大口径シリコンウエハ研削加工における幾何と運動*

周 立波** 篠原 一宏*** 清水 淳** 江田 弘**

Kinematics of Ultra Precision Grinding for Large Scale Si Wafer

Libo ZHOU, Kazuhiro SHINOHARA, Jun SHIMIZU and Hiroshi EDA

To address the problems of throughput rate, post-process cleaning, environmental aspects as well as to achieve the total surface integrity for large-scale silicon wafers, the semiconductor industry is looking for a fixed abrasive solution as the alternative. As the result of intensive R&D, many achievements have been seen in machine tools, grinding wheels and process technologies, which make it possible to control the motion of each cutting edge very precisely. This paper kinematically analyzes the motion and path of cutting edge at plunge grinding with a cup-type grinding wheel, where the contact area is unchanged. Two facts have been revealed; 1) the cutting path pattern is determined only by the rotational speed ratio of the wafer against the wheel. 2) Once the grinding reaches the steady state, the cutting edge goes over the same path so that the cutting path pattern remains unchanged. Three problems have then been addressed from the cutting path pattern; 1) Different rotational speed ratio grants a different cutting path density, thus achieves significantly different surface roughness. 2) The cutting path density in the wafer center is higher than that at the fringe so that the surface roughness is inconsistent over the whole wafer. 3) The variation in the cutting path density also leads the ground wafer to a concave profile. Solutions are proposed on the basis of analytical and experimental results. 1) The criteria to terminate the grinding process are established to improve the surface roughness. 2) The wheel geometry is optimized to attain a consistent cutting path density. The results achieved in this research are also applicable to the generation of large-scale flat surface other than silicon wafer.

Key words: Large scale silicon wafer, Ultra precision grinding, Cutting path, Flatness, Geometry, Roughness

1. 緒 言

超精密加工技術を駆使して、大口径シリコンウエハ加工の固定砥粒化が進められている。高精度・高品位の加工表面を得るには、運動精度や剛性の極めて高い加工機械が不可欠である。そのための要素技術¹⁾、プロセス技術が精力的に研究開発されている。著者らも、 $\phi 300$ (12")大口径 Si ウエハ大口径に対して、1台の加工機械、1工程を用いてポリシングと同程度の表面品位を得ることを目標に、固定砥粒方式による超加工機械²⁾を開発した。開発したシステムおよび中核技術により、仕上面粗さ $Ra < 1\text{nm}$ ($Ry < 5 \sim 6\text{nm}$)、平坦度 $< 0.2\mu\text{m}/\phi 300$ 、を可能にした。

このような超精密加工機械を用いれば、砥粒切れ刃の運動軌跡を正確に制御することができ、ウエハ表面形成を極めて再現性よく行うことができる。このような技術と結果を背景に、本研究は、大口径シリコンウエハ加工の思考実験として、ウエハの平面研削における砥粒切れ刃の運動および創成されるウエハの幾何形状を理論的に解析する。仕上げ面粗さや平坦度に対する砥粒軌跡のパターンと密度の影響を実験結果と共に考察し、さらに均一な砥粒軌跡密度を得るための最適加工条件、砥石形状を明らかにする。

2. 加工モデル

シリコンウエハの平面研削はカップ型砥石を用いてフェースカット方式によって行われている。この場合砥石にトラバースを与えると、加工中に砥石とウエハの接触面積が変動するため高い平坦度を得るのが困難である³⁾。したがって、図1に示すように砥石をウエハとオーバーラップになるように相対位置を固定し、プランジ研削を行うのが一般的である。この場合のウエハ面内における砥粒との干渉を図2に示す。ウエハの中心を座標原点とす

