偏心量計算に第2種完全楕円積分を用いた 高精度ウエハプリアライナの開発*

森 田 一 弘** 涌 井 伸 二***

Development of a Precision Pre-aligner Using the Complete Elliptic Integral of the Second Kind to
Compute an Eccentricity

Kazuhiro MORITA and Shinji WAKUI

This paper proposes an eccentricity computation algorithm using the complete elliptic integral of the second kind for a pre-aligner. A CD-SEM is an inspection tool of the semiconductor device using the electron beam. Highly precision CD-SEM is required by the high integration of the semiconductor device progressing. Also, high throughput CD-SEM is required by the increased production of semiconductor devices which are smaller and thinner, because they are required by growing of smartphones and tablet PCs. A pre-aligner which is installed to improve throughput is a part of CD-SEM. The pre-aligner computes eccentricity of a Si wafer, and transfers it to inside the CD-SEM precisely. It is a non-contact type which can prevent contamination using a line image sensor to compute eccentricity. However, it is difficult for a conventional method to be highly precise, because it depends on an approximation and an experience even though it computes eccentricity using derivative and statistics calculation. At first, this paper shows that a wave pattern of the line image sensor is proportional to the complete eccentric integral of the second kind based on geometry analysis. Then, it proposes highly precise eccentricity calculation algorithm based on an analytical result. Finally it shows high precision pre-aligner by an experimental result.

Key words: pre-alignment, elliptic integral, eccentricity computation, semiconductor, wafer

1. 緒 言

測長 SEM (CD-SEM : Critical Dimension Scanning Electron Microscope) は、半導体デバイス上に形成された回路パターンを電子ビームを用いて観察、測長することにより、半導体デバイス製造プロセスの改善に役立てる装置である。CD-SEM は、真空雰囲気下の試料チャンバ上に電子線照射カラム (以下、カラムと略記) を搭載した装置である。CD-SEM は、チャンバ内に搬入された半導体試料に電子線を照射することで回路パターンの検査を行う。電子線を用いるため分解能が高く、微細加工の必要な半導体デバイスの検査に適している。ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductor) ¹⁾によれば、近年の高集積化に伴い、回路パターンの設計ルールが微細化されて 7 nm に近づく状況にあるため、CD-SEM には測長精度向上とともにスループット向上が必要である。

プリアライナは CD-SEM に備えられているスループット向上のための一機構である。回路パターンの線幅、形状を測定・検査する場合、まず、シリコンウエハ (以下、ウエハと略記) を基準位置に合わせる、プリアライメントと呼ばれる工程が必要である。この工程を行う機構をプリアライナと呼ぶ。回路パタ

ーンが形成されているウエハには、結晶配列を示すオリエンテーションフラット (以下、オリフラと呼称) やノッチといった外周の切り欠き、ウエハ裏面へのレーザマークといった基準マークが設けられている。プリアライメントは、ウエハの中心位置と結晶方向の向きを基準位置に合わせることからなる。中心位置は、ウエハ中心と基準軸中心とのずれ量 (以下、偏心量と呼称) を算出することにより合わせる。結晶方向の向きはノッチやオリフラの中止位置を検出し、それを基準方向に回転させることにより合わせる。プリアライナには接触式と非接触式の 2 種類がある。前者はウエハを基準となるガイドやビンに押し付けて位置を合わせる。簡単な構造で実現できるメリットがあるが、接触点においてコンタミネーションが発生するデメリットがある。後者の非接触式プリアライナは、非接触式の 1 次元イメージセンサ (以下、センサと略記) を用いてウエハの外形を計測し、計測データをもとに中心位置および結晶方向を求める方式である。文献 2), 3) には非接触式プリアライナの原理が記載されている。文献 4) にはセンサを複数用いたプリアライナの構成法が記載されている。従来、偏心量の計算法はセンサによる計測データの波形処理にのみ着目されており、偏心量の計測原理については議論されてこなかった。そのため、偏心量の計算精度やウエハ搬送精度について分析・改善することが難しい。以上のことから、偏心量の計算精度を向上させることは高集積化された半導体デバイスの生産性向上にとって意義がある。

