圧電素子による精密位置決めステージの制振に関する研究*

田 中 慶 一**

Study of Vibration Suppression on Positioning Stage by using Piezoelectric Device

Keiichi TANAKA

It is possible to suppress a disturbance of vibration and to improve a positioning accuracy if piezoelectric device which has higher responsiveness and force density is applied to ultra-precision stage of lithography tool as a damping element. In this paper, dynamics of piezoelectric device with feedback of capacitance sensor are measured and identified to make its model and the temperature rise of the device is estimated, at first. Thereafter, two examples of vibration suppression in lithography tool are introduced and the effectiveness is verified by control simulation including the model of device.

Key words: piezoelectric device, ultra-precision stage, vibration suppression, lithography tool

1. 緒 言

半導体露光装置は、図1に示す露光原理により、ウェハ上の複数のIC領域に最小20~30nmの線幅の回路パターンを形成する装置であり、そのために原板であるレチクルを搭載するレチクルステージとウェハを搭載するウェハステージは数nmの位置決め精度で同期を取る必要がある。特にレチクルの位置誤差はウェハ上の全てのICのパターン誤差となるため、微小な振動を遮断する必要がある。また、ステージの位置決め計測手段を、0.15nmの計測分解能を持つレーザ干渉計とし、計測誤差となる空気揺らぎや構成部材の熱膨張を最小化するために高精度な温空調制御を採用している。図2にレーザ干渉計の計測によるステージ同期動作の形態を示す。通常はステージと光学ユニットを高性能な除振システムに搭載することで、振動外乱を約1/1000程度に減衰している。

ステージに注目すれば、制御対象であるステージ可動部の慣性主軸を装置座標に合せ、且つ駆動点を重心に一致させることで、制御軸間の干渉を最小限に抑制し、ステージ自身の振動発生を抑制するのが設計基本則である。しかしながら、装置の小型化や光学ユニットの寸法制限により可動ステージの形状が対称形ではなく、固有モードも複雑になるため、上記の基本則を厳守することが困難な場合が少なくない。つまり、制御軸以外の軸からの外乱の相互発生により、各軸の位置決め精度が悪化することになる。

そこで、この慣性テンソルが対称行列でない可動ステージの位置決め精度を向上させる方法として、通常の制御帯域では剛体と見なしてよいほどに、ステージの剛性向上、つまり固有モードを高周波数帯域まで引き延ばす方法と、固有モードの振幅が大きい位置に除振手段を貼り付けて制振する方法がある。更に除振手段には、マスダンパや圧電素子によるエネルギー散滅手段を設けるパッシブ除振方式と、電気入力による変位により振動を打ち消す、逆圧電効果を利用するアクティブ除振方式とがあり、後者の方が制振のためのエネルギーを投入する分だけ一般に除振効率が高い。特に、半導体露光装置の筐体制振にアクティブ除振技術を適用し

た研究は多数見受けられる^{1)~3)}。

圧電素子は、磁界や電界の印加により歪を発生させる磁歪アクチュエータや電歪アクチュエータに比べ、高い歪（変位）を得ることが知られている。また圧電効果と逆圧電効果の2面性を持つため、動作条件によっては、圧電ダンパのようなパッシブ制振との併用が可能であると考えられる。

Fig.1 Principle of exposure

Fig.2 Synchronization of stage motion

* 原稿受付 平成 24 年 10 月 24 日

** 正 会 員 (株)ニコン コアテクノロジーセンター
(横浜市栄区長尾台町)

露光方式によらず、今後もムーアの法則に倣うよう IC の微細化が進行するため、音響を含めた内/外乱振動の制振技術は、装置内の精度に関わる様々な箇所に適用され、入力される振動エネルギーを駆動源とするなど、装置全体としてのスマート化が展開されるものと考えられる。

本論文では、まず圧電素子の基本特性を説明し、その後、半導体露光装置の高精度位置決めステージの内、特に歩留まりに影響を与えるレチクルステージに対し、ステージ振動と逆位相の推力を発生する圧電素子を追加して、振動を打ち消すことで位置決め精度を向上させる事例を 2 つ取り上げる。これらの装置は既に R&D 機（研究開発号機）として市場に投入されたものであり、評価号機であることからステージの速度・加速度は低い。両装置とも 20~30 nm の線幅の露光を実現しているが、今後の量産化、つまり高いスループット（1 時間当たりのウェハ処理枚数）に向けた高速化と振動耐性（床振動レベル：VC-C⁴）相当、振動振幅：1 μm ）を得るための精度向上が必要である。

