

CMPにおけるウェーハエッジロールオフの影響

福田 明* 檜山 浩國** 廣川 一人**
辻村 学** 福田 哲生***

The Impact of Wafer Edge Roll-Off on CMP Performance

by Akira FUKUDA, Hirokuni HIYAMA, Kazuto HIROKAWA, Manabu TSUJIMURA, & Tetsuo FUKUDA

The impact of wafer edge roll-off on CMP performance was studied using FEM (Finite Element Method) analysis. It was found that the edge roll-off influenced the removal rate distribution at the wafer edge of both stacked and solo pads. This influence was up to 4 mm from the edge for stacked pads and up to 10 mm from the same for solo pads. The surface pressure in the vicinity of the edge, for cases where the ROA (Roll-Off Amount) was $1.27 \mu\text{m}$, was about 30% greater than that at the wafer center for stacked pads and about 23% greater than the same for solo pads. The relationship between the retainer ring pressure and allowable ROA was also studied.

Keywords: Wafer edge roll-off, CMP, FEM analysis, Removal rate, ROA, Stacked pad, Solo pad, Surface pressure

1. 緒言

半導体デバイスの高集積化，高速化が進む一方で，低コストを実現するために，半導体デバイスを形成するシリコンウェーハの大口径化が進んでいる。現在では，1枚のウェーハから多くのデバイスを得るために，直径300 mmのウェーハが使用されている。このウェーハの表面は，鏡面に磨かれ非常に平坦に見える。しかし，そのエッジの面取り部近傍には，ウェーハ中央部に比べて平坦度が劣っている部分，すなわちエッジロールオフが存在する。このエッジロールオフは，平坦性に優れた両面研磨300 mmウェーハにおいても，ITRS2005¹⁾ (International Technology Roadmap for Semiconductors 2005) で2 mm又は1.5 mmとされているエッジイクスクルージョン (ウェーハ最外周のデバイスが製造されない領域で，エッジからの距離) を越えて，その内側の領域にまで及ぶことが分かってきた。そのため，リソグラフィー工程においては，ウェーハエッジ部で最先端デバイスに要求される平坦度を満たすことができず，問題視されている²⁾。

一方，半導体デバイス製造プロセスにおいて，化学的機械研磨 (Chemical Mechanical Polishing, 以下CMP) は，成膜後の凹凸の平坦化に使用され，欠くことのできないプロセスである。近年，生産性向上の観点からウェーハエッジ部に多数のデバイスが作成されるようになり，CMPによってウェーハエッジ部を均一に研磨することが要求されている。したがって，CMPプロセスにおいても，エッジロールオフの影響を明らかにすることは，デバイス製造上非常に重要である。

そこで本論文では，CMP研磨レート分布に及ぼすエッジロールオフの影響について，有限要素法 (Finite Element Method, 以下FEM) 解析を用いて検討した結果を報告する。

2. CMP

図1にCMPの概略を示す。CMPは，砥粒を含んだスラリーを供給しながら，トップリングで保持したウェーハを研磨パッドに押し当て，トップリングと研磨パッドを回転させることでウェーハのおもて面を平坦かつ鏡面状に研磨する。CMPでは，スラリーに含まれる薬液の化学的作用と，砥粒の機械的作用により，加工変質層の無い研磨を実現している。

