小径工具を用いた揺動研磨におけるスラリー流量の低減*

吉 富 健 一 郎 ** 宇 根 篤 暢 ** 餅 田 正 秋 **

Reduction of Slurry Flow Rate in Oscillation Polishing Using a Small Tool

Kenichiro YOSHITOMI, Atsunobu UNE and Masaaki MOCHIDA

CMP is the standard planarization method for silicon wafers. For environment reasons, semiconductor manufacturers have to reduce the consumption of materials, such as slurry. The oscillation-speed-control-type polishing machine uses a small tool and supplies slurry from a pad center, so the slurry spreads to the polishing area easily. This report shows the polishing characteristics under low slurry flow rate conditions. In non-oscillation polishing, it is difficult to reduce the slurry flow rate to less than 200 ml/min since a shortage of slurry results in a damaged area on a wafer. In uniform oscillation speed polishing, no damaged area was found to occur even with a slurry flow rate of only 5 ml/min. In addition the experimental results corresponded with the simulated ones. It was demonstrated that in oscillation speed control polishing, the minimum oscillation speed and slurry flow rates were different for different pad materials. In experiments, a flatness of better than 0.2 μm over the entire surface was achieved using both an IC1000 pad with a slurry flow rate of 20 ml/min and a SUBA800 pad with a flow rate of 40 ml/min.

Key words: CMP, single wafer polishing, oscillation polishing, slurry flow rate, removal rate, polishing pad

1. 結 言

半導体デバイスの基板となるシリコンウエハの高平坦化にはCMP (Chemical Mechanical Polishing) が用いられ、直径 300mm のウエハ上に 32nm 以下のサイト平坦度が求められている。一方、半導体プロセスにおける消耗材の低減および廃液処理等の環境対策も重要であり、その一つとしてスラリー量の低減が挙げられる。スラリー量の不足は、研磨速度の低下だけでなく、ウエハ表面の焼けやスクラッチなど重大な欠陥の原因となるため、安定加工のために十分な流量で加工が行われている。従来のバッチ処理式 CMP では研磨パッドサイズが大きいため、パッド全面にスラリーを供給するには多くのスラリーが必要であるが、大部分のスラリーは加工に寄与することなく排出されている。一方、ウエハの大口径化に伴い開発が進む枚葉式 CMP¹⁾²⁾では、小径の研磨パッドを使用するのでスラリー量の低減が期待できる。しかし、現状ではスラリー流量の低減が研磨特性に及ぼす影響について明らかにされていない。

本報では、小径工具を用いた揺動研磨において、無揺動、等速揺動、揺動速度制御の各揺動条件に対して、スラリーの供給流量を低減させた場合の研磨特性について明らかにする。

2. 実験方法およびシミュレーション条件

図 1 に本実験で使用した小径工具を用いる揺動速度制御型研磨装置(枚葉式)の概略を示す。ウエハを載置する揺動テーブルの揺動条件を最適化することにより $\phi 300\text{mm}$ ウエハの高平坦化が可能である^{3)~6)}。従来のバッチ式研磨では、大口径の研磨パッドに対して複数の試料が載置されるため、スラリーを各加工領域に集中的に供給することは困難であり、パッド全面に均一に供給している。このため多量のスラリー供給が必要である。本研磨方式では、試料上部に研磨パッドを貼った小径工具を載置し、スラリーを研磨パッド中心から供給するため、研磨領域に効率よくスラリーを行き渡らせることが可能である。実験は、試料の位

置を固定した無揺動研磨および試料を連続的に移動させる揺動研磨で行った。ここでは、工具と試料の中心間距離を揺動位置と定義する。表 1 に研磨条件を示す。試料には平坦度 1 μm 以下に研削加工したシリコンウエハ、研磨パッドには硬質タイプの IC1000 と軟質タイプの SUBA800 (ともにニッタ・ハース社製) を用いた。研磨パッド表面にはスラリーの均一供給のために 5mm ピッチの格子溝を施し、平坦度 5 μm 以下にドレッシングした。スラリーは、加工に十分な流量である 200ml/min から 5ml/min まで変化させた。また、スラリーは加工開始前から供給し、試料回転によりウエハ全面にスラリーが行き渡り定常状態にした後に加工を開始した。研磨速度は加工前後のウエハ重量差より算出し、ウエハ形状はエアスライド式精密 1 軸ステージに取り付けた電気マイクロメータを用いて機上で測定した。

