

両面研磨におけるウェハ—キャリア間の摩擦係数推定

金沢大学 ○佐野 智哉, ◎橋本 洋平, 古本 達明, 小谷野 智広, 細川 晃
バンドー化学 武居 正史, 西藤 和夫, 笹島 啓佑

両面研磨におけるウェハ挙動の解析に大きく影響するウェハ—キャリア間の摩擦係数の推定手法を開発し、その推定を行った。開発手法では、片面研磨時のウェハとキャリアの力学的関係に基づき、摩擦係数の推定を行う。推定される摩擦係数は0.19と無視できる大きさではなく、ウェハ挙動を検討する上で、ウェハ—キャリア間の接触は重要な要素であることを明らかにした。また、このことからウェハ挙動の正確な解析を行う上で、著者らが開発しているウェハ—キャリア間の接触状態を正確にモデル化した手法の有用性も確認された。

1. 緒言

加工物を定盤やパッドで挟込み、加工物の両面に対して同時に研磨を行う両面研磨は、加工物の両面において良好な面粗さと平面度、良好な両面の平行度を得ることができる重要な加工技術であり、特に半導体ウェハの製造ではウェハの初期研磨として不可欠な役割を果たしている。しかし、両面研磨の理論構築はほとんど行われておらず、技術開発や加工条件の選定は勘と経験に頼っている状況である。このため、両面研磨の技術進展に繋がる理論構築や加工特性の推定技術の開発は重要な課題であるといえる。

ここで、両面研磨時のウェハの挙動は、研磨量分布に影響する研磨速度分布や研磨液の流れだけでなく、ウェハの破損などにも影響する、理論構築等に重要な情報である。しかし、両面研磨では、ウェハの挙動はウェハと接触する上下の定盤またはパッドと加工物を保持するキャリアとの相対運動により受動的に決定されるため解析は容易ではなく、両面研磨時のウェハ挙動は未だ解明されていない。これに対し、著者らはウェハ挙動の解析には加工物と接触する上下の定盤とキャリアとの力学的つりあいが重要であると考え、接触状態および接触条件を正確にモデル化した、力学的関係に基づくウェハ挙動の解析手法を開発している¹⁾。ただし、解析されるウェハ挙動は、解析条件の一つであるウェハ—キャリア間の摩擦係数に大きく影響する²⁾にもかかわらず、これまでにこの摩擦係数の計測や推定した報告は存在しない。このため、本研究ではウェハ挙動の高精度な解析を実現するために、ウェハとキャリアとの間の摩擦係数の推定を行う。

2. 両面研磨におけるウェハ—キャリア間の摩擦係数推定手法

2.1 摩擦係数推定手法の概要

図1に両面研磨の模式図を示す。一般的な両面研磨機は、上下の定盤とサンギアとインターナルギアから構成される。サンギアとインターナルギアの間にはキャリアが設置され、キャリアはこれらのギアにより自転運動と公転運動が与えられる。ウェハはキャリアに形成された穴に保持され、キャリアと接触しながら運動する。そして、ウェハと上下の定盤との境界面に研磨液を供給して、相対運動を与えることでウェハの両面を同時に研磨する。

ウェハとキャリアの接触は、両者が十分に平坦な面であるため、垂直抗力による非線形性は生じないと考えられる。このため、本研究では、両面研磨機で上定盤を用いない片面研磨を行い、その時のウェハ挙動を観察することにより、ウェハ—キャリア間の摩擦係数を推定する。

2.2 力学的関係に基づくウェハ挙動の推定手法

図2に加工面内における、キャリアとウェハの幾何学的関係を示す。ここでは、図に示すように、各ギアの回転軸を原点Oとし、キャリア中心O_cに向かう方向をp軸、その垂直方向をq軸とする座標系を考える。原点とキャリア中心の距離をL_c、キャリア中心とウェハ保持穴の中心O_hの距離をL_hとし、p軸に対するウェハ保持穴中心の角度をθ_hとすると、ウェハ保持穴中心のウェハ上の半径r、角度φに存在する点Aの位置p(r, φ)は式(1)で表される。

