

ウェーブレットを用いた干渉顕微鏡の高精度化

伊藤俊治*1 山本昌治*1 水野和康*1

High Precision Instrument by Interferometric Microscope by using Wavelet

Shunji ITO, Masaharu YAMAMOTO
and Kazuyasu MIZUNO

Technical Consulting Division, AITEC *1

干渉顕微鏡を用いた表面粗さ計測において、系統誤差としての性質を持つ光学システム誤差をウェーブレット変換によって抽出する方法を提案し、実験及びシミュレーションから、以下の結果を得た。

- (1)従来では光学システム誤差の再現性の崩れに対応できないのに対し、本方法はマスターを1か所計測するだけで抽出できるから、再現的に発生する誤差を補正し、計測精度を約2倍に向上できた。
- (2)本方法は、光学システム誤差に含まれる局所的な不連続に対応でき、高精度化に有効であった。

1. はじめに

ウェーブレット変換は、画像処理あるいは信号処理の分野で多く用いられている。このうち信号処理に関する応用は、異常信号の検出、相似相関の検出、ノイズ除去、システム同定などに集約される。

一方、ナノメートルオーダーに仕上げられた面の表面粗さを、位相シフト方式の干渉顕微鏡によって評価するには、計測データに系統誤差として混入する光学システム誤差¹⁾²⁾の影響を除去する必要がある。従来、光学システム誤差の抽出方法は、極めて滑らかに加工されたガラスマスターの異なった位置を少なくとも8か所で計測し、その計測データを平均するものであった³⁾。しかし、ミロー対物レンズなどでは、干渉縞の濃淡を調節する機構があり、この調節量が異なると、光学システム誤差の再現性が崩れる問題があった。

本稿では、2次元離散ウェーブレット変換によるノイズ除去の手法⁴⁾を光学システム誤差の抽出に応用する方法を提案する。ノイズ除去は通常、外乱となる雑音の除去を意味するが、ここでは、正規白色的な表面粗さをノイズに見立てる。すなわちマスターの表面粗さが正規白色的であることを前提に、これを除去することによって光学システム誤差を抽出する。本方法は、1か所だけの計測だから、複数か所の計測を要する従来の方法と比べ

ると、干渉縞濃淡の調節で生ずる光学システム誤差の再現性の崩れを問題にしない。本方法によって抽出された光学システム誤差を計算機に記憶させたうえで、他の試料を計測する都度、生データから減算すれば、干渉顕微鏡を高精度化できる。

2. 計測原理

干渉顕微鏡において、ミロー対物レンズは透明な試料の表面粗さを計測可能だから多用されている。しかし、干渉縞の濃淡を調節する必要があり、調節により光学システム誤差が微妙に変化する。これは、参照面が光軸回りにわずかに回転することに起因する。そこで、マスターの複数か所を計測するのではなく、1か所の計測から光学システム誤差を抽出する方法を検討した。

2.1 1次元ウェーブレット変換

まず、1次元ウェーブレット変換を簡潔に示す。関数 $f(x)$ のマザーウェーブレット $\psi(x)$ によるウェーブレット変換は次式のように定義される。

$$(W f)(b,a) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) f(x) / |a|^{0.5} dx \quad (1)$$

ただし、 $a > 0$ 、 b は実数であり、それぞれ、スケール変換とシフト変換を表すパラメータである。 b 、 a の値をそれぞれ $2^k, 2^l$ とし、連続ウェーブレットを離散化すると、

*1 技術支援部機械電子室

$$j,k(x)=2^{-j/2} (2^{-j}x-k) \quad (2)$$

となる。次にウェーブレット変換(W f) (b,a)を $w_k(j)$ で表すと、式(1)は

$$w_k(j) = \int_{-\infty}^{\infty} j,k(x) f(x) dx \quad (3)$$

と書ける。上式において j はレベル、 $w_k(j)$ は展開係数である。また式(3)において実際には積分を行わず、スケーリング関数とマザーウェーブレットとの間に成り立つ関係から導かれた分解アルゴリズムを用いる。その分解アルゴリズムはスケーリング係数 $s_k(j)$ を用いて次式で表せる。

$$s_k(j) = P_{n-2k} S_n(j-1) \quad (4)$$

$$w_k(j) = Q_{n-2k} S_n(j-1)$$

ここで、 P_{n-2k} と Q_{n-2k} は、それぞれスケーリング関数の数列(本稿では、よく用いられるドベシの数列を選択した)、及びウェーブレットの数列である。