揺動条件の最適化、加工形状の予測には研磨シミュレーション⁷⁾を用いる。表 2 にシミュレーションに使用した計算パラメ

Fig.1 Oscillation polishing with a small tool

Table 1 Polishing conditions

Wafer size		$\phi 300 \text{ mm}$
Tool size		$\phi 200 \text{ mm}$
Rotational speed	Wafer	75 rpm
	Tool	-150 rpm
Slurry type		Colloidal Silica
Slurry flow rate		5 ~ 200 ml/min

* 原稿受付 平成 21 年 9 月 24 日

** 正 会 員 防衛大学校 (神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

Table 2 Simulation conditions

Relative elastic coefficient	Hard	4.41 kPa/ μm
	Soft	0.637 kPa/ μm
Removal rate η_w	0.1~0.43 $\mu\text{m}/(\text{km} \cdot \text{kPa})$	
Polisher wear rate η_p	0 $\mu\text{m}/(\text{km} \cdot \text{kPa})$	
Modification coefficients of relative velocity	f: 0.08 km/min, g: 15 min/km, V_0 : 0.028 km/min	
Compensation coefficients of moment for tool inclination	k: 0.4 mm/kPa, m: 0.08 kPa, q: 23.5 mm	

ータを示す。研磨パッドは摩耗しないとし、比加工量・圧力比は $0 \mu\text{m}/(\text{km} \cdot \text{kPa})$ とした。ウエハとパッドの相対速度修正係数は相対速度の増加に伴う研磨速度の飽和現象に、工具傾斜モーメントの補正係数は工具はみ出し時の圧力分布にそれぞれに関連するパラメータである。

3. 無揺動時の研磨特性

実験は、工具が試料からはみ出さず偏心荷重の影響のない揺動位置 30mm, 50mm について行った。研磨パッドは硬質タイプ、研磨時間は 10min、研磨圧力は 12.3kPa である。図 2 に、揺動位置 30mm, 50mm におけるスラリー流量に対する研磨速度を示す。揺動位置 30mm, 50mm のいずれにおいてもスラリー流量 150ml/min 以上で研磨速度は飽和し、十分なスラリーが供給されているといえる。これ以下のスラリー流量では、徐々に研磨速度は低下しスラリー不足状態となる。スラリー流量 30ml/min における研磨速度は飽和時の約半分である。スラリー流量 150ml/min 以下では環状の非鏡面部が発生し、この領域はスラリー不足による、ウエハの焼けやスラリーの乾燥凝着による劣化部と考えられる。

図 3 に揺動位置 30mm における劣化部の発生状態の概略とスラリー流量に対する環状劣化部の形状変化を外半径と内半径により表す。この揺動位置では研磨パッド外周が試料のエッジから 20mm 内側に位置し、ウエハ外周 20mm の範囲は未加工領域となる。スラリー流量 200ml/min では接触する加工領域全面が鏡面となるが、スラリー流量 150ml/min では幅 5mm の環状劣化部を生じ、スラリー不足状態といえ、その外半径は 130mm であり加工領域外周と一致する。スラリー流量の減少に対して、劣化部の外径は変わらず内径がウエハ中心側へ移動し、スラリー流量 30ml/min では劣化部の幅が 40mm となる。

図 4 にスラリー流量 30ml/min における加工後のウエハと研磨パッドの表面写真を示す。ウエハ上の破線内が研磨パッドと接触する加工領域であり、試料中央の直径約 160mm の範囲が鏡面加工されている。研磨パッドについては、ウエハ鏡面部と接触する中央部の直径約 100mm が変色した。これはスラリー不足によりウエハの切りくずが排出されずに滞留したものである。一方、研磨パッド変色部の外側表面は、ドレッシングで創成した凹凸が摩耗して平坦となることがレーザ顕微鏡により観察された。