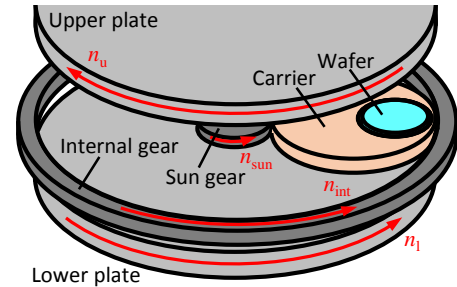


Fig. 1 Schematic illustration of double side polishing

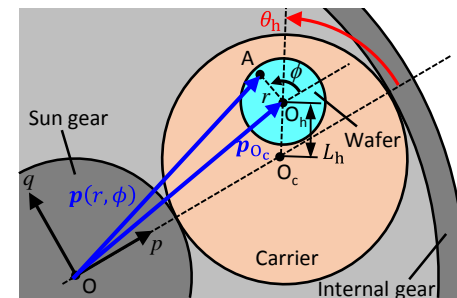


Fig. 2 Geometry of carrier and wafer

$$\mathbf{p}(r, \phi) = L_c \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} + L_h \begin{Bmatrix} \cos \theta_h \\ \sin \theta_h \end{Bmatrix} + r \begin{Bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{Bmatrix} \quad (1)$$

なお、ここではウェハとウェハ保持穴のサイズはほぼ同じと考え、本定式化では両者の中心のズレは無視する。

このウェハ上の点Aに、下定盤との接触により生じる摩擦力 $\mathbf{f}^{lw}(r, \phi)$ は、式(2)で表されるウェハと下定盤の間の相対速度 $\mathbf{v}^{lw}(r, \phi)$ と方向が一致するため、式(3)により表すことができる。

$$\mathbf{v}^{lw}(r, \phi) = 2\pi(n_1 - n_{c_{rev}})R_{c_{rev}} \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix} + 2\pi(n_1 - n_{c_{rot}})L_h \begin{Bmatrix} -\sin \theta_h \\ \cos \theta_h \end{Bmatrix} + 2\pi(n_1 - n_w)r \begin{Bmatrix} -\sin \phi \\ \cos \phi \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{f}^{lw}(r, \phi) = \mu^l(r, \phi) \cdot \mathbf{p}^l(r, \phi) \cdot dA \cdot \frac{\mathbf{v}^{lw}(r, \phi)}{|\mathbf{v}^{lw}(r, \phi)|} \quad (3)$$

ここで、 $\mu^l(r, \phi)$ はウェハ上の点Aにおける下定盤との摩擦係数であり、 $\mathbf{p}^l(r, \phi)$ は点Aにおける下定盤との研磨圧力、 dA は微小面積である。また、 $n_{c_{rot}}$ と $n_{c_{rev}}$ はキャリアの自転回転数と公転回転数であり、 n_1 は下定盤の回転数、 n_w はウェハの回転数である。ここで、 $n_{c_{rot}}$ と $n_{c_{rev}}$ 、 n_1 は両面研磨の駆動条件の設定値であるが、 n_w は接触状態等によって受動的に決定される。このため、 n_w を同定することで、相対速度 $\mathbf{v}^{lw}(r, \phi)$ および摩擦力の方向 $\mathbf{v}^{lw}(r, \phi)/|\mathbf{v}^{lw}(r, \phi)|$ の推定が可能となる。

そして、式(4)に示すように摩擦力 $\mathbf{f}^{lw}(r, \phi)$ をウェハ全面で面積積分をすることにより、下定盤との接触により生じる力 \mathbf{F}^l を算出することができる。また、式(5)に示すように摩擦力 $\mathbf{f}^{lw}(r, \phi)$ とウェハ中心から点Aの外積の大きさをウェハ全面で面積積分をすることにより、下定盤との接触により生じるモーメント \mathbf{M}^l を算出することができる。

$$\mathbf{F}^{lw} = \int \mathbf{f}^{lw}(r, \phi) dA \quad (4)$$

$$M^{lw} = \left| \int (\mathbf{p}(r, \phi) - \mathbf{p}_{0c}) \times \mathbf{f}^{lw}(r, \phi) dA \right| \quad (5)$$

