

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：55503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05743

研究課題名(和文) ミクロスケール・スラリー流れ可視化観察による研磨メカニズムの解明

研究課題名(英文) Elucidation of polishing mechanism by visualization of microscale slurry flow

研究代表者

福田 明 (Fukuda, Akira)

徳山工業高等専門学校・機械電気工学科・准教授

研究者番号：80643220

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：半導体デバイスの製造に欠かせない化学的機械研磨において、ウェーハと研磨パッド間のミクロなスケールにおけるスラリー流れは未解明である。そこで、流れの相似則を利用して模擬的なスラリー流れを再現し、ミクロなスラリー流れの可視化観察を実施した。その結果、ウェーハと研磨パッド間の微細な凹凸領域に循環流れの存在を確認した。また、循環流れの数が多いほど研磨レートが大きくなる傾向にあることが分かった。本研究で確認されたミクロな循環流れを制御することにより、研磨性能の向上につながる可能性がある。

研究成果の概要(英文)：In chemical mechanical polishing, which is essential for the manufacture of semiconductor devices, microscale slurry flow between the wafer and the polishing pad has not been completely elucidated. Therefore, scaled-up microscale slurry flow was reproduced based on the scaling laws of fluid dynamics and then the flow visualization was carried out. As the result, the microscale circulation flows were observed in the small asperity region between the wafer and the polishing pad. In addition, it was found that the polishing rate tends to increase as the number of the circulation flows increases. There is a possibility that the polishing performance may be improved by controlling the circulation flows confirmed in this study.

研究分野：工学

キーワード：化学的機械研磨 スラリー流れ 可視化 ミクロスケール 循環流れ 研磨レート

1. 研究開始当初の背景

半導体デバイス製造の多くの工程で使用されている化学的機械研磨 (CMP) においては、近年、半導体デバイスの更なる高性能化を実現するために、研磨メカニズムを踏まえた効率的な技術開発が重要となっている。これまでに提案されている研磨モデルでは、ウェーハと研磨パッドとの間 (以下、ウェーハ面下) の微細な隙間のスラリー流れによる砥粒の挙動が重要な要素であり、その解明と制御が研磨性能の向上における重要課題である。

ウェーハ面下の微細な隙間のマクロなスラリー流れに関しては、これまでに種々の報告がなされているが、パッド表面に存在する数十 μm 程度の微細な凹凸のスケール (ミクロスケール) で詳細に研究した例はほとんどなく、全く解明されていないに等しい。微細な隙間のスラリー流れをミクロスケールで可視化観察することができれば、CMP の研磨メカニズムにおける砥粒挙動の解明、並びに研磨速度の向上に貢献できると考えられる。

しかし、ウェーハ面下の微細な隙間におけるスラリー流れを、ミクロスケールでその場観察することは非常に困難である。そこで報告者らは、研磨パッド表面の数十 μm 程度の微細な凹凸を 20mm 程度に拡大した透明模型を作製し、流れの相似則を利用して可視化観察する手法を考案した。そして、ウェーハ面下の微細な隙間におけるミクロスケール・スラリー流れの可視化観察および流速分布取得が可能であることを示していた。

2. 研究の目的

本研究では、ミクロスケール・スラリー流れと研磨パッド表面形状および研磨速度との関係を明らかにし、研磨メカニズムの解明に挑むことを目的とした。

3. 研究の方法

まず、報告者らが考案した可視化観察手法を簡単に説明する。レーザ顕微鏡で測定した研磨パッド表面形状の実測データをもとに、3次元プリンタを用いて、表面形状を数百倍程度に拡大した透明シリコン樹脂製の可視化模型を作製する (図1)。作動流体で満たした回流式の亚克力製可視化水槽に可視化模型を設置し、流れ発生装置により実際の CMP 時と同様の流れ場を発生させる (図2)。その際、実際の CMP と可視化実験とでレイノルズ数を等しくすることにより、双方の流れが相似となる。作動流体にはトレーサ微粒子を分散させた 45wt% 砂糖水を使用し、シート状レーザとデジタルカメラで任意断面の流れを可視化観察する (図3)。このとき、透明シリコン樹脂と 45wt% 砂糖水の屈折率が等しいので、エンジン内部の気流可視化などで用いられるインデックスマッチング法による流れの可視化となり、研磨パッド表面の