Table 1 Parameter list

R_1	Wheel radius (mm)
R_2	Wafer radius (mm), $R_2 = 150$, or indicated otherwise
(r_1, θ_1)	Position of abrasive grain ($0 \leq r_1 \leq R_1$ mm, $0 \leq \theta_1 \leq 2\pi$, rad)
r_2	Radius of machining point ($0 \leq r_2 \leq R_2$, mm)
L	Offset between wheel canter and wafer center (mm)
n_1	Wheel revolution (rpm, "+" for CCW)
n_2	Wafer revolution (rpm, "+" for CCW)
ω_1	Wheel angular velocity ($= \pi \cdot n_1 / 30$, rad/s)
ω_2	Wafer angular velocity ($= \pi \cdot n_2 / 30$, rad/s)
f	Infeed rate ($\mu\text{m}/\text{min}$)
t	Grinding time (min)
Z_s	Total infeed ($Z_s = f \cdot t$, μm)

ると、砥石中心は、ウエハ(X-Y)平面内に半径分だけオフセットしたところにある。解析に使用する記号を、表1のように示す。

ここでは、加工中における砥石とウエハの回転数および研削切込み速度を一定とし、研削抵抗が接触面内に一様で、さらに砥石軸とワーク軸が完全平行の理想状態にあると仮定する。X-Y座標をウエハ表面上に固定して考えた場合に、初期位置が (r_1, θ_1) にある砥粒切れ刃の、加工時間 t における座標値 $[x(t), y(t), z(t)]$ は次のような行列に表される。

* 原稿受付 平成13年7月11日

** 正会員 茨城大学工学部 (日立市中成沢町4-12-1)

*** 学生会員 茨城大学理工学研究科

Fig. 1 Grinding wheel/wafer arrangement

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \theta_1] & \cos \omega_2 t & 0 \\ -\sin[(\omega_1 - \omega_2)t + \theta_1] & \sin \omega_2 t & 0 \\ 0 & 0 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ L \\ f \end{bmatrix} \quad (1)$$

3. 砥粒の軌跡と密度

3.1 ウエハ平面上における砥粒の軌跡

通常のウエハ研削では、狭幅(3mm 前後)のリング状の砥石が用いられる。この場合すべての砥粒切れ刃は、砥石外径 R_1 に配置されていると見なすことができる。そのうち、 $(R_1, 0)$ にある砥粒切れ刃の運動軌跡のウエハ (X-Y) 平面への投影は、式 (1) によれば、次式のようになる。

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 - \omega_2)t & \cos \omega_2 t \\ -\sin(\omega_1 - \omega_2)t & \sin \omega_2 t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ L \end{bmatrix} \quad (2)$$

他の位置 (R_1, θ_1) にある砥粒は、 θ_1/ω_1 だけの時間差で式 (2) と同じ軌跡を描く。したがって、式 (2) だけを解析すれば、全体の砥粒軌跡を正しく知ることができる。図 3 には、 $\phi 300\text{mm}$ シリコンウエハを想定して、 $R_1 = L = 150\text{mm}$ においてウエハ/砥石の回転数がそれぞれ 1/2, 1/3, 2/3, 500/1500 の時に算出した砥粒軌跡を示す。このように、回転数比 (1/2, 1/3, 2/3) が変化すると、形成される軌跡は大きく異なる。しかしながら、両者の比を一定に保ったまま、1/3 から 500/1500 に大きく変化しても形成される軌跡は全く同じである。

このことについて $T = \omega_2 t$ とおけば、式 (2) は次のように変形できる。

$$\begin{bmatrix} x(T) \\ y(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_1/\omega_2 - 1)T & \cos T \\ -\sin(\omega_1/\omega_2 - 1)T & \sin T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ L \end{bmatrix} \quad (3)$$

T を t の ω_2 倍された時間変数として捉えれば、式 (3) に示す砥粒軌跡は、ウエハ、砥石各々の回転数ではなく、それらの比 ω_2/ω_1 (あるいは n_2/n_1) のみによって決まることがわかる。とくに $\omega_2/\omega_1 = 1/2$, $R_1 = L$ のとき、式 (3) より、

$$\begin{cases} x(T) = 2L \cos T \\ y(T) = 0 \end{cases}$$

軌跡は放射線状の直線になる。したがって、ウエハ/砥石の回転数比が 1/2 に近づくにつれ、1 本の砥粒軌跡長さは漸減しウエハ半径に等しくなる (後述図 8 の ds/dr_2 に参照)。

