水膜チャックの開発 (第1報) *

— メニスカス力による吸着力と反り矯正 —

吉富健一郎** 宇根篤暢*** 小笠原永久† 餅田正秋**

Development of a Water-Film Chuck (1st Report)

- Sticking Force Utilizing Meniscus Force and Flattening of Warpage -

Kenichiro YOSHITOMI, Atsunobu UNE, Nagahisa OGASAWARA and Masaaki MOCHIDA

Silicon wafers for fabricating IC cards and smartphones must be less than a few tens of microns in thickness. After the wafer is thinned by backgrinding, the damaged layer is removed by chemical mechanical polishing (CMP) and dry polishing. A porous vacuum chuck is typically used to fix the wafer during machining. However, it is difficult to completely clean the porous chuck and to flatten a concave wafer with large warpage. To solve these problems, a water-film chuck is proposed. This chuck has a thin water film between the back surface of a wafer and the surface of the chuck. This paper describes the flattening characteristics of the water-film chuck. It was clarified that a quartz glass wafer 1.2 mm thick that has warpage of a few-hundred microns can be flattened to less than 10 μm over time. Then, a backgrinding silicon wafer with 1 mm warpage was flattened instantly below 20 μm by applying a fine water mist. In addition, the lateral restraint force per unit area was found to be over 10 kPa for a water-film thickness of less than 0.5 μm . Therefore, the water-film chuck can be used for not only wafer transfer but also grinding or light-load polishing.

Key words: sticking force, porous chuck, water-film chuck, surface tension, flattening, quartz glass

1. 緒 言

ICカードやスマートフォンなどに使用される半導体デバイスは、数 10 μm 以下に薄化することが要求されている。このためシリコンウエハ裏面を研削し、この加工によって生じたクラック層を除去するために CMP 研磨やドライポリシが行われている¹⁾²⁾。この最終加工は薄化したウエハの割れを避けるために行われる。これら加工時の固定保持には、通常、アルミナセラミック製の真空ポーラスチャックが使用される。デバイスが形成された表面は、厚さ 100 μm 程度の粘着テープで保護され、チャックにより反りが平面矯正された後、裏面が研削、研磨される。この加工中に発生する切り屑や研磨スラリは、チャックのポーラス内部へ真空吸引される。これら吸引物はフラッシュ洗浄を行っても清浄化することは難しく、切り屑などがポーラス部に刺さった状態で保持されると平坦度を劣化させる。ポーラス内部の汚れは加工面をも汚染する。

一方、粘着テープで保持された薄化ウエハは、加工に伴う残留応力により数 100 μm から数 mm の大きな反りを引き起こす。この大きな反りをもつウエハ、とくに凹状に反ったウエハを真空吸着により平面矯正するのは難しい。このため切り屑や加工液を吸引せず、しかも大きく反ったウエハを平面矯正できるチャックが必要とされており、ウエハ裏面と平坦度の良いチャック表面の間に薄い水膜を形成した水膜チャックの検討が進められている³⁾。

本論文では、水膜チャックの吸着原理について述べるとともに、反りをもつ凹凸状石英ウエハを用いた保持実験結果より、水膜チャックの平面矯正能力について理論的扱いを含めて明らかにする。さらに、

粘着テープで保持された mm オーダの大きな反りをもつ凹凸状薄化シリコンウエハの平面矯正能力や、水膜チャックの吸着力と横方向拘束力についても示す。

2. 水膜チャックによる吸着原理

2 物体間に液膜が存在すると、表面張力によるメニスカス力が発生することはよく知られている⁴⁾⁵⁾。これらの力は MEMS 等の微細構造物では大きな問題となっており、光ディスクへのヘッドの吸着はディスク面を破損するため、ダイヤモンドライクカーボン膜やフッ素系液体潤滑膜により致命的な損傷を避けている。図 1 に示すように 2 平面間の液膜は表面張力により鼓状となる。2 平面間に働くメニスカス力 F (引力) は、式(1)で示すラプラス負圧に起因する引力 Δp と、液膜が最もくびれたところの周囲に働く表面張力 γ の和となり、式(2)で表される。

$$\Delta p = \gamma \left(-\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (1)$$

$$F = \pi r_2^2 (-\Delta p) + 2\pi r_2 \gamma = \pi r_2 \gamma \left(\frac{r_2}{r_1} + 1 \right) \approx \pi \gamma \frac{r_2^2}{r_1} = 2\pi \gamma \frac{r_2^2}{t} \quad (2)$$

