研究

平面修正制御形ラップ・ポリシ機の試作*

宇根 篤 暢** 上野 嘉 之**

Flatness Controlling Lapping/Polishing Machine

Atsunobu UNE and Yoshiyuki UENO

A lapping/polishing machine has been newly designed and constructed to produce precise flat surfaces efficiently. The machine can control the shape of a base plate by varying the pressure distribution on the work plates and the conditioning rings. It is also possible to control the shape of the base plate by changing the rotating speeds of the base plate and the work plates. Stable floating characteristics and vibration suppression to less than $1\ \mu\text{m}$ are attained by using hydrodynamic bearings for the base plate bearings. Accurate and large loading are also attained by using parallel leaf springs. The base plate and work plate surfaces are lapped within a few microns by controlling

the pressure distribution. The base plate always attains an isothermal state during silicon wafer polishing, because the upper and lower surface temperatures of the base plate rise simultaneously due to polishing and motor power heat. On the other hand, the work plates are deformed thermally. Therefore, two-layer discs with a larger coefficient of thermal expansion in the upper layer were used to reduce thermal deformation. As a result, it has been proved that highly accurate polishing may be attained efficiently by using the machine.

Key words: polishing machine, lapping machine, flatness correcting, flatness control, silicon wafer polishing, hydrodynamic bearing, parallel leaf springs, thermal deformation, two-layer disc.

1. 緒 言

電子機器部品を高性能、安価に製造するためには、その基板となる Si ウエハや各種結晶材料に高精度平面を能率よく得ることが必要となる。

高精度平面を得る方法として、小工具を制御して試料面形状を直接修正する方法^{1)~3)}と、ラップ面形状を修正し、それを試料に転写する方法がある⁴⁾。本研究では、生産能率の高い後者の方法を適用し、現状の修正リング形ラップ・ポリシ機に平面修正制御の機能を付加した新形機を設計・試作した。

本報告では、定盤面を平面修正制御するための加圧力、偏心荷重、回転速度の連続可変機構、および高精度・高能率加工を実現するための機械構造について述べるとともに、本機に採用した定盤用流体すべり軸受の浮上特性、平行ばね加圧方式による加圧精度、ならびに平面修正制御結果、ポリシング時の昇温特性について明らかにする。また、本機を Si ウエハのポリシングに適用し、試料皿の熱変形が加工精度へ大きく影響することを示すとともに、この対策のために採用した上層の熱膨張係数が大きい 2 層円板形接着基板の熱変形を実験的、理論的に解析した結果について述べる。

2. 設 計 方 針

一般に試料およびラップは、各接触部における圧力と走行距離に比例して減耗する⁵⁾ため、ラップ面に平面を維持するためには、圧力と相対速度と接触時間の積がラップ面全体で等しくならなければならない。修正リング方式において、ラップ面磨耗に係る要因は、ラップ、試料皿、修正リングの回転速度、試料皿、修正リングとラップの相対位置、試料皿、修正リングに与える加圧力と偏心荷重である。本機では構造を簡単にするために、ラップ、試料皿の回転速度、試料皿、修正リングに与える加圧力と偏心荷重を平面修正制御変数とした。

高精度・高能率加工を実現するための設計方針を以下に示す。

- (1) 高精度加工のために、運動精度の向上、低振動、高剛性化を図ること。
- (2) ラップと試料皿の回転速度、および試料皿と修正リングへの加圧力、偏心荷重は、制御性を高めるために連続可変とすること。
- (3) 高能率加工のために、多数枚同時加工、高加圧、高回転速度を実現すること。
- (4) 現状の片面加工用修正リング形ラップ・ポリシ機を原形とすること。

3. 構 造

図 1 に本機の構造を示す。試料皿、定盤の回転速度を

* 原稿受付 昭和 56 年 5 月 22 日。昭和 53 年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和 53 年 10 月 4 日)にて発表。