従来、元波形情報の特徴を保存しつつ解析を容易にする手法として等角写像 ⁵⁾ がある。電磁気学の解析手法 ^{6)~8)} として優れ

* 原稿受付 平成 28 年 9 月 26 日

掲載決定 平成 29 年 2 月 15 日

** 正 会 員 (株) 日立ハイテクノロジーズ (茨城県ひたちなか市市毛 882)

*** 正 会 員 東京農工大学大学院工学研究院 (東京都小金井市中町 2-24-16)

Fig.1 Structure of a CD-SEM

Fig.2 Structure of a pre-aligner

た成果を得てきた。流体工学への応用も多いが、石田ら⁹⁾、北山ら¹⁰⁾による機械設計への応用も報告されている。等角写像による解析は複素積分計算¹¹⁾を含むため、リアルタイム計算が必要なプリアライナには適さないと考えられていたが、櫻井、杉浦による数値計算法¹²⁾も報告されており、著者はプリアライメント高精度化に関する研究の一環として等角写像を応用した偏心量計算の検討を開始した。ところが、等角写像によりセンサ波形を矩形や無限上半平面に写像しても偏心量の計算を高精度化するに有意な特徴が得られなかった。

本稿では、プリアライナの基本原理に立ち返り、原理的に正確な偏心量を求める計算アルゴリズムを提案する。まず、CD-SEMとプリアライナの構成を示す。その後、センサによる計測データの幾何解析の結果を示す。次に、解析結果を用いた偏心量の計算アルゴリズムを示す。このとき、ウエハサイズの変動による影響についても述べる。最後に、実験による偏心量計算精度の実証結果を示す。

2. CD-SEMとプリアライナの構造

CD-SEMとそこに備えられているプリアライナの構成を示し、特徴と課題を明らかにする。

2.1 CD-SEMの構成

図1に、CD-SEMの概略構成を示す。ストックから取りだされたウエハはプリアライナへ設置される。ここで、プリアライメント工程を経て真空チャンバ（以下、チャンバと略記）内へ搬入される。チャンバへ搬入されたウエハは、チャンバ内のステージへ搭載され、ステージの移動によってウエハ位置を随時変更する。カラムから照射された電子線は偏向レンズによって偏向され、試料上に形成された回路パターンに照射される。電子線の走査によって得られた回路パターン像を用いて線幅の測定や欠陥検査をおこなう。

2.2 プリアライナの構成

図2に、CD-SEMにおけるプリアライナの概略構成を示す。ウ

Fig.3 Waveform of an outer edge measurement

エハは θ テーブルの上に固定される。マイクロコンピュータ（以下、マイコンと呼称）の指令によってモータが回転すると、 θ テーブルの回転に伴ってウエハが回転する。光源から照射された光は集光レンズによってウエハの外縁部に照射され、ウエハの位置によって光の遮光状態が変化する。この外縁位置を結像レンズによってセンサ上に結像させる。ウエハの回転に伴う外縁位置の変化をモータの角度と同期してマイコンに取り込む。マイコンにて計算した結晶方向は θ テーブルの回転で、偏心量はウエハをチャンパ内のステージに搭載するときのステージ位置で補償する。図3(a)に、ウエハの外縁位置計測原理を、同図(b)にウエハの外周を N 等分した回転角にて外縁位置を取り込んだ結果の1例を示す。ここで、 O_s はウエハ中心位置 mm、 O_r は θ テーブル回転中心位置 mm、 d は偏心量 mm である。 θ は計測位置の角度 rad、 $f(\theta)$ は角度 θ におけるセンサで計測した回転中心位置からウエハ外縁位置までの距離 mm である。 $\theta_1 \sim \theta_N$ により1回転分の外縁位置データ（以下、外縁データと略記）を取得できる。図3(b)をみると、前半部（ $\theta=0 \sim \pi$ ）radと後半部（ $\theta=\pi \sim 2\pi$ ）radでは波形が異なっており、特に尖頭部に違いが見られる。これより、外縁データの波形は単なる正弦波でないことがわかる。

