

モデルベースシミュレーションを利用したCMPプロセスの状態量推定

中央大学 ○平野航大, ◎鈴木教和 金沢大学 橋本洋平 荏原製作所 山木暁, 安田穂積, 望月宜宏

要旨

本研究では、CMPにおける研磨効率をモデル化し、プロセスの状態量を高精度推定する技術を提案する。プレストン則に基づき、ウェハ面内の摩擦係数の動的・空間的变化と研磨効率の関係をモデル化する。さらに、研磨トルクと摩擦係数の線形関係式を与え、研磨システムのインプロセスデータを逆解析することで、モデルパラメータを高速同定する。研磨実験を通じて研磨効率分布とその動的変動を推定し、提案手法の実行可能性を検証する。

1. 緒言

半導体製造プロセス技術の一つであるCMP (Chemical Mechanical Polishing) では研磨量制御技術と安定化技術の高度化が要求されている。同時に、製造コストを低減する必要があり、スラリーや研磨パッド、コンディショナといった消耗材の使いこなしの重要性が増している。現在、CMPプロセスの高度化を目的として、デジタルツインを活用する様々な取り組みが検討されている。本研究においては、物理モデルを活用するモデルベース技術の開発について検討する。CMPプロセスにおける研磨レートが研磨効率 k_p と研磨圧力および相対速度の積に概ね比例するという経験則 (プレストン則) が知られている¹⁾。このうち研磨圧力と相対速度については推定する技術が概ね確立されている²⁾。一方で研磨効率は様々な要因に依存し、直接的な計測が困難であることからモデル化が十分に検討されていない。

本研究では研磨効率がウェハ面内において一様に分布せず、動的に変化すると仮定し、数的にモデル化を行う。一般に、研磨定盤の回転トルクが大きいほど研磨効率が高い性質が知られている³⁾。本研究では、このレート・トルク依存性に着目し、研磨プロセスにおける研磨効率の空間的・時間的变化の逆解析を行う。CMP装置の動的な運動を考慮したレート・トルクシミュレーション技術を開発し、研磨中の各種計測信号からモデルパラメータの同定を行う。この同定値を用いて、CMPプロセスにおける各種状態量の高精度推定技術を開発する。検証実験を通じて、研磨効率の空間的分布およびその時間変化の影響について明らかにする。

2. CMP装置の運動

CMPプロセスにおいて研磨パッド、トップリング、ドレッサに生じるトルクはそれぞれの相対運動に起因する。図1にCMP装置の模式図と各種ベクトルを示す。プラテン、リテーナ付きウェハキャリア (トップリング)、ドレッサは反時計回りに回転運動を生じ、トップリングは上下の直線軌道、ドレッサは円弧軌道の揺動運動を生ずる。これらの5軸トルクの回転位置およびトルク電流はサーボ系のインプロセスデータとして取得することができる。なお、研磨中に急激な加減速運動は生じないため、トルク指令値と実際の外乱トルクが一致するとみなす。ウェハ、リテーナリング、ドレスとパッドの接触面内部における任意点の変位ベクトル \mathbf{a} を定義する。この任意点に生じる摩擦力ベクトルと相対速度ベクトルから各軸に生じる任意時間のトルクを定式化して求める。例えば、 k 番目の時間ステップ $t = k\Delta t$ におけるプラテントルク ${}^P_r N_k$ は式(1)で得ることができる。

$${}^P_r N_k = \left| \sum_{i=1}^{N_i} {}^{PW}_r \mathbf{a}_{ik} \times {}^{P-W} d\mathbf{F}_{ik} + \sum_{\theta=1}^{N_\theta} {}^{PR}_r \mathbf{a}_{\theta k} \times {}^{P-R} d\mathbf{F}_{\theta k} + \sum_{\theta=1}^{N_\theta} {}^{PD}_r \mathbf{a}_{\theta k} \times {}^{P-D} d\mathbf{F}_{\theta k} \right| \quad (1)$$

ほかの機械要素に生じるトルク ${}^{TR}_r N_k$, ${}^D_r N_k$, ${}^{TR}_o N_k$, ${}^D_o N_k$ について

も同様に推定することができる。

ベク	\mathbf{a}	位置
トル	\mathbf{v}	速度
	$\boldsymbol{\omega}$	角速度
運動	r	回転
添え字	o	揺動
機械	P	パッド
要素	W	ウェハ
添え字	R	リテーナリング
	TR	トップリング
	D	ドレッサ

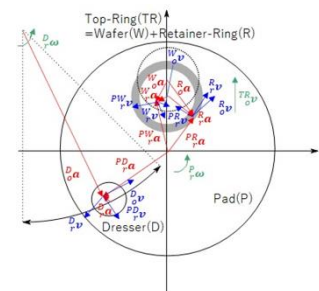


図1 CMP装置の運動の模式図と各種ベクトルの定義

3. 研磨レートと研磨効率

CMPプロセスにおいては、パッドと加工物の間に捕捉された砥粒が作用して材料除去が生じると考えられる。このためウェハ面内に保持された砥粒の分布が、摩擦係数と研磨効率の分布に大きな影響を与えると考える。また、1枚のウェハを研磨する間に動的に研磨トルクが変化する現象が知られている。これは砥粒供給状態と研磨パッド表面状態の変化に依存している可能性がある。そこで本研究において採用するモデルについて以下に説明する。