ここで、 r_1 は液膜外周の曲率半径、 t は液膜厚さ、 r_2 は液膜外周が最もくびれた中央部における液膜半径である。本研究では、液膜厚さに対して液膜半径が非常に大きいので $r_1 \ll r_2$ と考えることができ、第 1 項のラプラス負圧による引力が支配的になる。液膜厚さ t は r_1 の 2 倍なので、式(2)の右項が成立する。

水膜チャックにおいて、薄い水膜によりウエハがチャックに吸着されるのは、このメニスカス力によるものであり、この引力は水の表面張力と水膜面積に比例し、水膜厚さに反比例する。

Fig. 1 Sticking principle of the water-film chuck

* 原稿受付 平成 28 年 7 月 8 日

掲載決定 平成 28 年 12 月 4 日

** 正 会 員 防衛大学校 (神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*** 元防衛大学校

† 防衛大学校

3. 水膜による石英ウエハの平面矯正

大反りウエハに対する水膜チャックの平面矯正能力を調べる実験を行った。平板上の水たまりにウエハを載置して平板とウエハ間に水膜を形成し、長時間放置して蒸発により水膜を薄くした場合と、ウエハを上から押圧して初期の水膜を薄くした場合のウエハの表面形状変化を測定した。なお、前者の水膜を蒸発させる場合を押圧無しの実験と称す。試料は、直径 300mm、厚さ 1.2mm、表面粗さ 10nmRa 以下の反りをもつ石英ウエハを用いた。ウエハを上下反転することにより凹状と凸状ウエハとして利用した。水膜を形成する前のウエハの初期形状を図 2 に示す。凹状載置で反りは約 160 μ m、凸状載置で約 220 μ m である。平板には、SiC 製の平坦度 0.3 μ m、表面粗さ 10nmRa 以下の鏡面プレート（以後、チャックと称す）を用いた。

水膜の形成では、ウエハ全面に水膜が形成されるのに十分な量である約 10ml の水たまりをチャック上に作り、図 3 に示すように斜めからウエハを滑らしながら載置することで、水膜内に泡が入らないようにした。その後、エアスライダとレーザ変位計(キーエンス社製 SI-F1000)からなる高精度形状測定器を用いて表面形状の変化を長時間に亘り連続測定した。

押圧は、ウエハ上に直径 320mm、厚さ 20mm、平坦度 0.3 μ m の剛体平板を 10 秒間載置する方法で行い、剛体平板上に銅片を載せて 50N と強い押圧の 100N に調整した。

3.1 押圧無し時の形状変化

図 4 にウエハを押圧せずにチャック上で長時間放置した場合の形状変化を示す。(a)図に示す凹状ウエハの場合、ウエハが右に傾いて載置されたため、360 分までは左側の水膜厚さが厚く、右側の水膜厚さが薄い状態になる。430 分以降は左右の盛り上がり方が等しくなり、その後、盛り上がり部分が等分に減少する。610 分を超えるあたりからウエハ中央部のくぼみが盛り上がる傾向を示し、790 分後に両側のくぼみがなくなりほぼ平坦になる。さらに、水の蒸発により水膜厚さが減少してウエハとチャックとの間隙が減少し、最終的に 1330 分経過後に 11 μ m 以下まで平面矯正される。(b)図に示す凸状ウエハの場合、66 分までは水膜厚さが減少してウエハが下降するだけで、ウエハ形状はほとんど変化しない。126 分以降徐々に形状が変化し、2141 分後に平坦度 10 μ m 以下に平面矯正される。後述の水膜厚さ測定結果より、この時の水膜厚さは全面で 5 μ m 以下になっていると推察される。ここで、式(2)は均一な水膜厚さにおいて水膜が薄いほど吸着力が大きいことを示す。反りをもつウエハを吸着する場合の水膜厚さは場所により変化するが、水膜は連続体であるので場所に依らず一様な吸着力となる。水膜が薄い箇所は

Fig. 2 Initial profiles for concave and convex quartz glass wafers

Fig. 3 Apparatus to measure a wafer profile

(a) Concave quartz glass wafer

(b) Convex quartz glass wafer

Fig. 4 Profile changes for concave and convex quartz glass wafers while left for a long time

Fig. 5 Enlarged view of profiles at the final time for concave and convex wafers

周から水が補充され、それ以下に薄くなることを拘束する。このためウエハ全面で水膜厚さの均一化が進み、反りの大きい箇所からチャック面に引き寄せられ、最終的に平面矯正されと考えられる。

凹凸ウエハに対する最終形状の拡大図を図5に示す。いずれも平坦度約 $10\mu\text{m}$ に平面矯正されるが、周期の小さい数 μm の凹凸は消滅していない。したがって、今回の条件の水膜厚さでは、大きな周期の反りは平面矯正できるが、真空チャックを用いた場合のように数 10mm 周期の反りは矯正できない。

