研究論文

回折格子によるマスクとウェハの間隙設定法*

内田憲男** 石橋頼幸** 平野亮一** 菊入信孝**

A Gap Setting Method for X-ray Lithography using Dual Gratings

Norio UCHIDA, Yoriyuki ISHIBASHI, Ryoichi HIRANO and Nobutaka KIKURI

This paper presents a mask-wafer gap setting method for X-ray lithography, using dual gratings. The mask gratings and the wafer gratings are arranged at right angles with regard to each other, so that the diffraction light intensity varies only with the mask-wafer gap variation, independently from the lateral displacement. Two pairs of those dual gratings, which consist of different pitch mask gratings and same pitch wafer gratings, were used as gap setting marks. Diffraction light intensity differences $\Delta I(0, 1) = I_1(0, 1) - I_2(0, 1)$ from those pairs were used for gap setting signal. In order to avoid the gap setting error caused by the ripples in the signal, the wafer stage was scanned for several microns in the gap direction. During scanning, ΔI and relative displacement of the wafer stage were sampled to calculate the regression line. The mask-wafer gap was set at the point where the regression line became zero. The gap setting point had good agreement with the calculated gap. A wide gap setting range, 0-60 μm , was obtained. Moreover, 0.4 $\mu\text{m}(3\sigma)$ gap setting repeatability has been achieved.

Key words: dual gratings, gap setting method, X-ray lithography, diffraction, mask-wafer gap

1. はじめに

X線露光法は解像性が良いために0.5 μm 以下の次世代超LSIの回路パターン転写法として注目されている。サブミクロンの解像度とこれに見合う重ね合わせ精度(パターン寸法の1/5程度)を得るためには、マスクとウェハの位置合わせだけでなく、その間隙を30 μm 程度に正確に設定する必要がある。

間隙設定法としては、精度が良いことは言うまでもないが、マスクとウェハの初期設定を考えると、十分な広い検出範囲を持っていることが必要となる。さらに、位置合わせ法と組み合わせて使えるものでなければならぬし、位置合わせと間隙設定が独立に行えることが望ましい。

マスクとウェハの位置合わせと間隙設定法についてはいくつか提案されているが^{1)~3)}、位置合わせと間隙設定を独立に行えないものが多く、必ずしも十分な精度と機能を持っていないのが現状である。

本報では、マスクとウェハ上に一次元格子を互いに直交関係になるように配置することで、位置ずれと独

立にマスクとウェハの間隙が検出できる新しい間隙設定法を示し、間隙設定の再現性について記述する。さらに、この方法と先に報告した一次元格子・市松模様格子からなる位置合わせ法⁴⁾と組み合わせて、マスクとウェハの間隙設定と位置合わせ実験を行った結果について報告する。

2. 間隙設定法についての理論解析

図1に示すように、マスクとウェハ上に一次元格子が互いに直交するように配置され、波長 λ のレーザ光がマスク格子に対して垂直に入射する場合を考える。マスク格子で透過回折され、ウェハ格子で反射回折され、再びマスク格子で透過回折された回折光はレンズ系により結像されて2次元分布となる。二つの格子は互いに直交しているので、回折光の強度は間隙 z だけの関数になり、回折格子間の相対的な位置ずれには無関係になる。 x 方向の回折次数を n 、 y 方向の回折次数を r とすると、回折光の強度 $I(n, r)$ は鳥居らの理論解析⁵⁾をもとに、

$$I(n, r) \propto |w C_r \sum_j C_j \cdot C_n \cdot \exp(-2\pi i j^2 Z)|^2 \quad (1)$$

で表せる。ここで、 $Z = \lambda z / p_x^2$ 、 p_x と p_y はマスク格

* 原稿受付 昭和63年8月4日。昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和62年10月12日)にて発表

** 正会員 (株)東芝(川崎市川崎区浮島町4-1)

Fig. 1 Gap setting dual gratings

子とウエハ格子のピッチ、 z はマスクとウエハの間隙、 mC_k, wC_r はマスクとウエハ格子のフーリエ係数であり、 i は虚数単位である。

マスク下面の反射率が零でない場合には、マスクとウエハ間で多重反射回折が生じ、何度かマスクとウエハを往復した光波がマスク～ウエハ～マスクを経由した光波と干渉する。この影響を調べるためには、式(1)にマスク下面で一度反射回折する光波、二度反射回折する光波…を加え合わせればよいが、ここでは簡単のために、マスク下面で一度だけ反射回折する光波、すなわち、マスク～ウエハ～マスク～ウエハ～マスクを経由する光波の影響だけを考慮して、 $I(n, r)$ を求めると、次のようになる。

$$I(n, r) \propto |wC_r \sum_j mC_j \cdot mC_{n-j} \cdot \exp(-2\pi i j^2 Z) + A \cdot \exp(4\pi i z/\lambda) \sum_j \sum_s \sum_k mC_j \cdot wC_s \cdot$$

$$mC_{k-j} \cdot wC_{r-s} \cdot mC_{n-k} \cdot \exp\{-2\pi i (j^2 + a^2 s^2 + k^2) Z\} \cdot \exp\{i(k-j)\pi\}|^2 \quad (2)$$