3.2 定常状態における砥粒軌跡とその密度

加工時間と共に 1 個の砥粒が繰り返しウエハを研削するので、

Fig. 2 Grinding model

Fig. 3 Single cutting path

Fig. 4 Cutting path at stable state

砥粒軌跡の本数は増える。ところが、図 4 に示すようにいずれの研削条件においても、軌跡の本数はやがて定常状態に達し、それ以上研削を重ねても砥粒は同じ軌跡を通ることになるので、軌跡本数は増加せず、むしろ後述のように仕上げ面粗さの劣化が引き起こされる恐れがある。

このような現象を解析するため、式 (2) のマトリクスにおける個々の成分の周期性を調べる。まず、 $\cos \omega_1 t$ (あるいは $\sin \omega_1 t$) は、

$$\cos \omega_1 t = \cos \omega_1 \left(\frac{2\pi}{\omega_1} + t \right) \quad (4)$$

と書き直すことができるため、周期 $\lambda_1 = 2\pi / \omega_1$ を持つ周期関数である。同様に $\cos \omega_2 t$ (あるいは $\sin \omega_2 t$) は、周期 $\lambda_2 = 2\pi / \omega_2$ を持つ周期関数である。したがって、 $\cos(\omega_1 - \omega_2)t$ (あるいは $\sin(\omega_1 - \omega_2)t$) の周期 λ は、 λ_1 と λ_2 の最小公倍数になる。ここで、

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{k \cdot n}{k \cdot m} \quad (k, m, n : \text{自然数}) \quad (5)$$

とすれば、 k は ω_1 と ω_2 の最大公約数、 n/m は既約分数である。したがって、 $\cos(\omega_1 - \omega_2)t$ の周期 λ は、

$$\lambda = 2\pi \cdot k \cdot m \cdot n \quad (6)$$

になる。 λ は λ_2 の倍数でもあるので、式 (2) のマトリクスのすべての成分の共通周期になる。このように、式 (2) は周期関数を表し、周期 λ に達するまでは、砥石 1 回転ごとに砥粒軌跡は 1 本ずつ増える。それ以降の研削では、1 本目の軌跡から繰り返すことになる。砥粒軌跡が 1 周期 λ に達した時点で定常状態になる。

砥粒軌跡が定常状態になるまでに、砥石は $\lambda \cdot \omega_1 = 2\pi \cdot m$ rad、またウエハは $\lambda \cdot \omega_2 = 2\pi \cdot n$ rad だけ回転している。つまり、ウエハが n 回転している間に、同じ砥粒によって m 回切削され、ウエハ平面上に m 本の砥粒軌跡が形成される。例えば砥石回転数 $n_1 = 1500$ rpm、ウエハ回転数 $n_2 = 50$ rpm の条件では、式 (5) にしたがって、

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{50 \cdot 1}{50 \cdot 30} \quad (7)$$

$k = 50, m = 30, n = 1$ であるため、ウエハが 1 回転 (0.02 min) するだけで定常状態になる。その間に、図 4 のように 1 個の砥粒によって 30 本の軌跡が形成されている。また、ウエハ回転数だけを $n_2 = 40$ rpm に変更すると、 $k = 20, m = 75, n = 2$ であるため、定常状態になるまで、0.05 min (2/40) かり、75 本の軌跡がウエハ平面上に形成されることになる。

このように、ウエハ/砥石の速度比 n_2/n_1 の既約分数 (速度比そのものではない) の分母 m を大きくすると、砥粒軌跡密度は大きくなる。実験 (詳細については次報) では、軌跡密度を高く設定すると、仕上げ面粗さが向上するという結果が得られている。密度を上げるためには、単純に砥石回転数 n_1 を大きくする方法と、上述の例のように回転数比 n_2/n_1 の既約分数を操作する方法の 2 種類がある。後者の場合は、定常状態になるまでの研削時間が大になるので、実験ではしばしば研削焼けが生じた。