2.2 2次元ウェーブレット変換

干渉顕微鏡の計測データ構造は3次元配列だから、その領域を 2^L (L :整数)の画素数を一辺とする正方形とし、画素位置(m,n)における高さ座標値を $f(m,n)$ と定義する。そして、 $f(m,n)$ をレベル0のスケーリング係数 $S_{m,n}^{(0)}$ とみなしたうえで、次式で横軸(m)方向に1次元離散ウェーブレット変換を行なう。

$$S_{m,n}^{(j+1,x)} = \sum_k P_{k-2m} S_{k,n}^{(j)} \quad (5)$$

$$W_{m,n}^{(j+1,x)} = \sum_k Q_{k-2m} S_{k,n}^{(j)} \quad (6)$$

ここで j はレベルであり、 $S_{m,n}^{(j+1,x)}$ と $W_{m,n}^{(j+1,x)}$ はそれぞれ横軸方向のスケーリング係数及びウェーブレット展開係数を表す。次に、それぞれの係数に対して縦軸(n)方向に離散ウェーブレット変換を行う。

$$S_{m,n}^{(j+1)} = \sum_l P_{l-2n} S_{m,l}^{(j+1,x)} \quad (7)$$

$$W_{m,n}^{(j+1,h)} = \sum_l Q_{l-2n} S_{m,l}^{(j+1,x)} \quad (8)$$

$$W_{m,n}^{(j+1,v)} = \sum_l P_{l-2n} W_{m,l}^{(j+1,x)} \quad (9)$$

$$W_{m,n}^{(j+1,d)} = \sum_l Q_{l-2n} W_{m,l}^{(j+1,x)} \quad (10)$$

ここで、 $W_{m,n}^{(j+1,h)}$ は横軸方向にスケーリング関数を、縦軸方向にウェーブレットを作用させた係数を示す。また $W_{m,n}^{(j+1,v)}$ は横軸方向にウェーブレットを、縦軸方向にスケーリング関数を作用させた係数を示す。さらに、 $W_{m,n}^{(j+1,d)}$ は縦、横両方向ともウェーブレットを作用させた係数を示す。

