

ULSI の製造工程において、リソグラフィーの許容焦点深度は、素子の高集積化に伴い厳しくなる。そのため、化学的機械研磨 (CMP: Chemical Mechanical Polishing) による露光面平坦化(たん)の重要性が増している。CMP は、被研磨材と砥粒、研磨液および研磨布間のトライボロジー現象を利用した加工法であり、それぞれの機械的および化学的作用を定量的に明らかにしていくことは、年々要求性能が厳しくなる CMP プロセスを開発するうえで重要である。われわれは、層間絶縁膜 (SiO₂膜) CMP について、ウェーハと研磨布間の接触圧力分布が研磨後の平坦性に及ぼす影響、および Cu 膜 CMP について、研磨液成分の役割と各成分の濃度が研磨速度に及ぼす影響について明らかにした。

The margin of the depth of focus in lithography becomes more critical as the ULSI design rule becomes smaller. Chemical mechanical polishing (CMP) is an essential process for achieving a high degree of planarity, utilizing the tribological phenomena occurring between polished materials, slurry, abrasive and chemicals, and polishing pad. It is important to quantitatively understand the mechanical and chemical interactions of the above elements for the development of CMP processes.

In order to investigate the mechanism of CMP, this paper discusses the effects of contact pressure distribution between wafer and pad in SiO₂-CMP and the functions of the slurry ingredients in Cu-CMP.

1 まえがき

ULSI 製造工程において、CMP による露光面平坦化の重要性が増している。これは、素子や配線の微細化に対応するリソグラフィーの解像度の向上に伴い、その焦点深度が浅くなることによる。従来は、リフロー、エッチバックなどの技術により、部分的な平坦化が行われてきたが、CMP は、露光面全面にわたる平坦化技術として導入された。研磨液の化学的作用と研磨布および砥粒の機械的作用の複合効果による加工法であり、トライボロジーの現象を積極的に利用した技術である。

ここでは、層間絶縁膜 CMP における平坦化特性に及ぼすウェーハと研磨布間の接触圧力分布の影響、および Cu 膜 CMP における研磨特性に及ぼす研磨液組成の影響について述べ、CMP の研磨メカニズムの一端を紹介する。

2 CMP の概要

図 1 に CMP プロセスの構成を示す。一般の研磨と同様に、加工面を下にウェーハをターンテーブル上の研磨布に押し付ける。ウェーハと研磨布はともに自転しており、その相対運動と接触面間に介在する研磨液および砥粒の作用により、研磨加工が行われる。ULSI 製造工程における CMP の適用は、図 2 に示すとおり二つに分類される。一つは、素子や配線上に形成する層間絶縁膜 (SiO₂膜) の平坦化であ

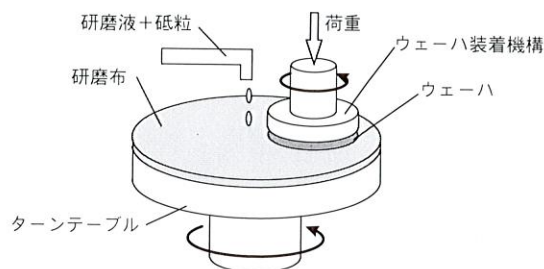


図 1. CMP プロセスの構成 ウェーハと研磨布はともに自転する。ウェーハを研磨布に押し付け、研磨布中央部から砥粒を含む研磨液を供給する。

Configuration of CMP process

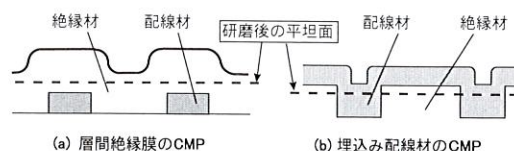


図 2. CMP プロセスの分類 CMP には、絶縁膜を平坦化するプロセス(a)と埋込み配線を形成するために余分な配線材を除去するプロセス(b)とがある。

Two types of CMP processes

り、もう一つは、埋込み配線の形成における平坦化で、余分な配線材の除去を兼ねる。成膜後の層間絶縁膜は下地の素

子や配線に起因する凹凸をもつが、CMPによりこの凹凸を低減し、次層のリソグラフィーに必要な平坦度を達成する。

ULSIの集積度の向上に伴い、その露光面に許容される焦点深度は低下し、CMPに求められる加工後の平坦度は今後ますます厳しくなる。また、コスト低減のため、ウェーハの大径化が進められており、加工の均一性に対する要求も増していく。さらに、デバイス的高速化に向けた新しい配線材に対応するCMPプロセスの開発も求められており、こうした要求に対応していくためには、CMPの研磨メカニズムを定量的に明らかにし、効率的なプロセス開発を進めていく必要がある。

