大口径 Si ウェハ表面形状の計測評価技術に関する研究*

—第2報：ウェーブレット変換を用いたノイズ除去手法の適用—

尾 島 裕 隆** 周 立 波** 清 水 淳**

Study on Surface Profile Evaluation for Large Si Wafer Measurement
- 2nd Report : Application of Denoising Method by Use of Wavelet Transform -

Hirofumi OJIMA, Libo ZHOU and Jun SHIMIZU

In this research, we have been developing the denoising method by use of wavelet transform. In previous report, this method was investigated by comparison with conventional low-pass filter and Fourier transform. It was concluded that wavelet transform was more effective for elimination of white noise and this method was capable of removing the noise not only in the frequency domain, but also in amplitude domain. In this report, the denoising method by use of wavelet transform is applied into evaluation of Si wafer profile data which is acquired by an actual measurement system. As the acquired data includes not only the white noise but also the inherent noise introduced by the measurement system itself, it is found that the proposed method of filtering white noise in both frequency and amplitude domains is insufficient to improve GBIR (Global Backside Ideal Range which is also equal to peak-to-valley). The cutoffs used in the proposed method are then fine-tuned via least-square procedure. The results demonstrate the validation of newly designed filter in GBIR improvement.

Key words: Si wafer, digital filter, noise, wavelet transform, profile measurement, denoising

1. 緒 言

本研究では、ウェーブレット変換 (WT: Wavelet transform) によるノイズ除去法の開発を行っている。前報¹⁾において、ウェーブレット変換を用いたノイズ除去法の基礎的な検討を行った。シミュレーションにより、計測時に発生したノイズは、繰り返し計測し平均値処理しても、バイアスとして GBIR (=peak-to-valley) に重畳し、サンプリングデータ数とともにその影響が大きくなることを明らかにした。また従来のローパス・フィルタと異なり、ウェーブレット変換が周波数成分および振幅成分の両方に対してフィルタリングが可能で、周波数成分と振幅成分を同時に除去する手法がホワイト・ノイズの除去において最も有効であることを示した。

そこで第2報である本報では、前報で有用であることを示したウェーブレット変換を用いたノイズ除去法により、実際のウェハ平坦度計測器で測定したデータからのノイズ除去を試みる。まず、実際のウェハ計測データにホワイト・ノイズが付加されていると仮定した場合のノイズ除去の効果について比較する。次に、計測器固有のノイズ特性を取り出し、この特性を持つノイズを除去できるフィルタを設計し、その効果を明らかにする。

2. ウェーブレット変換によるノイズ除去法

ここでは、まず前報で明らかにしたウェーブレット変換によるノイズ除去の手法と効果について簡潔に述べ、実際のウェハ平坦度の計測データへの適用のために、ウェーブレット変換の二次元化について説明する。

図1(a)に振幅が1のサイン波に対して $\varepsilon(0, 0.1)$ のホワイト・ノ

Fig. 1 Results of denoising with WT

イズを付加したものを計測データとして示す。真値 GBIR=2 に比べて、ノイズの存在によって計測した GBIR が大きくなっていることを定性的に見ることができる。前報の結果により、1) 繰り返し計測し平均値処理しても、GBIR に及ぼすノイズの影響が除去されず、バイアスとしてプラスされること、2) このバイアスはサンプリングデータの数と共に大きくなることがわかっている。このため、計測データからノイズのみを適切に除去するフィルタの開発が重要である。

図1(b)-(d)に、前報で開発したウェーブレット変換によるホワイト・ノイズの除去結果を示す。図1(b)は周波数成分に対するフィルタ (周波数フィルタとする) により高周波数のノイズ除去を行った結果、図1(c)は振幅成分に対するフィルタ (振幅フィルタとする) により低振幅のノイズ除去を行った結果、そして図1(d)が周波数成分と振幅成分を同時に考慮したフィルタ (周波数・振幅フィルタとする) により、高周波数かつ低振幅のノ