以上より、スラリー不足状態になる研磨パッド領域は、外周から環状に拡がり、スラリー流量の低下とともに、目詰まりによる加工不良部の幅が拡大する。すなわち、鏡面加工に関与する研磨パッドの領域は、スラリー流量の不足により円状に中心に向かって縮小する。また、切りくず排出性も悪化し、スクラッチの原因となる。

図 5 に、スラリー流量が 200ml/min と 30ml/min における加工量分布を示す。理論加工量は表 2 のシミュレーション条件で計算した。図より、スラリー流量 200ml/min の実験結果とシミュレーション結果はほぼ一致し、研磨領域に供給されるスラリーは十

Fig.2 Relationship between removal rate and slurry flow rate **Fig.3** Diagram showing damaged area and size of damaged area for different slurry flow rates at the oscillation position of 30 mm **Fig.4** Wafer and polishing pad after polishing at the slurry flow rate of 30 ml/min **Fig.5** Experimental stock removal distributions for different slurry flow rates and simulated stock removal distribution **Fig.6** Comparison of experimental profiles and theoretical profile calculated for a pad diameter of $\phi 120 \text{ mm}$

分であるといえる。一方、スラリー流量 30ml/min の実験結果はシミュレーションと大きく異なり、スラリー流量 200ml/min と比較して、十分な加工量が得られる範囲が縮小し、ウエハ中央部の加工量が増加する。ウエハ半径位置 100mm 以上の範囲における加工量減少の原因は、スラリーが十分に行き渡らないためである。ウエハ中央部の加工量増加は、スラリー量が少なく冷却効果の減少に伴う加工温度上昇のためと考えられる。

低スラリー流量時は、研磨パッド外周側は加工不良領域となり、研磨パッドが変色する中央部で鏡面加工が行われると考えられるので、研磨パッド直径を 100mm～130mm と変えてシミュレーションを行った。その結果、図 6 に示すように直径 120mm 場合に、実験結果とよく一致する理論形状が得られた。理論形状と実験形状は中心付近が若干異なるがよく一致する。したがって、研磨パッドの加工不良領域は加工の早い段階で発生し、スラリーが十分に行き届く研磨パッド中央領域で鏡面加工が行われると考えられる。

図 7 に、揺動位置 50mm における劣化部の発生状態の概略とスラリー流量に対する環状劣化部の形状変化を示す。この揺動位置では、研磨パッド外周とウエハ外周とが一致し、ウエハ全面が加工領域となる。スラリー流量 200ml/min ではウエハ全面が鏡面となるが、スラリー流量 150ml/min では環状劣化部が生じ、スラリー流量不足状態といえる。劣化部はウエハ外周より約 10mm 内側から発生する。これは、表面張力によってウエハ外周上に滞留するスラリーが再度加工領域に供給されるためと考えられる。また、滞留するスラリー量はスラリー流量に依存しないため、環状劣化部の外半径はスラリー流量にかかわらずほぼ一定である。しかし、滞留スラリー量はウエハ回転による遠心力に依存するため、高速回転時はウエハ外周までスラリー不足になると考えられる。劣化部の幅は、スラリー流量の減少に伴いウエハ中心側に拡大し、スラリー流量 30ml/min では約 30mm になる。これは、揺動位置 30mm の場合と同様に、研磨パッドの鏡面加工に関与する有効

Fig.7 Diagram showing damaged area and size of damaged area for different slurry flow rates at the oscillation position of 50

