CMP プロセスの膜厚制御技術*

Thickness Control Technology for CMP Process

渡辺和英**

Katsuhide WATANABE

Key words CMP, thickness control, end point detection, sensor, Cu, ILD, STI, profile control, adaptive control

1. はじめに

半導体製造工程において、絶縁膜成膜後の平坦化や金属配線の形成過程で使用される CMP (Chemical Mechanical Polishing) 装置は、ロジック (CMOS) やメモリ (DRAM, 2D/3D NAND) の各製造工程で使われ、最近では、薄化したシリコンウエーハどうしの貼り合わせや後工程の領域でも使用され始め、その用途が拡大しつつある。近年、半導体製造工程 (FEOL, MOL, BEOL) で求められる研磨終了後の残膜厚の精度、面内均一性がますます厳しくなり、その要求精度は数 nm 以下となりつつある。この CMP 装置に対する要求性能を実現する重要な技術として膜厚制御技術がある。CMP 装置で研磨するウエーハ上の膜厚は、数十から数百 nm、最近のメモリ (3D NAND) では数 μm ある。これら各種の膜を研磨して初期段差すなわち研磨前の膜厚段差を解消して得られる研磨性能 (残膜厚、面内均一性) は、製品の歩留まりに直結するため厳しく管理しなければならない。しかし、CMP は複雑で微妙なプロセスで、装置運転状態のばらつきや使用される消耗品 (研磨布 (パッド)、研磨剤 (スラリー)、ドレッサー等) のわずかな品質ばらつき、経時変化の影響で研磨速度 (レート) が変化する。さらに前工程の成膜厚さや膜質のばらつきもあり、指定されたレシピで研磨するだけでは目標性能 (残膜厚、面内均一性) を達成するのは、ますます困難となってきた。そのため、精度の厳しいプロセスでは、研磨中のウエーハ面内の膜厚をモニタして、リアルタイムで面内膜厚プロファイルを制御し目標残膜厚の終点検出を行っている。また、常時各消耗品の状態を観測・管理するシステムは、CMP プロセスの生産性向上、半導体製品の歩留まり向上のためには欠かせない技術となっている。本稿では、CMP 装置に搭載している膜厚制御技術の概要を紹介する。

2. CMP 制御システム

図 1 に CMP 研磨部の制御システムの模式図を示す。CMP はトップリングで保持したウエーハをテーブル上に貼られた研磨パッド上にスラリーを流しながらトップリング内エアバッグで押し付けて、ウエーハ表面の凸凹膜を削り平坦化するプロセスである。エアバッグは複数エリアに分かれ、各エリアの圧力を制御することでウエーハ面内の研磨レートを制御している。また、平坦化と同時に所定の膜厚を終点検知して精度良くプロセスを終了させるため、膜厚をモニタする膜厚検出センサをテーブルに搭載している。モニタする膜には、金属膜と絶縁膜があり、金属膜検出用に渦電流方式の膜厚検出センサ、絶縁膜検出用に光学式の膜厚検出センサが搭載されている。一方で、研磨対象膜の下地にストッパー膜を設けて、境界面を終点検出するプロセスもある。

前述したように、CMP プロセスは使用する消耗材の影響を大きく受ける。例えば、スラリーの流量、パッドの高さ、パッドの温度、ウエーハを保持するリテーナリングの高さ等があり、プロセスの高精度化・安定化を図るためには、これら消耗材の状態をモニタ・管理して変動の影響を

図 1 CMP 研磨部の制御システム

*原稿受付 平成 29 年 12 月 20 日
(株)荏原製作所 (東京都大田区羽田旭町 11-1)

図2 膜厚制御システム

図3 渦電流方式の測定原理

最小化する必要がある。

3. 膜厚制御技術

3.1 膜厚制御システム

図2にCMPに搭載する膜厚制御システムを示す。本システムは、膜厚検出センサ、アンプ、信号処理ユニットおよび膜厚制御PCから構成され、膜厚検出センサとアンプはターンテーブル内に搭載してテーブルと共に回転する。信号処理ユニットと膜厚制御PCはテーブルの外部に搭載される。膜厚検出センサからの信号は、回転する機器との電気的接続を可能にするロータリーコネクタを介して信号処理ユニットに接続している。そして、膜厚制御PCで事前に取得した研磨初期から終了までの膜厚参照データに基づき、膜厚のモニタ、終点検出を行う。そして、この終点信号をCMPコントローラへ送り、研磨終了動作を行う。

