光ヘテロダイン干渉式位置検出法*

鈴木 雅 則** 宇 根 篤 暢**

An Optical-Heterodyne Interferometry Alignment Technique

Masanori SUZUKI and Atsunobu UNE

A new optical-heterodyne interferometry alignment technique with diffraction gratings is developed for quarter micron X-ray lithography. To obtain detection accuracy as good as a few tens of nanometers, a phase signal is utilized instead of a conventional intensity signal. The relative lateral displacement between mask and wafer is detected by measuring the phase difference between heterodyne beat signals generated by projecting two laser beams from +1st-order and -1st-order diffraction directions on the mask and wafer grating marks. The displacement signal is not influenced by gap variation using symmetric optics. A lateral displacement detection resolution better than 10 nm is obtained by the experimental alignment setup. Using this optical-heterodyne interferometry alignment method, a stepper is developed for synchrotron X-ray lithography. Alignment servo control is established by combining a 4-channel alignment system with highly accurate stages. The total overlay accuracies of $\pm 0.07 \mu\text{m}$ (3σ) are achieved.

Key words: optical-heterodyne interferometry, beat signal, phase signal, grating, alignment, X-ray lithography, lateral displacement detection, positioning

1. 結 言

X線露光技術は、高解像性を有したパターン形成技術であり、数百Mbit以上のULSIを実現するための、光露光技術にかわる次世代のクォータミクロンリソグラフィ技術として注目されている。最小線幅 $0.2\sim 0.3 \mu\text{m}$ の微細パターンを高速・高精度で転写するためには、ステップ・アンド・レピート型のX線露光装置、いわゆるX線ステッパの開発が必要不可欠である。

この装置開発には、LSIパターンを $\pm 0.05 \mu\text{m}$ 以下の精度で重ね合わせる高速・高精度のアライメント技術が重要なキー技術になる。また、この技術にはマスク・ウェハ間の相対位置ずれ量を検出するだけでなく、長時間露光時における位置ドリフトをなくすため、露光中もサーボ制御できることが要求される。

これまでに、これらの要求条件を満足させるために、多くのアライメント技術が提案されている。

一つは、顕微鏡・ITV撮像・画像処理方式を用いた

アライメント法である^{1)~3)}。この方法は、顕微鏡による光学像を用いることから解像度に限界があり、高い位置検出分解能が得られないという欠点をもつ。

また、高分解能をねらいとして回折格子を用い回折光の強度信号を位置合わせに利用する方法があるが⁴⁾⁵⁾、光源の出力変動、プロセス層による反射率、形状変化等で強度信号が変動し検出信号劣化の要因となる。さらに、ギャップ変動の影響を受けやすく、位置合わせを行うために所定のギャップにあらかじめ設定する必要がある。

本論文では、これらの欠点をなくすために、回折光の位相信号を利用する光ヘテロダイン干渉法を考案し、理論、及び実験の両面から相対位置ずれ量を高精度で検出制御できることを実証する。また、このアライメント法をSORステッパに適用し、3軸アライメントの位置合わせ精度、及び実用上の問題について評価した結果について明らかにする。

2. 回折格子を用いた位置検出法

2.1 基本 原理

回折格子を用いた光ヘテロダイン干渉法の原理を図1に示す。実線で示す周波数が互いに数十から数百kHz異なる二つの直線偏光光 f_1, f_2 を、式(1)で示す

* 原稿受付 平成2年7月9日。1989年度精密工学会秋季大会学術講演会(平成元年11月7日)にて発表

** 正 会 員 日本電信電話(株)LSI研究所(厚木市森の里若宮3-1)

Fig. 1 Principle of optical-heterodyne method
Beat frequency: $f_b = |f_1 - f_2|$

1次回折角 θ_{11} , θ_{12} の方向から回折格子に入射すると, f_1 , f_2 の-1次回折光はいずれも回折格子面に垂直な方向に出射される.

$$\left. \begin{aligned} \theta_{11} &= \sin^{-1}(\lambda_1/P) \\ \theta_{12} &= \sin^{-1}(\lambda_2/P) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで, P は回折格子ピッチであり, λ_1 , λ_2 は周波数 f_1 , f_2 の光の波長である.

