV用銅めっき液では、ボトムアップ成長とめっき装置の攪拌が密接に関係している。UFPめっき装置では、対象となるビアサイズに合わせてパドル攪拌を調整することが可能で、これにより優れたボトムアップ成長を発揮させることができる。

3-4 高アスペクトビアのボトムアップ成長

荏原TSV用銅めっき液を使用し、パドル攪拌を行ったときのビア内部のめっき成長状態を写真4に示す。開口径5 μm 、深さ50 μm （アスペクト比：10）のビアにお

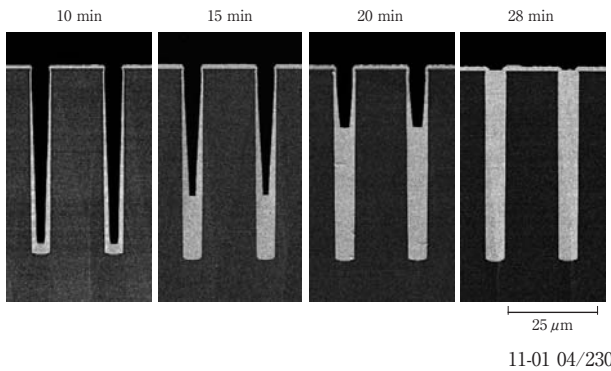


写真4 口径5 μm × 深さ50 μm ビアのめっき時間ごとの断面SEM像

Photo 4 Cross-sectional SEM image per plating time for dia. 5 μm × depth 50 μm via

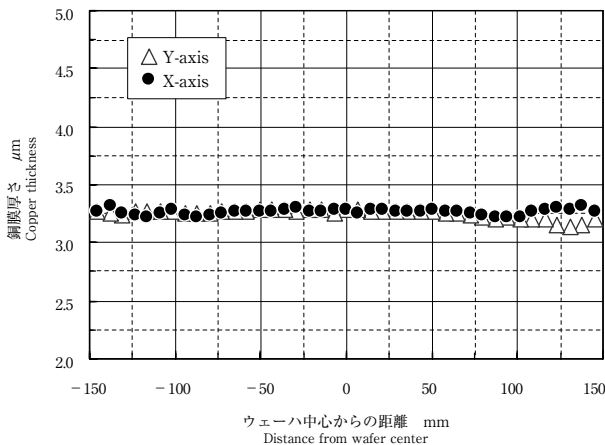


図6 300mm ウェーハ上の銅膜厚分布

Fig. 6 Copper film thickness distribution on 300 mm wafer

いて、ビア底部から優先的にめっき成長が始まり、めっき開始から20分後で約70%まで充填され、開口部の閉塞も抑えられているのが分かる。更に28分後にはポイドなく完全にめっき充填される。また、28分後のウェーハ表面の銅皮膜の厚さは、約2 μm となっている。このように高いアスペクト比のビアに対して、表層のめっき膜厚を極力抑えながら短時間でめっき充填が達成できている。

4. UFPめっき装置のTSVフィリングめっきへの適用

4-1 UFPめっき装置の基本性能

UFPめっき装置では、レギュレーションプレートと呼ばれる電場調整板や陽極、陰極間距離、陽極開口径などによって、めっき膜厚の分布を調整することが可能である。図6にUFPめっき装置を使って300 mmウェーハ上に銅めっきを約3 μm 成膜処理したときの膜厚分布を示す。めっきされた銅皮膜は面内の膜厚差が0.2 μm 以内に制御され、良好な均一性が得られている。写真5は300 mmウェーハでの各箇所におけるフィリング状態を観察した結果である。ウェーハ中央部、ウェーハ外周部（ウェーハエッジより5 mmの位置）ともにポイドなくめっき充填されている。このようにUFPめっき装置は、TSV形成用の銅めっき装置として十分に適用可能であるといえる。

4-2 UFPめっき装置によるTSVフィリング実績

これまでにUFPめっき装置を使って様々なサイズのビアについてフィリングめっきを検討してきた。図7にUFPめっき装置によってめっき充填が達成されたビアサイズを示す。ここに示すように幅広いビアサイズについて実績があり、写真6にその一例を示す。開口径6 μm 、