この凸状ウエハの水膜による変形経過時における水膜厚さを、分光干渉式ウエハ厚み計(大塚電子社製 SF-3)を用いて測定した。その結果を図6に示す。(a)図に示す破線部は測定範囲外の形状であり、図4の初期形状から類推して示した。縦軸を拡大した(b)図から、水膜厚さは初期にウエハ端部で $7\sim 12\mu\text{m}$ 、180分後に左端で $9\mu\text{m}$ 、右端で $7\mu\text{m}$ 程度となり、991分後には $5\mu\text{m}$ 以下に減少する。破線は991分後のウエハ形状を示し、両端を除いて水膜厚さと似た傾向をもつ。

3.2 押圧時の形状変化

図2に示した初期形状を有する凹凸状ウエハを押圧後、放置した場合の形状変化を図7に示す。(a)図が凹状ウエハ、(b)図が凸状ウエハの形状変化である。(a)図に破線で示す凹状ウエハの形状変化は、 100N の強い押圧を行った場合で、初期水膜厚さが薄くなる。 50N の押圧、すなわち水膜厚さが厚い場合、初期形状約 $160\mu\text{m}$ の凹状ウエハは、押圧1分後に約 $60\mu\text{m}$ の2つの山をもつ形状に変化し、時間とともに2つの山の高さが等しくなるように矯正される。10分後の左の山高さは1分後の山高さより大きくなる。これは水膜による吸着力に対し、押圧によるウエハの弾性変形が元に戻ろうとする弾性復元力の方が大きいため生じると考えられる。強い押圧により水膜を薄くすると、1分後の2つの山の高さが約 $30\mu\text{m}$ まで減少するが、この場合はさらに強い弾性復元力が作用し、左の山高さは60分後まで、1分後の山高さより大きい。100分後には左右の山高さがほぼ等しい約 $20\mu\text{m}$ まで矯正される。この形状を図4(a)に示した押圧無しの形状変化と比較すると、左右端形状は少し異なるが、730分経過後の形状に相当する。すなわち、押圧により初期の水膜を薄くすると吸着力が高まるので、平面矯正の時間を短くすることができると言える。

(b)図に示す初期反り量が約 $220\mu\text{m}$ の凸状ウエハは、120分後に1分後の形状(中央部は120分後の形状にほぼ重なっている)とほぼ等しい山高さ $110\mu\text{m}$ まで矯正される。押圧によりバックリングを起こした外周部は時間とともに平面矯正される。120分後の形状は、図4(b)に示した押圧無しの490分後の形状にほぼ一致し、平面矯正にはまだ時間を要する。すなわち、この押圧荷重では $200\mu\text{m}$ 程度の大きな凸状ウエハを短時間で $10\mu\text{m}$ 以下に平面矯正することは難しいと言え、矯正能力を高めるためには、押圧荷重を大きくする必要がある。

短時間で $10\mu\text{m}$ 以下に平面矯正できる反り量を調べるために、約 $50\mu\text{m}$ の反りをもつ凹状ウエハについて同様の実験を行った。その結果を図8に示す。押圧後、放置した場合の形状変化を(a)図に、強い押圧の場合を(b)図に示す。(a)図に示すようにウエハは傾いた状態から、押圧後に平坦度約 $30\mu\text{m}$ の2つの谷をもつ形状となり、中央が膨らむバックリングを起こす。右端は10分後に1分後より高くなり、時間とともに傾きが水平に修正される。50分後には、 $10\mu\text{m}$ 以下に平面矯正される。(b)図に示す強

(a) Convex quartz glass wafer

(b) Thickness change of water and wafer profile after 991 min

Fig. 6 Thickness changes of water for convex quartz glass wafers while left for a long time

(a) Concave quartz glass wafer

(b) Convex quartz glass wafer

Fig. 7 Profile changes after pressing and while left for a long time for concave and convex quartz glass wafers

い押圧の場合、傾斜の無い状態から押圧直後に 10 数 μm の凹凸状に矯正されるが、30 分までは弾性復元力と吸着力の均衡に時間を使われ、平坦度は 30 分後に $10\mu\text{m}$ 以下に、50 分後に約 $5\mu\text{m}$ になる。このように反りが $50\mu\text{m}$ 程度であれば、押圧により 30 分で $10\mu\text{m}$ 以下に平面矯正できると言える。

