

SPA特集

Cu/Ti/TiN/Ti積層構造を有する 高信頼性Cuダマシン配線

High Reliable Cu Damascene Interconnects with Cu/Ti/TiN/Ti Layered Structure

阿部 一英
Kazuhide Abe

時藤 俊一
Syunichi Tokitoh

金森 順
Jun Kanamori

要 旨

Cu, TiN間へTi層を挿入し、配線抵抗、およびダマシン配線のエレクトロマイグレーション (EM) 耐性への影響を検討した。その結果、Ti層の挿入により下地に対するCuの密着性が改善されることが明らかになった。挿入Ti膜厚を薄膜化し、大気曝露処理を施すことで、熱処理後の配線抵抗の上昇も低減できる。また、Ti層の挿入による安定なCu/下地メタル界面の形成によって、ダマシン配線のEM寿命が1ケタ以上長くなることがわかった。

1. ま え が き

配線の微細化に伴う電流密度の増加に対して、エレクトロマイグレーション (EM) 耐性が大きな問題となっており、また素子の性能向上を図るために低抵抗配線が必須となっている。そのような背景から、CuがAlに替わるメタル材料として検討されている。しかし、Cuといえども、配線の微細化の進展に対してEM耐性の向上が必要である。

Cu配線のEMに影響する因子は、Cu結晶粒径、結晶配向性などのCu微細構造や、Cu/バリアメタル間、あるいは上層キャップ膜であるSiN/Cu間などの界面状態に分類できる。Cu/バリアメタル界面に関して、最近になって界面制御の重要性を示唆する複数の報告^{1) 2)}がなされており、Cu/バリアメタル間の密着性改善がEM耐性向上の課題となっている。界面の密着性を向上させる方法の一つとして、Cu/バリアメタル間へ密着層を挿入し、熱処理によりCuと密着層を反応させる

ことが有効と考えられる。しかし、Cuと密着層の反応によるCu配線の実効断面積減少や、Cu中への密着材の拡散に起因した配線抵抗の増加が懸念点として挙げられる。

本稿では、LSIプロセスで幅広く用いられているTiを、Cu, TiNバリア間に密着層として挿入することを検討した。その結果、Ti層の挿入により安定なCu/下地メタル界面が形成され、Cuダマシン配線のEM耐性が向上することが明らかになった。また、熱処理後のCu配線の抵抗上昇を低減するためには、挿入Ti層の大気曝露処理が有効であることも見出した。

2. Cu膜の凝集特性

Cu/下地メタル界面の安定性を調べるため、熱処理後におけるCu膜の凝集特性を評価した。始めに、SiO₂/Si基板上にTiN (40 nm) /Ti (10 nm) 積層膜をDCマグネトロンスパッタ法により形成した。Ti堆積にはArガスをを用い、さらに同一チャンバー内でTiNを反応性



阿部一英

生産センタ 技術
第四部 多層配線
CMPプロセスチーム



時藤俊一

生産センタ 技術
第四部 多層配線
CMPプロセスチーム



金森 順

超LSI研究センタ
デバイス研究第二
部長

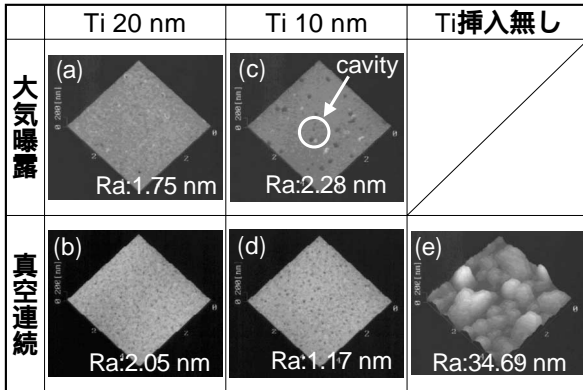


図1 (Ti)/TiN/Ti積層膜上のCu膜表面のAFM像
Fig. 1 AFM images of Cu films deposited on (Ti)/TiN/Ti under layers

スパッタ法によりAr/N₂混合ガスを用いて連続堆積した。基板温度は100 °Cである。続いて、基板温度100 °CでTiN/Ti積層膜上にCu膜の密着層としてのTi膜(0~20 nm)を連続して堆積した後、大気に晒すことなくCu膜(25 nm)を室温でスパッタ堆積した。一方、最上層のTi膜を24時間大気に晒した後、Cu膜を成膜した試料も作成した。上記の方法により作成した試料に対して450 °C、30分の熱処理をN₂/H₂雰囲気中で行った。