図1において，ウェーハのおもて面は下側となり，裏面からエアバッグによって圧力が加えられ研磨パッドに

* 荏原総合研究所 物理研究室

** 同 同 工学博士

** 精密・電子事業カンパニー 技術統括部 特許室 特許グループ

** 同 装置事業部 工学博士

*** 富士通株 工学博士

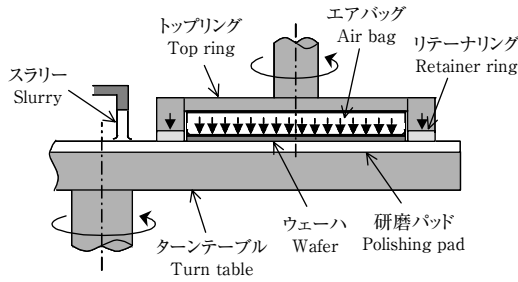


図1 CMP概略図
Fig. 1 Schematic of CMP

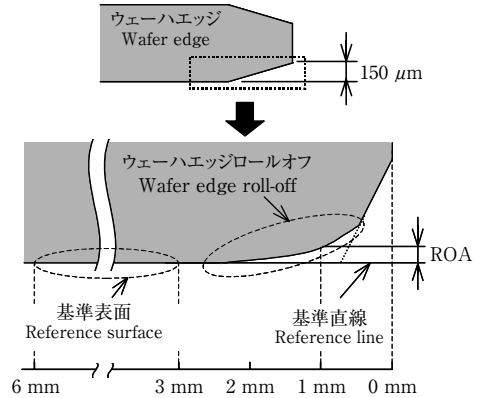


図2 エッジロールオフの模式図
Fig. 2 Schematic of edge roll-off

押し当てられている。また、リテーナリングは、ウェーハの脱落防止や、ウェーハエッジ部の研磨レートの一均性を向上するために使用される。

3. エッジロールオフ

図2に、成膜前のベアウェーハのエッジ部を厚さ方向に拡大し、エッジロールオフを強調した模式図を示す。ウェーハ表面は、エッジから約0.5 mmを除いて平坦であることが要求されている^{3, 4)}が、実際には図2のようにエッジ部近傍はウェーハ中央部に比べて平坦度が劣っている。この平坦度が劣った部分をエッジロールオフと呼ぶ。エッジロールオフは、ウェーハ製造時の研磨ダレが原因である⁵⁾。

エッジロールオフの形状は、メーカーや製造ロットにより異なる。したがって、本論文では異なるエッジロールオフ形状をもつ7枚のウェーハをCMPした際の研磨レート分布をFEM解析により求め、エッジロールオフのCMPへの影響を調べた。研磨レート分布解析を行った両面研磨300 mmウェーハの各々のエッジロールオフ形状を図3に示す。縦軸はウェーハおもて面を下向きにしたときの表面の位置を表し、平坦面を0とした。ここで、Wf1～Wf5は実際のウェーハ、VW1及びVW2は仮想的にエッジ形状を決めたウェーハである。なお、Wf1～Wf5のエッジ形状は、実際に測定したエッジ形状データを最小二乗法により次式で近似し、算出した。

$$f(x) = \frac{a}{1+dx^e} + bx + c \dots\dots\dots(1)$$

ここで、 x はウェーハエッジからの距離、 a 、 b 、 c 、 d 、 e はフィッティング係数である。

エッジロールオフの大きさを表す数値として、ROA (Roll-Off Amount) が提案されている⁶⁾。ROAは、図2に示すように、ウェーハ表面の対象点と基準直線との距離を表す。したがって、ROAが大きいほど平坦度が悪い。

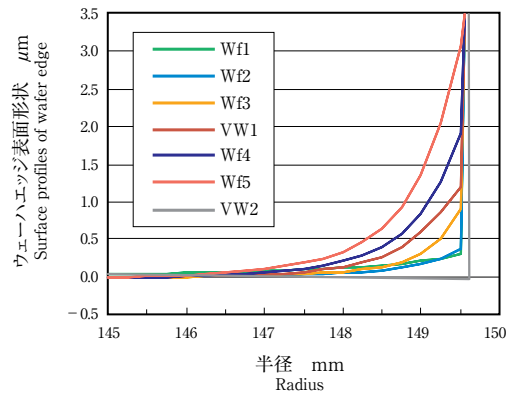


図3 研磨レート分布解析を行ったウェーハのエッジ表面形状
Fig. 3 Wafer edge surface profiles analyzed using removal rate distribution

表1 解析したウェーハのROA (φ300 mm)
Table 1 ROA of analyzed wafers (φ300 mm)

ウェーハ Wafer	ROA μm	ウェーハ Wafer	ROA μm
Wf1	0.06	Wf4	0.75
Wf2	0.15	Wf5	1.27
Wf3	0.35	VW2	0.00
VW1	0.55		