2つの光の振幅強度 E_1 , E_2 は, 式(2)のように表される.

$$\left. \begin{aligned} E_1(t) &= A_1 \exp(j 2\pi f_1 t + \phi_1) \\ E_2(t) &= A_2 \exp(j 2\pi f_2 t + \phi_2) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで, A_1 , A_2 は振幅, ϕ_1 , ϕ_2 は初期位相である.

回折格子面に垂直な z 方向で検出される光ヘテロダイナミクスビート信号 $I_r(t)$ は,

$$\begin{aligned} I_r(t) &= |E_1(t) + E_2(t)|^2 \\ &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(2\pi f_b t + \Delta\phi_0) \end{aligned} \quad (3)$$

で表され, $f_b = |f_1 - f_2|$, $\Delta\phi_0 = \phi_1 - \phi_2$ である.

回折格子が x 方向に Δx 微小変位して点 C が点 C' に移動した場合の周波数 f_1 , f_2 のレーザ光の光路長の変化量は, それぞれ $\Delta x \sin \theta_{11}$, $-\Delta x \sin \theta_{12}$ となる. また, f_1 , f_2 の波長 λ_1 , λ_2 はほぼ等しく, 式(1)から $\theta_{11} \approx \theta_{12}$ が成立する. 従って, 回折格子が Δx だけ微小変位した場合の光ヘテロダイナミクスビート信号 $I_b(t)$ は, 次式で表される.

$$\begin{aligned} I_b(t) &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos\{2\pi f_b t + \Delta\phi_0 \\ &\quad + 2\pi\Delta x \sin \theta_{11}/\lambda_1 - (-2\pi\Delta x \sin \theta_{12}/\lambda_2)\} \\ &= A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(2\pi f_b t + \Delta\phi_0 + \phi) \end{aligned} \quad (4)$$

(a) Optical scheme. Mask-to-wafer gap: ΔG
Relative lateral displacement: Δd

(b) Gap variation

Fig. 2 Optical-heterodyne relative lateral displacement detection method

$$\phi = \frac{2\pi\Delta x}{P/2} \quad (5)$$

すなわち, ビート信号の位相差は回折格子の変位量 $P/2$ を周期として直線的に変化する.

2.2 位置ずれ検出

X線露光における位置合わせは, 数十 μm で近接して対向したマスクとウェハ間の相対的な位置ずれ量を検出し, 位置ずれ量が $0 \mu\text{m}$ となるように制御することである. このため段差のある2物体間の相対位置ずれを検出できる光ヘテロダイナミクス干渉式位置検出法を開発した. 図2(a)に原理図を示す.

回折格子マークはマスク, ウェハ上に格子ライン方向 (y 方向) にずれて配置され, ウェハ回折格子にはレーザ光を透過するマスクメンブレン窓が設けられる. 図2(b)に示すように, マスク回折格子はメンブレン上に形成されたX線吸収体ボタン, ウェハ回折格子はエッチングにより形成された段差ボタンであ

る。マスク回折格子とウエハ回折格子のピッチは等しい。これらの回折格子は、同一レーザビームスポット内に配置され、同位相平面波を照射される。

周波数 f_1, f_2 の2つの直線偏光レーザ光は、回折格子面に垂直な z 方向に対して左右対称の $+1$ 次回折角と -1 次回折角の方向から入射する。これら2つのレーザ光の -1 次回折光は、マスク回折格子、及びウエハ回折格子の格子面に垂直な z 方向に回折・合成され、光ヘテロダイナミクス干渉光が生成される。マスク、ウエハからの光ヘテロダイナミクス干渉光は、光電変換器によりビート信号 I_M, I_W として検出される。

ここで、 I_M は式 (4) において $\phi = \phi_M$ とおくことにより表される。 I_W は図 2 (b) に示すように、マスクとウエハがギャップ ΔG だけ離れて対向する場合、 I_M と比較して f_1, f_2 の光路がそれぞれ $\Delta G(1+1/\cos \theta_{11}), \Delta G(1+1/\cos \theta_{12})$ だけ長くなるが、左右対称光学系の採用により互いにキャンセルされた式 (6) で表される。

$$I_W(t) = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(2\pi f_b t + \Delta\phi_0 + \phi_w) \quad (6)$$

