画像解析を用いたステージ精度測定手法の提案*

前田 俊二** 吉田 実** 岡 健次***

A Proposal of Stage Motion Measurement Method Using Image Analysis

Shunji MAEDA, Minoru YOSHIDA and Kenji OKA

A method of measuring the motion of a stage has been developed based on a Thru The Lens optics system. Images of the target, which has line & space patterns written on a Si wafer, are detected through the lens by a linear image sensor, which is synchronized with the output of the position sensor of the scanning stage. The displacement from the ideal orbit is measured by an image analysis method. This method has a fixed measuring point in contrast with the moving measuring point of a laser interferometer system, and the method is optimum for laser processing systems and LSI wafer inspection systems. Its accuracy was evaluated to be 10 nm p-p.

Key words : dynamic measurement, scanning stage, image analysis

1. 緒 言

高精度な計測、検査あるいは加工を行う装置の開発において、対象となる試料を移動するステージの走行性能や位置決め性能は装置性能を大きく左右するため、ステージの挙動をつぶさに測定し、評価することが重要になる。特に、走行中のステージ性能は、LSI 異物検査装置¹⁾やレーザ加工装置²⁾の高分解能化、あるいはスキャン露光装置^{3)~5)}の開発に見られるように、10nm オーダの精度が必要になってくることが予想される。

ステージの走行中の挙動を測定する手段としては、測定距離をまかなう反射ミラーをステージ上に載せ、レーザ光の干渉を用いて位置計測を行う方法⁶⁾(以下、レーザ計測システムによる方法と呼ぶ)が従来一般的であった。しかし、測定点が反射ミラーの移動に伴い変化するため、LSI 異物検査装置やレーザ加工装置などに見られる加工点あるいは測定点が本体の光学系により固定されている装置には直接的に適用困難であるという課題があった。また、レーザ計測システムを搭載しておらず、軽量の試料に対応した装置の場合、レーザ計測のために比較的重量のある反射ミラーを搭載すると、荷重分布等が異なる系で測定を行うことになり、通常の使用状態における走行を再現することはできないという課題もあった。

上記課題を解決するため、画像解析を用いた新たなステージ精度測定手法を開発した。本論文では、装置性能を確保すべき加工点あるいは測定点で、通常の使用状態における精度計測を実現し、従来のレーザ計測システムによる方法に匹敵する分解能を得ることを可能とする手法を述べる。開発した走行精度測定手法および実際のステージ精度測定に適用した実験結果を以下説明する。

2. 評価対象と技術課題

2.1 評価対象

* 原稿受付 平成11年6月11日
** 正 会 員 (株)日立製作所生産技術研究所 (横浜市戸塚区吉田町 292)
*** (株)日立製作所生産技術研究所

図1に、評価対象となるステージの全体構成を示す。対象とするステージは、4軸すなわちx軸、y軸、z軸およびθ軸を有し、y軸が位置決め動作、x軸が定速度の走行動作を行うものとする。y軸が動作後、x軸が動作することを基本動作とする。x軸、y軸ともに、制御上の決められた時刻に通るべき位置と実際の位置との位置偏差が小さいことが重要である。y軸の場合は、位置決め動作のため、x軸走行中の静止安定性がより重要となる。z軸およびθ軸は、試料の上下方向および回転方向の補正を行うものとする。

測定対象は、x軸ステージ走行中のxおよびy方向の位置(変位)である。測定点は、図1に示すように、ステージ上方に配置した評価光学系の焦点面内の視野中心とする。なお、x軸およびy軸の位置、速度は、それぞれポジションセンサ(リニアエンコーダ)⁷⁾の出力により得られるものとし、制御系によってx軸の定速度走行、y軸の位置決め動作を行うものである。また、z軸およびθ軸も制御系によってそれぞれ制御するものとする。

2.2 技術課題

測定点は、ステージ走行位置にかかわらず座標が固定であり、レーザ計測システムによる方法の場合のようにステージ上の反射ミラーの位置と共に移動するものではない。これは、LSI異物検査装置、レーザ加工装置、スキャン型露光装置などのステージ用途に共通のものである。従って、これらのステージに

Fig.1 Scanning stage to be evaluated

対応するには、光学系の視野中心に座標系を有する Thru The Lens 方式の測定系を構築することが必要である。

また、レーザ計測システムによる方法では、反射ミラーの重量が対象とする試料より重い場合、通常の使用状態とは異なる条件で測定することになる。このため、いかに通常の使用状態に近い形で測定できるかが精度を確保する上での鍵となる。