ここで、 \mathbf{p}_{0c} はキャリア中心の位置ベクトルである。

ウェハに生じる力とモーメントの関係に着目すると、ウェハとキャリアとの接触により生じる力 \mathbf{F}^c は $-\mathbf{F}^{lw}$ と、モーメント M^c は $-M^{lw}$ と表される。また、ウェハの半径 R_w を用いて、 \mathbf{F}^c の接線力成分 F_t^c は式(6)で表される。

$$\mathbf{F}_t^c = \frac{M^c}{R_w} \quad (6)$$

このため、 \mathbf{F}^c の垂直抗力成分 F_n^c は式(7)で表され、式(8)によりウェハ-キャリア間の摩擦係数 μ^c を算出することができる。

$$F_n^c = \sqrt{|\mathbf{F}^c|^2 - F_t^c{}^2} \quad (7)$$

$$\mu^c = \left| \frac{F_t^c}{F_n^c} \right| = \left| \frac{F_t^c}{\sqrt{|\mathbf{F}^c|^2 - F_t^c{}^2}} \right| = \left| \frac{M^c/R_w}{\sqrt{|\mathbf{F}^c|^2 - (M^c/R_w)^2}} \right| = \left| \frac{1}{\sqrt{(R_w|\mathbf{F}^c|/M^c)^2 - 1}} \right| \quad (8)$$

ただし、ウェハとキャリアがすべらない条件では、式(8)で計算されるのはみかけの摩擦係数となるため、ウェハ-キャリア間の摩擦係数を推定するためには、すべる条件における式(8)を算出する必要がある。なお、式(8)で算出に用いるウェハに生じる接触力 \mathbf{F}^c とモーメント M^c の比は、摩擦係数と研磨圧力がウェハ面内で一定であれば、これらの影響を相殺することができる。このため、ウェハとキャリアの接触においてすべりが生じる条件におけるウェハの回転数が分かれば、相対速度分布が算出され摩擦係数が推定できる。

3. ウェハ-キャリア間の摩擦係数の推定

3.1 ウェハ回転数の同定実験

浜井産業(株)製の精密表面ラップ盤 3BN 3M10 を用いた 2inch, t0.7 のガラスウェハの片面研磨におけるウェハ回転数の導出を行う。図3に実験の様子を示す。本試験では、バンドー化学製の研磨パッドを用いる。このパッドはダイヤモンド砥粒を樹脂で接着した多数の研磨島を有する。研磨島は均等に配置されているため、ウェハと下定盤との摩擦係数分布および研磨圧力分布をウェハ全面で均一となると考えられる。キャリアはガラエポ製 2inch, t0.5 のものを用いる。

研磨中のウェハ挙動を SONY 製の HDR-CX700V で動画撮影し、フレームごとのウェハの運動を特定することで、ウェハ回転数の同定を行う。撮影条件は 60fps で 1920pix×1080pix とし、ウェハおよびキャリアの位置や向きを同定を目的に、それぞれに複数のマーカーを接着する。

試験条件は、下定盤の回転数を 15 min^{-1} 、キャリアの自転回転数と公転回転数を 5 min^{-1} と 13 min^{-1} とし、いずれも回転方向も時計回りとする。図4にこの条件において撮影された動画の一部を示す。このような各フレームの静止画からマーク位置を特定し、フレーム毎の変化を求めることで、ウェハの回転数は 8.3 min^{-1} と同定される。なお、図に示すように、ウェハとキャリアのマーク位置が時間経過とともに変化していくため、ウェハとキャリア間の接触はすべり状態となっていることが分かる。このため、本条件におけるウェハ回転数を基に、ウェハ-キャリア間の摩擦係数を推定することが可能となる。

3.2 ウェハ-キャリア間の摩擦係数の推定

実験により同定されるウェハ回転数を用いて、2.2節に示すように、ウェハの各位置における下定盤との相対速度を算出し、ウェハとキャリアとの接触により生じる力とモーメントに基づき、摩擦係数を推定すると 0.19 となる。なお、本推定では、キャリア中心とウェハ中心間の距離 L_h は 2.3 mm と小さいため、 L_h に関する項の影響は無視している。