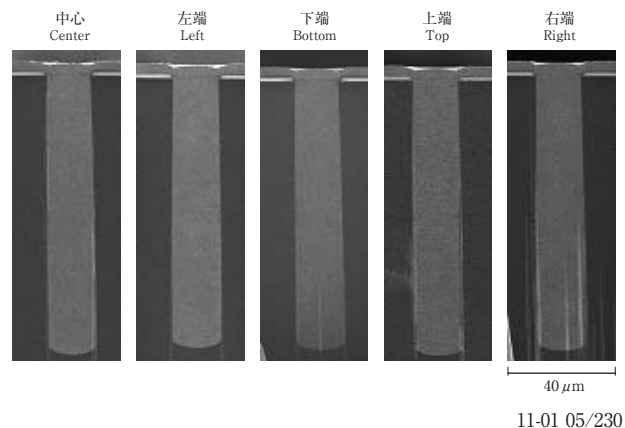


写真5 300 mm ウェーハ上の各位置における口径17 μm × 深さ110 μm ビア断面SEM像

Photo 5 Cross-sectional SEM image of dia. 17 μm × depth 110 μm via at each position on 300 mm wafer

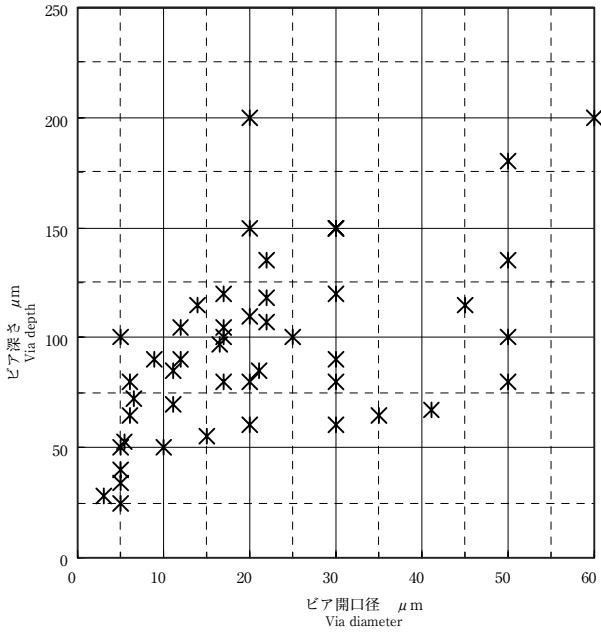
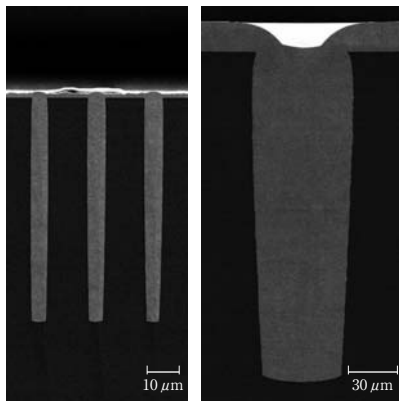


図7 UFP装置によるTSVフィリング実績

Fig. 7 Actual TSV filling data where UFP tool was used



a) Dia. 6μm × depth 80μm b) Dia. 60μm × depth 200μm

11-01 06/230

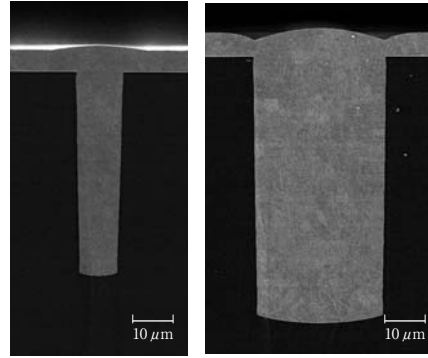
写真6 高アスペクト比ビア (a) とラージサイズビア (b) の断面SEM像

Photo 6 Cross-sectional SEM image of high aspect ratio via (a) and large size via (b)

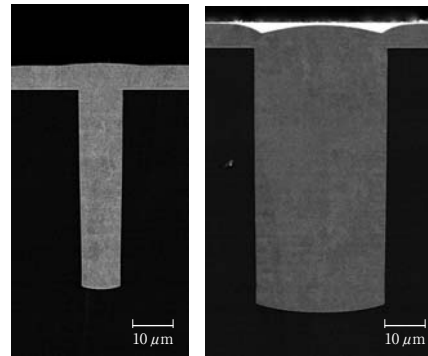
深さ80 μm (アスペクト比:13) の極めて高いアスペクト比のビアから開口径60 μm, 深さ200 μm (アスペクト比:4) のラージビアまでボイドなくめっき充填することが可能で, 多様なビアサイズに対しても対応することが可能となっている。

4-3 連続運転による安定性評価

次にUFPめっき装置を用い, 連続でめっき処理を行った場合のめっき性能の安定性について確認した。連続処理中の添加剤濃度はECI社製分析装置QL-100Eを用い



a) 初期めっき液による埋め込み結果 (0 A·h/L)
Filling results with initial solution (0 A·h/L)



b) 連続使用めっき液による埋め込み結果 (50 A·h/L)
Filling results with used solution (50 A·h/L)