3.1 研磨レート・研磨効率モデル

本研究では研磨レートモデルとして式(2)に示す修正プレストン則を用いる。

$$MRR = k_p p v^{0.48} \quad (2)$$

また、研磨トルクと研磨効率に高い相関性があることが Tamai らによって明らかにされている³⁾。そこで、研磨効率係数 k_p とウェハ-パッド間の摩擦係数 $W\mu$ に式(3)が成立するとしてモデル化する。

$$k_p = \beta W\mu \quad (3)$$

ここで、 β は比研磨効率係数である。

3.2 ウェハ内摩擦係数分布の多項式近似モデル

研磨プロセスでは、ウェハ面内へのスラリー供給状態などに依存してウェハ面内で研磨量分布が生じることが知られている。これはウェハ面内における有効作用砥粒数分布および摩擦係数分布が一様にならないことを示唆している。本研究ではウェハ面内における摩擦係数分布を多項式分布としてモデル化する。多項式分布中心に対するウェハ面内の任意位置の距離 $W_r b_i$ を用いて摩擦係数分布 $W\mu(r, \theta)$ を式(4)で表す。

$$W\mu(r, \theta) = \sum_{j=0}^{N_j} W_r b_j^j \mu_0 \quad (4)$$

$$W_r b = |W_r \mathbf{r}(r, \theta) - W_r \mathbf{r}_0|$$

μ_0 は多項式関数の係数であり、 j は多項式の係数である。

3.3. 摩擦係数の動的変化モデル

酸化膜 CMP において、研磨開始と同時に研磨トルクが上昇し、その後時間経過に伴い研磨トルクが減少する現象が知られている。これは研磨パッド表面、すなわちアスペリティの動的な状態変化に依存すると考える。この状態変化を代表する摩擦比例定数 f_{p1}, f_{p2} を定義し、摩擦係数の動的変化をモデル化する。 f_{p2} は研磨開始時にトルクの立ち上がりが遅れる現象を一次遅れ関数としてモデル化した関数である。 f_{p1} はトルク低下の現象を一次遅れ関数としてモデル化した関数である。これらの関数から、パッドの表面状態を考慮するパッド表面状態関数 $f_p(t) = f_{p1}(t)f_{p2}(t)$ をモデル化する。 $f_p(t)$ と見かけの摩擦係数 ${}^W\mu(r, \theta)$ の積から動的に変化するウェハ面内の摩擦係数分布 $\mu(f_p, {}^W\mu) = f_p(t){}^W\mu(r, \theta)$ を求める。

4. 最小二乗法によるパラメータ同定

上述のモデル化に基づいて特性行列 C, E を作成し、5 軸トルク ${}^P_r N, {}^{TR}_r N, {}^D_r N, {}^{TR}_o N, {}^D_o N$ および研磨レート MRR と摩擦係数との間に、次の関係式を与えることができる。

$$\begin{bmatrix} {}^P_r N \\ {}^{TR}_r N \\ {}^D_r N \\ {}^{TR}_o N \\ {}^D_o N \\ MRR \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^P W_r C & {}^P R_r C & {}^P D_r C \\ {}^T W_r C & {}^T R_r C & {}^T D_r C \\ 0 & 0 & {}^P W_r C \\ {}^D W_o C & {}^D R_o C & 0 \\ 0 & 0 & {}^D D_o C \\ \beta E & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu(f_p, {}^W\mu) \\ R_r \mu \\ D_r \mu \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^P N_{fr} \\ {}^{TR} N_{fr} \\ {}^D N_{fr} \\ {}^{TR} N_{fr} \\ {}^D N_{fr} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

N_{fr} は 5 軸トルクそれぞれに発生する装置内部の機械摩擦トルクである。5 軸トルクの時刻歴データ ${}^P_r N, {}^{TR}_r N, {}^D_r N, {}^{TR}_o N, {}^D_o N$ と研磨レートの空間分布データ MRR は計測可能であり、特性行列は CMP 装置の運動情報から算出することができる。このため、最小二乗法を適用することで、摩擦係数を高速高精度同定することができる。ただし、すべての未知パラメータを完全に分離することができないため、いくつかのパラメータについては初期値を仮定し、段階的なパラメータ同定を行う。

5. 実験結果と推定結果の比較

提案手法の検証のため、ラボ用 CMP 装置（不二越機械工業製 RDP-500）を用い、6 インチ酸化膜ウェハの研磨実験を実施した。まず、MRR の面内分布を分析するため、トップリングの回転を止めて研磨を行う“ストップ研磨”を行った。ここでは、プラテン電流を用いてプラテントルクを推定する代わりに、トップリングの横方向荷重の計測値を用いた。また、リテーナの摩擦係数をウェハの摩擦係数と独立して同定するため、研磨中に瞬間的にリテーナ/ウェハ加圧比を変化させた。実験結果をもとにそれぞれのパラメータの同定を行った。