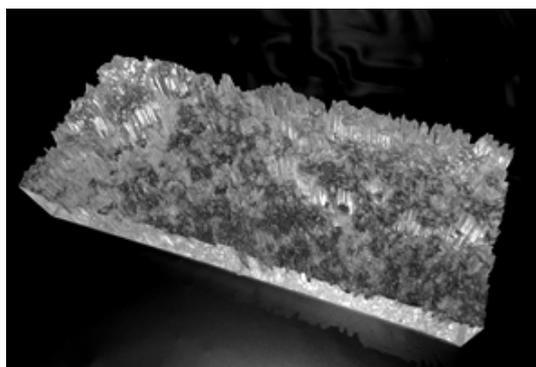


図1 研磨パッドの拡大透明模型



図2 可視化実験装置

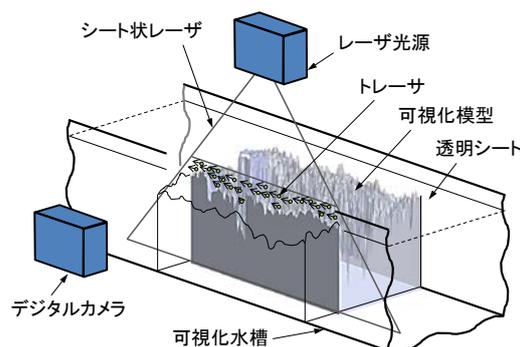


図3 可視化観察方法

凹凸による死角やゆがみを気にせず流れの可視化観察を行うことが可能となる。流速分布は得られた可視化画像をもとに、粒子画像流速計測法 (PIV) によって取得する。

本研究では、この可視化観察手法をブラッシュアップして、①ミクロスケール・スラリー流れの可視化観察手法ならびに流速分布測定手法を確立する。次に、②光学的フーリエ変換により評価した数種類の研磨パッド表面形状におけるスラリー流れの可視化観察ならびに流速分布測定を実施する。これにより、③ミクロスケール・スラリー流れと研磨パッド表面形状および研磨速度との関係を明らかにし、研磨メカニズムの解明に挑む。

4. 研究成果

(1) 可視化観察手法と流速分布測定手法の確立

当初の実験装置では、シート状レーザとカメラの正確な位置決めができず、複数断面に

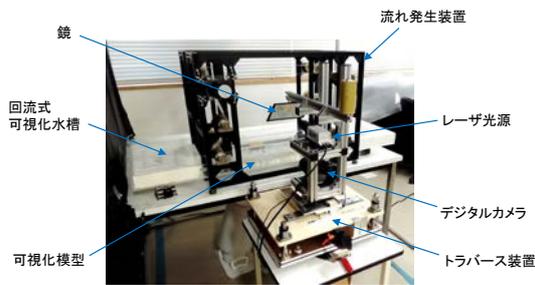


図4 トラバース機構を設置した実験装置

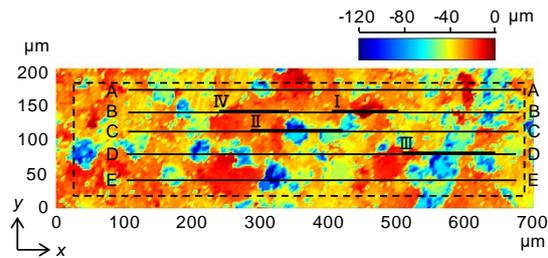


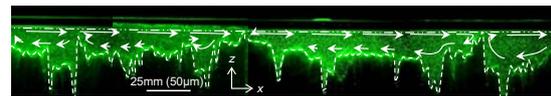
図5 研磨パッド表面形状と可視化断面 A~E

わたる詳細な可視化観察や流速分布測定の実施が困難であった。したがって、まず、シート状レーザとカメラの位置関係を固定した状態で3軸方向に位置決め精度1mm（可視化模型の拡大倍率により異なるが、実際のCMPに換算すると2~3μm）で移動可能なトラバース装置を設計製作し、可視化実験装置に設置した（図4）。

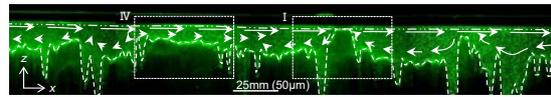
これにより、複数の断面を等間隔で可視化観察することが可能となった。また、これまでは一度の可視化観察範囲が流れ方向に80mm程度（実際のCMPに換算すると160μm程度）に限られていたが、トラバース装置を使用して撮影した複数の可視化画像をつなげることにより、285mm程度（実際のCMPに換算すると570μm程度）までの可視化観察が可能となった。また、これらの可視化観察結果をもとに、PIVを使用して、より広範囲で詳細に流速分布測定が可能となった。