(Ti)/TiN/Ti積層膜上に堆積した熱処理後のCu膜の原子間力顕微鏡(AFM)像を図1(a)-(e)に示す。(e)Ti挿入無しではCu膜が凝集しているのに対して、Cu、TiN間にTiを挿入した(a)-(d)では滑らかなCu膜表面が得られた。Cu膜表面の凹凸を定量化した平均粗さ(Ra)に関しても、Tiを挿入した試料ではTi挿入無しよりも1ケタ小さい。Ti挿入はCu膜の凝集特性を大きく改善する。つまり、Cuの下地に対する濡れ性、言い換えればCuの密着性はTi挿入によって向上すると考えられる。また、Ti挿入膜厚を10nmまで薄膜化すると、Cu膜の表面凹凸はTi大気曝露処理の有無に影響を受ける。(c)、(d)の場合、いずれもCu膜表面には局所的に小さな穴が観察されるが、Tiの大気曝露処理を行った(c)ではより大きな穴が形成された。

3. Cuダマシ配線の電気特性

ダマシ配線を形成するため、酸化膜中に配線形状を有する溝(深さ:0.6 μm, 幅:2 μm)を形成した。次に、2節に示した方法に従い(Ti)/TiN/Ti積層膜を堆積し、Cuシード膜(80nm)をスパッタ法で堆積した。続いて、電気めっき法によりCu膜(1 μm)を成膜した後に450 °C、

表1 配線抵抗の比

Table 1 Ratio of line resistance

Ti堆積膜厚	Ti堆積後プロセス	配線抵抗の比
20nm	大気曝露	1.30
	真空連続	1.33
10nm	大気曝露	1.07
	真空連続	1.30

表2 Cu膜厚の比較

Table 2 Comparison of Cu thickness

	Ti (20 nm)		Ti (10 nm)
	大気曝露	真空連続	大気曝露
Cu膜厚 (nm) (シート抵抗より)	165	139	244
Cu膜厚 (nm) (TEM像より)	300	270	300

30分の熱処理をN₂/H₂雰囲気中で行い、溝以外の不要な金属を化学機械研磨(CMP)法にて除去した。

配線抵抗の比を表1に示す。Cu/Ti/TiN/Ti積層配線の抵抗を、従来構造であるCu/TiN/Ti積層配線の抵抗で規格化した。表中の値の比較から、Ti成膜後の大気曝露処理は配線抵抗の低減に有効であり、またTi挿入膜厚が薄くなるほど大気曝露処理の効果が大きくなることが明らかである。

上記の結果を考察するため、Cu/(Ti)/TiN/Ti積層構造を有する試料を用いて、Cu、Ti間の反応、およびCu膜中へのTi拡散に与える挿入Ti膜厚、Ti大気曝露処理の影響について調べた。

透過電子顕微鏡(TEM)像、およびシート抵抗から算出したCu膜厚を表2にまとめた。大部分の電流がCuの下地金属層よりも抵抗の低いCu層に流れると仮定して、シート抵抗からCu膜厚を算出した。TEM像からのCu膜厚の比較により、Ti大気曝露処理はCu、Ti間の反応を抑制する効果があること、大気曝露Ti膜厚の変化に対して熱処理後のCu膜厚は変化しないことがわかる。また、計算から求めたCu膜厚はTEM像から得られたCu膜厚よりも薄いことから、Cu、Ti間の反応によるCu実効断面面積の減少のみでは、配線抵抗の増加が説明できないものと考えられる。

熱処理後におけるCu膜中のTi拡散量を2次イオン質量分析法(SIMS)にて調べた結果を図2に示す。Ti挿入膜厚20nmでは、Ti挿入無しと比べてTiカウントが4ケタ増加しているのがわかる。そのTiカウントの差は、挿入したTiが熱処理によりCu膜中に拡散したことが原因と考えられる。また、Ti挿入膜厚20nmでは、Ti拡散