ここで、 A_1, A_2 は振幅である。従って、ギャップ ΔG が変化してもビート信号の位相には変化を与えないといえる。

マスクとウエハ間の相対位置ずれ量 Δd は、マスクのビート信号 I_M を基準として、ウエハのビート信号 I_W との位相差 $\Delta\phi_d$ を測定することにより検出できる。

位相差 $\Delta\phi_d$ は、式 (4), (6) をもとにすると次式で表され、 $P/2$ を1周期として直線的に変化する。

$$\Delta\phi_d = \phi_w - \phi_M = \frac{2\pi\Delta d}{P/2} \quad (7)$$

3. シミュレーションと実験結果

3.1 位置検出

レーザ光源として2周波直交偏光 He-Ne レーザ装置 (STZL⁶⁾)、ステージとして電磁力駆動弾性板ばね機構¹⁾を用い、相対位置ずれ量 Δd と位相差 $\Delta\phi_d$ の関係を実験的に求めた結果を図 3 (a) に、理論計算した結果を図 3 (b) に示す。

マスク回折格子は、膜厚 $2\mu\text{m}$ の SiN マスクメンブレン上に形成された膜厚 $0.6\mu\text{m}$ の Ta 吸収体パターンであり、ウエハ回折格子は、Si 基板をエッチングして形成した段差 $0.5\mu\text{m}$ の溝パターンである。これらの回折格子のピッチは $4\mu\text{m}$ 、大きさは $\square 200\mu\text{m}$ である。

相対位置ずれ量 Δd と位相差 $\Delta\phi_d$ とは線形性を示

(a) Detection signal measured experimentally

(b) Calculated phase signal

Fig. 3 Lateral displacement signals
Beat frequency; 128 kHz, Diffraction grating pitch; $4\mu\text{m}$

し、周期は $2\mu\text{m}$ ($=P/2$) である。実験結果は、計算結果と良く一致する。

3.2 サーボ制御

上記の実験装置を用い、1軸 (x 方向) について位置合わせ実験を行った。マスクを固定し、ウエハを xy ステージ上に配置してギャップを $50\mu\text{m}$ に設定し、位置ずれ検出信号 $\Delta\phi_d$ を xy ステージの駆動制御部に送り、 $\Delta\phi_d = 0^\circ$ に位置合わせ制御した結果を図 4 に示す。位置合わせ点 0° に対し位相差 $\pm 0.5^\circ$ 以下 (格子ピッチ $P = 4\mu\text{m}$ として、 $4000/(4 \cdot 360) \approx \pm 3\text{nm}$ に相当) の精度に制御されており、nm オーダの位置検出分解能が期待できる。

4. 実用上の問題

4.1 多重干渉

X 線露光ではマスクとウエハを数十 μm に近接した状態で位置合わせを行うため、レーザ光がマスクとウエハ間で多重反射する。この多重反射による位置合わせ精度への影響について検討した。

Fig. 4 Relative lateral displacement alignment
Diffraction grating pitch; $4\ \mu\text{m}$, Gap; $50\ \mu\text{m}$

Fig. 5 Mask-to-wafer multiple reflection

図5に多重反射による干渉の様子を周波数 f_1 の光についてのみ示す。マスク回折格子、及びウェハ回折格子に対して入射レーザー光が回折して生じる所望の回折光を実線で、マスク・ウェハ間で反射して生じる不要な回折光の例を破線で示す。反射光としては、マスク・ウェハ間でそれぞれ1回ずつ全反射、あるいは1次回折して検出側に射出する回折光のみを示した。

図5(a)において実線と破線で示す回折光の光路長差は、レーザー光の反射される面(ウェハ面)の z 軸方向の変動、すなわちギャップ変動に対して変化する。光路長差の変動は、周波数が同じ f_1 であるこれらの回折光の合成光に振幅変動(強度変化)として現れる。同様のことは、周波数 f_2 のレーザー光についても言える。