3. 走行精度測定手法

3.1 走行精度測定手法

立案した走行精度測定方法を図2に示す。計測用パターンを描画したウェハをステージ上に搭載する。ランプからの照明光はハーフミラーを介して対物レンズに集光し、計測用パターンを照明する。パターンからの反射光は、ハーフミラーを透過し、リニアイメージセンサ上に結像される。リニアイメージセンサを駆動するドライバのタイミング信号は、走行動作を行う x 軸ステージのポジションセンサの出力信号により与えられる（外部同期）。これにより、ステージの走行に同期させながらリアルタイムに2次元の連続した画像が得られる。また、このタイミング信号は、切替器により基準信号を発生する発振回路の出力に切り替えることにより（内部同期）、ステージ走行に影響されない画像を得ることも可能な構成とする。

Fig.2 Measuring method of stage motion

図2に示すように、ステージ走行中にヨーイングやピッチングなどの変動があると、描画されている計測用パターンに対して位置ずれ、すなわちひずみを持ったパターンが検出される。そこで、検出されたひずみの量を解析することにより、想定した走行位置と実際の走行位置とのずれ量およびその発生周期等を求めることができ、ステージの走行状態を高精度に測定することができる。

3.2 測定用基準試料

基準試料に描画した計測用パターンは、走行方向（x方向）の位置変位と直角方向の位置変位が同時に測定できるように隣接して配列され、それぞれ y 方向と x 方向のライン&スペースからなる等ピッチのパターンとする。ここでは、光学系がステージ上方に配置され、透過光でなく反射光を用いることができること、および軽量化が可能であることから、Si ウェハ上に描画したパターンを用いる。

3.3 画像解析によるひずみ測定

検出されたひずみの量を解析する方法を図3に示す。x方向のひずみは、検出パターンのピッチ変動として測定できる。このため、数本分のライン&スペースからなる画像をテンプレートとし

Fig.3 Image evaluation method

で登録し、このテンプレートを検出画像上で一定ピッチずつ順次ずらしながら相関係数を算出し、この値から x 方向の位置ずれ量を求め、x 方向ひずみとする⁸⁾。なお、上記ピッチは、ステージへの指令速度と画像検出の速度から算出する。また、ここではステージ位置に同期する外部同期により画像を検出する。ひずみの測定は次式により行う。 $C(a,b)$ は相関係数を表す。得られた相関係数を $C(a,b)$ 放射線 (3 点) 近似し、下式を得る。

ここで、 C_c は上記相関係数 $C(a,b)$ の最大値であり、

$$C(a,b) = \frac{1}{M^2 \sigma_f(a,b) \sigma_g} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} \{f(x+a, y+b) - \bar{f}(a,b)\} \{g(x,y) - \bar{g}\} \quad (1)$$

$$\bar{f}(a,b) = \frac{1}{M^2} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} f(x+a, y+b) \quad (2)$$

$$\bar{g} = \frac{1}{M^2} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} g(x,y) \quad (3)$$

$$\sigma_f(a,b) = \sqrt{\frac{1}{M^2} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} \{f(x+a, y+b) - \bar{f}(a,b)\}^2} \quad (4)$$

$$\sigma_g = \sqrt{\frac{1}{M^2} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} \{g(x,y) - \bar{g}\}^2} \quad (5)$$

$$\delta_x = \frac{(C_r - C_l)}{2(2C_c - C_l - C_r)} \quad (6)$$

$$\delta_y = \frac{(C_d - C_u)}{2(2C_c - C_u - C_d)} \quad (7)$$

C_u, C_d, C_l, C_r はそれぞれ相関係数配列上 C_c の上下左右の相関係数である。また、 $f(x,y)$ は検出した画像から一定ピッチずつ切り出した画像、 $g(x,y)$ はテンプレート画像である。x 方向ひずみは δ_x に相当する。

y 方向のひずみは、検出パターンの横ずれとして測定できる。そこで、1 ライン分の画像をテンプレートとして登録し、このテンプレートを検出画像上で 1 ラインずつ順次ずらしながら相関係数を算出し、この値から y 方向の位置ずれ量を求め、y 方向ひずみとして算出する。y 方向ひずみは δ_y に相当する。

なお、x 方向のひずみについては、LSI 異物検査装置等の比較検査装置用ステージへの適用を考え、比較ピッチが一定となるように、検出画像上で一定間隔離れた領域同士に関して順次マッチングを実施し、ひずみ量を算出することも行う。