これまでの研究で、摩擦係数がゼロとなる場合には、ウェハ挙動は中川による先行研究³⁾と一致すること、そして摩擦係数が非常に大きい場合、ウェハとキャリアの接触はほとんどの時間ですべりなしとなることが分かっている。これに対し推定される摩擦係数は、いずれの条件とも異なり、解析されるウェハ回転数は、摩擦を無視した場合、常に固着する場合ともに、最大で 50%程度

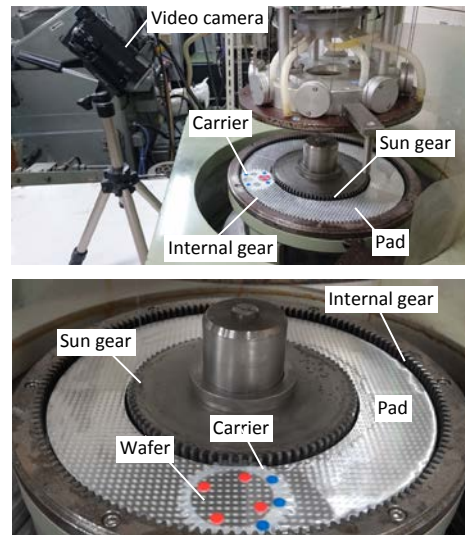


Fig. 3 Experimental setup

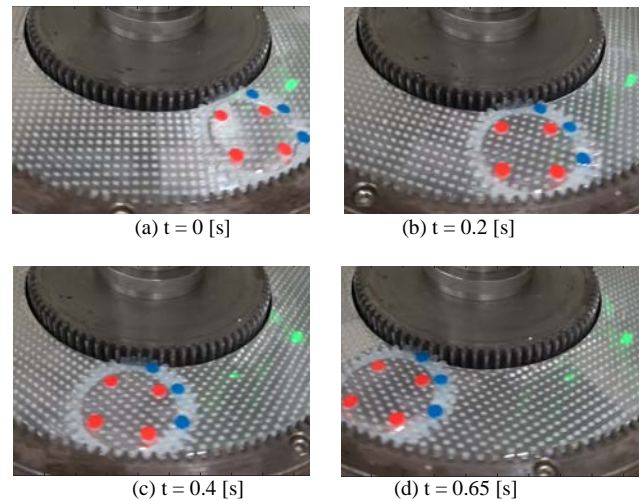


Fig. 4 Observed wafer behavior

の誤差が生じることが確認されている²⁾。このことから、ウェハ挙動を検討する上で、ウェハ-キャリア間の接触は重要な要素であり、著者らが開発しているウェハ-キャリア間の接触状態を正確にモデル化したウェハ挙動の推定手法は有効であるといえる。

4. 結言

両面研磨の理論構築や加工特性の推定技術などを行う上で重要となるウェハ挙動の高精度解析を実現するために不可欠である、ウェハ-キャリア間の摩擦係数の推定を行った。推定手法では、両面研磨機を用いた片面研磨試験を行い、ウェハとキャリアの接触においてすべりがおこる際の回転数を元に、力学的関係に基づき摩擦係数の推定を行った。推定される摩擦係数が 0.19 となり、著者らの開発する、ウェハ挙動の解析手法はその高精度解析において重要であるといえる。

参考文献

- 1) 橋本洋平, 近藤亮太, 古本達明, 小谷野智広, 細川晃: “両面研磨におけるウェハ挙動の解析技術の開発”, 2016 年度精密工学会春季大会講演論文集, (2016), pp. 555-556.
- 2) Y. Hashimoto, T. Furumoto, T. Koyano and A. Hosokawa, “Analytical Investigation on Wafer Behavior in Double-Sided Polishing”, International Conference on Planarization/CMP Technology (ICPT2016), (2016), pp. 189-191.
- 3) 中川, 両面研磨における摩擦距離のウェハ面内分布均一化のための加工条件最適化, 精密工学会誌論文, 72(5), (2006)