一方、周波数 f_1, f_2 のレーザー光の入射光学系は、 z 軸に対して左右対称光学系であるため、ギャップ変動による光路長変化は、周波数 f_1 と f_2 のレーザー光で同じだけ生じる。従って、周波数 f_1 と f_2 のレーザー光間

(a) Mask beat signals calculated as a function
of mask-to-wafer gap. $\Delta G=50\text{--}55\ \mu\text{m}$

(b) Beat signals detected experimentally
by gap variation.
 $2\ \text{V/div}$, $5\ \mu\text{s/div}$

Fig. 6 Waveform variation
Beat frequency; $128\ \text{kHz}$

には光路長差は生じなく、両者の合成光である光ヘテロダイン干渉ビート信号の位相には影響を及ぼさない。上記のことは、図5(b)のウェハ回折格子の場合についても成立する。

この多重反射条件において、ギャップ変動に対するマスク回折格子からの光ヘテロダイン干渉光のビート信号 I_M を計算した結果を図6(a)に示す。ギャップ変動に対し、 $\text{INTENSITY}=2.00$ を中心としてビート信号の振幅は変動するが、位相変化は生じない。

このことは、ギャップを $\pm 5\ \mu\text{m}$ の範囲で変動させた場合の図6(b)に示す実験結果でも明らかである。

従って、本方式によれば、多重干渉が直接、位相に影響することではなく、しかも、ギャップに無関係に位置合わせを行うことができるので高い位置合わせ精度を達成できる。

Fig. 7 Inclination error of alignment optics

4.2 光学系傾斜の影響

光学系傾斜により光学系の対称性が崩れた場合に発生する検出精度に及ぼす影響について検討した。左右対称光学系の一方のみが傾いた場合、あるいは互いに反対方向に傾いた場合、回折光の干渉性が劣化しビート信号の検出が困難になる。

ここでは、ビート信号が発生する条件を満たすために、左右光学系が同一方向に同じ角度だけ傾斜した場合に生じる位置誤差について解析した。

この時、光学系の左右対称性の崩れから、(回折格子ピッチ)/2の周期の変化、及びギャップ変動に対する光路長差が生じる。図7に左右対称光学系が、回折格子面に垂直な z 方向に対して $0\sim 2^\circ$ 傾斜した場合の検出誤差の計算結果を示す。周期誤差は、光学系が傾いた時の周期と正規の周期($P/2$)との差 ΔP の($P/2$)に対する割合を表した値である。周期誤差は光学系の傾き 2° でも $1.2\text{ nm}/(360^\circ\text{ 当たり})$ ($P=4\text{ }\mu\text{m}$ の場合)と小さく、位置合わせの誤差要因とはならない。

一方、破線で示すように、ギャップ変動 $1\text{ }\mu\text{m}$ に対する位置合わせ誤差は、傾き 2° で 35 nm と計算される。

光学系の傾きは、 $0.2'$ 以下の精度で容易に調整できるので、ギャップ変動が数 μm 以上あっても位置合わせ誤差は 10 nm 以下となり、実用上問題はない。

5. 3軸アライメントへの適用

本光学系を縦型ステージに組み込んだSORステップを開発した⁷⁾⁸⁾。x, y, θ の3軸アライメントが可能で、4チャンネル方式の光ヘテロダイナミクス干渉式位置検出光学系を図8に示す。光学系は1チャンネルのみ示した。位置検出マークはマスクとウエハ上のA, B, C, D

Fig. 8 Optical-heterodyne experimental alignment setup. Four pairs of alignment marks are formed at points A, B, C and D

の4か所に設けた。

前述のレーザ光源から発したレーザ光は、偏光ビームスプリッタPBSにより周波数 f_1, f_2 の2つのレーザ光に分離される。周波数 f_1 のレーザ光は直接、 f_2 は $\lambda/2$ 板を通過させて f_1 と同一方向の偏光にして図2と同様の1次回折角の方向から入射する。これらのレーザ光が-1次回折角方向に回折・合成され光ヘテロダイナミクス干渉光となる。マスク及びウエハ回折格子から出射した2つの光ヘテロダイナミクス干渉光は、ビート信号 I_M, I_W として、それぞれフォトダイオードPD₁, PD₂により検出される。ミラーM₂, M₃, 及びM₄はいずれも露光領域からはずれた場所に配置されているので露光中サーボが可能である。