ここで、 A はマスクとウエハの反射率の積であり、 $a = p_x/p_y$ である。

図1の回折光のうち(0,0)および(±1,0)次の回折光は、マスク格子上面で直接反射回折する光波(図1の破線)と干渉するために、回折光の強度は z の変化に対して周期 $\lambda/2$ で変化する項が支配的となり、間隙検出光としては不適当である。そこで、マスク格子での反射回折光の影響を受けない $I(0,1)$ および $I(1,1)$ について式(1)を用いて計算した結果を図2に示す。ただし、マスクのピッチは $p_{x1} = 5.0 \mu\text{m}$ と $p_{x2} = 8.7 \mu\text{m}$ である。 p_{x1}, p_{x2} は $I_1(n, r), I_2(n, r)$ の z に対する周期が1対3となるように $p_{x2} = \sqrt{3} \cdot p_{x1}$ とした。 $I(n, r)$ の曲線の形はマスク格子の形状($mC_j = \sin(j\pi\alpha)/j\pi$, $\alpha = c_x/p_x$)にだけ依存し、ウエハ格子の形状($\beta = c_y/p_y$)には無関係であることが式(1)よりわかる。ピッチが数 μm 程度のマスク格子の形状についてはEB描画法で精度良く描けるので、ここでは、開口比 α と β を0.5とした。

$I(1,1)$ は余弦曲線となり、 $I(0,1)$ は余弦曲線に高次の回折光が重なった曲線となる。この理由は次のとおりである。 c_x/p_x は0.5であるから、 mC_j は $j=0$ の場合を除き、 j が偶数の場合には零となる。したがって、式(1)において $n=1$ の場合には、 $j=0$ と $j=1$ 以外の $mC_j \cdot mC_{1-j}$ はすべて零となり、

$$I(1,1) \propto \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{\pi}\right)^4 \cdot (1 + \cos Z) \quad (3)$$

となるためである。これに対して $I(0,1)$ では、 $mC_0 \cdot mC_0, mC_1 \cdot mC_{-1}, mC_{-1} \cdot mC_1, mC_3 \cdot mC_{-3}, \dots$ などの回折光波の干渉が生じるために余弦曲線に高次の曲線が重なる。

図3に p_x が $5 \mu\text{m}$ の強度 $I_1(0,1)$ 、 $I_1(1,1)$ と 8.7

Fig. 2 Diffracted light intensity calculated from Eq.(1)

Fig. 3 Diffracted light intensity difference

Fig. 4 Positioning gratings and gap setting gratings

μm の強度 $I_2(0, 1)$, $I_2(1, 1)$ の差 $\Delta I(0, 1)$ と $\Delta I(1, 1)$ を示す。 $\Delta I(0, 1)$ と $\Delta I(1, 1)$ は $z=30 \mu\text{m}$ で零と交わる正弦状の曲線となるので、マスクとウエハの間隙があらかじめ $0 \sim 60 \mu\text{m}$ の間にあれば、間隙を $30 \mu\text{m}$ に設定できる。設定間隙を小さくするには p_{x1} , p_{x2} を小さくし、大きくするには、大きな値を選べば良い。

3. 実験装置と方法

実験に用いた位置合わせと間隙設定用の回折格子の形状を図4に示す。位置合わせ用の回折格子は既報⁴⁾のものと同一であり、マスク側に $p_{px}=8 \mu\text{m}$ の一次元格子、ウエハ側には $p_{px}=8 \mu\text{m}$, $p_{py}=7 \mu\text{m}$ の市松模様格子からなる二重回折格子が2対設けられ、1対の回折光強度が極大となると、他方の1対が極小となるように配置されている。間隙設定用については、マスク側に $p_{x1}=5 \mu\text{m}$ と $p_{x2}=9 \mu\text{m}$, ウエハ側に2個

Fig. 5 Experimental apparatus

の $p_y=5 \mu\text{m}$ の回折格子が互いに直角に対向して配置されている。それぞれの回折格子の大きさは一辺が約 $100 \mu\text{m}$ であり、開口比が 0.5 である。 p_x と p_y は位置合わせ用検出光と間隙設定用検出光が互いに干渉することなく独立に検出できるように $5 \mu\text{m}$ と $7 \mu\text{m}$ に選んだ。マスク上の回折格子は平面度 $2 \mu\text{m}$ 以下の石英ガラスに蒸着したクロム層をエッチングして作製したものであり、ウエハ上の格子はシリコン基板上にレジストパターンで作製した。