なお、本論文では、ウェーハエッジから1 mmの点を対象点とし、エッジから3～6 mmの表面形状を直線近似した直線を基準直線とした。それぞれのウェーハのROAを表1に示す。このように、両面研磨300 mmウェーハにおいても、最大でROA = 1.27 μmのエッジロールオフがある。

なお、VW1はWf3とWf4の間のROAをもつ仮想的なウェーハである。また、VW2はエッジロールオフの全く無い理想的なウェーハである。

4. 解析方法

4-1 解析方法

CMPの研磨レートは、概ね次式に示すPrestonの式⁷⁾によって表せることが知られている。

$$R_q = \frac{Q}{t} = k \cdot p \cdot v \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 R_q は研磨レート、 Q は研磨量、 t は研磨時間、 k は比例定数、 p はウェーハおもて面にかかる圧力（以下面圧）、 v はウェーハおもて面と研磨パッドとの相対速度である。

ここで、次の条件を仮定する。

まず、比例定数 k は、研磨面（ウェーハおもて面）の温度分布やスラリー分布、パッドのドレッシング状態などにより変化するが、ウェーハ面内で一定と仮定する。

また、相対速度 v は、図1のようにウェーハが揺動せず、ウェーハとパッドが互いにオフセットした軸を中心として回転する一般的なCMPにおいて、それぞれの回転速度が等しいと仮定して、ウェーハ面内で一定とする。

すると、式(2)が単純化され、研磨レートは面圧に比例する。したがって、面圧分布をFEM解析により求めれば、研磨レート分布の傾向が分かる⁸⁾。

そこで本報では、エッジロールオフをもつウェーハをCMPにより研磨する際の研磨プロファイルを予測するため、FEM解析を用いて面圧分布を計算した。なお、FEM解析には、MSC. Software Corporationの汎用解析ソフトMSC. Marcを用いた。

4-2 解析モデル

FEM解析のために、ウェーハ、トップリング、研磨パッドを、ウェーハ中心を対称軸とする二次元円筒座標系を用いてモデル化した。図4にウェーハエッジ部周辺の解析メッシュを示す。ウェーハは、直径300 mm、厚さ0.775 mm、面取り形状を台形とした。ここで、ウェーハエッジから内側に12 mmまでの部分は、エッジロールオフを含む形状としてメッシュを作成した。研磨パッドは、二層パッドと単層パッドの二種類についてメッシュを作成した。図4に示すパッドは、二層パッドの場合である。二層パッドは下地層が軟質パッド、表層が硬質パッドの積層構造とした。ウェーハ裏面には、バックングフィルムを介して等分布圧力（ウェーハ押付け圧力）を加えた。ウェーハの周囲はリテーナリング（Retainer Ring）により押し付けた。

なお、簡単のために、解析は、ウェーハやパッドの回転を無視し、鉛直方向の押付け圧力だけ考慮することと

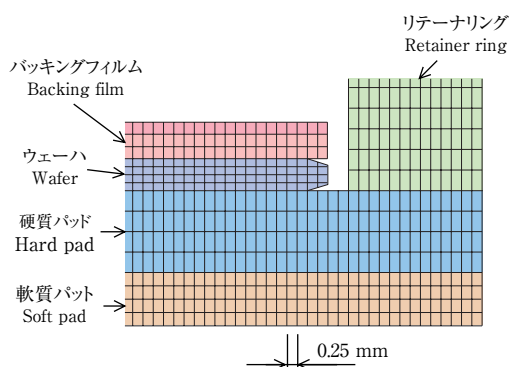


図4 ウェーハエッジ部周辺の解析メッシュ
Fig. 4 FEM analysis mesh at wafer edge proximity

表2 材料特性

Table 2 Material properties

材料 Material	厚さ Thickness (mm)	ヤング率 Young's modulus (MPa)	ポアソン比 Poisson's ratio
ウェーハ Wafer	0.775	190 200	0.25
パッド(単層) Pad (solo)	1.4	21.0	0.35
パッド(二層-硬質) Pad (stacked-hard)	2.0	39.2	0.35
パッド(二層-軟質) Pad (stacked-soft)	1.3	1.7	0.35
バックングフィルム Backing film	0.6	0.2	0.35
リテーナリング Retainer ring	—	3 462	0.30