*原稿受付 平成24年12月13日

**正 会 員 茨城大学 (茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

Fig. 2 2D Wavelet Transform

イズ除去を行った結果を示している。これらの結果からわかるように、周波数成分のみ、振幅成分のみでは十分にノイズ除去が行われていない。それに対し、高周波数でなおかつ低振幅の成分を除去するフィルタでは、周波数フィルタのみ、または振幅フィルタのみの場合に比べ、除去成分が少ないにもかかわらず、最も効果的に高周波数・低振幅のノイズ除去が行われている。

このウェーブレット変換を用いたノイズ除去手法を、実際のウエハ平坦度計測データに適用するため、二次元に拡張する。まず、一次元の離散 WT は以下の式により定義される。

$$X(\ell, k) = \sum_n x(t) \psi_{\ell, k}(t) \quad (1)$$

ここで n は入力信号 $x(t)$ のサンプリング点数であり、 ℓ はスケール係数、 k はシフト係数を表し、離散 WT の窓関数 $\psi(t)$ はマザーウェーブレットと呼ばれ、式(2)で与えられる²⁾。

$$\psi_{\ell, k}(t) = 2^{-\ell/2} \psi(2^{-\ell} t - k) \quad (2)$$

上記の式(1), (2)により入力信号 $x(t)$ とウェーブレット $\psi(t)$ との相関値であるウェーブレット係数 $X(\ell, k)$ が計算され、波長が 2^ℓ に相当する周波数成分を抽出することが出来る。この処理を順次行うことにより、入力信号 $x(t)$ が高周波成分と低周波成分に分解される。分解するにつれて、 ℓ が大きくなり、より低周波の成分に分解される。この分解の度合いを level ℓ で表す。図 2 に二次元信号に適用する際の WT および逆ウェーブレット変換

(IWT: Inverse wavelet transform) の処理方法を示す。上記一次元の WT をまず二次元信号の行方向について適用し、それによって得られた高周波成分 (H 成分とする) と低周波成分 (L 成分とする) それぞれについて、列方向に再び WT を行う。H 成分に対する列方向の分解により HH 成分と HL 成分に、また L 成分に対する列方向の分解により LH 成分と LL 成分に分解されるため、level 1 の WT により、元の信号は 4 つの周波数成分に分解される。その中で LL 成分に対して再帰的に行、列方向の WT を行うことにより、さらに分解される。IWT については、この処理手順とは逆になり、列方向に対して IWT を行い、続けて行方向に IWT を行うことにより、一つ上の level ($\ell - 1$) の成分を再構築することが出来る^{3)~4)}。

この IWT の際に、ウェーブレット係数に対して次のような処理を行うことによりノイズ除去を実現する。前報において、ウェーブレット係数に対するノイズ除去では、次の式によるハード閾値処理が優れていた。本報告においてもハード閾値処理を用いる。まず周波数フィルタの場合、入力ウェーブレット係数

Fig. 3 Measurement system

Table 1 Specification of Lasor profiler

Measurement principle	triangulation method
Spot size	10-18μm
Measurement range	160μm
Working distance	8mm
Height resolution	0.005μm
Repeatability	±0.08μm
Linearity	±0.03%MR
Sampling period	15.6μs

$X(\ell, k)$ に対して、出力ウェーブレット係数 $X_T(\ell, k)$ は次式で表される。

$$X_T(\ell, k) = \begin{cases} X(\ell, k) & (\ell > \ell_0) \\ 0 & (\ell \leq \ell_0) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 ℓ_0 はカットオフ波長 $\lambda_c = 2^{\ell_0} / 0.345$ に関わる分解レベルである。また、振幅フィルタの場合、次の式に従って閾値処理が行われる。

$$X_T(\ell, k) = \begin{cases} X(\ell, k) & (|X| > T_c) \\ 0 & (|X| \leq T_c) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 T_c は振幅のカットオフ閾値であり、必要に応じて任意に決定できるが、ノイズの標準偏差 σ 、入力信号のサンプル数が N の時、 $T_c = \sigma \sqrt{2 \log_2 N}$ で与えられる場合が多い⁵⁾。上記の式