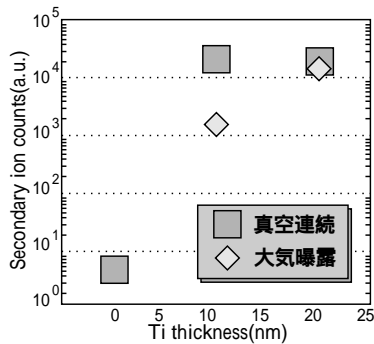


図2 Cu膜中のTi拡散量
Fig. 2 Amount of Ti diffusion into Cu film

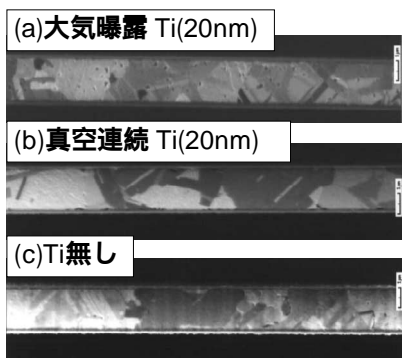


図3 Cuダマシシ配線のFIB像
Fig. 3 FIB images of Cu damascene interconnects

量は大気曝露処理の影響を受けない。一方、Ti挿入膜厚が10nmでは、Ti大気曝露処理の有無によってCu膜中へのTi拡散量が異なる。大気曝露処理を行った場合のTi拡散量は真空連続と比べて約1ケタ減少する。この拡散量の減少は、薄膜Ti表面の大気曝露処理によりTi表面が酸化され、拡散するTiの体積が減少したことに起因していると推測している。

以上の結果から、Cu、Ti間の反応よりもCu中に拡散したTiの存在が配線抵抗の上昇に大きく影響している。Ti大気曝露処理は、Cu、Ti間の反応を抑制するのみならず、Ti挿入膜厚が薄くなると、Cu中へのTi拡散量を減少させる働きがある。そのため、配線抵抗の上昇を防ぐのに効果的であると考えられる。

4 . Cuダマシシ配線の微細構造

図3はCuダマシシ配線(幅:2 μ m)の集束イオンビーム(FIB)像である。配線幅に対してCu結晶粒が1個存在する、いわゆるバンブー結晶領域と、数個存在する多

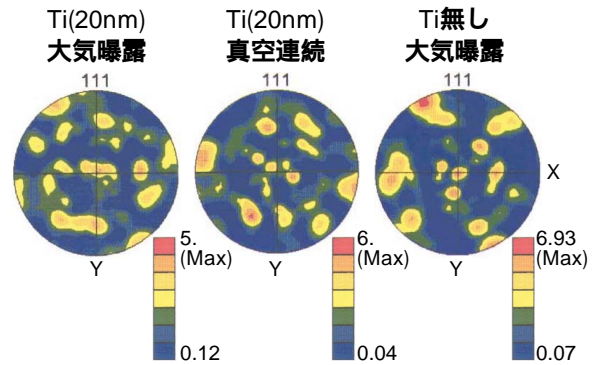


図4 Cuダマシシ配線の(111)極点図
Fig. 4 EBSD (111) pole plots of Cu damascene interconnects

結晶領域が、いずれの配線にも観察される。

Ti層を挿入した(a)、(b)Cu配線のCu結晶粒径は約1.25 μ m、標準偏差は0.46~0.53であった。挿入Tiの大気曝露の有無は結晶粒径とその標準偏差に影響を与えない。一方、(c)Ti層挿入無しのCu配線では、Cu結晶粒径が約1.56 μ m、その標準偏差が0.66であった。よって、Ti層の挿入によって結晶粒径は約20%減少し、その標準偏差も小さくなる。

図4には電子線後方散乱回折(EBSD)法で得られたCuダマシシ配線(幅:2 μ m)の(111)極点図を示す。X、Yと書かれたラインの交点は試料基板に対して垂直な方位を表している。Xは配線の幅方向、Yは配線の長さ方向の情報を表している。極点図付近の(111)ピーク強度を比較すると、試料構造に依存しないことがわかる。つまり、Cu結晶性はTi層の挿入によって影響を受けないと考えられる。また、Cu結晶性はTi層の大気曝露の有無によっても変化しない。

5 . Cuダマシシ配線のEM耐性

0.36 μ mのWピアを伴った2層配線構造のピアチェーンパターン(ピア間隔:100 μ m、ピア数:50個)をEM試験に用いた。1MはW配線、2MはCuダマシシ配線(幅:2 μ m、厚み:0.53 μ m)から構成されている。パッシベーション膜にはSiO₂/SiN積層膜を用いた。試験条件は、Cuダマシシ配線の電流密度を2MA/cm²、配線温度を290とした。配線抵抗が初期値から10%増加した時点をも不良発生時間と定義した。