図4(a)に、 θ テーブルに搭載されたプリアライメント前のノッチ付きウエハを、同図(b)にプリアライメント後の同ウエハを示す。図4(a)に示すように、 θ テーブルに搭載されたノッチ付きウエハは回転方向に θ_n rad、並進方向に d mmの偏心を持った状態にある。 θ テーブルを回転させて取得した図3(b)に示す外縁データから θ_n 、 d を求める。 θ_n はセンサの位置を基準位置としたノッチ中心位置

Fig.4 A method of pre-alignment

までの角度である。ノッチ中心位置は、外縁データを微分するとエッジ信号として検知されるノッチ両端の中心として求められる。 θ_n を θ テーブルを回転させて補正すると、ウエハ中心位置 O_s は O'_s に移る。図4(b)が θ_n を補正した後の状態である。破線で示した理想状態に対して d_x 、 d_y だけウエハ中心位置がずれているが、これはノッチ付きウエハをチャンバへ搬入する際のステージ位置によって補正できるため d_x 、 d_y が計算できれば良い。図5に、 d_x 、 d_y の計算方法を示す。 θ_n と、センサを基準位置としたウエハ中心位置までの角度 θ_s rad から、 d_x 、 d_y は式(1)で計算できる。以上により、ノッチが基準方向を向いており、 O_r と O_s が一致している状態、すなわち偏心のないウエハ位置合わせが実現できる。

$$\begin{pmatrix} dx \\ dy \end{pmatrix} = d \begin{pmatrix} \sin(\theta_s + \theta_n) \\ \cos(\theta_s + \theta_n) \end{pmatrix} \quad (1)$$

すでに述べたように、プリアライメントには外縁データからノッチ中心位置の角度 θ_n とウエハ中心位置の角度 θ_s と偏心量 d を求めなければならない。このうち、外縁データから直接得られない d を高精度に求めることがプリアライメントの課題である。文献2)に示されている従来の偏心量計算方法においては、外周位置において 180° 離れた対向する2点のデータの減算値

 Fig.5 Calculation of d_x and d_y

Fig.6 Schematic diagram of an outer edge measurement mechanism

を複数計算し、これらの最頻値を偏心量 d としていた。しかし、図3(b)に示したように外縁データが正弦波でないため、得られた偏心量 d の精度は低い。また、外縁データの波形を正弦波と仮定して最小二乗法を適用し、偏心量 d を求めている方法も用いられていたが、同様に精度は低い。このように、従来の偏心量計算アルゴリズムには精度が低いという課題があった。

3. 偏心量計算方式の検討

2章では、プリアライナの構成と偏心量計算の仕組みを記し、従来の計算方法では正確に偏心量を計算できないことを述べた。これを解決するため、幾何解析から得た理論式とセンサ波形を比較することで偏心量を計算する方法の検討結果について述べる。

3.1 幾何解析

図6にウエハ外縁位置計測の模式図¹³⁾を示す。ここで、 r はウエハ半径 mm である。同図から外縁データの軌跡を求める。同図の動作はカム機構¹⁴⁾と同じように考えられる。 O_s と O_r 、センサを結ぶ三角形について三平方の定理から式(2)を得る。式(2)より、ウエハが偏心していない場合は $d=0$ で、 $f(\theta)$ が半径 r に等しくなる。また、偏心量 d が半径 r に対して小さい場合は近似的に正弦波とみなせる。しかし、偏心量を精密に求める場合、正弦波とはみなせない。式(2)の波形は図3(b)のとおりとなり、解析結果が正しいことがわかる。

$$f(\theta) = d \cdot \sin \theta + \sqrt{r^2 - d^2 \cos^2 \theta} \quad (2)$$

次に、従来のウエハの直径を計算する方法について考える。文献2)には、 180° 離れた対向する2点の外縁位置を加算すると直径になると記されている。式(2)より対向する2点を加算すると式(3)となる。同式より、偏心量 d がある場合は直径 $2r$ よりも短くなるから、従来の計算方法では誤差を生じる。