3.3 砥粒軌跡の位相角

図 5 は、砥石/ウエハの回転数を、それぞれ 50/1500 と 350/1500 としたときにおける砥粒軌跡の形成過程である。前節の結果によれば、いずれの条件においても、定常状態では 30 本の軌跡が形成される。しかし、50/1500 の条件では軌跡が side-by-side の順で形成されるのに対して、350/1500 の条件では砥粒軌跡がとびとびで形成されている。

ウエハ/砥石の回転数比の既約分数が n/m である場合、隣り合う 2 本の軌跡の成す角は、 $\phi = 2\pi / m$ で与えられる。ところで、砥石 1 回転の所要時間は、 $2\pi / \omega_1$ で、その間にウエハは $2\pi \omega_2 / \omega_1$ だけ回転する。つまり、軌跡の位相角 Φ は、

$$\Phi = 2\pi \frac{\omega_2}{\omega_1} = 2\pi \frac{n}{m} \quad (8)$$

のように与えられる。位相角 Φ と成す角 ϕ を比較すると、 $\Phi \geq \phi$ であることがわかる。 $n = 1$ であれば、図 5(a) のように、 $n > 1$ であれば、図 5(b) のように $(n-1)$ 本飛びで軌跡が形成さ

Fig. 5 Phase difference in cutting path

Fig. 6 Cutting path at different stock removal

Fig. 7 Surface roughness at different stock removal

れる。

実際の研削では、多数の砥粒が軌跡の形成に同時に関与するため、軌跡の位相角 Φ が仕上げ面粗さに対する影響は、軌跡密度ほどは大きくない。それよりもむしろ、研削を終了するタイミングを定常状態になった時点におくことが重要である。図 6 は $n_2/n_1 = 485/1500$ 、切込み速度 $f = 5 \mu\text{m}/\text{min}$ を一定にしたとき、総切込み量 Z_s がそれぞれ 0.8, 1.0, 1.2 μm の時に形成される砥粒軌跡で、図 7 はそれらに対応した仕上げ面粗さである。このように、

$$n_1 \frac{Z_s}{f} = m \quad (9)$$

を満たす条件では仕上げ面粗さが最小になる。これは、総研削時間 Z_s / f の間に、砥石がちょうど m 回転するので、ウエハ表面が最も均一に加工されるためである。 m より小さい時 ($Z_s = 0.8 \mu\text{m}$) にはウエハ表面に削り残しの部分があり、また m より大きい時 ($Z_s = 1.2 \mu\text{m}$) には、砥粒が同じ軌跡を複数

回通するため面粗さは悪くなる。このような現象は、ピンドルの回転数がフィードバック制御された超精密加工機械において、特に顕著である。

4. ウエハ半径方向における砥粒軌跡密度の分布

図5、図6に示されるように、現行のような砥粒がリング状に配置されている砥石を用いれば、砥粒軌跡密度は必ずウエハの中心部になるにつれて高く、周辺部になるにつれて低くなる。その結果、機械のループ剛性が無限大でない限り、ウエハの中心部に余分な除去が行われ、中凹の形状を呈する。現在は、主としてウエハと砥石の軸間アライメント⁹⁾を調整することで対処しているが、この問題を根本的に解決するには至っていない。

ここでは、ウエハ半径方向における砥粒軌跡密度を解析し、ウエハの平坦度について考察する。時間 t における砥粒の座標を $x(t), y(t)$ とすると、図2のウエハ平面において半径は $r_2 = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}$ で与えられる。同じように時間 $t + \Delta t$ の時の砥粒座標は $x(t + \Delta t), y(t + \Delta t)$ であるから、

$$\begin{cases} \Delta x = x(t + \Delta t) - x(t) \\ \Delta y = y(t + \Delta t) - y(t) \end{cases} \quad (10)$$

Δt が十分小さければ、その間に形成される砥粒軌跡の長さ Δs は、

$$\Delta s \approx \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (11)$$

である。また半径 r_2 は次式で与える Δr_2 だけ変化する。

$$\Delta r_2 = \sqrt{x^2(t + \Delta t) + y^2(t + \Delta t)} - \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (12)$$