3.4 周波数解析によるひずみ測定

上記ひずみ測定結果は、想定軌跡からのひずみ量を測定したものである。ひずみ発生を調べるため、周波数解析を行う。周波数解析の方法を図4に示す。同図(a)は周波数解析に用いたデータの一例である。これをフーリエ変換し、スペクトル分布を表示した結果を同図(b)に示す。これにより、特定の周波

数成分が見られるかどうかを確認する。また、指定した周波数帯域を抽出し、これを逆フーリエ変換して、ひずみ量に変換することを可能とした。これにより、着目した周波数のひずみ量への影響が把握できる。

4. 実験および検討

4.1 実験方法

実験に使用したステージの基本仕様を表1に示す。ステージは、x軸、y軸、z軸および θ 軸を有し、y軸が位置決め動作、x軸が定速度の走行動作を行うものである。ステージのx軸に搭載したポジションセンサには、光回折干渉方式のリニアエンコーダを用いた。このリニアエンコーダは回折格子を刻んだスケールにレーザを照射し、光電素子で回折光を検出するものである。スケールの目盛間隔は $4\mu\text{m}$ であり、信号出力ピッチは $2\mu\text{m}$ である。なお、スケールの有効長は 150mm である。

図5に基準試料であるSiウェハに描画した計測用パターンの例を示す。1層の SiO_2 からなる $2\mu\text{m}$ のパターン幅と $2\mu\text{m}$ の間隔を有するライン&スペースのパターンである。縮小投影露光装置を用いて製作しているため、同一ショット内での精度は高いが、異なるショット間では露光装置の位置決め誤差が含まれるため、ここでは同一ショット（大きさ $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ ）内のパターンを対象にする。

光学系と画像処理系の構成を図6に、基本仕様を表2に示す。

Table1 Specification of XYZ θ stage

Stage size	600×600×400mm
Travel stroke	(x,y)150mm
Drive unit	(x)Motor+ball bearing spindle (y)Motor+ball bearing spindle
Guide unit	(x,y)Ball bearing
Position sensor	(x)Linear encoder (2 μm /pulse)

Table2 Specification of optics and image processing

Objective	×50
Linear image sensor	pixels 256 speed 50kHz (20 μs /line)
Pixel size	0.25 μm

ここでは、市販の顕微鏡と画像処理基板を用いた。顕微鏡に搭載されている対物レンズ（テレセントリック系¹⁰⁾）は50倍であり、その焦点面に計測用パターン面が入るようにステージのz軸を調整する。計測用パターンは、対物レンズと結像レンズによりリニアイメージセンサに結像する。焦点面における倍率変化を抑えるため、視野内の各点を通過する照明光の主光線は対物レンズの瞳中心を通り、ウェハが垂直に照明される。計測用パターン上での検出画素寸法は $0.25\mu\text{m}$ とする。リニアイメージセンサは、256画素/ラインとし、20 μs /ラインの速度で画像検出を行う。すなわち、最高25kHzまでの周波数解析が可能である。リニアイメージセンサの出力は、パーソナルコンピュータに接続した画像処理基板に取り込まれる。取り込まれた画像を対象に画像解析を行い、ステージ移動時におけるx、y方向のひずみの量を算出するとともに周波数解析を行い、結果を表示する。走行ステージの速度は、リニアイメージセンサの駆動速度と検出画素寸法から求めた。なお、予備実験により相関係数演算を用いた位置ずれ検出の誤差を算出したところ、繰返し周期8画素で正弦波状に明るさが変化するパターンにおいて、最大誤差は0.015画素（ 3.75nm ）であった。

4.2 実験結果

ステージ走行中に θ 軸を駆動し、基準試料であるSiウェハを微小量回転させることで、強制的にヨーイングに相当する変位を発生させ、このときの画像から測定感度を換算した。測定結果を図7に示す。ヨーイング方向の変位を 170nm とした。この時の回転角は $0.84''$ に相当する。ヨーイングによる変位量と本測定手法によって得られた測定値との誤差より、本測定手法が測定感度10nmp-pを有することがわかる。

検出した画像の処理・解析に要する時間は、検出画像を 256×8000 画素 $\times 8\text{bit}$ 、テンプレート画像を 250×32 画素 $\times 8\text{bit}$ として、ひずみ量の計算に約1分、周波数解析に約1分であった（CPU: Pentium166MHz, メモリ: 48MB 使用）。なお、画像処理の探索範囲は ± 1 画素とした。

上述したように、本方式が目標とした測定感度を有し、実用性を有することを確認できたが、本方式では、ポジションセンサとして使用したガラススケールの製作誤差、その取付け位置によるアップ誤差が本質的には取り除けず、測定精度はガラススケール