上述のように、水膜厚さ分布が均一に近づき薄くなることで平面矯正能力は高くなる。そこで、均一厚さの水膜を一樣圧力負荷と仮定し、 $160\mu\text{m}$ 以上の反りをもつ凹凸ウエハを、 μm オーダの平坦度まで平面矯正するために必要な一樣圧力負荷を有限要素法により検討した。また、押圧によりウエハを μm オーダまで平面矯正する場合の形状変化についても理論計算を行った。

図 9 に、図 2 に示した初期形状をもつ凹凸ウエハに、上部から一樣圧力を負荷した場合の一樣圧力と形状変化の関係について示す。図に矢印で示す破線は、理論曲線にほぼ一致する実験値を、図 4 に示した形状(傾斜と最小値は予め 0 に補正)から選んで示したものである。それぞれ(a), (b)図に示す凹凸ウエハのいずれについても理論形状とほぼ一致する。すなわち、膜厚が均一化された水膜による吸着力は、ウエハ全面をチャック面にほぼ同じ吸着力で引き寄せるので、一樣圧力負荷と同様の形状変化になると考えられる。理論結果より、凹状ウエハでは 1kPa を、凸状ウエハでは 10kPa の一樣圧力を負荷すると μm オーダまで矯正される(X 軸と重なるので表示されていない)ことから、凹状ウエハの方が平面矯正されやすいと言える。

図 10 に、剛体平面を用いて凹凸ウエハ上部から押圧した場合の押圧荷重と形状変化の関係を示す。図に示す破線は、図 7 に示した押圧後 1 分経過時の実験結果を示す。ウエハとチャックの間に水膜がないのでウエハは実験の押圧荷重より低い値で変

(a) Pressing

(b) Strong pressing

Fig. 8 Profile changes after pressing and while left for a long time for a concave quartz glass wafer with small warp

(a) Concave quartz glass wafer

(b) Convex quartz glass wafer

Fig. 9 Deformations calculated by FEM for concave and convex quartz glass wafers under various uniform pressures

(a) Concave quartz glass wafer

(b) Convex quartz glass wafer

Fig. 10 Deformations calculated by FEM for concave and convex quartz glass wafers when pressing against a rigid plate

形し、(a)図に示す凹状ウエハでは、50Nの押圧の場合の形状は押圧荷重5.9Nの理論形状に、強く押圧した場合は11.6Nの理論形状に、拡大図に示す中央部のバックリングを含めてほぼ一致する。(b)図に示す凸状ウエハでは、押圧荷重2.3Nの理論形状に端部のバックリングを含めてほぼ一致する。したがって、押圧による変形状態は水膜の有無に関わらず同様であると言え、水膜がない場合のウエハを μm オーダまで平面矯正するのに必要な押圧荷重は、30~40N(ウエハ面積に対して0.42~0.57kPaに相当)である。

以上より、水膜の吸着力による平面矯正は、一様圧力負荷の場合と同じように形状変化し、凹凸状ウエハについて、それぞれ1kPa、10kPaに相当する吸着力となる水膜厚さが実現できれば μm オーダの平面矯正が可能と言える。一方、剛体平板による押圧では、水膜が μm オーダへの平面矯正を妨げており、さらなる押圧荷重は破損の問題があるため、水膜厚さを薄くする他の手法を考案する必要がある。

4. 大反り薄化シリコンウエハの平面矯正

水膜チャックによって、大反りを有する研削した薄化ウエハの平面矯正が可能か否かを検討するために、100 μm 厚の粘着テープで保持したウエハを研削して作成した1mm以上の大反り薄化ウエハについて平面矯正を試みた。チャックに作った水たまりにウエハを載置後、押圧しないで放置した場合の48 μm 厚の試料の形状変形を図11に示す。載置することによって1300 μm の反りをもつウエハは約700 μm まで反りが減少する。さらに32分後に反りは数10 μm 以下となった。

初期の水膜厚さを薄くして矯正能力を高めるために、霧吹きで1ml以下の水を試料裏面に塗布して形状変化を測定した。図12に結果を示す。同図は、1mm以上反った75 μm 厚の凸状試料と45 μm 厚の凹状試料をチャックに載置した後の形状である。いずれの試料も載置直後に矯正されて平坦度はそれぞれ40 μm 以下、80 μm 以下となった。図13に、凸状試料について押圧を加えた結果を示す。押圧により中央が平坦化され、さらに外周部に対して押圧を加えることにより、平坦度20 μm 以下の平面に矯正された。すなわち、真空チャックと異なり、水膜チャックを用いることにより、凹凸に1mm以上反った試料を水膜の吸着力と押圧荷重により平坦度20 μm 以下に容易に平面矯正できると言える。