11-01 07/230

写真7 めっき液の安定性: 初期液 (a) と連続使用後液 (b) の埋め込み性能比較

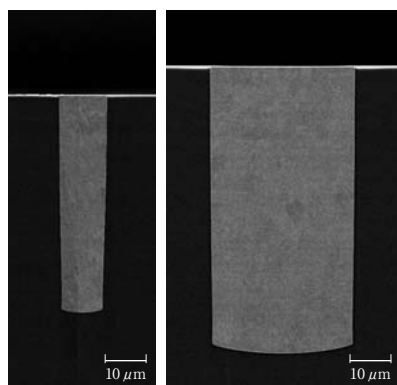
Photo 7 Stability of plating solutions : Comparison between filling abilities with initial (a) and used solutions (b)

[左 Left: Dia. 10 μm × depth 50 μm,
右 Right: Dia. 30 μm × depth 65 μm]

CVS法によって分析して濃度管理を行った。写真7-aは連続試験開始時のフィリング状態で, 開口径10 μm, 深さ50 μmビア及び開口径30 μm, 深さ65 μmビアともにボイドなくめっき充填されている。写真7-bはめっき液量に対する積算通電量が50 A · h/Lに到達したときのフィリング状態を観察したもので, 試験開始時のフィリング状態と同様にボイドなくめっき充填できているのが分かる。積算通電量50 A · h/Lは, 当社の代表的なめっき装置「UFP-300A」で1枚あたり5 μmのめっき処理として10000枚以上のウェーハ処理量に相当することになり, 今回の試験結果から量産使用にも対応できる安定した性能を有していることが分かる。

4-4 CMP評価

写真8はUFPめっき装置でめっき処理を行った後, 当社のCu-CMP装置でCMP処理したTSVの断面SEM写真である。CMP処理によって余剰の銅皮膜が除去され, ビア上部が平坦化されている状態が示されている。UFP



a) Dia. 10 μm \times depth 50 μm b) Dia. 30 μm \times depth 70 μm

11-01 08/230

写真8 CMP後のビア断面SEM像

Photo 8 Cross-sectional SEM via image after CMP process

めっき装置を使った銅めっきでは、ボトムアップ成長によるボイドのないめっき充填と余剰の銅皮膜を最小限に抑えることが可能で、更に銅配線工程で培われたCMP技術を組み合わせることで高い信頼性をもつTSV形成が実現できる。

5. おわりに

UFPめっき装置は、高い生産性と信頼性を有するパンブ・再配線形成用のめっき装置として国内外で広く用いられている。今回、種々の検討を重ねた結果、現在注目されている三次元実装向けのTSV形成用めっき装置とし

ても十分に適用できることが確認された。今後、半導体技術の中で主流になると思われる三次元実装分野にもUFPめっき装置が広く用いられることが期待できる。また、当社の保有のCMP技術と組み合わせることで、多くの顧客に対して信頼性の高いTSV形成技術を提供できるものと考えている。

参考文献

- 1 K. Takahashi, H. Terao, Y. Tomita, Y. Yamaji, M. Hoshino, T. Sato, T. Morifuji, M. Sunohara and M. Bonkohara "Current Status of Research and Development for Three-Dimensional Chip Stack Technology", Japanese Journal of Applied Physics Vol.40, No.4B, pp.3032-3037 (2008).
- 2 Lesley Anne Polka, Huthasana Kalyanam, Grace Hu, Satish Krishnamoorthy, "Package Technology to Address the Memory Bandwidth Challenge for Tera-scale Computing" Intel Technology Journal Vol.11, Issue 03 (2007).
- 3 傳田精一著, 三次元実装のためのTSV技術, (株)工業調査会 (2009).
- 4 N. Saito, R. Kiumi, F. Kuriyama, "Electroplating of Cu through electrodes in 3D packaging", Proc. of the International Wafer Level Packaging Congress 2005, pp.128-133 (2005).
- 5 F. Kuriyama, A. Fukunaga, A. Owatari, N. Saito, M. Nagai, "Electroplating Copper Filling for 3-D Packaging", Proc. of the ICEP 2008, pp.489-492 (2008).
- 6 福永明, 長井瑞樹, 齋藤信利, 荒木裕二, 赤澤賢一, 栗山文夫, 尾渡晃: シリコン貫通電極形成のためのめっき装置技術, 第72回半導体・集積回路技術シンポジウム講演会論文集 (2008).
- 7 栗山文夫, 南吉夫, 木村誠章, : パンプめっき装置, エバラ時報No.207, pp. 34-38 (2005).
- 8 半導体新技術研究会編, 早瀬仁則監修, 最先端高密度銅配線めっき技術, (株)シーエムシー出版, pp.143-144, pp.203-204 (2009).