** 正 会 員 日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所(武蔵野市緑町 3-9-11)

Fig. 1 Cross sectional view of the lapping/polishing machine

個別に連続可変制御するために2台の無段速モータを用いた。3個の試料皿の回転は、定盤中心に回転軸をもつ歯車により周辺に歯車を設けた修正リングを強制回転駆動し、その回転をキー伝達することによって行われる。低振動化のために、定盤はラジアル・スラスト流体すべり軸受で支持した。ラジアル軸受は、くさび状の油膜を形成するために、外周辺に沿って $50\text{ }\mu\text{m}/110\text{ mm}$ の傾斜をもつ5個の受金(長さ 120 mm , 幅 102 mm)から、スラスト軸受は、流体すべり軸受の負荷能力算出式⁶⁾を用いて設計した $14\text{ }\mu\text{m}/200\text{ mm}$ の傾斜をもつ12個の受金(円弧長さ 215 mm , 幅 114 mm)から構成される。

高精度の連続圧力制御を行うため、可動質量が小さく、定盤の上下動に追従し、かつ高加圧が容易に実現できる平行ばね加圧方式を採用した。図2に加圧システムを示す。主平行ばねは、3個の試料皿、あるいは修正リングに同時に等加圧力を与え、定盤の上下動に対して安定して追従するように中央軸から3半径方向に伸びる。試料皿、あるいは修正リングへの加圧力は、1組の主平行ばねの端部から分岐する3組の副平行ばね端に取り付けた特殊すべりシューを介して与えられる。中央軸は軸心を共有する2重軸構造、平行ばねは2段構造をもち、試料皿と修正リングに個別の加圧力を与える。定盤の外周、あるいは内周側に大きい偏心荷重は、試料皿、あるいは修正リングの円周上の3等分点上に、内周側2個、外周側1個になるように配置したシューの足の長さを内周側と外周側でアンバランスにすることによって与えられる。各シューへの加圧力は、加工中に副平行ばね上に取り付けたストレインゲージにより検出し、差動ねじによって調整する。加圧のための中央軸の送りには、ピッチ

Fig. 2 Loading system

Fig. 3 Special sliding shoe

10 mm , 単一ピッチ誤差 $5\text{ }\mu\text{m}$ の高精度送りねじを使用し、駆動には回転角精度の高い電気パルスモータを用いた。

特殊すべりシューは、構造上、足の長さが長くなる。したがって、図3に示すようにシューとランナ間に介在する油の流体抵抗によって、副平行ばねに大きなねじりモーメントが発生する。このモーメントによってシューが傾斜し、浮力を失うことを避けるために、 $5\text{ }\mu\text{m}/60\text{ mm}$ の傾斜をもつ前後の受圧面に $5\text{ }\mu\text{m}$ の段差を設けた。この段差により前の受圧面で発生する動圧力は、後の受圧面に比して大きくなり、反対方向のモーメントが発生し、流体抵抗によるモーメントをキャンセルする。

4. 試作結果

図4に試作機の概観、表1に仕様を示す。試料の多数枚同時加工 ($3''\text{ Si}$ ウェハでは102枚)を可能にするために定盤径を 1300 mm と大径化し、生産能率向上のために最大加圧力、相対速度は、従来の数倍の 49 kPa [0.5 kgf/cm^2], 547 m/min (定盤、試料皿回転速度 112 rpm の場合)とした。

Fig. 4 Newly-built lapping/polishing machine

Table 1 Machine specifications

Base plate diameter mm	
Outer diameter	1 300
Inner diameter	256
Work plate diameter mm	510
Number of work plates	3
Rotating speed rpm	
Base plate	11.2-112
Work plate and conditioning ring	15.4-154
Size mm	1 880 L × 1 720 W × 2 660 H
Weight kN	88.2
Load N	
per work plate	0-5 674.2
per conditioning ring	0-3 410.4
Asymmetric load N	
Work plate	0-1 960
Conditioning ring	0-1 176
Motor power kW	
Base plate rotating	15
Conditioning ring rotating	5.5
Electric pulse motor power W	
Loading feed of work plate	246
Loading feed of conditioning ring	246

4.1 定盤の浮上, 振動特性

図5にスラスト流体すべり軸受を採用した定盤の無負荷運転時における浮上特性を示す。浮上量, および後述する振動特性は, 床に設置した防振台から定盤上に伸びるアームに取り付けた非接触式の容量形電気マイクロメータを用いて測定した。浮上量は2 rpmで26 μm と大きく, 40 rpmで95 μm に達し, 飽和状態となる。上下変動量は回転速度にかかわらず53 μm の一定値となり, その変動波形は周期的かつ一様な軸対称形状をもつ。し