式(5)から式(10)までをまとめると次式が成立する。

$$S_{m,n}^{(j+1)} = \sum_k P_{k-2m} P_{l-2n} S_{k,l}^{(j)} \quad (11)$$

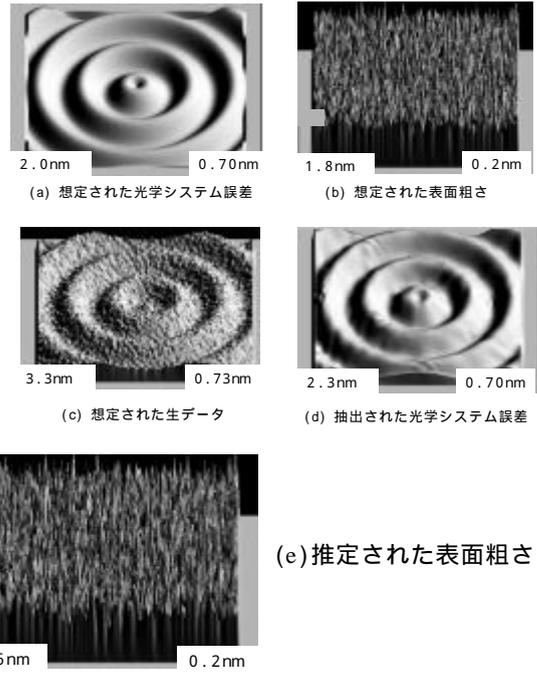


図1 シミュレーションの例

$$W_{m,n}^{(j+1,h)} = \sum_k P_{k-2m} Q_{l-2n} S_{k,l}^{(j)} \quad (12)$$

$$W_{m,n}^{(j+1,v)} = \sum_k Q_{k-2m} P_{l-2n} S_{k,l}^{(j)} \quad (13)$$

$$W_{m,n}^{(j+1,d)} = \sum_k Q_{k-2m} Q_{l-2n} S_{k,l}^{(j)} \quad (14)$$

上式のうち、 $S_{m,n}^{(j+1)}$ のみをさらに4つの成分に分解することを繰り返すことによって、2次元の多重解像度分解を行う。そして、 $j = 0$ から $j = L - 1$ までの展開係数を求める。ここで、展開係数の数は、 j のレベルによらず $2^L \times 2^L$ である。 $j = L - 1$ のとき、展開係数のrmsを計算し、このrmsよりも絶対値が小さな展開係数を零にする。この操作は、正規白色的な表面粗さの影響が展開係数のrmsよりも小さな展開係数に現れることを前提としている。そして操作された展開係数から出発して、次式を $j = L - 1$ から $j = 0$ まで繰り返し使用することによって高さ座標値の再構成を行い、光学システム誤差を抽出する。これを記憶し、計測の都度除去すればよい。

$$S_{m,n}^{(j)} = \sum_k \left[P_{m-2k} P_{n-2l} S_{k,l}^{(j+1)} + P_{m-2k} P_{n-2l} W_{k,l}^{(j+1,h)} + Q_{m-2k} P_{n-2l} W_{k,l}^{(j+1,v)} + Q_{m-2k} Q_{n-2l} W_{k,l}^{(j+1,d)} \right] \quad (15)$$

3. シミュレーション

想定された光学システム誤差を図1(a)のように回転正弦波と設定し、図1(b)に示す0.2nm(rms)の正規白色的な表面粗さを想定すると、図1(c)に示す生データが創成される。これに2章のウェーブレット変換を用いる方法を適用すると、図1(d)のように光学システム誤差が抽出される。さらに想定された生データと抽出された光

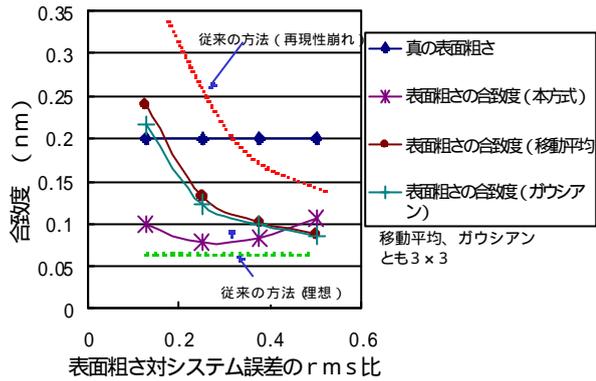


図 2 想定粗さと推定粗さの合致度

学システム誤差を加算することによって、表面粗さは図 1(e)のように推定される。図中、左右の数値は PV と rms を表す。(a)と(d)、及び(b)と(e)を比較すると、各々よく一致している。両者の合致度は 0.059nm であった。

次に、光学システム誤差として、後述の実験で求まる実際の光学システム誤差を選択し、想定表面粗さを 0.2nm(rms)の正規白色信号としたうえで、生データを創成した。ただし、想定光学システム誤差の rms は高さ方向の倍率を可変にすることによって任意に設定できる。そして、想定表面粗さに対する想定光学システム誤差の rms 比を変化させたときの推定表面粗さの合致度をシミュレーションにより求めた。その結果を図 2 に示す。

同図では、本方法の他に、異なった 8 か所の想定生データを平均して求める従来の方法と、信号に対する応答性が比較的高い 3×3 の移動平均によるスムージング、及び 3×3 で標準偏差 1 のガウシアンフィルタを用いる方法の結果を併記している。

これらを比較すると、rms 比が 0.1 ~ 0.5 の間では、光学システム誤差の再現性の崩れを想定しない従来の方法(理想)、本方法、ガウシアンフィルタ、移動平均、再現性の崩れを想定した従来の方法(再現性の崩れ)の順で合致度が小さい。特に rms 比 0.3 近辺において、本方法と再現性の崩れを想定した従来法(再現性の崩れ)とを比較すると本方法の合致度は半分以下であった。

これに対し、移動平均あるいはガウシアンフィルタでは横軸の rms 比が小さいとき、合致度が大きくなる傾向があった。これは、通常のスムージングやフィルタリングでは、局所的に不連続な信号の抽出が困難であるのに対し、本方法では光学システム誤差に含まれる局所的な不連続まで抽出できることによる。また、同図から、本方法は rms 比の主要な範囲で、移動平均あるいはガウシアンフィルタよりも高性能であるといえる。