ポジ形のFBM-Gレジストにより位置合わせ精度を評価した。マスク間の位置ひずみ、ウエハ間のウエハマーク形成時のプロセスの影響、等を除去するために、同一のマスク、及びウエハによる2重露光法を適用した。

図9に光波干渉計により測定した位置合わせ精度評価結果を示す。露光領域 $12\times 12\text{ mm}$ において、 $\pm 0.07\text{ }\mu\text{m}$ (3σ)の位置合わせ精度が得られた。

6. 結 言

X線リソグラフィにおける位置合わせ法として、回折格子を用いた光ヘテロダイナミクス干渉式位置検出法を考案した。本方式に関して理論解析を行う一方、単軸の実験装置により位置合わせの実験を行い、理論と良く一致することを確認した。さらに、このアライメント法を適用したSORステップを開発し、位置合わせ精度を評価した。

以下に、主な結果を要約して述べる。

Fig. 9 Overlay accuracy measured by Nikon-2 I using single mask and multiple exposure

- (1) 2つの回折格子からの-1次回折光をそれぞれ光ヘテロダイン干渉させ、2つのビート信号の位相差から、回折格子間の相対位置ずれを検出できる。
- (2) 回折格子への入射光学系を、回折格子面に垂直な法線方向に対して左右対称に設定することに

より、多重反射、ギャップ変動の影響を受けない位置ずれ検出が可能である。

- (3) 本アライメント法により、 ± 3 nm 以下の高精度単軸サーボ制御を実現した。
- (4) 光学系傾斜の影響は、 0.2° 以下の精度で設定することにより無視できる。
- (5) 本アライメント法を適用した SOR ステップにより、位置合わせ精度 $\pm 0.07 \mu\text{m}$ (3σ) を実現した。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、御指導を頂いた NTT・LSI 研究所、吉原秀雄博士、石原直氏に深く感謝致します。実験用 X 線マスク製作に御協力して頂いた小田政利氏、大久保高志氏、小澤章氏、また、転写実験に御協力して頂いた福田真氏に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) T. Hayasaka, S. Ishihara, H. Kinoshita and N. Takeuchi : A Step-and-repeat X-ray Exposure System for $0.5 \mu\text{m}$ Pattern Replication, J. Vac. Sci. Technol. B, **3**, 6, (1985) 1581.
- 2) E. Cullmann, K. A. Cooper and W. Vach : An X-ray Stepper for Production Lithography, SPIE, **773**, (1987) 2.
- 3) 谷口素也, 稲垣 晃, 見坊行雄, 岡本啓一, 船津隆一 : 斜方結像光学系を用いた X 線露光装置用アライメントパターン検出法, 精密工学会誌, **55**, 9 (1989) 1687.
- 4) B. Fay, J. Trotel and A. Fichet : Optical Alignment System for Submicron X-ray Lithography, J. Vac. Sci. Technol., **16**, 6, (1979) 1954.
- 5) 宇根篤暢, 猪城 真, 竹内信行, 鳥居康弘 : 回折格子による高精度位置合わせ法 (第 2 報), 精密工学会誌, **55**, 1, (1989) 129.
- 6) H. Takasaki, N. Umeda and M. Tsukiji : Stabilized Transverse Zeeman Laser as a New Light Source for Optical Measurement, Appl. Opt., **19**, 3, (1980) 435.
- 7) S. Ishihara, M. Kanai, A. Une and M. Suzuki : A Vertical Stepper for Synchrotron X-ray Lithography, J. Vac. Sci. Technol. B, **7**, 6, (1989) 1652.
- 8) M. Suzuki and A. Une : An Optical-heterodyne Alignment Technique for Quarter-micron X-ray Lithography, J. Vac. Sci. Technol. B, **7**, 6, (1989) 1971.