Fig. 5 Floating characteristics of the unloaded base plate

たがって, この変動は定盤上面の傾斜によるものであり, 浮上すきまの変動は無視できる。定盤の振動は, 100 rpmで約1 μm に達するが, この時の本体振動6 μm に比較してきわめて小さい。このようにスラスト流体すべり軸受は, 大重量の定盤(14.7 kN {1.5 tf})を安定して支持し, しかも低振動化に大きな効果をもつ。

4.2 加圧精度

加圧を行う中央軸の送り精度は, 位置決め誤差 $\pm 5 \mu\text{m}$, バックラッシュ量5~6 μm である。これらは機械要素の製作誤差から生じたものであり, 送りねじのピッチ誤差が前者に, 減速系歯車の加工精度が後者に主に影響する。繰返し誤差は1 μm 以下ときわめて小さい。したがって, 加圧精度は $\pm 14.7 \text{ N}$ [$\pm 1.5 \text{ kgf}$]と計算され, 高精度加圧が可能となる。この値は常用荷重2 940 N {300 kgf}の $\pm 0.5\%$ に相当する。

加圧時における特殊すべりシユアの流体抵抗によるびり振動は, 段差を設けることにより手に感じない程度に小さくなる。

4.3 平面修正制御

加圧力, 偏心荷重, 回転速度による平面修正制御性を検討するため, WA # 600を用いて定盤面をラップした。砥粒は試料皿の中央部の穴から供給し, 砥粒濃度分布を定盤全面で一様にするため, 試料皿面に幅5 mm, 深さ3 mm, ピッチ20 mmの格子溝を設けた。定盤面の平面修正結果を表2に示す。なお, 定盤, 試料皿面の形状測定は, 検定した直定規(長さ500 mm)を基準とし, 直定規上面にダイヤルゲージの測定子先端を接触させ, 定盤, 試料皿面上に置いたダイヤルゲージ固定台をすべらすことによって行った。円周方向の形状測定は,

Table 2 Flatness correcting results for base plate surface in lapping

Lapping condition No.	Lapping time min	Rotating speed rpm		Pressure kPa		Asymmetric load %		Shape of the base plate surface μm				Shape of the work plate after lapping μm
		B.P.	W.P. & C.R.	W.P.	C.R.	W.P.	C.R.	Before lapping		After lapping		
								Radial direction	Circular direction	Radial direction	Circular direction	
1	50	19	14	9.8	14.7	16	20					
2	30	20	20	9.8	14.7	20	20					
3	30	20	20	12.7	12.0	0	0					
4	30	20	20	9.8	14.7	20	20					

B.P. ; Base plate, W.P. ; Work plate, C.R. ; Conditioning ring

直定規を定盤面のほぼ中央部で半径に対して直角に置いて行った。

偏心荷重は、試料皿等の自重を含めた試料への全加圧力が、3個のシューに与えられたとして、{(外周側のシューに与えられた加圧力)-(内周側の1個のシューに与えられた加圧力)}/(内周側の1個のシューに与えられた加圧力)をパーセントで表したものである。

中低ですり鉢状の定盤面を平面修正するために、試料皿に対し、修正リングの圧力を高くし、定盤の外周側に大きい偏心荷重を与える1,2の条件で連続して加工すると、半径、円周方向とも30 μm の凸、すなわち円すい状で中高となる。このため加工時間を短くし、制御条件が逆の3の条件で加工すると、定盤面は約2 μm に修正される。このさい円周方向の形状が左右非対称となるのは、うねりによるものである。また、半径、円周方向が10 μm 、8 μm の凹の定盤面を2と同様の4の条件で加工すると、定盤、試料皿面ともほぼ平面に修正される。すなわち、試料皿の圧力を修正リングより高くすると、定盤面は中低に、逆にした場合は中高になり、外周側に大きい偏心荷重を試料皿、修正リングに与えると、定盤面は円すい状に、与えなければすり鉢状になる。一方、すり鉢状の定盤面を、試料皿の回転速度が定盤より大きい条件で平面修正した結果、その効果はきわめて低いことがわかった。