図5にCuダマシシ配線の累積故障分布を示す。Ti層を挿入したCu配線はTi挿入無しに比べて配線寿命が1~2ケタ向上している。Ti層を挿入した配線の寿命

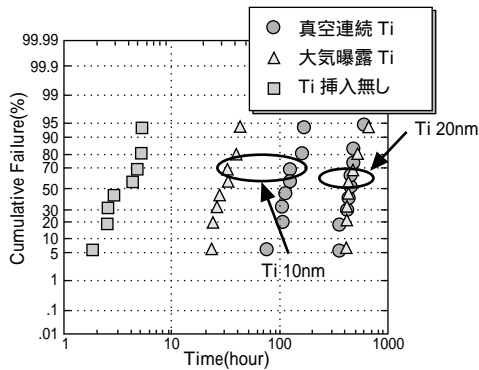


図5 Cuダマシン配線の累積故障分布

Fig. 5 Cumulative failure distribution of Cu damascene interconnects

はTi膜厚に依存しており、挿入Ti膜厚の厚い配線の寿命は長くなる。また、Ti大気暴露処理に関しては、Ti挿入膜厚20nmの場合には配線のEM耐性にほとんど影響しない。しかし、Ti挿入膜厚10nmの場合、配線寿命は真空連続のほうがより長くなった。第4節に示したようにCu結晶粒の標準偏差、Cu結晶性はTi層挿入によって大きな差は無く、またCu結晶粒径はTi層挿入によって小さくなるためEM寿命が大幅に長くなる理由はCu膜の微細構造からは説明できない。EMに影響する別な因子としてCu/下地メタル界面が考えられる。Ti層の挿入は下地に対するCuの密着性を改善するため、EMによるCu原子の動き易さに影響を及ぼしていると思われる。同様に、EM寿命のTi膜厚やTi大気暴露処理依存性もCu/下地メタル界面状態と密接な関係があると思われる。図6はTi層を挿入したCuダマシン配線の溝底部における断面TEM像である。Ti挿入膜厚20nmではCuTi_x化合物が連続的に形成されているのに対して、10nmの場合には不連続なCuTi_x化合物が形成されている。Cu、Ti間の均一な反応がより安定なCu/下地メタル界面を形成するため、厚いTi膜厚ではEM寿命が長くなると考えられる。また、大気曝露したTi膜厚10nmの場合、そのEM寿命はTi挿入配線の中で最も短かったが、図1に示したCu膜の凝集特性とも十分な相関が得られている。

6. あとがき

Cu、TiNバリア間へTi層を挿入し、配線抵抗およびEM耐性への影響を評価した結果、以下のことが明らか

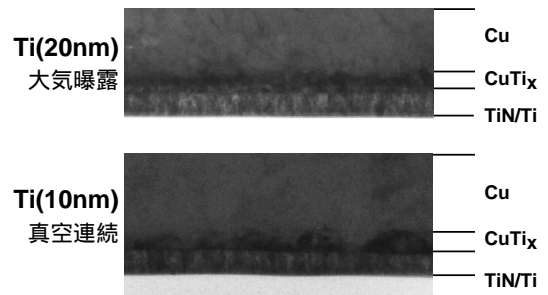


図6 Cuダマシン配線底部の断面TEM像

Fig. 6 Cross-sectional TEM images for the bottom of trench in Cu damascene interconnects

かになった。

Cuの密着性はTi層の挿入により向上する。

熱処理後、Ti層を挿入したダマシン配線の抵抗は増加する。その抵抗増加はCu、Ti間の反応によるCu断面積の減少、およびCu膜中へのTi拡散により引き起こされる。Ti大気暴露処理、Ti挿入膜厚の薄膜化は、低い配線抵抗を実現するために効果的である。

Ti挿入を行ったCuダマシン配線のEM寿命は、Ti挿入無しに比べて1ケタ以上長くなる。Cu原子の移動に影響するCu/下地メタル界面状態の改善がEM耐性の向上に寄与していると考えている。

Cu/Ti/TiN/Ti構造配線の開発により、従来のCu/TiN/Ti構造配線よりも高EM耐性を実現し、かつ低抵抗性をも兼ね備えた配線形成が可能になった。今後は、Ti膜厚の厚膜化によるEM耐性のさらなる改善のため、熱処理温度の低温化を検討する必要がある。

7. 参考文献

- 1) S. E. Schulz *et al.*: Morphology and electromigration lifetime of copper lines with different barriers, Advanced Metallization and Interconnects System for ULSI Application in 1997, p. 427, 1998
- 2) T. Nogami *et al.*: Graded Ta/TaN/Ta barrier for Cu interconnects for high electromigration resistance, 1998 Advanced Metallization Conference, p. 313, 1999