した。

各部のヤング率とポアソン比を表2に示す。

5. 解析結果

5-1 ロールオフの影響

5-1-1 二層パッド

まず、二層パッドにおけるロールオフの影響を調べた。図5に、ウェーハ押付け圧力とリテーナリング圧力を共に30 kPaとした場合の、Wf1及びWf5のウェーハエッジ部の面圧分布を示す。ここで、縦軸は、ウェーハ中央部での面圧を1とした場合の相対面圧である。前述のように、面圧分布は概ね研磨レート分布と傾向が一致すると考えてよい。

ROAが小さいWf1においては、半径148 mmよりも内側であれば、面圧分布がほぼ平坦であることが分かった。一方、ROAが大きいWf5においては、半径が146 mmより大きくなると次第に相対面圧が大きくなり、半径148 mmにおいてウェーハ中央部より約30%も相対面圧が大き

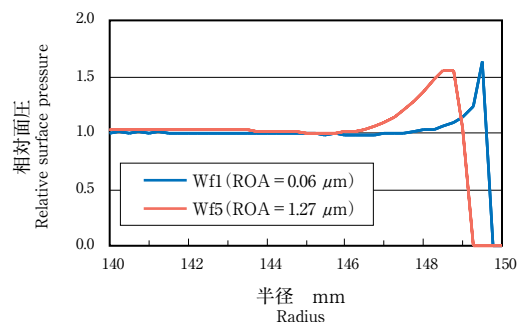


図5 二層パッドにおけるウェーハエッジ部の面圧分布
Fig. 5 Surface pressure distribution at wafer edge using a stacked pad

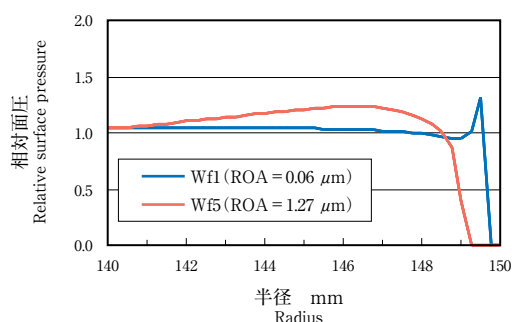


図6 単層パッドにおけるウェーハエッジ部の面圧分布
Fig. 6 Surface pressure distribution at wafer edge using a solo pad

なった。

ここで、エッジロールオフが研磨レートの面内均一性に及ぼす影響を評価するために、面圧の許容範囲を設定する。まず、評価を除外する領域として、エッジエクスクルージョンをITRS2005の2006年での値と同じ2 mmとした。次に、研磨量のばらつきの許容範囲を±10%、すなわち、相対面圧で 1.0 ± 0.1 とした。面圧分布がこの許容範囲に入っていれば、研磨レートの面内ばらつきがCMP後のプロセスに影響しないものとした。

なお、実際のCMPにおいて、研磨レートのばらつきの要因には、面圧分布のばらつきのほかに、装置誤差やスラリー分布など、他の要因によるばらつきも含まれる。また、その許容範囲は、デバイスメーカーによって異なる。前記の許容範囲は実際の許容範囲よりも大きめにとっているが、本論文では以後仮に設定したこの許容範囲で議論を進める。

設定した許容範囲を図5の面圧分布に適用すると、Wf1では相対面圧が許容範囲に入っていたが、Wf5では相対面圧が許容範囲を大きく超えていた。したがって、二層パッドにおいて、エッジロールオフはウェーハエッジ部の研磨プロファイルに大きく影響を及ぼすことが分かった。

5-1-2 単層パッド

次に、単層パッドにおけるロールオフの影響を調べた。図6に、ウェーハ押付け圧力とリテーナリング圧力を共に30 kPaとした場合の、Wf1及びWf5のウェーハエッジ部の面圧分布を示す。