(3)や(4)により閾値処理されたウェーブレット係数を IWT 時に用いることで、ノイズ除去された信号を得ることが出来る。また、周波数・振幅フィルタでは、式(3)および(4)を同時に用いることによりノイズ除去を行い、良好な結果が得られている¹⁾。

3. 実験装置および計測方法

図 3 に本研究で用いたウエハ計測装置の外観写真を、また表 1 には装置で用いられているレーザープロファイラの仕様を示す。このウエハ計測装置は、図 4 に示すように、ウエハを挟んで上下に 2 台レーザープロファイラを配置し、ウエハを回転させながらレーザープロファイラを外周から中心へと移動させることにより、らせん状にウエハ全面の厚さの計測を行うものである。らせん状に計測時のサンプリングピッチは 1~5mm で 5 段階に選択可能となっている。本装置を用いた直径 300mm のウエハをサンプリングピッチ 3mm で計測したデータの一例を図 5 に示す。計測に用いたウエハは直径 300mm に対し、厚さの計測結果は厚さ 771.924~772.135 μm と peak-to-valley=0.211 μm にあり、非常に平坦であることがわかる。また、上記の非常に小さな範囲内でもウエハ全体の凹凸形状がわかるほどに精密な計測が行われている。しかし、この計測結果においてもノイズが存在しており、このノイズを除去しなければ正確な計測結果が得られない。そこで、この計測データに対し、WT によるノイズ除去を行う。

4. 計測データに含まれるホワイト・ノイズ除去

まず、計測データに含まれるノイズがホワイト・ノイズであると仮定し、ノイズ除去を行った。WT を用いたフィルタについて、周波数フィルタ、振幅フィルタ、そして周波数・振幅フィルタを設計し、ノイズ除去を行った。それぞれのフィルタにおける、カットオフ波長 λ_c 、カットオフ閾値 T_c は、前報での設計方法に従い、 $\lambda_c = 23.2\text{mm}$ ($\ell_0=3$)、 $T_c = 0.0015$ とした。3 種類のフィルタによるノイズ除去結果を、それぞれ図 6~8 に示す。図 6~8 において、(a)はノイズ除去後のウエハ形状、(b)は除去したノイズ成分、(c)は除去したノイズ成分のヒストグラムを示し、また(c)の実線はヒストグラムに近い正規分布の近似曲線を表している。

図 6 では、カットオフ波長 $\lambda_c = 23.2\text{mm}$ で高周波成分をノイズとして除去しているが、図 5 と図 6(a)を比較すると全体的に形状が除去されていることがわかる。さらに図 6(b)の除去された成分から、除去量が多いことが見てとれ、ホワイト・ノイズのみでなく同心円状の形状成分が全体的に含まれていることがわかる。

図 7 の結果は、カットオフ閾値 $T_c = 0.0015$ として、低振幅成分をノイズとして除去したものである。図 6 と同様に、ノイズだけでなく形状も除去されているため、図 7(b)のように、同心円状の形状成分が見られる。

図 8 はカットオフ波長 $\lambda_c = 23.2\text{mm}$ 、カットオフ閾値 $T_c = 0.0015$ とした高周波かつ低振幅の成分をノイズとして除去した結果となっている。図 6、7 と比べ、図 8(b)の除去ノイズ成分は全体的にまんべんなく現れており、前出の 2 つの結果と異なり、同心円状の形状成分はあまり現れずにノイズのみの除去ができています。図 8(c)のヒストグラムにおいても標準偏差が小さく、除去ノイズ成分が低振幅成分に集中していることがわかる。