実験装置の概略を図5に示す。マスクは固定架台に、ウエハは弾性支持・圧電素子駆動の x, y, θ と z (3軸) テーブルからなるステージ上のウエハチャックに真空吸着される。ウエハチャック上には3個の渦電流形センサが設置されており、ウエハに開けられた穴を通してこれらのセンサがマスク面上に接着されている厚さ $10 \mu\text{m}$ の銅箔と対向する。3個の渦電流形センサの出力をCPU経由でPZTコントローラにフィードバックすることでマスクとウエハは平行に保たれ、任意の間隙に設定される。マスクとウエハの x 方向の相対位置は静電容量形の変位計で測定される。

波長が $0.6328 \mu\text{m}$ のHe-Neレーザー光がレンズ系と絞りにより $70 \mu\text{m}$ 角の2本の平行光となって1対の位置合わせ格子と1対の間隙設定用の格子のそれぞれのほぼ中央を同時に照明する。スキャナを振動させると、図4に示したように、2本のレーザー光は1対の位置合わせ格子と1対の間隙設定用の格子を1組として2組の回折格子を交互に照明する。レーザー光はマスクに垂直に入射するように調整されている。検出光は

Fig. 6 Experimental light intensity

レンズ系を経てフォトセンサに入り、光電変換されて位置合わせと間隙設定信号として用いられる。

4. 実験結果と考察

4.1 間隙設定信号

間隙設定用の2対の回折格子をレーザー光で独立に照明し、 $I_1(0,1)$ 、 $I_2(0,1)$ 、 $I_1(1,1)$ および $I_2(1,1)$ と間隙 z の関係を測定した結果を図6に示す。 $I_1(0,1)$ 、

$I_2(0,1)$ については、結像点が同じ位置になるので一つのフォトセンサで測定したが、 $I_1(1,1)$ 、 $I_2(1,1)$ についてはそれぞれ個別のセンサで測定した。 z の変化幅は z テーブルに用いた圧電素子のストロークの関係で $20 \sim 45 \mu\text{m}$ に制限された。

$I_1(0,1) \sim I_2(1,1)$ と z の関係は図3の計算値と対応した曲線となるが、間隙の変化に対して約 $0.3 \mu\text{m}$ ($\lambda/2$) 周期のリップルが載っている。この理由はマスクとウエハ間で多重反射回折が生じ、式(1)で考慮した光波がマスクとウエハ間で一度反射して出てきた光波と干渉するためと考えられる。そこで、マスクで一度だけ反射回折することを考慮した式(2)を用いて $I_1(0,1) \sim I_2(1,1)$ を計算し、図7に示した。計算結果は実験結果とおおむね対応し、 $0.3 \mu\text{m}$ 周期のリップルが生じる。リップルの振幅の計算値は、 $I_1(0,1)$ 、 $I_1(1,1)$ が零になる位置では零になり、実験値も零に近い値になっている。また、図7において、リップルの振幅の中点を通る曲線は図3の計算値と一致することがわかる。

前章で $I(1,1)$ は $I(0,1)$ より単純な曲線になることを述べた。しかし、実際にはリップルが生じるので両者の特性に大きな差はない。一方、 $I_1(0,1)$ と $I_2(0,1)$ は一つのセンサで受光できるが、 $I_1(1,1)$ と $I_2(1,1)$ を測定するには、2個のセンサが必要となり、装置が複雑になるだけでなく、感度に差が生じると誤差の原因となる。さらに、光の強度についても $I(0,1)$ の方が $I(1,1)$ より大きい。したがって、以下では $I(0,1)$ を用いて実験を行った。

スキャナを 170 Hz で振動させ、2対の間隙設定用の回折格子を矩形波形で交互に照明した。得られた信号をスキャナの駆動信号で同期検波することにより $\Delta I(0,1)$ を測定し、図8に示す。パラメータはマスクとウエハの位置ずれ (x 方向) である。 $\Delta I(0,1)$ は位置ずれとは無関係な曲線になり、広い検出範囲をもつが、リップルのために零と交差する点が幾つも存在する。すなわち、間隙設定点は $\pm 2 \mu\text{m}$ の広がりを持つことになる。そこで、 $\Delta I(0,1)$ を用いて間隙設定を精密に行うために、図9に示すように、ウエハチャックを z 方向に数 μm 走査し、ウエハチャックの相対移動量と $\Delta I(0,1)$ の値をサンプリングし、回帰直線を求めた。そして、回帰直線が零となるときのウエハチャックの移動位置 (渦電流センサの値) を求め、この値を目標位置として間隙設定を行った。

サンプリング数と間隙設定精度の関係を調べるために、走査距離を $28 \mu\text{m}$ から $32 \mu\text{m}$ に固定し、サンプリング個数を変化させて間隙設定値のばらつきを調べ