図6から、二層パッドの結果と比べて面圧分布が平坦でない範囲が大きく、ROAの小さいWf1においても半径140 mm以上では面圧分布が平坦ではなかった。これは、単層パッドの場合、面圧分布を平坦化するためのリテーナリングの効果が、後述のように小さかったため

ある。また、ROAが大きいWf5では、半径が140 mmより大きくなると次第に相対面圧が大きくなり、半径146 mm付近で最大となった。その大きさは、ウェーハ中央部の1.23倍であった。

ここで、二層パッドの場合と同様に相対面圧の許容範囲 1.0 ± 0.1 を適用すると、ROAの小さいWf1の相対面圧は許容範囲に入っていたが、ROAの大きいWf5は相対面圧が許容範囲を大きく超えていた。

したがって、単層パッドにおいても、エッジロールオフはウェーハエッジ部の研磨プロファイルに大きく影響を及ぼすことが分かった。

5-2 リテーナリング圧力の影響

二層パッドにおいて、リテーナリング圧力を変えるとウェーハエッジ部の面圧分布が変化することが知られている⁸⁾。図7に、二層パッドにおいて、ウェーハ押付け圧力を30 kPaに固定してリテーナリング圧力を変えた場合の、VW1のウェーハエッジ部の面圧分布を示す。

図7のように、リテーナリング圧力を変えることで、ウェーハエッジ部の面圧分布が変化した。

一方、単層パッドにおけるリテーナリングの影響を調べた結果を図8に示す。ここで、使用したウェーハはWf1、ウェーハ押付け圧力は30 kPaである。

単層パッドの場合、図8のように、リテーナリング圧力を0 kPaから50 kPaと変化させても、エッジエクスクルージョンを除いたウェーハの内側部分の面圧分布は、ほとんど変化しなかった。これは、リテーナリングをパッドに押し付けても、パッドの変形量が小さいために、その影響がウェーハのエッジから2 mm程度までしか及ばなかったためである。

ここで、相対面圧の均一性を簡単に評価するために、エッジエクスクルージョンを除いた範囲における最大の相対面圧及び最小の相対面圧を、それぞれ最大相対面圧

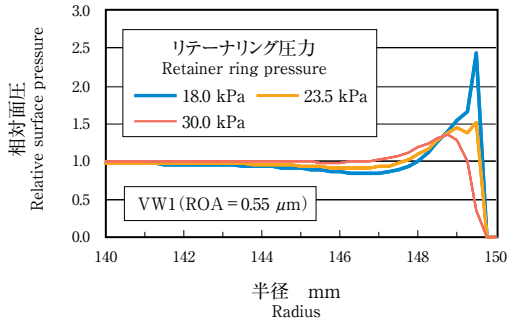


図7 二層パッドにおけるウェーハエッジ部の面圧分布とリテーナリング圧力との関係

Fig. 7 Relationship between retainer ring pressure and pressure distribution at wafer edge using a stacked pad

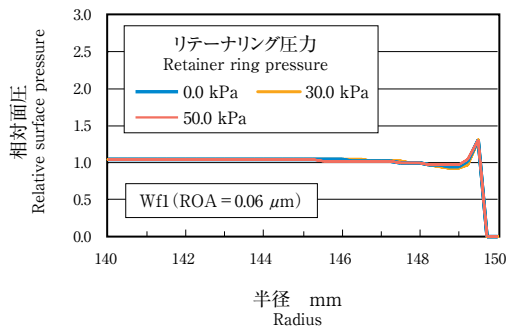


図8 単層パッドにおけるウェーハエッジ部の面圧分布とリテーナリング圧力との関係

Fig. 8 Relationship between retainer ring pressure and pressure distribution at wafer edge using a solo pad