 Fig.7 Locus plot of $f(\theta)$ on rectangular coordinate system

Fig.8 Diagram of a line element

$$f(\theta) + f(\theta + \pi) = 2\sqrt{r^2 - d^2} \cos^2 \theta \quad (3)$$

3.2 偏心量計算アルゴリズム

計測した外縁データの一部を用いる方法は雑音の影響を受けやすいため、全データを用いる計算方法を検討する。図7に、センサで測定されたウエハの外縁位置 $f(\theta)$ とモータの回転角 θ を極座標として得られる直交座標、すなわち $(x(\theta), y(\theta)) = (f(\theta) \cos \theta, f(\theta) \sin \theta)$ の軌跡（以下、外縁軌跡と呼称）を示す。図7より、同軌跡は y 軸について線対称なオーバル（Oval）形状¹⁵⁾¹⁶⁾となる。この周長を求めるため、図8の線素 ds を考えると、式(4)であらわせる。式(4)の極限 $ds \rightarrow 0$ を考え、外縁軌跡に沿って周回積分すると式(5)を得る。式(5)の左辺はあきらかに外縁軌跡の周長になる。式(5)に式(2)を代入して式(6)を得る。ここで、関数 E は第2種完全楕円積分¹⁷⁾を示す。これにより、外縁軌跡の周長が楕円積分を用いて簡潔にあらわせる。さらに、ウエハ半径 r は規格で決まる定数であるから周長は偏心量 d の関数となる。

$$\Delta s = f(\theta) \Delta \theta = \left(d \cdot \sin \theta + \sqrt{r^2 - d^2} \cos^2 \theta \right) \Delta \theta \quad (4)$$

$$\oint ds = \int_0^{2\pi} f(\theta) d\theta \quad (5)$$

$$\oint ds = \int_0^{2\pi} \left(d \cdot \sin \theta + \sqrt{r^2 - d^2} \cos^2 \theta \right) d\theta = 4rE\left(\frac{d^2}{r^2}\right) \quad (6)$$

式(6)の関数 E を解析的に求めるのは容易ではない。そこで、第2種楕円積分 E を級数展開して式(7)を得る。ここで、 K は近似に十分大きな自然数、 $!!$ は二重階乗を示す。

$$4rE\left(\frac{d^2}{r^2}\right) = 4r \times \frac{\pi}{2} \left[1 - \sum_{n=1}^K \left(\frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \right)^2 \frac{\left(\frac{d}{r}\right)^{4n}}{2n-1} \right] \quad (7)$$

Fig.9 Flowchart to calculate eccentricity

Fig.10 Shape of a notch on wafer

一方、式(5)の右辺は計測した外縁軌跡を用いて式(8)で近似できる。式(7)と(8)は等しくならなければならないので、これを満たす偏心量 d を探索すればよい。偏心量 d の範囲は $[0, r]$ であるから二分法で求められる。図9に偏心量 d を求めるフローチャートを示す。これにより、偏心量 d は簡便に求められる。

$$\int_0^{2\pi} f(\theta) d\theta \approx \sum_{i=1}^N f(i\Delta\theta) \Delta\theta \quad (8)$$

3.3 ノッチおよびオリフラ部への対応

ノッチやオリフラが形成されているウエハの場合、これが周長計算に与える影響が大きいため、該当部の周長を補間する。図10にノッチ付きウエハの外形を示す。ノッチはウエハの一部が欠けたような形状をしているため、外縁軌跡は正しく計測できない。図11(a)に同ウエハの外縁データを計測した結果を、同図(b)にノッチ部の拡大波形を示す。図11(b)に示すように同部のデータ変化が大きいため、これを周長として加算すると正確に計算できない。そこで、ノッチ部を補間するが、そのためには同部を認識する必要がある。これを認識するため、外縁データに図12のブロック線図に示すデジタルフィルタ処理を施す。微分演算によってノッチ部の両端を強調し、ローパスフィルタによって雑音を除去する。ここで、 z は z 演算子、 $h[0] \sim h[n]$ はフィルタ係数である。図13(a)に、図11(a)のデータに対する図12の信号処理結果を、同図(b)にノッチ部の拡大波形を示す。図13によれば、同部は、波形の立ち下がりとしち上がりが明確に判