(2) 循環流れの確認

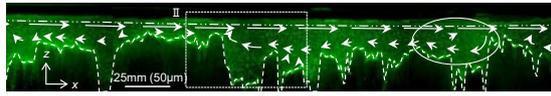
図5に、広範囲に可視化観察した研磨パッド表面形状を示す。また、図5に示す5つの可視化断面A~Eにおける可視化観察結果を図6に示す。図に矢印で示すように、研磨パッドの起伏の凸部付近に上昇流と下降流が観察され、起伏の谷部では、ウェーハの移動方向と反対方向の遅い流れが観察された。これらの流れは研磨パッドの気孔（ポア）の開口部と、コンディショニングにより形成された起伏の谷部に見られ、互いにつながって循環流れを形成している場合があることを確認した。また、ウェーハ近傍（ウェーハ表面から約15μmまで）に比べてパッド凹部の流れが非常に遅いことが判明した。



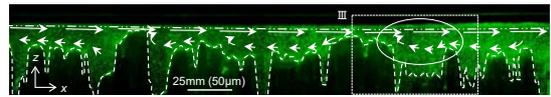
(a) 鉛直断面 A-A



(b) 鉛直断面 B-B



(c) 鉛直断面 C-C



(d) 鉛直断面 D-D



(e) 鉛直断面 E-E

図6 鉛直断面の可視化観察結果

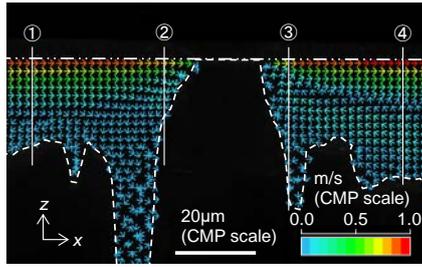
図6に長方形I~IVで示す領域における時間平均流速ベクトル分布を図7に示す。なお、図6の長方形領域I~IVは、図5において太線I~IVに対応している。図7(a)~図7(d)の直線①から③又は④に沿って水平方向流速 u と鉛直方向流速 w を抽出した結果を図8に示す。

(3) 研磨パッド表面形状と循環流れの関係

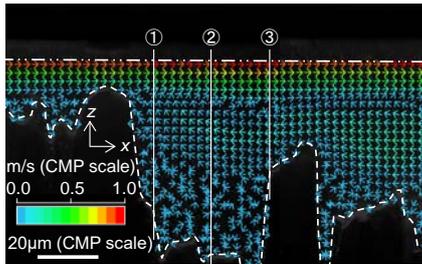
連携研究者が実測した研磨パッド表面形状をもとに作製した5種類の可視化模型を使用してスラリー流れの可視化実験を実施し、上昇流、下降流、循環流れの数と研磨レートとの関係を調べた。図9に結果を示す。循環流れの数が多いほど研磨速度が大きくなる傾向にあることが明らかとなった。

(4) 研磨メカニズムに関する考察

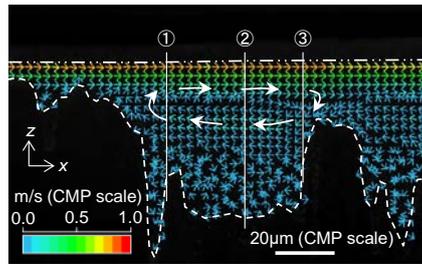
本研究の結果から、研磨パッドのポアの機能について考察する。研磨パッドのポアには、スラリーの供給機能に加えて、研磨屑等を研磨面から排出する機能があるとされている。図9に示したように、循環流れの数が多いほど研磨レートが大きくなる傾向にある。循環流れは、ポアの開口部とコンディショニングにより形成された起伏の谷部に形成されることから、ポアには循環流れを形成してスラリーをウェーハ表面に供給する機能があることが分かる。一方、本研究の可視化観察の条件下では、ポアや谷の内部で透明シートからCMPスケールで約40μm以上離れた場所