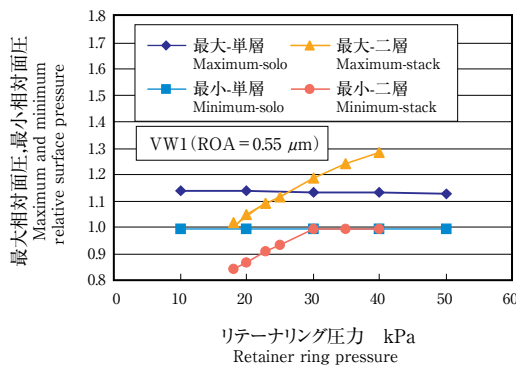


図9 最大・最小相対面圧とリテーナリング圧力との関係

Fig. 9 Relationship between retainer ring pressure and maximum/minimum relative pressure

及び最小相対面圧と呼ぶことにする。最大相対面圧と最小相対面圧の両方が、設定した許容範囲に入っているか否かによって均一性を評価できる。

図9に、VW1ウェーハにおいてウェーハ押付け圧力を30 kPaとした場合の、最大相対面圧及び最小相対面

圧と、リテーナリング圧力との関係を示す。

図9のように、二層パッドでは、最大相対面圧と最小相対面圧がリテーナリング圧力に依存するのに対し、単層パッドではほとんど依存しないことが分かった。

したがって、図9において、二層パッドの場合、リテーナリング圧力が22.3 kPaから23.8 kPaの範囲であれば、許容範囲に入ることが分かった。一方、単層パッドの場合は、リテーナリング圧力を変えても最大相対面圧が1.1を下回らず、許容範囲に入らないことが分かった。

この結果は、二層パッドの場合、エッジロールオフの大きさに合わせてリテーナリング圧力を調節することで、面圧分布を許容範囲に収めることができる可能性があることを示している。

5-3 許容ROA

次に、ROAと最大相対面圧及び最小相対面圧との関係を調べた。図10に、二層パッドでリテーナリング圧力を30 kPaに固定した場合の、ROAと最大相対面圧及び最小相対面圧との関係を示す。なお、ウェーハ押付け圧力は30 kPaである。

このように、ROAが大きいほど、最大相対面圧が大きかった。一方、最小相対面圧の変化は最大相対面圧と比べて小さかった。また、最大相対面圧と最小相対面圧が共に相対面圧の許容範囲 1.0 ± 0.1 に入っているのは、ROAが0から $0.34 \mu\text{m}$ の範囲であった。

ここで、このROAの範囲を、この研磨条件での許容ROAと定義する。図11は、リテーナリング圧力及びパッドを変えて、許容ROAがどのように変化するかを調べた結果である。

図11から、単層パッドにおいては、リテーナリング圧力を変えても許容ROAはほとんど変わらず、0から

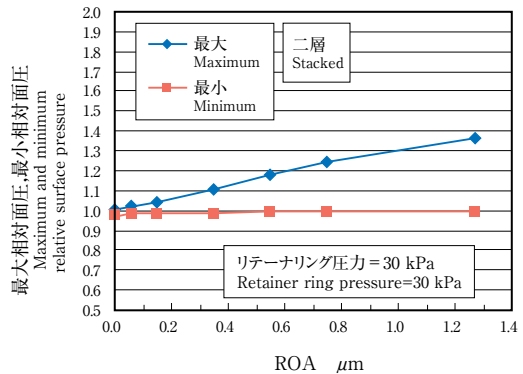


図10 最大・最小相対面圧とROAとの関係
Fig. 10 Relationship between ROA and maximum/minimum relative pressure

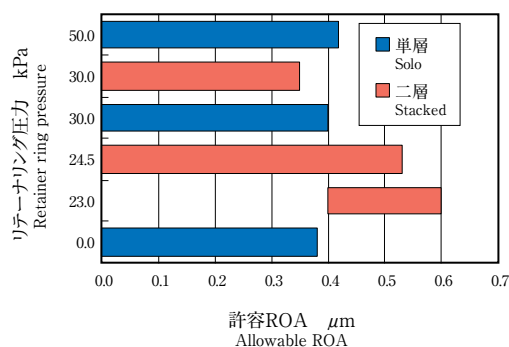


図11 許容ROAとリテーナリング圧力との関係

Fig. 11 Relationship between allowable ROA and retainer ring pressure

0.4 μm 程度であった。これは、上述のように、単層パッドの場合、リテーナリングが面圧分布にほとんど影響を及ぼさないためである。

この結果は、単層パッドの場合、ウェーハのROAが0.4 μm 以下に管理されていれば、ROAに関係なくリテーナリング圧力を設定できることを示している。

一方、二層パッドにおいては、リテーナリング圧力を23 kPaから30 kPaの間で変化させると、許容ROAの範囲が0から0.6 μm の間で大きく変化することが分かった。