(a) Waveform of overall of an outer edge measurement

(b) Close-up waveform of a notch part

Fig.11 Flowchart to calculate eccentricity

Fig.12 Block diagram of a filtering for searching a notch

別できるから正負の適当な閾値を用いて容易に認識できる。ここで認識した両端を θ_a rad, θ_b rad とする。次に、図7によれば外縁軌跡は線対称なオーバル形状を示すから、対称性を利用して区間 $[\theta_a, \theta_b]$ の外縁軌跡は区間 $[\pi - \theta_b, \pi - \theta_a]$ のそれで代用できる。直交座標系においては、データ (x, y) を同 $(-x, y)$ で置換できる。ノッチ部のデータを代用データで補間できれば式(8)が適用できるので、ノッチ無しの場合と同様に計算できる。オリフラはノッチの切り欠きが長い場合と考えられるので、同じ補間方法で計算できる。また、レーザマークが付けられているウエハは切り欠きがないため、ノッチ無しの場合と同様に計算できる。

3.4 ウエハ径の変動への対応

式(2)~(8)においてウエハの半径 r は一定であるとしたが、製造精度により変動する。その変動範囲は半導体業界団体である SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) によって規格化されており、300 ミリウエハでは半径 r が 150 ± 0.1

(a) Overall waveform after filtering

(b) Close-up waveform of a notch part

Fig.13 Waveform after filtering for searching a notch

mm と定められている。これによれば、半径 r の相対誤差率は式(9)で示され、最大 0.067 % となる。このとき、3.2 節の偏心量計算アルゴリズムによれば偏心量 d の結果は 1450 % の相対誤差率となる。式(6)において、半径 r が $r + \Delta r$ になったときの周長をもとにして、半径 r として計算した偏心量 d には Δd の誤差が含まれるので、式(10)が成り立つ。例として、 $r = 150$ mm, $\Delta r = 0.1$ mm, $d = 0.5$ mm の場合、偏心量の誤差は $\Delta d = 7.25$ mm となる。このため、半径 r の変動が偏心量 d の計算結果に与える影響は無視できない。

$$\frac{|1501 - 1500|}{1500} \approx 0.067\% \quad (9)$$

$$4(r + \Delta r)E\left(\frac{d^2}{(r + \Delta r)^2}\right) = 4rE\left(\frac{(d + \Delta d)^2}{r^2}\right) \quad (10)$$

この課題への対応として、外縁軌跡から半径 r を求める。式(3)において、 $\theta = \pi/2$ のときに $f(\theta) + f(\theta + \pi) = 2r$ となることから、2 点の外縁軌跡から半径 r を決定できる。同 r を用いて偏心量 d を計算することでウエハ製造精度の影響を除ける。

4. 実験結果

3 章の設計により、第2種完全楕円積分を用いて高精度に偏心量を計算可能なプリアライナを構築した。この設計結果を実験により確認する。既知の偏心量をもつウエハの偏心量を算出する実験をおこなった。実験条件を表1に示す。実験ではノッチ付きウエハを用い、外周を 62,500 分割して計測している。第2種楕円積分の級数は 40 次まで計算している。図14(a)に、実験で取得した外縁軌跡の全体を、同図(b)にノッチ部の拡大波形を示す。図14(b)により、同部による外縁軌

Table 1 Specifications of an experiment

Description		Value	Unit
Division number of circumference	N	62500	-
Resolution of linear imaging sensor		0.0004855	mm/LSB
Radius of Si wafer	r	150	mm
Wafer with notch		Yes	-
Order of elliptic integral	K	40	-

(a) Waveform of overall of an outer edge measurement

(b) Close-up waveform of a notch part

Fig.14 Waveform after filtering for searching a notch

跡の変化が確認できる。

表2に、対向する2点の外縁データを用いて求めたウエハ直径に基づいて偏心量を計算する従来手法と提案手法による偏心量計算結果を示す。真値に対する従来手法と提案手法による結果を示す。括弧内には誤差量を記す。従来手法では 3σ が $8.048\text{ }\mu\text{m}$ であったが、提案手法ではそれを $2.261\text{ }\mu\text{m}$ に低減できた。

