回折格子による高精度位置合わせ法（第2報）*

——倍ピッチ2重回折格子による位置合わせ——

宇根篤暢** 猪城 真*** 竹内信行** 鳥居康弘†

A High Accuracy Grating Alignment Technique (2nd Report)
—Alignment using Double-pitch Dual Gratings—

Atsunobu UNE, Makoto IKI, Nobuyuki TAKEUCHI and Yasuhiro TORII

This paper describes a mask-to-wafer alignment technique for submicron X-ray lithography. A new alignment method is proposed to detect lateral displacement in the wide gap range accurately. Wafer grating pitch is twice as large as the mask grating pitch in order to avoid gap fluctuation influence on the lateral displacement detection signal. The dependence of the lateral displacement detection signal on gap fluctuations is discussed both theoretically and experimentally. A highly sensitive and stable lateral displacement detection signal is obtained at the specific gap. The signal has a triangular waveform and hardly varies by gap fluctuations of a few microns from the specific gap. The gap range where the stable signal can be obtained, is fifty times larger than that of the conventional dual grating method. These experimental results agreed well with the theoretical calculation. By combining the double-pitch dual grating method and the single grating method mentioned in the 1st report, accuracies of $\pm 0.02 \mu\text{m}$ in both the gap and lateral displacement servo-controls are achieved.

Key words : alignment, grating, positioning, X-ray lithography, dual gratings, gap detection, lateral displacement detection

1. 緒 言

16 M ビット以上の超 LSI に適用できる $0.5 \mu\text{m}$ 以下のパターンを生産的に転写できる X 線露光装置の開発が各国で進められている¹⁾²⁾。X 線露光は光露光と異なり、X 線縮小光学系が開発されていないため、1 : 1 の転写を余儀なくされている。このためマスクとウエハの位置ずれ検出は、光ステッパに採用されているスルー・ザ・レンズ方式の場合に比べて 5~10 倍の精度を要求される。また、結像方式でないため、良好なパターンを得ようとする、マスクとウエハの間隔、すなわちギャップを $10\sim 40 \mu\text{m}$ に近接して露光しなければならない。このためマスクとウエハが接触しやすく、特に分散 X 線源を用いる場合は、ランナウト誤差も発生するので、高精度ギャップ設定が必要になる。このような条件のもとで、転写パターンに高い重ね合わせ精度を達成するためには、マスク・ウエハ間の相

対位置ずれとギャップを高精度に検出しなければならない。

この位置ずれ、ギャップ検出法として、フレネルゾーンプレートをを用いる方法³⁾や回折格子を用いる方法⁴⁾が提案され、前者は商用 X 線露光装置に適用されている⁵⁾。後者の方法は、前者の方法に比較し、マーク形状が単純で、強度の大きい信号を容易に得ることができ、位置とギャップを同一のマークで検出するため、信号分離が難しいという欠点を有していた。このため信号の切り分けと絶対ギャップ値の検出を可能にする単一回折格子法を前報⁶⁾で提案した。しかし、位置ずれ検出信号はギャップの強い影響を受けるため安定した検出を行うには、 $\pm 0.02 \mu\text{m}$ 以下の高精度ギャップサーボが必要不可欠であった。

本報では、位置ずれ検出法として、新たに倍ピッチマークを用いる方法を考案し、ギャップ変動による位置ずれ検出信号への影響を従来の $1/50$ 以下に低減できることを示すと同時に、単一回折格子法と組み合わせ、 $\pm 0.02 \mu\text{m}$ の実用的な位置合わせ方式を実現できることを明らかにする。

* 原稿受付 昭和 63 年 4 月 25 日。昭和 59 年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和 59 年 10 月 2 日）にて発表

** 正 会 員 日本電信電話(株)（厚木市森の里若宮 3-1）

*** 元日本電信電話(株)

† 日本電信電話(株)