Fig.8 Diagram showing oscillation range

Fig.9 Removal rate and slurry flow rate in uniform oscillation speed polishing

Fig.10 Relationship between roughness and slurry flow rate

径が小さくなるためである。劣化幅は揺動位置 30mm の場合と比較して若干拡大する。これは、ウエハと研磨パッド間の相対速度の増加により鏡面加工に関与する有効径が縮小したためと考えられる。スラリー流量 30ml/min における研磨パッドの有効径は、揺動位置 30mm, 50mm とともに約 100mm である。

以上の結果より、無揺動研磨時のスラリー流量低減は困難であり、良好な研磨面を得るには 200ml/min のスラリーを供給する必要がある。揺動研磨時において揺動速度が極低速の場合には、無揺動時と同様の研磨状態になると考えられるため、スラリー流量に留意する必要がある。したがって、スラリーを低減するためには目詰まりによる研磨不良領域の発生を防止する必要がある。以下、工具を揺動させることによって、研磨パッド全面にスラリーを行き渡らせる研磨条件について検討する。

4. 揺動研磨時の研磨特性

4.1 等速揺動時の研磨特性

研磨パッドと試料の接触状態が連続的に変化する揺動研磨では、スラリーが分散されるため、無揺動時よりもスラリー流量の低減が期待できる。はじめに、等速揺動時の揺動条件は、無揺動研磨の揺動位置 50mm の場合と加工量がほぼ等しくなる条件でシミュレーションにより算出した。表 3 に研磨実験条件を示す。図 8 に示すように、揺動範囲は 50mm～100mm とし、図中の揺動範囲-60mm～120mm は後述する揺動速度制御時の揺動条件である。揺動は、ウエハ外周側から開始し、ウエハ内周側で反転して元の揺動位置に戻るまでを 1 往復とし、実験では 5 往復した。研磨パッドは硬質タイプである。図 9 に、スラリー流量に対する研磨速度の変化を示す。スラリー流量 10ml/min 以上で飽和研磨速度の 60nm/min に達し、無揺動研磨時と比較してスラリー流量を半分に低減することが可能である。スラリー流量 5ml/min では、研磨速度が飽和値の約 2/3 に低下する。また、研磨パッド全面に切りくずが付着する変色が観察され、無揺動時の研磨不良領域は発生しない。研磨速度の低下の原因となる研磨パッドの目詰まりの影響を調べるため、スラリー流量 5ml/min の研磨後、ドレッシングをせずにスラリー流量 30ml/min で連続して研磨を行ったところ、再び研磨速度 60nm/min を得た。したがって、本実

Table 3 Polishing conditions with uniform oscillation speed

Oscillation condition	Type	Uniform oscillation speed
	Range	50 ~ 100 mm
	Speed	50 mm/min
	Number of oscillations	5
Polishing time		10 min
Polishing pressure		10 kPa
Slurry flow rate		5 ~ 30 ml/min

験では研磨速度に影響を及ぼす研磨パッドの目詰まりは起こっていないものと考えられる。

図10に、スラリ流量に対するウエハ研磨面の表面粗さ R_a について、ウエハ直径上5箇所の平均値と最大・最小値を示す。スラリ流量に対して粗さはほぼ一定であり、ウエハ全面でも粗さに大きな差はない。また、目視検査では低スラリ流量である5ml/min時においてもスクラッチは観察されなかった。図11に、スラリ流量を低減した場合の研磨速度と研磨圧力の関係を示す。研磨圧力に対して研磨速度はほぼ比例し、全研磨圧力においてスラリは研磨領域へ十分に供給されている。

図12に、スラリ流量5ml/min, 10ml/minの場合について実験と理論の加工形状比較を示す。5ml/min時の初期形状は10ml/min時の加工後形状である。スラリ流量5ml/minの場合には、図8に示すように研磨量が減少するので、10ml/minの場合における比加工量・圧力比 $0.23(\mu\text{m}/\text{km})/\text{kPa}$ の70%として計算を行った。いずれのスラリ量においても、実験と理論はよく一致し、スラ

Fig.11 Relationship between removal rate and polishing pressure for different slurry flow rates

Fig.12 Experimental and simulated wafer profiles for different slurry flow rates under a uniform oscillation speed condition