2. 圧電素子の動特性

2.1 位置決め特性

ステージ制振への適用の前に、静電容量センサによる変位計測に基づく、圧電素子単体の電圧・変位特性と位置決め分解能および応答性を評価する。図 3 に、静電容量センサ（Queensgate 製 NXB-S, Range:20 μm , Noise:<0.005 nm/ $\sqrt{\text{Hz}}$ ）を位置決め制御に用いた、圧電素子（Denso 製 P2-10, 発生力:2 kN, 変位:50 μm ）の評価装置構成を示す。静電容量センサの隙間を 10 μm に初期調整するため、マイクロゲージ粗動機構と、微調整用圧電素子（調整後変位を固定）を設けた。当該装置は、床振動規格である VC-C 相当の床に設置されたアクティブ除振装置（-30~-20 dB @ 10 Hz）上に搭載されている。

露光装置では、露光光の幅をステージが通過する時間内で位置偏差が平均化されるため、ステージ速度を 0.1 m/sec, 光の幅を 8 mm とした場合、約 0.1 sec 間の平均値で位置偏差を評価する。よって、静電容量センサ出力の 0.1 sec 間平均値をフィードバック制御に使用し、発振器で発生させた信号によりドライバを介して圧電素子を駆動した。図 4 に評価装置のシステム構成を示す。4 nm 以下の微小変位を駆動する場合は、電気ノイズ除去のため、発振器からの出力信号を一旦 100 分の一に縮小し圧電素子を駆動し、静電容量センサにより計測された出力信号を 100 倍して制御器に帰還している。

Fig.3 Test stand of piezo evaluation

Fig.4 System configuration of test stand

Fig.5 Step response at piezo feedback

図 5 にステップ応答特性を示す。同図(a)は微動の場合で、ステップ幅は上段が 0.5 nm, 下段が 1.0 nm, 同図(b)は粗動の場合で、ステップ幅は上段が 1 μm , 下段が 3 μm である。各グラフは左から静電容量による変位計測値、偏差率及び圧電素子への指令電圧を示している。過渡状態での偏差の推移を把握するため制御ゲインを下げた場合、nm ステップで数%以下、 μm ステップで 1%以下の位置偏差を得ており、更に制御ゲインを上げれば高い応答性が得られるものと考えられる。

2.2 発熱量

圧電素子によるサブナノオードの位置決めが必要な装置は、半導体露光装置のステージに代表されるように、環境からの振動絶縁の他に、環境からの伝熱遮断や、装置自身の発熱の抑制が必要となる。露光装置の仕様にもよるが、圧電素子の駆動による発熱量が許容できるか否かの判断は重要であり、熱膨張による位置誤差を考慮した場合、ウェハ 1 枚当たりの露光時間内の温度変動は 0.05 $^{\circ}\text{C}$ 以下が望ましい。以下に代表的な見積りを示す。

圧電素子の変位なり発生力は入力電圧にほぼ比例し、この比例係数は材質の圧電歪み係数と弾性コンプライアンスの関数となる重要な性能指数である。また、その時の発生電流振幅 I_{amp} は、 $I_{amp} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot E_{amp} \cdot duty$ と表現できる。ここで、 f は駆動周波数、 C は圧電素子の静電容量、 E_{amp} は入力電圧振幅、 $duty$ は駆動デューティを表す。ここで求める発熱量 $Q (= I_{amp} \cdot E_{amp} / 2)$ が全て輻射伝熱のみで周囲に放熱されると仮定すると、輻射伝熱

Table 1 Temperature rise of piezo

Displacement nm	Frequency Hz	Voltage amplitude A	Current (rms) A	duty %	Heat W	Temperature rise of piezo K
5	200	0.6	1.06E-04	5	2.24E-06	0.003
10	200	1	2.11E-04	5	8.96E-06	0.013
20	200	2	4.22E-04	5	3.58E-05	0.053
30	200	4	6.33E-04	5	8.06E-05	0.119
50	200	6	1.06E-03	5	2.24E-04	0.329
100	200	12	2.11E-03	5	8.96E-04	1.311