5. 水膜チャックの吸着力と横方向拘束力

反ったウエハが水膜チャックによって平面に矯正される理由は、前述の式(2)で示されるメニスカス力による吸着力である。この吸着力を10mm角、厚さ4mmの石英ガラス片と厚さ1.2mmの石英ガラスウエハとを用いて測定した。図14に実験方法を示す。測定は、垂直方向とせん断方向それぞれについて行い、水膜厚さは石英ガラスウエハ側から測定した。図15に、石英ガラス間の水膜厚を変えて剥離する力(引張力)を測定した結果を示す。実験結果は式(2)の理論と同様に水膜厚さが薄くなると急激に引張力は大きくなるが、水膜厚さ3 μm 以下では理論値の約3割となり、水膜厚さ3~6 μm においても引張力は10~20kPaであり理論値より小さい。この理由として、本実験方法ではガラス片に対して精密に水平・垂直方向の力を加えることが難しく、また、ガラス片のエッジ部で剥離が起こりやすいためと考えられる。図より、引張力は水膜厚さ1 μm 近辺から急激に増加

し、水膜厚さ0.3 μm では真空チャックの吸着力に匹敵する70kPa以上に達する。水膜厚さ5 μm では10kPa以上の引張力があり、

Fig. 11 Profile changes for a convex backgrinding silicon wafer while left for a long time

Fig. 12 Flattening using a thin-film spray method for concave and convex backgrinding silicon wafers.

Fig. 13 Flattening for a convex backgrinding silicon wafer when pressing against a rigid plate and on the periphery

Fig. 14 Apparatus to measure tensile strength and lateral restraint force

Fig. 15 Relation between tensile strength and thickness of water-film thickness

Fig. 16 Relation between lateral restraint force and water-film thickness

図 9(b)に示した凸状ウェハが 10kPa で平面矯正される計算結果に一致する。

水膜による横方向拘束力は、水膜チャックを用いて研削や研磨加工を行う場合に、ウェハがチャックから外れないために必要である。水膜厚さが 10 μ m 程度では水膜が潤滑作用を示し横方向は拘束されず、数 μ m 以下の水膜厚さにすることで横方向拘束力が発生する。そこで、40mm 角、厚さ 1.2mm の石英ウェハを水膜で保持し、横方向拘束力をプッシュプルケージで測定した結果を図 16 に示す。横方向拘束力は、水膜厚さが 2 μ m 以

上ではほぼ 0 であり、1 μ m 以下になると急激に拘束力は大きくなり、0.5 μ m で 10kPa を超える。研磨加工に使用するためには、研磨圧力 50kPa $\times$ 摩擦係数 0.5 として 25kPa 以上の拘束力が要求され、0.3 μ m 以下の水膜厚さが必要となる。

6. 結 言

メニスカス力を利用する水膜チャックを大反りウェハの平面矯正に使用するために、水膜による吸着力と反りの平面矯正能力について実験と理論により検討し、以下の結論を得た。

- (1) 水膜チャックの水膜厚さを 5 μ m 程度にすることにより、直径 300mm、厚さ 1.2mm、反り量約 200 μ m の石英ウェハを 10 μ m 以下に平面矯正できる。
- (2) 裏面に粘着テープで保持した薄化ウェハは、1mm 以上凹状に反っていても平面矯正することが可能で、霧状塗布により水膜を薄くすることにより簡単に 20 μ m 以下に平面矯正できる。
- (3) 水膜の厚さを 0.5 μ m 以下にすることにより 10kPa を超える横方向拘束力を得ることができ、研削や軽荷重の研磨に適用できる可能性がある。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、実験試料の提供にご協力頂いた株式会社岡本工作機械製作所、ならびに測定にご協力頂いた大塚電子株式会社の関係各位に深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Y.S. Kim, et al: Ultra Thinning Down to 4- μ m using 300-mm Wafer 40-nm Node 2Gb DRAM for 3D Multi-Stack WOW Applications, IEEE 2014 Symposia on VLSI Technology and Circuits, Hawaii(2014) T3.3.
- 2) K. Ishikawa, et al: The Back Grinding Technology for Semiconductor device, Journal of JSPE, 73, 7(2007)764.
- 3) K. Yoshitomi, et al: Fundamental characteristics of a water-film chuck, Proc. of the 13th euspen international conference, Berlin (2013) 30-35 V2.
- 4) J. N. Israelachvili: Intermolecular and surface forces, Academic Press (1991).
- 5) H. Taura, et al: Meniscus forces of liquid bridge between two parallel planes, Journal of JSME, 78, 6(2012)331.