Fig.13 Surface images and removal rate with different test pads

リ流量を減少させた場合においても研磨量の均一性が確保されることが明らかとなった。すなわち、等速揺動研磨時には、パッド中心から供給されるスラリの減少は、ウエハ全面の研磨量に均一に影響を与えるのみで、パッド周辺部の研磨量の低下や研磨不良領域などを発生させないといえる。

4.2 スラリの飛散の防止効果

低スラリ流量時においても、スラリが研磨パッド全面に十分に保持されれば、研磨速度の低下は抑制されると考えられる。そこで、研磨パッドの外周から5mm内側まで格子溝がない硬質タイプの試作パッド1と、硬質タイプの研磨パッドの外側に軟質タイプの研磨パッドを環状に貼り付けた試作パッド2を作製し、等速揺動研磨実験を行った。いずれの試作パッドも、パッド外周端に抜ける溝がないことでスラリの飛散が防止され、研磨領域におけるスラリ保持能力を高めることが予想される。

図13に試作パッド外観とスラリ流量に対する研磨速度を従来の格子溝パッドと比較して示す。図より、試作パッド1による研磨量は10%程度増加し、5ml/minにおいても研磨量の低下は20%程度に抑えられる。しかし、切りくずの排出性が悪いことから表面粗さが従来型パッドの1.5倍程度に悪化した。一方、試作パッド2の研磨速度は、全スラリ流量で5%程度向上し、従来型パッドと同様の傾向を示す。また、表面粗さは、従来型パッドと同等であった。以上の結果より、切りくずの排出を考慮したスラリ飛散防止型パッドを用いれば、低スラリ流量での研磨が可能であるといえる。

4.3 揺動速度制御時の研磨特性

等速揺動研磨によって得られた実験結果から、スラリ流量を5ml/minまで低減してもパッド全域において加工量の均一性が認められ、揺動により研磨パッドとウエハの接触面全域にスラリが均等に保持されていることが明らかである。したがって、揺動速度制御によって理論通りの形状が創成可能といえる。ここでは、硬質タイプと軟質タイプの研磨パッドそれぞれについて、揺動速度制御によるウエハの高平坦化について検討する。研磨条件については、揺動1往復、揺動範囲はウエハ初期形状と加工量を考慮して設定した。

4.3.1 硬質パッドの場合

研磨パッドに試作パッド2を用い、スラリ流量を20ml/minとして、精密研削によって得られる平坦度 $0.5\mu\text{m}/\phi 300\text{mm}$ のウエハに対して揺動速度制御研磨により平坦化実験を行った。図14に揺動範囲を0~120mmとし、平均揺動速度5mm/minで平坦化研磨した際の実験結果をシミュレーション結果と併せて示す。実験形状は理論形状と大きく異なる。これは、揺動速度が遅いため無揺動研磨時と同様に研磨パッドの外周部にスラリが十分に行き渡らず、研磨不良な目詰まり領域が発生したためと考え

Fig.14 Experimental and simulated wafer profiles at average oscillation speed of 5 mm/min

られる。次に、スラリをウエハ全面に均等に行き渡らせることが可能な平均揺動速度 50mm/min で平坦化実験を行った。揺動速度を速くすると、1回の揺動では加工量が少ないため、揺動範囲を-60~120mmに拡大した。図15に示すように、実験形状と理論形状とは良く一致し、スラリ流量を20ml/minに低減した条件においても、0.1 μ m/ ϕ 300mmの高平坦化が実現できた。図16に上述した2通りの研磨加工実験における揺動速度パターンを示す。平均揺動速度 50mm/min の場合、揺動速度は20mm/min以上、5mm/minの場合は全域10mm/min以下である。