同定されたパラメータより推定したトップリングの横方向荷重と MRR の実験値との比較を図 3 に示す。荷重、MRR ともに推定値と実験値が概ね一致している。各パラメータの同定に要した時間は約 4 秒（Core-i7 1065G7, メモリ 16GB）であり、提案手法では高速演算が可能である。図 4 に摩擦係数分布 ${}^W\mu_i(r, \theta)$ と動的変化 $f_p(t)$ の時間推移についての推定結果を示す。図に示すように提案手法では、ウェハ面内の摩擦係数分布を推定することが可能である。推定結果より、プラテンの回転中心に近い領域においてやや摩擦係数が高くなっていることが分かる。これはスラリーの供給位置に近い回転半径で有効作用砥粒数が増加し、研磨効率が向上する性質を示唆していると考えられる。推定された摩擦係数の分布中心位置（ウェハ下端）を利用し、回転研磨実験に対するシミュレーションを行った。推定したプラテントルクと MRR の実験値との比較を図 5 に示す。トルク、MRR ともに推定値と実験値がよく一致していることが分かる。

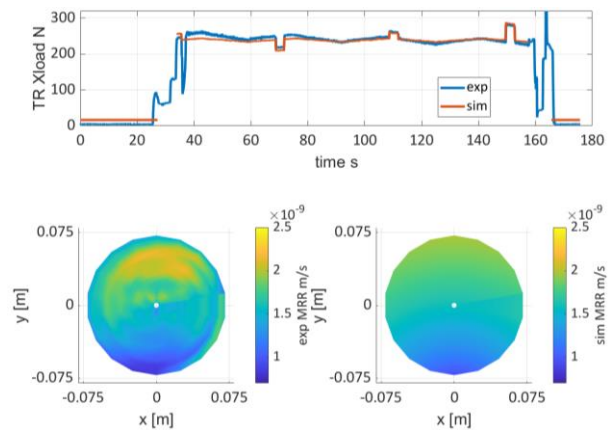


図 3 TR 荷重と MRR の推定値と実験値の比較（非回転研磨）

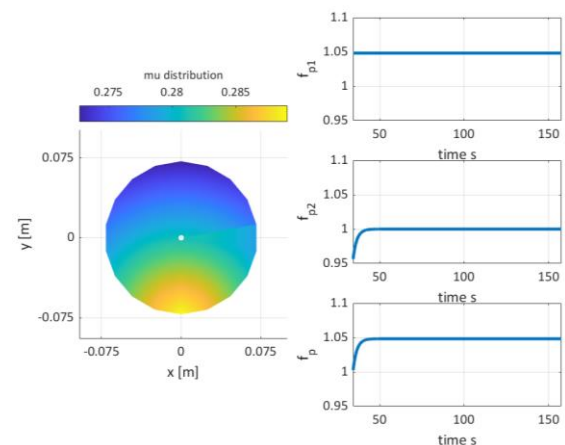


図 4 摩擦係数の空間的・動的変化の推定結果（非回転研磨）

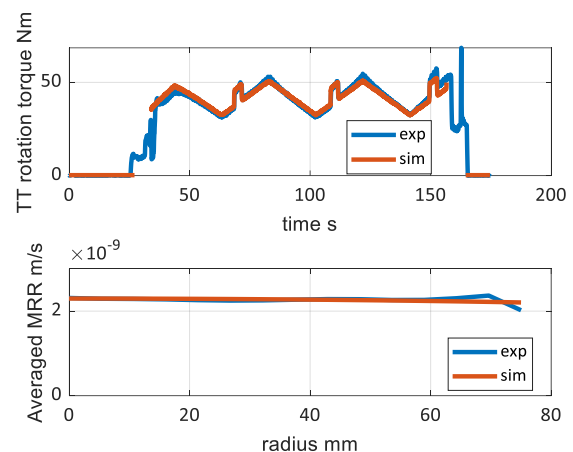


図 5 プラテントルクと MRR の推定値と実験値の比較（回転研磨）

6. 結論

CMP 装置のインプロセスデータを利用して、モデルベースで状態量の推定を行った。提案手法により、研磨トルクや MRR に加えて摩擦係数の空間分布のような直接計測が困難な状態量を予測することができる。また、装置のインプロセスデータを用いて未知パラメータの高速同定が可能であり、推定値が実験値とよく一致することを確認した。今後はモデルのさらなる高精度化に取り組みるとともに、新しいプロセス制御技術への応用を目指す。

参考文献

- 1) Preston, F.W. (1927) Journal of the Society of Glass Technology, 11, 214-256.
- 2) Suzuki N, et al., (2017) Annals of the CIRP 66(2):329-332.
- 3) Tamai K, et al., (2011) J. Elec. Soc. 158: H333-H337.