したがって、ウエハ単位面積あたりに砥粒1個が形成する軌跡の密度は、

$$\text{density} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{m \cdot \Delta s}{2\pi r_2 \cdot \Delta r_2} = \frac{m}{2\pi} \cdot \frac{ds}{r_2 dr_2} \quad (13)$$

である。図8は、図3と同じ条件でウエハ/砥石周速比を大きく変化させたときのウエハ半径方向における ds/dr_2 および $ds/r_2 \cdot dr_2$ を示す。このように、ウエハの中心部に向かうにつれて、砥粒軌跡長さの変化率 ds/dr_2 が次第に小さくなるにもかかわらず、面積密度を表す $ds/r_2 \cdot dr_2$ が大きく増加する。これは、半径 r_2 の減少によるものであることがわかる。またウエハ/砥石周速比によってウエハ外周部における砥粒軌跡密度の変化は異なるが、いずれの場合もウエハ中心で密度の急増が見られる。このような砥粒軌跡密度分布は、砥石形状がリング状である限り改善されることはない。

また図9に、(a)砥粒の半径位置 r_1 ($\neq R_1$)および(b)オフセット量 L を変化したときの砥粒軌跡を示す。その結果よりウエハの中心から $r_2 < |r_1 - L|$ の部分は切削されないことがわかる。図10は、 $L = 150$ に固定して、 $100 < r_1 < 200$ を変化させたときの軌跡密度である。図9に示すごとく、砥粒軌跡の包絡線、つまり半径 $r_2 = |r_1 - L|$ の円上で軌跡密度は急増する。同様なことがオフセット量の変化についても見られる。

さらに、図10の結果を利用して砥粒切れ刃が砥石の半径方向に分布するときの軌跡密度を計算した。例えば、砥粒切れ刃が砥石半径方向に一樣に分布したときに形成される軌跡密度を図11に示す。図中の $148 < r_1 \leq 152$ は、中心半径150mm、幅4mmのリング状砥石を意味する。このようにリング状の砥石を用いる場合に、リング幅に対応した中凹のヘソがウエハの中心に残る。図12は、幅3mmのリング状砥石を使って実際に研削した時に得られたウエハ中心の様子である。

5. 砥石形状の最適化

以上の結果より、ウエハの平坦度が砥粒軌跡密度に強く依存し

Fig. 8 Cutting path density made by a single grain with different speed ratio

Fig. 9 Cutting path made by grain positioned at different r_1 and L

Fig. 10 Cutting path density made by grain at different radius

Fig. 11 Cutting path density made by uniformly distributed grains

ていることがわかる。それでは均一砥粒軌跡を得るには、砥石をどのような形状にすべきかについて考える。図11の結果によれば、砥粒切れ刃の分布範囲がウエハの半径に相当 ($0 < r_1 \leq 150$, $150 < r_1 \leq 300$)するとき、あるいはその整数倍 ($0 < r_1 \leq 300$)のときに、中心部にヘソがつくられないことがわかる。なかでも、

特に $150 < r_1 < 300$ 範囲で砥粒切れ刃が一様分布した場合、ウエハの外周から中心部まで比較的均一な軌跡密度分布が得られる。セグメントを使用したときの砥石形状の1例とウエハとの相対位置を図13に模式的に示す。ここでは砥石セグメント形状を表す $f(r_1)$ も併示した。この場合ワークであるウエハの2倍の直径を持つ砥石が必要であるため、大型の加工機械および大型のスピンドルが必須である。