計算時間についても評価した。第2種完全楕円積分の近似計算および二分法による解探索処理を含めて約1秒で完了しており、従来手法と同等の計算時間であることを確認した。その結果、チャンバ内での電子線照射位置合わせ工程が簡略化でき、ウエハの検査時間を1.6秒/枚だけ短縮できた。これにより、ウエハ検査可能枚数を65枚/hから67枚/hに向上できる。

Table 2 Comparison of the computation result by the method

No.	Eccentricity μm	Computation result by each method (Error) μm	
		Proposed method	Conventional method
1	526.40	526.25 (-0.15)	530.76 (4.36)
2	522.27	522.48 (0.21)	525.67 (3.40)
3	522.61	523.06 (0.45)	525.90 (3.29)
4	523.63	522.98 (-0.65)	527.14 (3.51)
5	530.95	529.45 (-1.50)	527.90 (-3.05)
6	512.77	513.54 (0.77)	517.90 (5.13)
Average	μm	-0.145	2.773
3σ	μm	2.261	8.048

5. 結 言

プリアライナの偏心量計算を高精度化する方式の検討と実証結果について述べた。本論文の結論は以下のとおりである。

- (1) 1次元イメージセンサによるウエハ外縁位置データの軌跡がオーバル形状で示されることを明らかにした。
- (2) オーバル形状である外縁軌跡の周長が第2種楕円積分で計算できることを利用して偏心量を計算する手法を提案した。
- (3) 上記(2)の提案手法を実験により実証した。
- (4) 上記(2)の提案手法をCD-SEMに適用し、検査位置合わせ時間を短縮したことでウエハ検査可能枚数が65枚/hから67枚/hに向上できる見通しを得た。

参 考 文 献

- 1) ITRS 2013 Edition Table ORTC1: Executive Summary, International Technology Roadmap for Semiconductor(2013)17.
- 2) 日立製作所：特許 第2804547号 (1998).
- 3) 日立製作所：特許 第1897441号 (1994).
- 4) キヤノン：特許 特開2010-283304 (2010).
- 5) 佐々木達治郎：等角写像の応用，現代工学社(1974).
- 6) G. De Mey: Field calculations in Hall samples, Solid State Electronics,16 (1973)955.
- 7) G.De.Mey: Integral equation for the potential distribution in a hall generator, Electronics letters, 9,12(1973)264.
- 8) 天野要，高松孝安，阿部齊：代用電荷法とNewton法による外部逆等角写像の数値計算法，情報処理学会論文誌，30, 8(1989)923.
- 9) 石田祥子，野島武敏，萩原一郎：等角写像変換を利用した折り畳み可能な湾曲した筒型構造設計法，日本応用数理学科論文誌，24, 1(2014)43.
- 10) 北山哲士，山崎光悦，山川宏：等角写像による座標変換を用いた平面曲げの最適位相に関する研究，日本機械学会論文集 C 編，70, 692(2004)1016.
- 11) 神保道夫：複素関数入門，岩波書店(2003).
- 12) 櫻井鉄也，杉浦洋：Padé近似を用いた数値等角写像の計算法，情報処理学会論文誌，43, 9(2002)2959.
- 13) 小峰龍男：Mathematicaによるメカニズム，東京電機大学出版局(1997).
- 14) 西岡雅夫：機械技術者のための実用カム機構学，日刊工業新聞社(2003).
- 15) 橋爪慎治：オーバル形混練機における高分子材料内圧力分布の理論解析，日本レオロジー学会誌，15, 1(1987)19.
- 16) V.N.Bhosale, S.P.Gaikwad: Fairulre Analysis of Grey Cast Iron Camshaft By Mode of Fracture, IJERD, 9,4(2013)36.
- 17) 三宅克哉：楕円関数概観 楕円積分から虚数乗法まで，共立出版(2015).