この結果は、二層パッドの場合、リテーナリング圧力を調節することで、単層パッドの場合より大きなROAのウェーハを許容範囲内で研磨できることを示している。しかし、リテーナリング圧力を変えれば、どんなに大きなROAのウェーハでも許容範囲内で研磨できるわけではなく、今回の場合、ROAが0.75 μm のWf4では許容範囲内で研磨できるリテーナリング圧力の条件は存在しなかった。

6. 結 言

ウェーハエッジロールオフの、CMP研磨プロセスへの影響についてFEM解析を用いて検討した。その結果を以下にまとめる。

①エッジロールオフの影響範囲は、積層パッドでエッジから4 mm、単層パッドでエッジから10 mmであった。また、ウェーハ押付け圧力とリテーナリング圧力を共に30 kPaとすると、ROAが1.27 μm の場合、エッジ近傍の相対面圧がウェーハ中央部より二層パッドで約30%、単層パッドで約23%大きくなった。したがって、エッジ

ロールオフは、二層パッド、単層パッドにかかわらず、ウェーハエッジ部の研磨プロファイルに大きく影響を及ぼし、CMP工程において問題となり得る。

②二層パッドにおいては、リテーナリング圧力を調節することにより、エッジロールオフに対応することができる。リテーナリング圧力を23 kPaから30 kPaの間で変化させると、許容ROAの範囲が0から0.6 μm の間で変化した。

③単層パッドにおいては、リテーナリング圧力を変えても許容ROAはほとんど変わらず、0から0.4 μm 程度であった。

前述のように、本論文により、ウェーハエッジロールオフがCMP研磨プロセスに影響を与えることを示した。また、リテーナリング圧力と許容ROAの関係を示した。

7. 謝 辞

(株)コベルコ科研 中井康秀氏、(株)神戸製鋼所 森本勉氏には、ウェーハエッジ形状測定の実施、並びにフィッティング関数、フィッティング係数を決定して頂いた。また、本研究を行うに当たり、(社)電子情報技術産業協会 (JEITA) 次世代ウェーハ技術専門員会で議論させて頂いた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- 1) International Technology Roadmap for Semiconductors 2005, Front End Process, (2005), pp.7-11, <http://www.itrs.net/Links/2005ITRS/Home2005.htm>.
- 2) Fukuda, T. et al., Wafer Quality Requirements from The Next Generation Processes and Devices, Proceedings of the Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2003, (2003-11), pp.19-25.
- 3) SEMI Japan, SEMI International Standards 0304, SEMI M1-1103, (2003), pp.17, SEMI Japan.
- 4) SEMI Japan, SEMI International Standards 0304, SEMI M1.15-0302, (2003), pp.3, SEMI Japan.
- 5) 益永ほか, 研磨布の粘弾性回復挙動がシリコンウェーハの外周ダレに与える影響, 2001年度精密工学会 秋季大会 学術講演会論文集 (Proceedings of the Spring Meeting of Japan Society of Precision Engineering 2001), (2002-03), pp.489.
- 6) Kimura, M. et al., A new method for the precise measurement of wafer roll off of silicon polished wafer, Japanese Journal of Applied Physics Part 1, 38-1A (1999), pp.38-39.
- 7) Preston, F. W., The theory and design of plate glass polishing machines, Journal of the Society of Glass Technology, (1927), pp.214.
- 8) 辻村ほか, CMP性能に及ぼすプロセスパラメータの影響, 砥粒加工学会誌 (Journal of the Japan Society of Grinding Engineers), 45-11 (2001), pp.527-532.