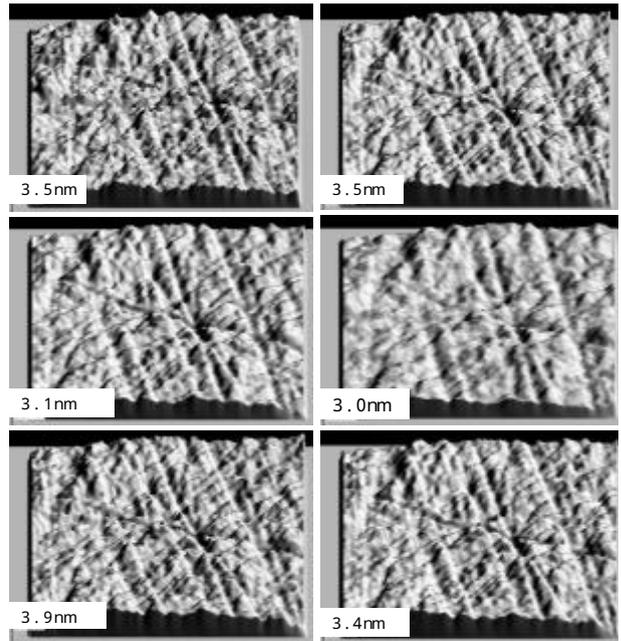


図 3 任意の位置で計測された生データ

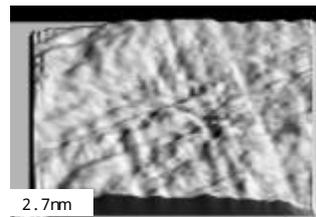


図 4 生データの平均結果

4. 実験

干渉顕微鏡の対物レンズを 40 倍のミロータイプとし、試料としてメカノケミカルポリッシングされたシリコンウエハを選択した。

そして、シリコンウエハの異なった位置を 6 か所計測し、それぞれから 2 次成分までを除去した結果を図 3 に示す。ただし、解析領域は 0.12mm 角 ($2^7 \times 2^7$ ピクセル) である。図 3 において 6 データはほとんど同じ特徴を示すから、同図に認められる筋は逆極性の光学システム誤差の成分と思われた。また、6 データを単純に平均した結果を図 4 に示す。同図では筋がぼやけ、その深さが浅くなったことが分かる。ちなみに 6 データの再現性は 0.24nm () であり、厳密には崩れていた。

これは計測か所の変更による可能性があったので、同一か所を 6 回繰り返し計測し、2 次成分までを除去した結果を図 5 に示す。また 6 データを単純平均した結果を図 6 に表す。図 5 と図 6 は、それぞれ図 3 と図 4 に類似しており、6 データの再現性は 0.20nm () であった。このことから再現性の崩れは場所変えによるものではなく、1 計測ごとに行った干渉縞濃淡の調節によると思われる。従って光学システム誤差の高精度な抽出にはミロ