一方、砥粒の分布範囲に加えて、砥石半径方向における砥粒切れ刃数（砥石セグメント面積に比例）を制御すれば、砥石の直径を増大せずに均一な軌跡密度分布を得ることができる。例えば、図11の計算で得られた $0 < r_1 \leq 150$ の軌跡密度曲線を上下、左右反転して、砥石半径方向の砥粒切れ刃分布 $f(r_1)$ とすれば、理論的に軌跡密度は均一になるはずである。そのときの砥石セグメント形状およびそれによって得られた砥粒軌跡密度を図14に示す。砥石セグメントの形状を表す砥粒切れ刃分布を3次までの近似式で表すと、次のようになる。

$$f(r_1) = 0.15 + 0.15r_1 - 0.03r_1^2 + 0.00063r_1^3 \quad (14)$$

しかしながらこの場合、切削速度は砥粒切れ刃の位置する半径 r_1 に比例するので、実際のウエハ平坦度はさらに切削速度による影響を加味して考えなければならない。

また、現在使われているリング状砥石については、平坦度の影響を最小にするには、リング幅をできるだけ小さくしなければならない。その場合ウエハ中心において、砥粒軌跡密度は不連続になるが、ヘソのサイズを小さく押さえることができる。

6. 結 論

本文は、固定砥粒加工法による大口径シリコンウエハのような平面創成において、工作物と干渉する砥粒切れ刃の軌跡を求め、幾何運動学の角度から創成面の仕上げ粗さおよび平坦度に対する影響を定量的に考察した。得られた結果を次のように要約する。

- 1) ウエハの平面研削において、砥粒軌跡パターンはウエハ／砥石の回転数比のみに依存する。
- 2) 砥粒軌跡の定常状態は、ウエハ／砥石の回転数比の既約分数 n/m によって決まる。つまり、ウエハが n 回転している間に m 本の軌跡が形成される。それ以降の研削では、1本目の軌跡から繰り返すことになる。
- 3) ウエハ／砥石の回転数比の既約分数 n/m について、 $n=1$ の時には砥粒軌跡は順次形成されるに対して、 $n>1$ の時には $(n-1)$ 本おきに軌跡が形成される。
- 4) 定常状態になった時点、つまり $n_1 \cdot Z_s / f = m$ を満たす条件で、仕上げ面粗さは最小になり、それ以外の場合は、ウエハ表面に削り残しの部分、あるいは多重切りの部分が生じるため、仕上げ面粗さは劣化する恐れがある。
- 5) リング状砥石による砥粒軌跡密度を理論的に算出し、ウエハの中凹形状と対応して定量的に考察した。
- 6) 均一な砥粒軌跡密度を得るための砥石形状を導き出した。

なお、以上の結果は砥粒軌跡の幾何形状から算出したもので、厳密な定量化には圧力分布、切削速度分布および砥粒切れ刃密度など幾何・運動以外のパラメータも考慮する必要がある。また以上の結果は、 $\phi 300\text{mm}$ のシリコンウエハに限らず、本文と同じ加工機構を持つ他の平面創成に対して適用できる。

謝 辞

本研究は通産省および NEDO の地域コンソーシアムの一環として実施した事業である。関連の諸機関並びに本研究メンバー各位に深く謝意を表す。また、本研究の一部は平成12年度文部科学省科学研究費地域連携促進研究（課題番号 11792007）により行われたことを付記し謝意を表す。

Fig. 12 Concave shape in wafer center

Fig. 13 Uniformly distributed wheel segment

Fig. 14 Cutting edge distribution and resultant cutting path density

参 考 文 献

- 1) 阿部耕三他：超大口径シリコンウエハ用反転式両面研削装置の開発、1998年度砥粒工学会学術講演会講演論文集、112
- 2) 江田弘、周立波、他4名：大口径 $\phi 300\text{Si}$ ウエハ用超加工機械の開発、精密工学会誌、(掲載待ち)
- 3) 木村景一他：硬質ホイール・パッド方式によるCMP加工特性、1998年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集、245
- 4) M. Kerstan and G. Oietsch: Silicon Wafer Substrate Planarization Using Simultaneous Double-disk Grinding, Advances in Abrasive Technology III, (2000) 211-222.
- 5) H.K. Tönshoff, W.V. Schmieden, I. Inasaki, W. König and G. Spur: Abrasive Machining of Silicon, Annals of CIRP, 39/2, 1990, 621-635.