以上より、加圧力、偏心荷重だけを制御することにより、平面修正は可能であり、制御性の低い回転速度による制御は不要であることが明らかとなった。

4.4 加工時の昇温特性

図6は後述する大形接着基板使用時のポリシング条件下における機械各部の昇温曲線を示す。各部温度はポリシング時間とともに上昇し、定盤モータは他の各部と比較し温度上昇が大きく、4 h後に70°C近くに達する。このモータ駆動熱により定盤用すべり軸受を格納する油槽下部は50°C近くまで暖められる。一方、ポリシャ面温度は、ポリシングによる加工熱によって4 h後に約

Fig. 6 Temperature elevation curve for several parts of the machine
Polishing conditions: rotating speed; 40 rpm, pressure; 6.37 kPa

50°Cに上昇する。このため試料接着基板温度も上昇し、接着剤が軟化してSiウエハの剝離等を生じることがある。

油槽下部とポリシャ面の昇温曲線はきわめてよく一致する。すなわち定盤の上下面は常に同一温度となり、定盤全体が均一温度状態になっていると推定される。

5. Siウエハポリシングへの適用

5.1 加工結果

本機をSiウエハのポリシングに適用した例について以下に述べる。表3にポリシング条件を示す。接着基板は3種類を使用し、大形接着基板は試料皿にボルト締めしてポリシした。

図7に大形接着基板を用いてポリシした際の接着状態におけるポリシ面の等厚干渉縞を、表4に剝離後の各基板ごとの加工精度を示す。干渉縞は直線状であり、平面度は1 μm 以内、周辺だれ幅は1.5~2 mm以内であるが、厚さのばらつき、平行度はいずれも数十 μm ときわ

Table 3 Polishing conditions

Gluing plate	Category	Large		Small		Two-layer disc	
	Size mm	Outer diameter	510	Diameter	188	Diameter	188
		Inner diameter	200	Thickness	20	Thickness	20
		Thickness	10				
Wafer size	Wafer number	3''	84	3''	15	5''	15
Rotating speed rpm	Base plate	40		20, 30		27.5	
	Work plate and conditioning ring			20, 30, 40			
Pressure kPa	Workpiece	6.37		15.3		19.6	
	Conditioning ring	10					
Polishing reagent		Colloidal silica (Commercial name: Snowtex 30)					
Supplying speed of polishing reagent L/h		10					
Polisher		Polisher made of polyurethan (Commercial name: Politex supreme)

Fig. 7 Interferogram of the polished surface
Polishing conditions: rotating speed; 40 rpm, pressure; 6.37 kPa

めて大きく、更に基板の内周部に接着した Si ウェハの厚さ、平行度は、外周部のそれに比較し小さい傾向を示す。

図 8 に平行度 $4 \sim 19 \mu\text{m}$ 、厚さのばらつき $40 \mu\text{m}$ の精度の悪い 3" Si ウェハを小形基板に接着してポリシした際の接着状態における平面度、平行度、厚さの時間的変化を示す。平面度は 6 h 半後にはほぼ飽和し、約 $1.2 \mu\text{m}$ の凹となる。平行度は 9 h 半後には $5 \mu\text{m}$ 以下となり飽和する。厚さのばらつきはポリシング時間とともに減少

し、11 h 後には約 $1/3$ になる。このように等圧力分布下においても、平行度、厚さのばらつきが向上するのは、修正リングの中に稠密に置いた各接着基板が自公転しているためであり、この方式はくさびの修正に対して効果をもつが、修正時間はきわめて長い。

図 9 に示すポリシング速度は、ポリシング時間とともに増加し、7 h 後には初期速度の 2 倍以上になり、飽和状態となる。この増加傾向は図 6 に示したポリシャ面の昇温傾向とよく一致し、コロイダルシリカを用いるメカノケミカルポリシングでは、ポリシング速度が加工温度に大きく依存することがわかる。