4.3.2 軟質パッドの場合

軟質パッドである SUBA800 はスラリがパッド内部に浸透する連続発泡体であるため、スラリ流量低減は硬質パッド(IC1000)より難しい。図17に、平坦度2 μ m/ ϕ 300mmのウエハをスラリ流量40ml/minで平坦化研磨した結果を示す。平坦度の悪い初期形状にもかかわらず、通常の1/5のスラリ流量で0.2 μ m/ ϕ 300mmの平坦度が達成された。図18にその揺動速度パターンを示し、揺動速度は全域で10mm/min以上である。高速移動する揺動範囲-20~20mm、80~120mmでは、加工はほとんど行われず、スラリの分散にのみ関与する。

以上の結果より、最低揺動速度に留意した揺動速度パターンを設定することで、スラリ流量低減時も高平坦化が可能であるといえる。

5. 結 言

小径工具を用いた揺動研磨において、スラリ流量の低減が加工特性に与える影響について、揺動条件を変えて実験を行い、理論計算と比較した。以下に結果を要約する。

- (1) 無揺動研磨時に鏡面を得るには、スラリ流量 200ml/min が必要であり、150ml/min 以下では研磨パッドにスラリ不足による研磨不良領域を生じ、ウエハに環状劣化部が発生する。
- (2) 無揺動研磨時の研磨不良領域を考慮して縮小した研磨パッド径を用いた理論形状は、実験形状と一致する。
- (3) 等速揺動研磨時は、研磨速度が飽和時の70%に低下するが、スラリ流量 5ml/min までウエハを劣化させずに低減可能である。また、低スラリ流量時においても理論形状と実験形状は一致する。
- (4) スラリ飛散防止型パッドにより研磨速度が5%向上した。
- (5) IC1000 使用時は揺動速度 20mm/min 以上、スラリ流量 20ml/min、SUBA800 使用時は揺動速度 10mm/min 以上、スラリ流量 40ml/min において、最適揺動速度制御を行うことにより 0.2 μ m/ ϕ 300mm 以下の高平坦化研磨が可能である。

参 考 文 献

- 1) Senga, K. Shinjo, T. Ueda, H. Nakahira, Y. Ushio, A. Une : Profile Control by the Smart Simulator in Partial Polishing CMP, CMP-MIC Conference, (2003)200.
- 2) A. Une, S. Ohbo and M. Mochida : Development of an Oscillation-Speed-Control-Type Sequential Grinding and Polishing Machine (1st Report) - Machine Structure and Basic Polishing Characteristics -, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, **68**, 3 (2002) 461 (in Japanese).
- 3) K. Yoshitomi, A. Une and M. Mochida : Planarization polishing for a large-sized wafer with a small tool (1st report) - Optimization of polishing condition with a simulation program -, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, **47**, 4 (2003) 196 (in Japanese).
- 4) A. Une and M. Mochida : Oscillation-Speed-Control-Type Polishing with a Small Tool (1st Report) - A Theoretical Analysis of Surface Generation in Linear Oscillation -, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, **68**, 2 (2002) 201 (in Japanese).
- 5) A. Une and M. Mochida : Oscillation-Speed-Control-Type Polishing with a Small Tool (2nd Report) - Wafer Profiles polished at High Revolution Speed

Fig.15 Experimental and simulated wafer profiles at average oscillation speed of 50 mm/min

Fig.16 Oscillation speed patterns optimized for different average oscillation speeds

Fig.17 Experimental and simulated wafer profiles for large stock removal polishing

Fig.18 Optimized oscillation speed pattern using soft pad

- and with Tool Overhang -, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, **68**, 10 (2002) 1342 (in Japanese).
- 6) K. Yoshitomi, A. Une and M. Mochida : Planarization for a Large-sized Wafer by Correction Polishing (1st Report) - Pressure Distribution and Contact State between a Wafer and a Polisher -, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, **74**, 1 (2008) 62 (in Japanese).
 - 7) A. Une, M. Mochida and K. Yoshitomi : Oscillation-Speed-Control-Type Polishing with a Small Tool (3rd Report) - Pressure Distributions and Wafer Profiles Polished with Tool Overhang -, Journal of the Japan Society for Precision Engineering, **70**, 9 (2004) 1201 (in Japanese).