3.2 金属膜の終点検知¹⁾

研磨中の金属膜厚は、渦電流方式の膜厚検出センサでモニタしている。この渦電流式センサは図2に示すように、ターンテーブルのウェーハ中心を通過する位置に設置され、テーブルを貫く方向に磁力線を発生している。テーブルが回転すると渦電流式センサはテーブルと共に回転し、トップリングに保持されたウェーハの下を通過する。図3に渦電流方式の測定原理を示す。ウェーハ面上に導電性の膜が存在すると、磁力線が導電性の膜を通過するため、ウェーハ面上に渦電流が発生する。この渦電流は、金属膜の

図4 Cuプロセスの終点検知例

図5 光測定方式の測定原理

抵抗、すなわち金属膜の厚さに応じて大きさが変化する。一方、渦電流が流れると当初の磁力線とは逆方向に磁力線が発生する。この逆方向に発生する磁力線の強度を測定することで、金属膜の厚さを計測することができる。図4にCu CMPプロセスへの適用例を示す。ウェーハの研磨が進行すると、ウェーハ面上の金属膜（Cu）が減少する。これに伴って渦電流式センサの出力が変化することで膜厚変化量を測定し、金属膜（Cu）を完全に除去した終点を検知しているのが確認できる。この渦電流方式は、金属膜の導電率が高い材料ほど渦電流が流れやすく、膜厚変化に対する感度が大きくとれるので、主に銅（Cu）、タングステン（W）等の金属材料の配線部分における終点検出に使用されている。

3.3 絶縁膜の終点検知²⁾

研磨中の絶縁膜厚は光の干渉を利用した光学式の膜厚検出センサでモニタしている。センサは、図2に示すようにテーブルのウェーハ中心を通過する位置に設置され、テーブル1回転ごとにウェーハ下を通過する間にウェーハ面に光を照射して測定を行う。図5に示すように、基板上の

図6 光学式センサヘッド

光透過性の薄膜に光が入射したとき、反射光の強度は薄膜の表面からの反射光（R1）と基板との界面からの反射光（R2）を合成したものになる。このとき R2 が薄膜内を通過する光路の長さに応じて両反射光の間に位相差が生じ、反射強度に強弱が生まれる。したがって、研磨により膜厚が変化すると位相差が変化して反射光の強度が波長ごとに周期的に変わることになる。この反射強度の変化をモニタすれば膜厚の変化を知ることができる。膜厚 d は下式で表され、 n と λ により反射強度のピーク間隔が決まる。

$$d = \lambda / 2n$$

n ：薄膜の屈折率、 d ：薄膜の厚さ

λ ：真空中の光の波長

しかし、実際に CMP で削る膜は微細配線が多層に形成された最上層の凹凸膜であり、さらに研磨中のウェーハ表面には研磨砥粒や削り屑が付着している。これらの下地構造の影響や付着物等による信号のゆがみやノイズを分離して、膜厚と相関のある信号だけを取り出すことで高精度化を図っている。図6に光学式センサのヘッド部分の構造を示す。センサヘッドには測定部に純水を供給するための給排水路が設けられ、給水路内に投光用と受光用の光ファイバが挿入されている。光は透過性が良い純水を光路として研磨布に開けられた孔からウェーハ表面に入射する。研磨布に開けられた孔はできる限り小さくして、研磨性能に影響を与えないように配慮した。また、給水の目的は光ファイバ先端とウェーハ表面測定部位との間に透明な光路を形成することである。これを可能にする給水システムをテーブルに備えている。CMP で使用するスラリーは不透明液で粒径数十から数百 nm の研磨粒子を含有している。このスラリーが測定部の純水中に混入すれば、光の透過率低下、散乱を招き正常な測定ができない。また、大量の純水が研磨布上に流出すればスラリーを希釈して研磨プロセスに悪影響を与えかねない。本給水システムは、ウェーハ表面の洗浄と測定光路内に流入するスラリーの排除を効率良く行うことができ、スラリー混入による信号ノイズの発生を抑制している。また、測定中は研磨布の孔がウェーハでふさがれる形になるので供給水は排水路へ流れ研磨布上に流れ出ることもない。図7に光学式のシステム構成を示す。光源は、ハロゲンまたはキセノンフラッシュランプ

図7 光学システム

残膜厚プロファイル

図8 ILD プロセスの終点検知例

を使用している。アンプ部の分光器で反射光を分光し、各波長の強度をデジタル信号に変換、信号処理ユニットでデジタルデータをフィルタリングする等の信号処理をして波長領域の反射強度データに変換する。変換取得したデータは、膜厚制御 PC で逐次膜厚を推定して終点検知を行う。図示していない給排水用の部品はテーブル内に取り付けられ、給水配管とはロータリージョイントを介して接続されている。膜厚の推定方法は、ウェーハのパターン形状や下地構造等から反射強度が受けた影響を最小化して推定可能なアルゴリズムを選択して行う。このように、信号処理や推定アルゴリズムを最適化することで高精度な膜厚推定、終点検知を実現している。図8に ILD CMP プロセスへの適用例を示す。ウェーハの研磨が進行すると、ウェーハ面