これら図 6-8(c)の除去されたノイズのそれぞれの平均値 M 、標準偏差 σ 、尖度 Kw 、歪度 Sk をまとめ、表 2 に示す。このフィ

Fig. 4 Measuring scheme of measurement system

Fig. 5 Measured wafer data

Table 2 Characteristics of removed noise

	$M [\mu\text{m}]$	$\sigma [\mu\text{m}]$	Kw	Sk	GBIR $[\mu\text{m}]$
$\lambda_c = 23.2\text{mm}$	-4.6×10^{-4}	0.0078	5.25	-0.85	0.164
Hard threshold ($T_c = 0.0115$)	-2.2×10^{-6}	0.0073	0.21	-1.33	0.207
$\lambda_c = 23.2\text{mm}$ & Hard threshold ($T_c = 0.0115$)	-5.9×10^{-5}	0.0041	0.49	-0.037	0.211

ルタでは、ホワイト・ノイズを対象としたノイズ除去を行ったため、平均値、尖度、歪度は全て 0 になることが望ましい。表 2 より、全てのフィルタにおいて、平均値はほぼ 0 となっていることがわかる。しかし、周波数フィルタでは、尖度が大きくなっており、ノイズ以外に振幅の大きな形状まで除去されていると考えられる。この表 2 より、周波数・振幅フィルタが実際の計測データに対するノイズ除去においても、最も良くホワイト・ノイズを除去できていることがわかる。

また、GBIR についてノイズ除去前後で比較をすると、ノイズ除去前の図 5 では、GBIR=0.211 μm となっているが、図 6、7、8(a)ではそれぞれ 0.164 μm 、0.207 μm 、0.211 μm となっている。図 6、7 の周波数フィルタまたは振幅フィルタでは除去前に比べ GBIR が小さくなっているが、図 8 のホワイト・ノイズのみ除去した場合では、ほとんど変わらなかった。ホワイト・ノイズを除去しただけでは、GBIR を改善するまでには至らなかった。そこで、次に計測システムに含まれる固有のノイズについても除去することを考える。

Fig. 6 Filtered by LS WT with $\lambda_c = 23.2\text{mm}$

Fig. 7 Filtered by LS WT with hard threshold $T_c = 0.0115$

Fig. 8 Filtered by LS WT with combined method $\lambda_c = 23.2\text{mm}$ and $T_c = 0.0115$

5. 計測データに含まれる装置固有のノイズ除去

次に、図 3 に示した計測システム固有のノイズ成分を除去することを考える。まず、固有のノイズ成分を以下のようにして求める。図 9 左図のように、同一ウエハに対して 150 回繰り返し計測し、150 回の計測データを取得する。それらのデータを計測点ごとに平均を取り、図 9 中央図のようにウエハの平均データを取得する。この平均データは個々の計測点については繰り返し計測によりノイズの影響がほぼなくなっていると考えられるため、はじめに取得した 150 回の計測データからこの平均データを差し引くことによって、図 9 右図のように 150 回のノイズデータが取得できる。このようにして求めたノイズデータの平均を取ることで、計測システム固有のノイズ特性を求めた。計測システム固有のノイズ特性のパラメータは、それぞれ平均値 $M_0 = -3.32 \times 10^{-3}$ 、標準偏差 $\sigma_0 = 0.00673$ 、尖度 $K_{W0} = 0.314$ 、歪度 $Sk_0 = 0.0214$ となった。

この求めた特性のノイズを除去できるフィルタを設計する。ウエハの平均データの GBIR を求めると $GBIR_{mean} = 0.3716\mu\text{m}$ であった。この平均データは、前述のとおりノイズの影響がほぼな

いものと考えられるため、計測データのノイズ除去後の GBIR がこの $GBIR_{mean}$ に近ければノイズが除去できたと考えられる。ノイズ除去後データの GBIR を $GBIR_{filtered}$ とすると、150 回の計測データから次式が最小となるようにフィルタの設計を行った。