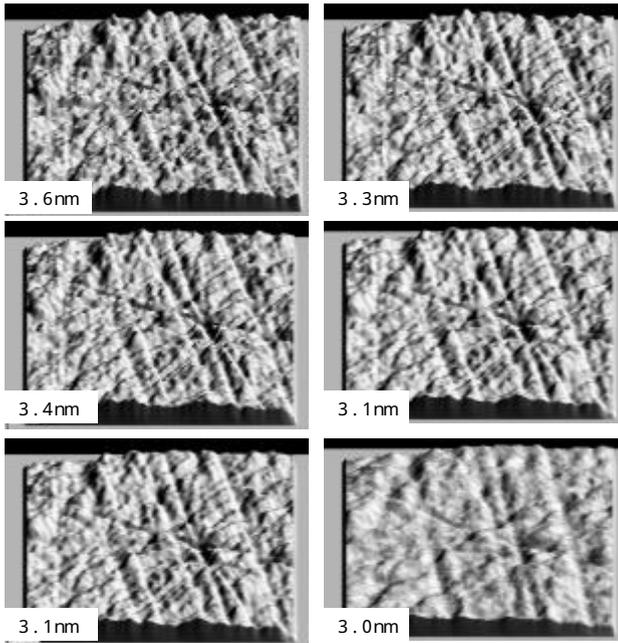


図5 同一場所で計測された生データ

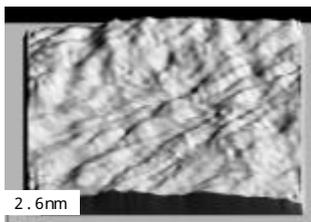


図6 生データの平均結果

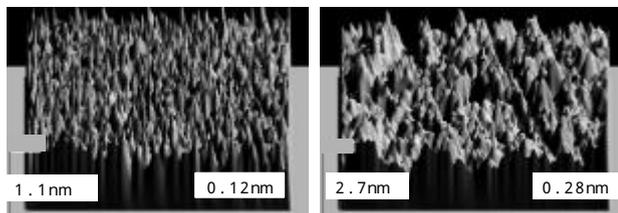


図7 本方法の表面粗さ 図8 従来法の表面粗さ

一對物レンズの場合、1回の計測で完結することが望ましいと言える。

さらに、図3に示した6計測のうち最初のデータにウェーブレット変換を適用して光学システム誤差を抽出、除去することで、シリコンウエハの表面粗さを推定した。この結果を図7に示す。PV値とrmsはそれぞれ1.1nmと0.12nmであった。また、図4に示した結果は、極めて平滑な面の6計測データの平均だから、従来法によって求めた逆極性の光学システム誤差にほぼ相当する。そこで図3に示した最初の計測データから図4に表示した逆極性の光学システム誤差を除去してシリコンウエハの表面粗さを求めた。結果を図8に示す。同図では再現性の崩れの影響から、光学システム誤差の筋が残像する。図7と図8を比較すると、従来法における再現性

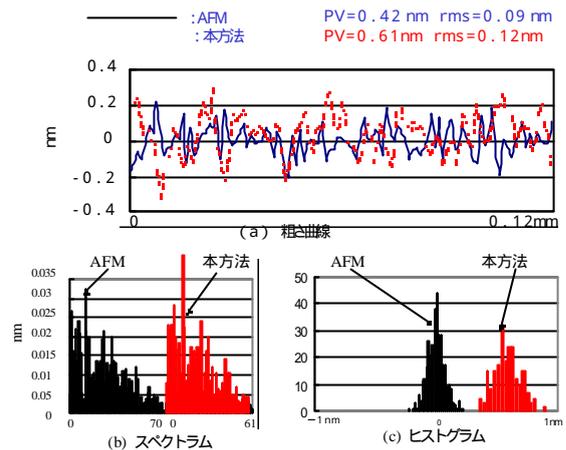


図9 AFMと本方法による表面粗さの比較

の崩れによる相違が顕著である。

同一のシリコンウエハにおいて、干渉顕微鏡による計測か所の近辺をAFMで観察した。図7とAFMの観察結果を詳細に比較する目的で、両結果から2次成分までを除去した任意の断面曲線を抜き出し、図9(a)に示す。さらに、2つの断面曲線のスペクトル解析結果とヒストグラムをそれぞれ図9(b)、(c)に表す。2章のウェーブレット変換による方法で得られた表面粗さの特徴は、図9においてAFMの観察結果におおよそ合致している。ここで、図9(b)で両結果に認められる有色性は、この表面粗さ計測に関して許容の範囲内であった。これはウェーブレット変換による方法が表面粗さに対して完全な白色性を要求するのではないことを意味している。

5. 結び

2次元離散ウェーブレット変換を用いた光学システム誤差の抽出方法は、解析領域において3次成分以上のうねりのない、基本的に正規白色的な表面粗さを有するマスターを必要とするが、1か所だけの計測から光学システム誤差を抽出できるので、干渉縞の濃淡調節で生ずる再現性の崩れを問題にしない。

他の試料を計測する場合には、対物レンズを光軸方向に位置調節することによって、ピントと干渉縞のコントラストを合わせる。この作業には、干渉縞の移動を観察する負担を伴うが、1計測につき1回ですむ。その後、予め本方式で求めた光学システム誤差を計測生データから除去すればよい。

文献

- 1) 伊藤俊治:精密工学会誌,68(1),80(2002)
- 2) 伊藤俊治:精密工学会誌,68(4),553(2002)
- 3) Zygo社 Maxim 3DModel5700 取扱説明書
- 4) 中野宏毅:ウェーブレットによる信号処理と画像処理, 共立出版(1999)