の式より、圧電素子温度上昇は $\Delta T = (Q / (\epsilon \cdot \sigma \cdot S) + T_0)^{1/4} - T_0$ の式より求まる。ここで、 ϵ は放射率、 σ はステファン・ボルツマン定数 ($= 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$)、 S は圧電素子表面積、 T_0 は周囲の温度を表す。表 1 に圧電素子形状が $\phi 20 \times 20 \text{ mm}$ で、表面放射率 ϵ を 0.06 とした場合の、発生電流、発熱量及び圧電素子の温度上昇を示す。100 Hz 以上の振動外乱は、構造物の減衰効果により低減でき、一方構造物の固有振動数が 800 Hz 以上となるように機構系を設計すれば、圧電素子の駆動周波数を 200 Hz まで高めることができる。そこで実験に用いた圧電素子 (Denso 製 P2-50) の電圧-変位特性を用いて、駆動周波数を 200 Hz に固定した場合の、変位違いの発熱量及び圧電素子の温度上昇を計算した。ステージ駆動系の許容温度上昇を約 0.05 °C に抑制すれば圧電素子の変位は 20 nm まで確保できると考える。

Fig.6 Piezo model

Fig.7 Test results on piezo identification

2.3 数値モデル化

次章の圧電素子によるステージ制振性能評価に当たり、2.1 節で実測した圧電素子の電圧-変位特性を予め数値モデル化しておく必要がある。図 6 に圧電素子の matlab/simulink モデルを示す。圧電素子への物理的な入力には電圧であるが、荷重及び変位は負荷や温度により変化するため、モデルには素子に加わる負荷と雰囲気温度も入力可能とし、各々、電圧-変位特性及び温度-変位特性に影響を与えるように設定している。また、変位は素子変位と弾性体を介した変位の 2 つを出力するが、前者の変位には圧電素子単体の電圧-変位特性を考慮し、その遅れ時間を同定パラメータとした。一方、後者の変位は圧電素子自身を構造物と見なして二次遅れ要素とし、その質量と剛性、減衰率を同定パラメータとした。図 7 に実機に同定した結果を示す。実機の特性が数値モデルに反映していることが分かる。

3. 高精度位置決めステージへの適用

3.1 電子ビーム露光装置のレチクルステージ

3.1.1 構成と現状

露光に電子ビームを用いた露光装置⁵⁾では外部磁界による電子ビームの偏向を防止する工夫の一つとして、当該ビームの最も近い位置にある微動ステージの駆動手段として非電磁アクチュエータである圧電素子を使用している。図 8(a) は、露光パターンの原板である直径 6 inch のレチクル (マスク) を 2 枚搭載するレチクルステージの構造図を示している。レチクルが 2 枚あるのは、ウェハ上の同一チップに例えばレチクル A による a パターンを露光後、レチクル B による b パターンを重ね露光して、微細なパターン a+b を形成するためである。同ステージは粗動ステージと微動ステージとで構成され、X/Y 及び θ_z 方向に長ストロークで移動する 3 自由度駆動可能な粗動ステージの側面に、3 つの Z 駆動手段である圧電素子を介して Z/ θ_x / θ_y の 3 自由度駆動可能な微動ステージが搭載されている。つまり、微動ステージ上のレチクルは、位置決め基準である電子光学系 (図

Fig.8 Reticle stage for electron beam lithography tool

2 の Projection optics に相当) に対して 6 自由度の位置・姿勢制御が可能な構成としている。図 8(b) はデバッグ中の粗動ステージの写真であり、真空対応エアベアリング及び磁気シールド電磁リニアモータに関しては、参考文献 6) を参照し、ここでは説明を省略する。

図 8(c) に微動ステージ上の Z 駆動アクチュエータの配置を示す。各々の Z 駆動アクチュエータのストロークは $50\text{ }\mu\text{m}$ であり、内蔵する静電容量センサ (分解能: 10 nm) によりアクチュエータの直線性を補償している。微動ステージの X 及び Y 側面に Z を除く 5 自由度ステージ制御のためのレーザ干渉計 (分解能: 0.15 nm) による計測用反射ミラーを設置し、水平垂直に複数のレーザ軸を配置することで XY のみならず、微動ステージの θ_x (ピッチング), θ_y (ローリング) 及び θ_z (ヨーイング) も計測可能としている。Z 軸のステージ制御に関しては、レチクル面を直接オートフォーカス (分解能: 50 nm) で測長した計測値を用いている。ステージの位置決め仕様は、 $X/Y: 1\text{ }\mu\text{m}$, $Z: 0.3\text{ }\mu\text{m}$, $\theta_x/\theta_y: 150\text{ }\mu\text{rad}$, $\theta_z: 300\text{ }\mu\text{rad}$ であり、 50 Hz の制御帯域を含め、実機で満足していることを確認している。類似の機構を持つステージの実測結果として文献 8) を参照のこと。図 8(d) は単体評価中の微動ステージの写真である。