図9 STIプロセスの終点検知例

上の絶縁膜 (Oxide) が減少し、これにともない干渉した反射光強度のスペクトラム変化 (波長領域) から膜厚推定することで、ウェーハ面内の膜厚変化の推移をモニタしているのが確認できる。この絶縁膜変化の見やすさは、下地膜の屈折率に大きく依存する。

3.4 異種膜界面の終点検知

CMP プロセスでは、研磨対象膜の下地に研磨ストップパー膜を設けて、境界面を終点検出するプロセスもある。主にスラリーの選択比に依存するが、対象膜を研磨して、下地の異種膜との界面が露出した際に、研磨レート、すなわち研磨による摩擦力が変化する。この摩擦力の変化を捉えて終点検知する方法がある。例えば、ターンテーブルのモータトルク (電流) をモニタして終点検知することが考えられる。図9にSTI CMP プロセスへの適用例を参考に示す。まず、STEP1でウェーハの研磨が進行すると、ウェーハ面上の絶縁膜 (Oxide) の段差を解消しテーブルモータのトルク電流が増加する (平坦化)。そしてSTEP2で圧力を下げて研磨を行い、絶縁膜をクリアして下層のストップパー膜が露出したときのトルク変化から界面での終点検知が可能と考えている。

3.5 プロファイル制御

膜厚制御システムでは、前述した膜厚推定、終点検知 (膜厚、界面) のほかにウェーハ面内膜厚のプロファイル制御を行っている。図10に本システムの制御ブロック図を示す。まず、各種膜厚検出センサからのデータを膜厚制御部に入力し、膜厚推定部でウェーハ面内の膜厚 (プロファイル) を計算、この膜厚計算値から制御圧を演算する圧力計算部に送る。圧力計算部では適応制御を導入することで、以下のプレストン則で示される研磨モデルをベースに研磨中のレート変化にも対応し、目標プロファイルに漸近的に一致する制御圧 (操作量) を演算してCMPコントローラへ送り、リアルタイムで膜厚プロファイルの制御を行う。

$$p_r = kpv$$

p_r : 研磨速度 (m/s), k : 定数 (Pa^{-1})

図10 プロファイル制御システム

p : 研磨圧力 (Pa), v : 相対速度 (m/s)

前項で紹介した図8では、本制御システムで研磨中のプロファイル制御を行っており、研磨進行していく中で、プロファイルのレンジが小さくなっているのが確認できる。また、実際にはトップリング内のエアバッグ圧力を制御しており、その時のエアバッグエリアごとの制御圧力の推移を示している。

4. おわりに

近年、半導体製造工程の中でCMPプロセスの応用範囲が広がり、そこで要求される精度が世代ごとに厳しくなっている。この要求を達成するには、ロバストで安定なCMPプロセスを構築しなければならない。そのためには、プロセスに影響があるパラメータをリアルタイムで精度良くモニタし、制御・管理する技術が非常に重要である。最近では、半導体製造工程でVM (Virtual Meteorology) を活用したAPC (Advanced Process Control) の研究開発³⁾⁴⁾も進められている。ただし、CMPプロセスは、微視的には解明されてない部分が多く、消耗材の影響もあり、各種プロセスに対応した精度の高いモデル作成が難しい。それら不明確な部分を補間するために、プロセス性能に影響する変動要因のモニタやその変動を極力抑制する制御が一層求められてくると考える。

参考文献

- 1) 三谷隆一郎: CMP 終点検知モニタ用渦電流式センサとその応用, エバラ時報, **234** (2012) 3-6.
- 2) 大田真朗, 中井俊輔, 辻仁志: 酸化膜 CMP 用光学式終点検出モニタ, エバラ **207** (2005) 25-29.
- 3) 玉置研二, 金子俊一: 消耗部材劣化の影響を予測する半導体 CMP プロセス制御, 計測自動制御学会論文集 **48**, 6 (2012) 326-334.
- 4) S. Yasuda, T. Okazaki and K. Nomura: The VM/APC activities in Sony Semiconductor, AECAPC Asia 2013.

渡辺和英

(株) 荏原製作所 精密・電子事業カンパニー CMP 事業部 CMP プロセス部長。(株) 荏原製作所 入社後、(株) 荏原総合研究所にて磁気浮上・振動制御に関する研究開発に従事。2007 年より現 CMP 事業部へ異動。2011 年より現職。博士 (工学) (九州大学)。