Fig. 7 Results of position measurement

(a) X-direction

(b) Y-direction

Fig. 8 Results of position measurement

の製作誤差、アッペ誤差、および画像検出時のSN比等により決まる。また、光による検出方式のため、光学系の照明のちらつきも測定精度に影響を及ぼす。10nmp-pを切る精度を確保するには、これらのより一層の改善が必要である。また、ステージが置かれた温度環境によるガラススケールの伸縮には、校正が必要である。しかしながら、レーザ計測システムで問題となる屈折率変動等への配慮が不要であり、比較的簡便なシステムを提供し得るという利点がある。

なお、計測用パターンはSiウェハに描画しており、アライメントマークを設けて位置決め可能な構成とした。斜め配置等の誤差は小さく問題ないレベルにある。

上述した提案方法により、実際のステージの精度測定を行った。測定結果の一例を図8に示す。同図(a)はピッチングにより生じるx方向の画像のひずみ量であり、ステージ精度は225 nm p-pである。同図(b)は同様にヨーイングにより生じるy方向の画像のひずみ量であり、ステージ精度は150 nm p-pである。

また、このひずみ量の測定結果から周波数解析を行った結果を図9に示す。測定したステージは走行時にy方向に約60Hz、x方向に約20Hzの周期で振動が発生することがわかった。これらの測定結果をもとに、振動発生要因を究明し、ステージの精度向上を図ることが可能となった。

開発した手法は、光学系の視野中心に座標系を有するThru The Lens方式に基づいている。これは測定点がステージ移動に伴い変化するレーザ計測システムによる従来方法とは観測座標系が異なるものである。すなわち、加工点や観測点が本体の光

Fig. 9 Results of frequency analysis

学系により固定されている加工装置と比較に基づく検査装置に対して、より目的に合致した精度評価を与え得るものである。

また、レーザ計測システムによる従来方法では、反射ミラーの重量が加算されるため、実際の使用時と計測時が異なることになり、荷重分布が異なる系で測定を行わねばならないという課題がある。このため、通常の使用状態における走行を再現することができない。これに対し、開発した手法は、通常の使用状態での計測を実現可能としたものである。

5. 結 論

画像解析を用いて高精度なステージ精度測定が可能なることを明らかにした。開発した手法は、ステージを走行させながら、Siウェハからなる軽量の基準試料上に描画した計測パターンの画像を検出し、この画像を解析して、想定したステージ軌跡からのひずみ量を測定するものである。

提案した手法に基づき構築した測定したシステムは、

- (1) 測定ストローク：2mm
- (2) 周波数解析：最大 25kHz
- (3) ヨーイングにより生じる想定軌跡からのずれ量測定感度：10 nmp-p

なる性能を有する。

今後の課題は、ナノメートルオーダの計測精度追求である。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、高精度画像検出回路の開発に御協力頂いた牧平坦氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 芝 正孝, 見坊行雄, 前田俊二, 窪田仁志, 平塚信次: 半導体ウェハ外観不良検査の効率的運用, 日立評論, **79**, 10 (1997) 61.
- 2) 牧野正信, 富田良幸, 木村定彦, 保木慶則: リニアモータ XY ステージを用いた高精度レーザ加工システム, 1997年度精密工学会秋季大会 学術講演会講演論文集 (1997) 594.
- 3) 牧野内 進, 林 豊, 神谷三郎: ステップの新露光方式と位置決め技術の改新, 精密工学会誌, **61**, 12 (1995) 1676.
- 4) J.D.Buckley and C. Karatzas: "Step and scan: A System Overview of a New Lithography Tool," Proc.SPIE. **1088**(Optical/Laser Microlithography II), (1989)424.
- 5) 福田恵明: 高精度 Step-and-Scan 移動機構, 精密工学会誌, **64**, 7(1998) 1000.
- 6) 大塚二郎, 坂戸啓一郎: 精密位置決め機構設計, 工業調査会 (1996).
- 7) 斎藤 洋: レーザスケールによる精密位置決め, 精密工学会超精密位置決めに関する専門委員会 前刷集, **96**, 5 (1996) 9.
- 8) 高木幹雄, 下田陽久: 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, (1991) 707.
- 9) 前田俊二, 小野 眞, 窪田仁志, 中谷光雄: 赤外線画像マッチングによる TFT 基板の高精度ショート欠陥検出, 信学論(D-II), **J80-D-II**, 9 (1997) 2333.
- 10) 鶴田匡夫: 第 4 光の鉛筆, 新技術コミュニケーションズ (1997) 440.
- 11) 鶴田匡夫: 続 光の鉛筆, 新技術コミュニケーションズ (1988) 223.