(a) $I(1,1)$ (b) $I(0,1)$

Fig. 7 Diffracted light intensity calculated from Eq. (2)

た。その結果、サンプリング個数が30個以上あれば間隙設定値のばらつきはほぼ一定値に落ち着くことがわかった。そこで以下では、サンプリング個数を30個に固定して実験を行った。

4.2 間隙設定および位置合わせ実験

2対の位置合わせ用回折格子からの回折光強度 $I_{P1}(0,1)$, $I_{P2}(0,1)$ をスキャナの駆動信号で同期検波す

Fig. 8 Experimental gap detecting signal $\Delta I(0,1)$ for some lateral displacement Fig. 9 Gap setting point calculated from ΔI by scanning the wafer stage in the z direction

ることにより $\Delta I_P(0,1) = I_{P1}(0,1) - I_{P2}(0,1)$ を求めると、図10に示すように、間隙変化に無関係な位置ずれ検出信号が得られる。そこで、4.1項で示した方法で間隙設定を行い、さらに、位置合わせ用の回折格子の信号 $\Delta I_P(0,1)$ を用いて位置合わせを行った。位置合わせ再現性については、ウェハチャックの位置を静電容量形変位計（マイクロセンス）で測定し、間隙設定値については渦電流形センサを用いて測定した。これらの操作を50回繰り返したときの再現性を図11に示す。位置合わせの再現性は 3σ (σ は標準偏差) で $\pm 0.033 \mu\text{m}$ が得られ、間隙設定値は平均値で $30.14 \mu\text{m}$ 、 3σ の値は $\pm 0.42 \mu\text{m}$ となった。実験では、 $p_{x1} = 5 \mu\text{m}$ 、 $p_{x2} = 9 \mu\text{m}$ の格子を用いているので、式(1)による間隙設定の計算値は $30.19 \mu\text{m}$ となり、実験値と計算値は非常に良く一致していることが明ら

Fig. 10 Positioning signal ΔI_P for various mask-wafer gaps

Fig. 11 Positioning repeatability and gap setting error distribution

かになった。

なお、本実験では、マスクとウエハの間隙値を確認するために、渦電流センサをウエハチャック上に設置した。しかしながら、ウエハチャックの z 方向の相対移動量さえ求めれば、露光中にマスク面が上下に変動しないかぎり間隙設定が可能である。したがって、渦電流センサをウエハチャックの裏面に設置し、ウエ

ハチャックの裏面の移動量を測定してもマスクとウエハの間隙を $30 \mu\text{m}$ に設定できる。

5. 結 論

マスク上にピッチの異なる二つの回折格子を、ウエハ上にピッチが等しくマスク格子と直交する二つの回折格子を設け、2対の二重回折格子から得られる回折光の強度差 $\Delta I(0,1)$ を用いることにより、マスクとウエハの間隙を設定する方法を示した。また、既報の位置合わせ法と組み合わせて位置合わせと間隙を設定する方法を示した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) マスクとウエハ間の多重反射のために、間隙設定信号には、 z の変化に対して $\lambda/2$ の周期で変化するリップルが生じた。これらのリップルを含めた信号は計算値と良く一致した。
- (2) ウエハチャックを間隙方向に数 μm 走査することにより、リップルの中心線を求め間隙設定を行う方法を示した。
- (3) 設定間隙値が $30 \mu\text{m}$ の場合、間隙設定範囲は $0 \sim 60 \mu\text{m}$ となり、広い検出範囲が得られた。
- (4) 設定された間隙値は計算値と非常に良く一致し、その再現性は 3σ で $\pm 0.42 \mu\text{m}$ 、位置合わせ再現性は 3σ で $\pm 0.03 \mu\text{m}$ となり、極めて高精度な位置決めが実現できた。

参 考 文 献

- 1) B. Fay, J. Trotel and Frichet: Optical Alignment System for Submicron X-ray Lithography, J. Vac. Sci. Technol., **16**, 6, (1979) 1954.
- 2) M. Feldman, A. D. White and D. L. White: Application of Zone Plates to Alignment in Micro-lithography, J. Vac. Sci. Technol., **19**, 4, (1981) 1214.
- 3) 猪城 真, 竹内信行, 宇根篤暢, 鳥居康弘: 回折格子による高精度位置合わせ法, 精密機械, **53**, 5 (1987) 717.
- 4) 内田憲男, 石橋頼幸, 平野亮一, 菊入信孝, 田畑光雄: 二重回折格子による間隙変化に純感なマスクとウエハの位置合わせ法, 精密機械, **54**, 10 (1988) 1951.
- 5) Y. Torii and Y. Mizushima: Theory of Alignment Monitoring by Diffraction from Superimposed Dual Gratings, J. Opt. Soc. Amer., **68**, 12, (1978) 1716.