Z 駆動アクチュエータ単体の写真を図 8(e) に示す。アクチュエータは真空対応を施した PZT 積層体の圧電素子であり水平配置による水平駆動を、フレクシャ (平行ヒンジ) を介して垂直駆動に変換している。変位変換率は 1 とし、剛性確保のため変位の拡大は行わない。なお、圧電素子単体のモデル化は「2.3 数値モデル化」と同じ方法を用いた。

3.1.2 制振対策と効果

前項で現状のステージは仕様を満足することを述べたが、低速/低加速の露光時 (100 mm/s , 0.4 G) の床振動を実測してみたところ振動振幅が $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 程度 (VC-E⁴⁾ 相当) であった。量産時は装置周辺にも振動源が多数あるため、少なくとも VC-C 相当に耐える必要がある。ここでは、ステージの速度/加速度を 10 倍にし、且つ床振動レベルを 10 倍にした駆動・環境条件でのステージ位置決め精度を、matlab/simulink を用いて評価する。

図 9 に図 8 で示した粗動ステージ可動部と微動ステージの FE モデル及び固有モードを示す。これらのモードは実機のモーダル実験から同定してある。

次に、この実機同定された微動ステージモデルに制振対策を施す。具体的には、図 10 に示すように、微動ステージを支持するアームの側面に、伸縮可能なシート状の圧電素子 2 枚を上下に貼り付け、同相励起ならばアームの伸縮モード、逆相ならばアームの曲げモードを発生させて、上記振動の固有モードを打ち消す。圧電素子には図 6 のモデルを使用した。レーザ干渉計及びオートフォーカスの計測サンプリングを実機に合わせて 10 kHz とした場合の制振制御シミュレーション結果を図 11 に示す。床振動振幅を $1\text{ }\mu\text{m}$ とし VC 周波数レンジ ($\sim 80\text{ Hz}$)⁴⁾ に基づき入力した。同図 (a) はステージを Y 方向に位置決めした状態の、Z 方向の $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ステップ駆動における、制振制御有無でのレチクル中心 Z 位置変位を示している。制振制御がない場合の振動振幅 $\pm 2\text{ }\mu\text{m}$ が、制振制御を加えることで $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 以内に抑えられている。一方、同図 (b) は粗動ステージの Y 方向に 4 G で 0.1 sec 間加速させた時のレチクル中心 Z 位置変位を示しており、加速終了後 0.3 sec 以降は仕様の $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 以下に収まっている。

Fig.9 Identification results of fine stage mode

Fig.10 Concept of vibration reduction

(a) Z positioning at stage center under servo control

(b) Z positioning at stage center during Y acceleration of 4 G

Fig.11 Simulation results of vibration control

3.2 極紫外線露光装置のレチクルステージ

3.2.1 構成と現状

露光に波長が 13.5 nm の極紫外線を用いる極紫外線露光装置は、線幅が 22 nm 以下の IC 回路パターンを得る次世代露光装置⁹⁾であり、レジスト感光のためのエネルギーを確保するためには、光学系やステージを真空環境 (10^{-5} Pa 程度) に維持する必要がある。真空対応のエアベアリングも適用可能だが、この機構はステージ速度の増加に伴う真空度の低下が懸念となる⁹⁾。量産時の高スループット (目標: 100 WPH (wafer per hour)) にも対応できるよう、ステージの高速・高加速化を検討した結果、磁気浮上を採用し、粗微動一体にして軽量な 6 自由度駆動可能なレチクルステージを幾つか考案している⁹⁾¹⁰⁾。

図 12 はその内の 1 案であり、X 方向の左右にあるリニアモータの永久磁石で浮上と推進を兼ねている。永久磁石が発生する磁界が電機子コイルの位置において理想の正弦波である場合、位相を変えた浮上電流と推進電流とを重ね合わせて電機子コイルを励起すれば、浮上と推進とが干渉することなく独立に制御可能である。しかしながら、電機子コイルでの磁束密度が空間的に正弦波分布から外れた場合は、交流電流の入力で、ステージ浮上時における推進方向の振動が大きくなることが懸念される。