3 層間絶縁膜 CMP における接触圧力分布の影響

CMPにおける研磨速度 R を表わすのに次の式がある。

$$\text{Preston の式}^{(1)}: R = K \cdot p \cdot V \quad (1)$$

ここで、 p はウェーハと研磨布の接触圧力、 V は相対速度、 K は Preston 係数と呼ばれる比例係数である。層間絶縁膜の CMP では、シリカ砥粒を分散した研磨液が広く用いられており、平坦な SiO_2 膜を研磨した場合にこの式がよく成り立つことが知られている。図1に示した構成において、ウェーハおよび研磨布の自転角速度を等しくすると、相対速度 V はウェーハ面内で一定となるため、その場合には、研磨速度は接触圧力に比例する。以下では、凹凸をもつ SiO_2 膜の平坦化過程に(1)式を適用し検討した結果について述べる。

3.1 平坦化特性

凹凸をもつ SiO_2 膜を効率的に平坦化するためには、凸部だけを研磨することが理想的であるが、実際には研磨布の変形および表面粗さ、砥粒の介在などにより、凹部でも研磨が進行する。したがって、平坦化のためには初期段差以上の研磨が必要であり、層間絶縁膜の形成にあたってはその研磨代を見込んでおく必要がある。

3.2 解析方法

ミクロンオーダの凹凸をもつ SiO_2 膜の研磨においても(1)式が成り立つとすると、ウェーハと研磨布の接触圧力を求めることにより、凹部を含めた研磨の進行を解析的に求めることができる。図3に解析手順を示す。凹凸をもつウェーハと研磨布の接触圧力分布を有限要素法により求め、(1)式から微小時間後の形状を算出する。形状が変わると接触圧力分布も変化するため、この計算を繰り返すことにより平坦化の過程を解析した⁽²⁾。接触圧力解析には、汎(はん)用コード ABAQUS を使用し、研磨布を弾性体、ウェーハを剛体とした。層間絶縁膜の CMP では発泡ポリウレタン製の研磨布が用いられ、その表面は散在する気泡に起因する数 10 μm の粗さをもっている。そのため、表面粗さ部を弾性率の低い層としてモデル化した。また、Preston 係数 K は、平坦

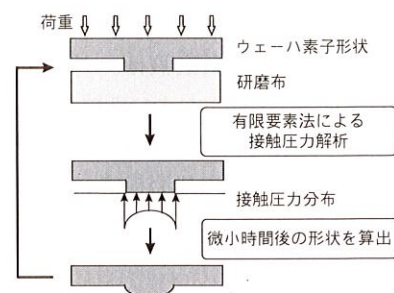


図3. 平坦化過程の解析手順 有限要素法による接触圧力解析と Preston の式に基づく形状変化を繰り返すことにより、平坦化過程を解析する。

Analysis flow of planarizing process

膜の研磨実験から求めた。

3.3 解析結果と実験結果の比較

図4は、二次元の繰返し凹凸形状をもつ SiO_2 膜の平坦化過程を実験および解析によって求めた結果である。解析結果は、研磨布表面粗さ部の弾性率をパラメータに実験値とフィッティングしたものであるが、(a)、(b)とも、その値は同じであり、研磨布モデルの最適化により、解析による平坦化過程の予測が可能であることが明らかとなった。この解析方法は、加工形状シミュレーション技術として、CMPプロセスの開発に適用されている。

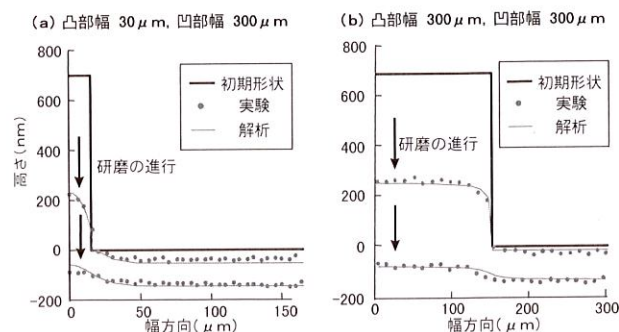


図4. 実験と解析による平坦化過程の比較 研磨により、凸部が平坦化されていく過程を示す。研磨布モデルの最適化により、解析結果は実験とよく一致する。

Comparison of planarizing process by experiments and analyses

4 Cu 膜 CMP における研磨液組成の影響

次世代高速デバイスでは、配線の微細化に伴う抵抗の増大や信号の遅延が問題となる。そのため、従来の Al に代わり Cu による配線の適用が期待されている。ここでは、Cu 多層配線を実現するために必要となる Cu 膜 CMP について、開発した研磨液の組成が研磨速度に及ぼす影響について述べる。

4.1 研磨メカニズム

Cu 膜 CMP 用に開発した研磨液は、グリシン ($\text{H}_2\text{NCH}_2\text{COOH}$)、過酸化水素 (H_2O_2) および砥粒を含む水溶液であり、研磨サンプルの Cu 表面の分析および電位測定から、図 5 に示すとおり、次のような研磨機構が作用していると考えられる⁽³⁾。

