20306 ECMP の研磨圧力依存性シミュレーション

Simulation of Removal Rate Dependency on Polishing Pressure in ECMP

○正 福田 明 (荏原, 九州大学・院) 小寺 章 (荏原) 當間 康 (荏原) 鈴木 作 (荏原)
正 檜山浩國 (荏原) 正 土肥俊郎 (九州大学) 正 黒河周平 (九州大学) 正 大西 修 (九州大学)

Akira FUKUDA^{*,**}, Akira KODERA^{*}, Yasushi TOMA^{*}, Tsukuru SUZUKI^{*}, Hirokuni HIYAMA^{*},
Toshiro DOI^{**}, Syuhei KUROKAWA^{**}, Osamu OHNISHI^{**}

^{*}Ebara Corp., 4-2-1, Honfujisawa, Fujisawa-shi, Kanagawa

^{**}Kyushu Univ.

As the first stage of predicting the step height reduction of Cu wiring pattern in dissolution-type electro-chemical mechanical polishing (ECMP), the removal rate dependency on the polishing pressure was simulated. Simulation results showed lower removal rate than experimental value, but the difference was almost within the range of the experimental error. Therefore, the simulation method is thought applicable to simulate the step height reduction of wiring pattern.

Key Words: Electro-chemical mechanical polishing, Removal rate, Simulation, Polishing pressure, Copper

1. 緒言

次世代半導体デバイスの性能向上のために, Cu 配線と低誘電率(Low-k)絶縁膜とから構成される Cu/low-k 配線構造の開発が進んでいる。しかし, Low-k 材料の機械的強度の乏しさから, 配線形成プロセスのひとつである Chemical Mechanical Polishing (CMP) 中に, 応力による Low-k 膜の剥離や Cu 配線の欠落といった欠陥が発生し, 問題となっている^{(1),(2)}。

これらの問題に対しては, CMP 工程における研磨圧力の低減が有効策のひとつであると考えられ, Low Down Force CMP⁽³⁾, 電解複合 CMP (Electro-Chemical Mechanical Polishing: ECMP)⁽⁴⁾, 電解研磨(Electro-Chemical Polishing: ECP)⁽⁵⁾, 化学エッチング(Chemical Etching: CE)などの平坦化技術が検討されている。

本報告では, その中の電解複合 CMP に注目した。電解複合 CMP は, 従来の CMP に電気化学的作用を加えることで, 低研磨圧力でも高い加工レートを維持できることが知られている⁽⁶⁾。

ロータリ方式の電解複合 CMP では, 図 1 に示すように, 研磨定盤上に設置された多数の貫通孔を有する研磨パッド表面に, キャリアに保持されたウェーハの Cu 膜を押し当てながら, 研磨パッドとウェーハとを共に回転させて Cu 膜を加工する。その際, 研磨パッド上に電解液を供給して貫通孔に電解液を充填させながら, ウェーハ表面の Cu 膜を陽極, 研磨定盤を陰極として電圧を印加する。これにより, Cu 膜, 貫通孔内の電解液, および研磨定盤を通る電気回路が構成され, 電解複合 CMP が実現する。

報告者らは, 電解複合 CMP の加工レートシミュレーション手法を独自に構築するとともに, 加工レートの貫通孔開口率依存性を精度良くシミュレートできることを示した⁽⁷⁾。本研究では, このシミュレーション手法を配線パターンの段差解消予測に応用するための第 1 段階として, 加工レートの研磨圧力依存性をシミュレートし, 実験結果と比較したので報告する。

2. 加工レートシミュレーション

2.1 加工メカニズム 電解複合 CMP の加工メカニズムには, 削膜型と溶解型の 2 つが考えられる。本研究では, 使用した電解液の特性から, 溶解型を想定した。溶解型の電解複合 CMP においては, まず, Cu 膜の表面が電解液に接

触することにより, 電解液中の腐食抑制剤が Cu 膜の表面に作用して保護膜が形成される。次に, 保護膜が研磨パッドの非開口部で機械的に除去される。そして, 主に研磨パッドの開口部(貫通孔部分)で Cu 表面を電気化学的に酸化させて“水溶性”の Cu 錯体を形成し, Cu 錯体が溶解することで加工が進むと考えられる。

2.2 シミュレーション方法 上記加工メカニズムによれば, Cu 膜表面の保護膜の量と, その保護膜の量に応じた Cu の溶解レートを見積もることで, 加工レートを予測することが可能となる。本研究においては, ウェーハ上の複数の点について, 保護膜量と Cu 溶解レートをそれぞれ加工開始から終了まで時間を追って逐次計算し, Cu 溶解量を算出した。Cu の加工レートは, 加工終了時の Cu の溶解量を加工時間で割ることで算出できる。その際, Cu 膜厚さが十分厚いとして, ウェーハ面内の電位分布を一樣と仮定した。

(a) 保護膜量のモデル化

保護膜量は, 次式によりモデル化した。

$$\zeta = \int \alpha_0 \left(1 - \frac{\zeta}{\zeta^*}\right) dt - \int k p v dt_p \quad (1)$$

ここで, 保護膜量 ζ は, 接液による保護膜の形成量(右辺第 1 項)と研磨パッドによる保護膜の除去量(右辺第 2 項)の差として表される。保護膜の形成量は, 保護膜形成レートと時間との積として表される。保護膜形成レートは, 保護膜量が 0 の時に最大形成レート α_0 [1/s]となり, 保護膜量が飽和保護膜量 ζ^* [-]に達すると 0 となる 1 次関数で表