3.2.2 制振対策と効果

ステージ位置決め誤差である振動を制御するための制振力を得るためには適当な慣性質量が必要である。そこで、ステージの推力発生源である永久磁石体 (永久磁石と磁気回路のヨーク) を圧電素子で駆動する検討を行った¹¹⁾。永久磁石の振動振幅が微小であればステージを位置決め制御するモータ推力への影響はないと考える。図 13 に永久磁石を駆動する圧電素子と一方向 (Y 方向) にのみ変位するフレクシャ機構を示す。前章でモデル同定した圧電素子を使用し、制御帯域を 200 Hz としている。

図 14 にレチクルステージモデルに圧電素子を組み込んだ matlab/simulink モデルを示す。ステージ加速度指令値とカルマンフィルタの加速度推定値との偏差に応じた電圧を圧電素子に入力している。図 15 に加速度 1 G 後に速度 0.25 m/sec でスキャン動作する際の、進行方向 (Y 方向) のステージの位置偏差を示す。制振パラメータとして慣性質量である永久磁石体の質量を 0.1 kg、1 kg 及び 2 kg とした。動作開始から位置偏差が ± 1 nm 以内に入る時間が、制御がない場合は 0.116 sec だったが、制御を加えることで 0.11 sec 前後となり、圧電素子の追加によりステージの整定性が改善できることが分かる。

Fig.12 Concept of magnetic levitated reticle stage

Fig.13 Piezoelectric device mounted on reticle stage

Fig.14 Control simulation model with piezoelectric device

Fig.15 Simulation result of vibration control

5. 結 言

本研究では、まず圧電素子の動特性を実測した結果をモデル化した後、半導体露光装置の高精度位置決めステージの制振を適用したケースを2つ紹介した。得られた見解を以下に示す。

1) 圧電素子の性能を実測し、パラメータを同定することで素子の特性をモデル化した。

2) モデル化した圧電素子をステージ筐体に貼り付け、その伸縮によりステージ振動モードを抑制することでステージ振動が低減できることをシミュレーションで確認した。

3) モデル化した圧電素子をステージ駆動源であるリニアモータの永久磁石体とステージとの間に設置し、加速度情報を元にステージ振動を抑制し、整定性が向上できることをシミュレーションで確認した。

参 考 文 献

- 1) 涌井伸二, 小島大典, 高橋正人, 山本幸治: 絶対変位センサのアクティブ除振装置への適用, 精密工学会誌, **73**, 10, (2007), 1169.
- 2) 高橋正人, 涌井伸二, 牧野内進: 除振装置の加速度センサの補正方法と高帯域化, 精密工学会誌, **75**, 7, (2009), 853.
- 3) 高橋正人, 涌井伸二, 牧野内進: アクチュエータの多点配置によるアクティブ除振装置の広帯域化(機械力学, 計測, 自動制御), 日本機械学会論文集 (C 編), **76**, 763, (2010), 550.
- 4) Colin G. Gordon : Generic Vibration Criteria for Vibration-Sensitive Equipment, Proceedings of SPIE, 1619, (1991), 71.
- 5) 岡本和也, 鈴木一明, 沖野輝昭, 河田真太郎, 守田憲司, 秦一成, 内川清, 谷本昭一, 山口武: 次世代露光機 EB ステップの開発, 電子情報通信学会技術研究報告. ED, 電子デバイス, **99**, 497, (1999), 53.
- 6) 田中慶一: 露光装置における6自由度磁気浮上ステージ開発-背景と第1報-, 精密工学会誌, **75**, 4, (2009), 501.
- 7) 田中慶一: 電子線露光装置における環境適合ステージ開発, 精密工学会誌, **77**, 7, (2011), 668.
- 8) 田中慶一: 露光装置におけるパラレルリンク駆動ステージの開発-機能検証-, 精密工学会誌, **76**, 3, (2010), 304.
- 9) 村上勝彦, 岡崎信次: EUV リソグラフィと露光装置 (<小特集> リソグラフィ用 EUV (極紫外線) 光源研究と将来展望, プラズマ・核融合学会誌, **79**, 3, (2003), 221.
- 10) 田中慶一: 露光装置における6自由度磁気浮上ステージ開発-設計検証 (第2報), 精密工学会誌, **75**, 5, (2009), 605.
- 11) 田中慶一: 特許第 4590846 号