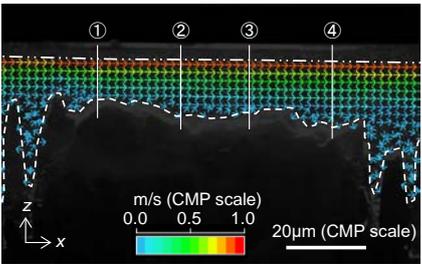
(a) 鉛直断面 I



(b) 鉛直断面 II



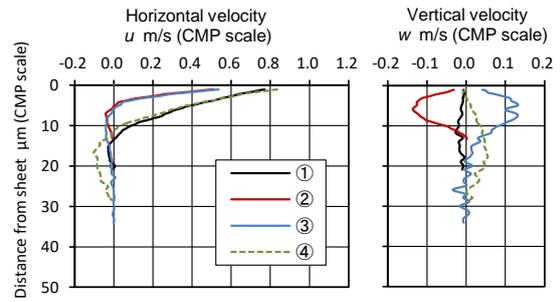
(c) 鉛直断面 III



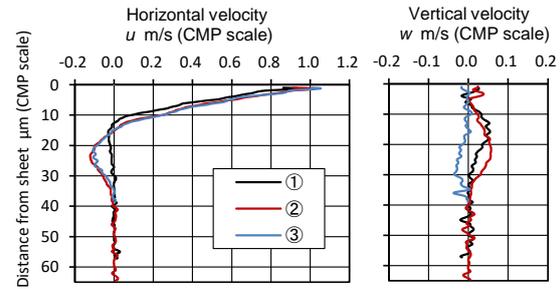
(d) 鉛直断面 IV

図7 時間平均流速ベクトル

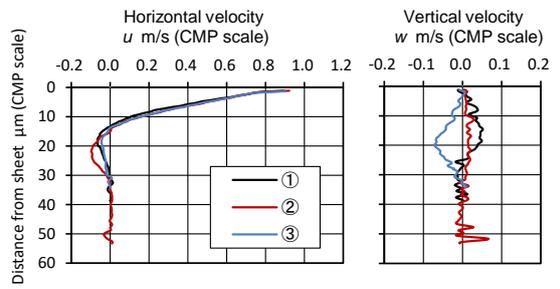
では、ほとんど流れが確認できなかった。図7に示した断面以外のいくつかの鉛直断面についても流速分布解析を実施したが、同様の結果であった。このことから、研磨層等が研磨パッド表面に保持される場合、ポアや谷の内部に保持されていれば、スラリー流れに乗ってウェーハ表面に戻ることが抑制されるとともに、循環流れの形成に大きな影響を与えないと考えられる。研磨パッドのポアが上述の2つの機能を同時に実現できるのは、このためであると考えられる。



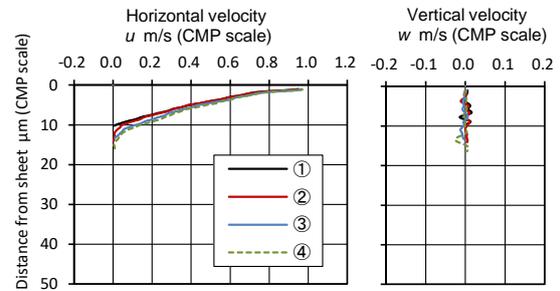
(a) 図7(a)の直線①～④



(b) 図7(b)の直線①～③



(c) 図7(c)の直線①～③



(d) 図7(d)の直線①～④

図8 図7の直線上の流速分布

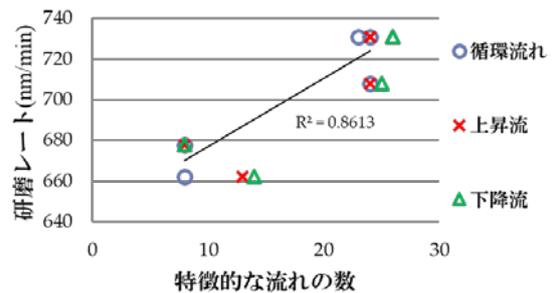


図9 特徴的な流れの数と研磨レートとの関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2件)

①福田 明, 研磨パッド・アスペリティ内のミクロなスラリー循環流れ -拡大パッドモデルを使ったスラリー流れの可視化結果-, 精密工学会誌, 84 巻 2 号, 2018, pp. 182-187, 査読有
DOI : 10. 2493/jjspe. 84. 182

②福田 明, 御手洗 真人, 研磨パッド・アスペリティ内スラリー流れの可視化方法の検討, 精密工学会誌, 83 巻 2 号, 2017, pp. 173-179, 査読有
DOI : 10. 2493/jjspe. 83. 173

[学会発表] (計 2件)

①福田 明, 秀毛春也, 山縣翔, 渡辺健介, CMP におけるウェーハ・研磨パッド間スラリー流れの可視化(第3報)ウェーハ・研磨パッド間凹凸領域における循環流れの存在について, 精密工学会 2017 年春季学術講演会, 2017. 03. 15, 慶応義塾大学(神奈川県横浜市)

②福田 明, 石田士, 潮田拓, CMP におけるウェーハ・研磨パッド間スラリー流れの可視化(第2報)パッド摩耗の影響の可視化に関する試み, 精密工学会 2016 年春季学術講演会, 2016. 03. 17, 東京理科大学(千葉県野田市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 明 (FUKUDA, Akira)
徳山工業高等専門学校・機械電気工学科・准教授
研究者番号 : 80643220

(2) 研究分担者

該当者なし

(3) 連携研究者

鈴木 恵友 (SUZUKI, Keisuke)
九州工業大学・大学院情報工学研究院・機械情報工学研究系・教授
研究者番号 : 50585156

(4) 研究協力者

該当者なし