Fig. 1 Schematic view of rotary type of electro-chemical mechanical polishing apparatus

される。

保護膜の除去量は、プレストンの式⁽⁸⁾と同じ形で表されたとした。即ち、保護膜の除去量は、係数 k [1/(Pa·m)], 研磨パッドと Cu 膜との研磨圧力 p [Pa], 相対速度 v [m/s], および接触時間 t_p [s] の積によって表されたとした。

(b) Cu 溶解レートのモデル化

Cu 溶解レートは、保護膜量の 1 次関数として表されると仮定して、次式でモデル化した。

$$R_E = \text{MAX} \left[R_{E0} \left(1 - \frac{\zeta}{\beta} \right), R_{Em} \right] \quad (2)$$

ここで、 R_E は Cu 溶解レート (単位: [nm/s]), R_{E0} は最大溶解レート ([nm/s]), β は溶解レートの傾きを決める係数 [-], R_{Em} は最小溶解レート ([nm/s]) で、MAX は大きい方の値をとる関数である。

Cu 溶解レートを時間積分することにより、Cu の溶解量 EA [nm] を求めることができる。なお、研磨パッドの非開口部でも若干の溶解が起こっていることを考慮して、次式で算出した。

$$EA = \int R_E dt_h + \delta \int R_E dt_p \quad (3)$$

ここで、右辺第 1 項は研磨パッドの開口部での Cu 溶解量を表し、右辺第 2 項は研磨パッドの非開口部での Cu 溶解量を表す。 t_h は開口部の通過時間 ([s]), δ は非開口部と開口部の溶解レート比 [-] である。

2.3 シミュレーション結果 上記加工レートシミュレーション方法を用いて、加工レートの貫通孔開口率依存性をシミュレートした結果を図 2 に示す。図 2 から、シミュレーション結果と実験結果が良く一致していることが分かる。

図 2 において、条件 2 は、条件 1 に対して電解液供給流量が小さく、研磨パッド回転速度が大きい条件であり、その他の加工条件は同じである。

なお、加工レートをシミュレートするには、式(1)~(3)中の 7 個のパラメータ ($\alpha_0, \zeta^*, k, R_{E0}, \beta, R_{Em}, \delta$) を何らかの方法で決定する必要がある。本研究では、 R_{Em} および δ を簡単な実験により直接求めた。また、他のパラメータは実験により直接求めることが困難なため、市販の最適化ツールを用いて最適化した⁽⁷⁾。

使用したパラメータの値を表 1 に示す。なお、貫通孔内の電解液充填率の影響⁽⁹⁾を反映するため、条件 2 の R_{E0} と R_{Em} は表 1 の括弧で示した値を使用した。

3. 加工レートの研磨圧力依存性シミュレーション

溶解型の電解複合 CMP において、配線パターンの段差解消は、配線パターンの凸部に凹部よりも大きな接触圧力が作用することで凸部の保護膜量が凹部に比べて小さくなり、凸部の Cu 溶解レートが凹部よりも大きくなることで実現すると考えられる。したがって、加工レートの研磨圧力依存性をシミュレートできれば、本シミュレーションを配線パターンの段差解消予測に応用できると考えられる。

図 2 の条件 2、貫通孔開口率約 30% における加工レートの研磨圧力依存性をシミュレートした。結果を実験結果と共に図 3 に示す。図 3 から、実験よりもシミュレーションの方が、加工レートが若干小さかった。しかし、上述のような非常に簡単なモデルを用いたにも関わらず、規格化研磨圧力 0.4 を除いてその差は実験のばらつきの範囲内であ

Fig. 2 Relationship between aperture ratio and Cu removal rate

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Amount (Condition 2)	Parameter	Amount (Condition 2)
α_0 [1/s]	481	ζ^* [-]	10.0
k [1/(Pa·m)]	2.07×10^{-4}	β [-]	6.94
R_{E0} [nm/s]	93.8 (33.7)	R_{Em} [nm/s]	29.0 (10.5)
δ [-]	0.067

Fig. 3 Relationship between the polishing pressure and the Cu removal rate (Condition 2, Aperture ratio ≈ 30%)

り、配線パターンの段差解消予測に十分応用可能な精度であると考えられる。

4. 結言

電解複合 CMP における配線パターンの段差解消予測の第 1 段階として、独自に構築した加工レートシミュレーション手法を用いて、加工レートの研磨圧力依存性をシミュレートした。その結果、段差解消予測に十分応用可能な精度で研磨圧力依存性をシミュレートできた。

参考文献

- (1) H. Nagai, et al., Proc. IEEE IITC, (2004), p.145.
- (2) 土肥ほか, 精密工学会誌, Vol.73 No.7 (2007), p.745.
- (3) Y. Wada et. al., Proc. IITC 2005, (2005), p.126.
- (4) L. Economikos, et al, Proc. IITC2004, (2004), p.233.
- (5) S. Sato, et al., IEDM 2001, (2001), p.4.4.1.
- (6) Y. Toma, et al., Proc. Adv. Metallization Conf. 2006, p.565.
- (7) 福田ほか, 精密工学会 2009 年度春季学術講演会講演論文集, (2009), p.1023.
- (8) F. W. Preston, J. Soc. Glass Tech., 11 (1927), p.214.
- (9) 福田ほか, 日本機械学会関東支部第 15 期総会講演会講演論文集, (2009), p.459.