5.2 熱変形と対策

表 4 に示した厚さのばらつき、平行度の劣化について、定盤は均一温度状態で熱変形を無視できるので、その原因は試料皿の熱変形によるものと考えられる。すなわち試料皿は下面をポリシャに接し、上面を空気にさらされているので、試料接着面が凸になるように熱変形する。この変形量は、Si ウェハと同程度の面積では小さくほとんど無視できるが、試料皿全面ではかなり大きく、このため平面度への影響は小さく、厚さのばらつきと平行度への影響はきわめて大きい。この熱変形に対し、通常、

Table 4 Polishing accuracies

Glued position	Thickness μm				Parallelism μm		Flatness μm	Rounding width at edge mm	Roughness $\mu\text{mR}_{\text{max}}$
	Inner		Outer		Inner	Outer			
Work plate No.	Average	Deviation	Average	Deviation	Average				
1	366.5	20.1	367.8	34.1	16.7	22.0	<1	1.5-2	<0.01
2	360.8	21.1	368.8	35.4	13.9	17.9			
3	360.8	31.2	369.0	24.0	17.8	24.5

Fig. 8 Change in polishing accuracy with time

Fig. 9 Change in polishing rate with time

試料皿や定盤を冷却し, 変形量を小さくすることが試みられている。本研究では前述した昇温によるポリシング速度の飛躍的増大の利点を生かすために, 熱変形対策として接着基板の小形化を試みた。

基板の小形化により, 基板全面の変形量は小さくなり, 厚さのばらつき, 平行度への影響は無視できるが, 図8に示したように平面度への影響は残る。このため上層に熱膨張係数の大きい他種金属をクラッドした2層円板形接着基板について検討した。

図10に示す半径 r_0 , 板厚 h (第1層板厚 h_1 , 第2層板厚 h_2)の2層円板の熱変形について考える。基板には式(1)で示す直線状温度分布 $T(z)$ が生じていると仮定する。

Fig. 10 Thermal deformation analysis for two-layer disc

Table 5 Thermal deformation of two-layer disc gluing plate

	Clad plate (1)	Clad plate (2)
Radius r_0 mm	94	94
Plate thickness mm		
First layer h_1	22.45	19.05
Second layer h_2	1.55	2.00
Maximum deformation quantity μm		
Experiment	7.4	12.5
Theory	7.6	14.5

$$T(z) = -\frac{\Delta T}{h}z + T_u \quad (1)$$

ここで, ΔT は上下面温度差, T_u は下面の上昇温度である。円板の第1層, 第2層の熱膨張係数を α_1, α_2 , ヤング率を E_1, E_2 , ポアソン比を ν_1, ν_2 とすると, 単位長さ当たり生じる曲げモーメント M は, 多層板に関する曲げモーメントの式⁷⁾を利用して,

$$\left. \begin{aligned} M &= \frac{1}{1-\nu_1} \int_0^{h_1} \alpha_1 E_1 T(z) (h - \eta - z) dz \\ &\quad + \frac{1}{1-\nu_2} \int_{h_1}^h \alpha_2 E_2 T(z) (h - \eta - z) dz \\ \eta &= \left(\frac{E_1 s_1}{1+\nu_1} + \frac{E_2 s_2}{1+\nu_2} \right) \left(\frac{E_1 h_1}{1+\nu_1} + \frac{E_2 h_2}{1+\nu_2} \right) \\ s_1 &= h_1 \left(\frac{h_1}{2} + h_2 \right), \quad s_2 = h_2 \cdot \frac{h_2}{2} \\ h &= h_1 + h_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

となる。 η は裏面から中立面までの距離である。このモーメントにより円板に生じる最大変形量 $\delta_{\max}$ は,

$$\delta_{\max} = \frac{-Mr_0^2}{2\{(1+\nu_1)D_1 + (1+\nu_2)D_2\}} \quad (3)$$

となる。ここで, D_1, D_2 は第1層, 第2層の曲げ剛性である。

第1層がSUS 410, 第2層がSUS 304で構成されるクラッド板について, 式(1)~(3)を用いて最大変形量を計算した結果と表3に示した条件でポリシした際の実験結果を表5に示す。ただし, $\alpha_1 = 9.9 \times 10^{-6}$, $\alpha_2 = 17.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $T_u = 27^\circ\text{C}$, $\Delta T = 25^\circ\text{C}$ とした。理論値と実