$$D = \sum_{n=1}^{150} (GBIR_{filtered} - GBIR_{mean})^2 \quad (5)$$

設計パラメータは、周波数・振幅フィルタのカットオフ波長 λ_c とカットオフ閾値 T_c となる。 λ_c と T_c を以下のように数値シミュレーションを行って求めた。本シミュレーションでは、 λ_c は WT の分解レベル l により定められる、5.79, 11.6, 23.2, 46.4, 92.8, 185.5mm の 6 つの値のみを用いる。また T_c は試行錯誤的に 0.01 ~ 0.10 の範囲を用いた。この数値計算により、 $GBIR_{filtered} = 0.3716$ となるカットオフ波長、カットオフ閾値は、それぞれ $\lambda_c = 46.4\text{mm}$ 、 $T_c = 0.0242$ と求められた。そのときの GBIR のヒストグラムについて図 10 に示す。図 10(a) は 150 回の計測データそのものの GBIR のヒストグラム、図 10(b) は求めた λ_c 、 T_c によるノイズ除去後の GBIR のヒストグラムである。2 本の垂直線はそれぞれ、実線が図 9 の平均データの $GBIR_{mean}$ 、点線がヒストグラムの平均 GBIR となっている。図 10(a) の GBIR の平均値は 0.3770 で、

Fig. 9 Method for identifying the noise of actual machine

$GBIR_{mean}$ にノイズによるバイアスを付加されていることがわかり、(b)においてノイズ除去後の $GBIR$ の平均値と $GBIR_{mean}$ がほぼ一致していることが確認できる。このように、周波数・振幅フィルタのカットオフ波長、カットオフ閾値を $\lambda_c = 46.4\text{mm}$ 、 $T_c = 0.0242$ に微調整すれば、計測システム固有のノイズ成分にも対応可能なフィルタを設計でき、 $GBIR$ の改善が達成できた。しかし、 $GBIR$ の標準偏差は、ノイズ除去前 0.0103 に対し、ノイズ除去後が 0.0124 とほぼ変わらない結果となった。

6. 結 言

本論文で得た結果を、以下のようにまとめる。

- (1) ウェーブレット変換を用いたノイズ除去フィルタを 2 次元に拡張し、大口径 Si ウエハ表面形状の計測評価に適用可能とした。
- (2) 実際のウエハ計測データに対しノイズ除去を行った。ホワイト・ノイズが含まれる場合、周波数・振幅フィルタにより除去されたノイズの特性が、平均値 $M = -5.9 \times 10^{-5}$ 、尖度 $Kw = 0.49$ 、歪度 $Sk = -0.037$ といずれもほぼ 0 であり、この周波数・振幅フィルタが最もノイズ除去に適していることを明らかにした。
- (3) ウエハ計測システム固有のノイズを求めた。また最小自乗法によりバンド・振幅フィルタのカットオフ波長、閾値を $\lambda_c = 46.4\text{mm}$ 、 $T_c = 0.0242$ と設計することで、ノイズによるバイアスをほぼ 0 にでき、 $GBIR$ の改善をすることが出来た。一方、 $GBIR$ の標準偏差は除去前後において変化が見られなかった。

謝 辞

本研究は平成 23 年度文部科学省科学研究費（課題番号 23360062）および平成 24 年度文部科学省科学研究費（課題番号 24760099）の助成により行われたことを記し、謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) L. Zhou et al.: Study on Surface Profile Evaluation for Large Si Wafer Measurement – 1st Report : Denoising by Use by Wavelet Transform -, J. Jpn.

(a) Raw data

(b) Filtered data

Fig. 10 Histogram of GBIR

- Soc. Precis. Eng., 77, 12, (2011) 1165 (in Japanese).
- 2) X. Jiang, et al.: Wavelets and their application for surface metrology, CIRP Annals – Manufacturing Technology 57 (2008) 555.
- 3) M. Mitani: Communication mathematics for "doing over", CQ Publishing Co., Ltd. (2008) 157 (in Japanese).
- 4) O Rioul, and M Vetterli: Wavelets and Signal Processing, IEEE Sig. Proc. Mag., (1991) 14.
- 5) D L Donoho, I M Johnston: Ideal Spatial Adaptation by Wavelet Shrinkage, Biometrika, 81, 3, (1994) 425.