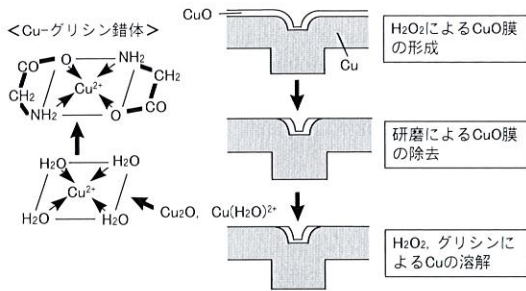


図 5. Cu 膜 CMP における研磨機構 凸部の CuO 膜は砥粒により除去され、過酸化水素水およびグリシンの作用により Cu が溶解し、研磨が進行する。

Polishing mechanism of Cu-CMP

- (1) 過酸化水素水の酸化作用により、Cu 表面に CuO 膜が形成される。
- (2) 砥粒と研磨布の機械的作用により、凸部の CuO 膜が優先的に除去される。
- (3) Cu は過酸化水素水とグリシンの作用により、Cu-グリシン錯体を生成し、水中に溶解する。

上記のとおり、過酸化水素水は Cu を溶解する(3)の作用と CuO 膜の形成によりそれを阻する(1)の作用をもつ。効率的な Cu 膜 CMP のためには、(1)と(3)の作用のバランスが必

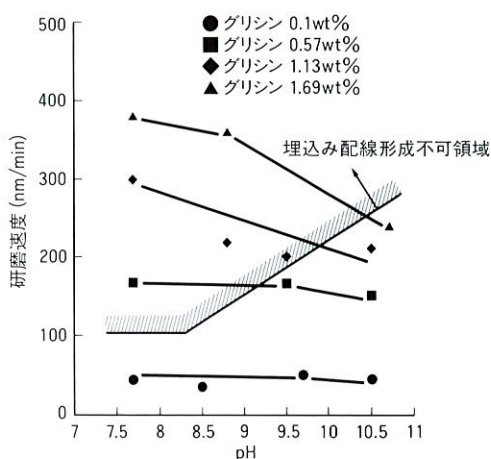


図 6. Cu 膜 CMP における pH およびグリシン濃度の影響 研磨速度の変化および埋込み配線形成の可否を示す。アルカリに調整することにより、形成可能なグリシン濃度が増加し、実用的な研磨速度が得られる。

Effects of pH and glycine content in Cu-CMP

要であるが、過酸化水素水の濃度調整では、実用的な研磨速度が得られなかった。一方、グリシンの添加量を高くして(3)の作用を強くすると、CuO 膜が残る凹部でも Cu の溶解が進み、埋込み配線が形成できなくなる。そのため、研磨液に水酸化カリウム (KOH) を加え、pH の調整による研磨特性の最適化を行った。

4.2 pH 調整による研磨特性の最適化

研磨液に水酸化カリウムを添加し、Cu 膜表面に形成される CuO 膜の厚みを調べた結果、pH が高いほど厚くなることがわかった。図 6 に、研磨液に水酸化カリウムを加えると同時にグリシンの添加量を増やし、研磨速度および埋込み配線形成の可否を調べた結果を示す。研磨液の pH をアルカリに調整することにより、埋込み配線が形成可能なグリシン濃度が増加し、最大で 250 nm/min の研磨速度が得られ、実用的な Cu 膜 CMP が可能であることを確認した。

5 あとがき

層間絶縁膜 CMP において、研磨後の平坦性がウェーハと研磨布間の接触圧力分布でよく説明できることがわかった。また、Cu 膜 CMP において、研磨液成分の役割を明らかにするとともに、各成分の濃度の最適化により、実用的な研磨速度が得られることを確認した。今後とも進む ULSI の高集積化に対応していくためには、CMP をトライボロジー現象としてとらえ、その研磨のメカニズムをさらに定量的に明らかにしていくことが重要である。

文 献

- (1) L. M. Cook. Chemical Processes in Glass Polishing. Journal of Non-Crystalline Solids. 120. 1990, p.152-171.
- (2) 西岡岳, 他. "CMP における荷重分布の影響 (第一報: 平坦化特性)". トライボロジー会議予稿集. 大阪, 1997-11. 1997, p.345-346.
- (3) 平林英明, 他. "Cu-CMP 用研磨液の開発—pH 調整による研磨速度の高速化". 1995 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集. 1995, p.411-412.



西岡 岳 NISHIOKA Takeshi

研究開発センター 機械システム研究所主任研究員。
トライボロジーの研究・開発に従事。日本機械学会、日本
トライボロジー学会会員。
Mechanical Systems Research Labs.



間瀬 康一 MASE Yasukazu

半導体生産技術推進センター 半導体プロセス技術第一部主務。
半導体多層配線工程の開発に従事。
Semiconductor Manufacturing Engineering Div.



堅山 佳邦 TATEYAMA Yoshikuni

半導体生産技術推進センター 半導体プロセス技術第一部主務。
半導体多層配線工程の開発に従事。
Semiconductor Manufacturing Engineering Div.