驗値はほぼ一致する。したがって、熱変形量をほぼ0にできるクラッド接着基板を設計・作製すれば、3" Si ウエハの平面度を1 μm 以内にすることも可能となる。

以上より、熱変形対策を施した2層円板形接着基板を採用することにより、Si ウエハの高精度・高能率加工に本機を適用できることが明らかとなった。

6. 結 言

高精度・高能率加工を実現するために、流体すべり軸受や平行ばね加圧方式を採用して、定盤、試料皿面の平面修正を制御できる修正リング形ラップ・ポリシ機を開発した。以下、主な試作結果と本機をSi ウエハポリシングに適用した結果について要約する。

- (1) 定盤のラジアル・スラスト軸受に流体すべり軸受を採用することにより、本体振動6 μm に対し、定盤振動を1 μm 以下ときわめて小さくできる。
- (2) 平行ばね加圧方式と前後の受圧面に段差をもつすべりシューの採用により、加圧精度 $\pm 14.7 \text{ N}$ { $\pm 1.5 \text{ kgf}$ } (常用荷重の $\pm 0.5\%$)の安定した加圧が得られる。
- (3) ラッピングにおいて、定盤と試料皿の回転速度制

御による平面修正効果は小さいが、試料皿と修正リングの加圧力、偏心荷重による制御性は高く、定盤面を数 μm 以内に平面修正できる。

- (4) メカノケミカルポリシングにおいては、ポリシング速度は加工温度に大きく依存し、常温から50°Cへの温度上昇により、2倍以上に増加する。
- (5) 3" Si ウエハポリシングにおいて、熱変形対策のために採用した上層の熱膨張係数が大きい2層円板形接着基板の熱変形を理論解析した結果は実験結果とほぼ一致する。

参 考 文 献

- 1) W. Rupp: Loose Abrasive Grinding of Optical Surfaces, Appl. Opt., **11**, 12, (1972) 2797.
- 2) R. A. Jones: Optimization of Computer Controlled Polishing, Appl. Opt., **16**, 1, (1977) 218.
- 3) 森 勇蔵ほか: EEMによる超精密数値制御加工法, 精密機械, **46**, 12 (1980) 1537.
- 4) 河西敏雄, 宇根篤暢: ピッチポリシングにおける圧力分布の解析, 精密機械, **43**, 5 (1977) 562.
- 5) 松永正久: ラッピング, 誠文堂新光社 (1957) 149.
- 6) 佐藤健児: 表面工学概論, 養賢堂 (1967) 214.
- 7) 土肥 修, 鶴飼隆好: 曲率法による多層残留応力測定, 日本機械学会論文集 (第1部), **36**, 285 (1970) 697.

情 報

(p. 335 より続く)

また、今後の産業技術について触れ、ミクロ (微細) 技術, 情報技術, 複合化技術の三つの大きな流れを指摘している。そして各産業分野の研究開発の重点志向分野として、この3分野の方向は否定できないとし、すでに取組みが始まっている次世代産業基盤技術開発もこうした大局的な流れに沿う国家的新技术開発と位置づけている。

しかし、同提言は一連の今後の産業技術開発が国に大きく依存した形で進むことについて疑問を投げかけ、あくまで民間の主体的意識のもとに、新たな研究開発課題を選択、それぞれに強化する研究開発力で取り組む必要性を強調している。

国に対する提言としては、あくまで民間主体の研究開発強化を軸に、これを促進する環境整備を国の役割として求めている。

通産省は昭和55年春にまとめた「80年代の通産政策ビジョン」で「技術立国への道」を提起、創造的技術開発の推進の必要性を強調、わが国の研究開発資金量を現在のGNP比2%前後から、80年代半ばには2.5%へ、80年末には3%へのアップを目指すよううたった。わが国の創造的技術立国化のための技術開発ビジョンを早期に示し、80年代、90年代へ向けての技術の進むべき方向の展望と重点技術を示す必要性を強調しており、今回の提言はこれに沿ったものとなる。(服部 敏夫)