Fig. 1 Lateral displacement detection principle using double-pitch dual gratings

Fig. 2 Grating type

2. 倍ピッチ回折格子による位置ずれ検出

2.1 理論解析

位置ずれを検出するために、図1に示すウエハ回折格子のピッチがマスク回折格子の倍である一組のマーク（以後倍ピッチマークと呼ぶ）を用いる。このマークに波長 λ のレーザー光を垂直に照射して生じる ± 1 次回折光の強度差を利用して位置ずれを検出する。従来のマスク回折格子とウエハ回折格子のピッチが等しい等ピッチマークを用いた場合、マスク上面反射回折光とマスク、ウエハを透過した回折光は、同一方向に回折され、互いに干渉する。したがって、位置ずれ検出信号は、前報で述べたようにギャップが $\lambda/8$ 変動する度に振幅が最大から最小まで変化する、きわめてギャップ変動に敏感な信号となる。一方、上述した倍ピッチマークを用いた場合には、位置ずれ検出信号に用いる $+1$ 次回折光は、実線で示す $\theta/2$ の方向に回折され、破線で示す角度 θ 方向に回折されるマスク上面反射回折光と干渉しないため、ギャップ変動による影響が大幅に軽減される。

倍ピッチマークを用いた場合の n 次回折光強度 I_n は、透過形2重回折格子の理論式⁷⁾をもとにし、入射光の振幅を1とすると次式で表される。

$$I_n = \left| \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{h=-\infty}^{\infty} {}_T C_k \cdot {}_T C_{h-k} \cdot {}_R C_{n-2h} \right. \\ \left. \times \exp \left[-i\pi \left\{ -\frac{2hd}{P_M} + M \left\{ k^2 + \left(\frac{n}{2} + k - h \right)^2 \right\} \right\} \right] \right|^2 \quad (1)$$

ここで、 d はマスクとウエハの相対位置ずれ、 P_M はマスク回折格子のピッチ、 ${}_T C_k$ 、 ${}_R C_k$ はマスク、ウエハ回折格子のフーリエ係数であり、回折格子形状により定まる。マスク回折格子を、図2(a)に示す透過部と吸収部の振幅透過率がそれぞれ a 、 b の透過吸収回折

格子とし、ウエハ回折格子を図2(b)に示す段差部の深さが H 、段差部の媒体の屈折率が n' （空気の場合 $n'=1$ ）、段差部、非段差部の振幅反射率が a' 、 b' の反射位相形回折格子とすると、 ${}_T C_k$ 、 ${}_R C_k$ は次式で表される。

$${}_T C_k = \begin{cases} (a-b) \cdot \frac{\sin \pi k r_M}{\pi k} & (k \neq 0) \\ b + (a-b) r_M & (k = 0) \end{cases} \quad (2)$$

$${}_R C_k = \begin{cases} \left\{ a' \exp \left(\frac{i 4 \pi n' H}{\lambda} \right) - b' \right\} \cdot \frac{\sin \pi k r_W}{\pi k} & (k \neq 0) \\ \left\{ b' + a' \exp \left(\frac{i 4 \pi n' H}{\lambda} \right) - b' \right\} r_W & (k = 0) \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 r_M 、 r_W はそれぞれマスク回折格子の開口比、ウエハ回折格子の段差幅比で、前者はマスク回折格子ピッチ P_M に対する透過部の幅の比、後者はウエハ回折格子ピッチ P_W に対する段差部の幅の比である。 M は無次元数であり、マスク、ウエハ間のギャップを z とすると、次式で表される。

$$M = \lambda z / P_M^2 \quad (4)$$

これらの理論式を用いて、 ± 1 次回折光強度 $I_{\pm 1}$ をギャップ $14.3 \sim 36.3 \mu\text{m}$ ($M=1 \sim 2.55$)の間で計算した結果を図3(a)に示す。計算条件を表1に示す。 $+1$ 次と -1 次の回折光強度の信号形状はギャップ $z=14.3 \mu\text{m}$ ($M=1$)と $28.3 \mu\text{m}$ ($M=2$)付近ではほぼ等しくなる。信号強度はギャップ $z=14.3 \mu\text{m}$ 付近で小さく、 $28.3 \mu\text{m}$ 付近で大きい。また、 $z=21.3, 36.3 \mu\text{m}$ ($M=1.5, 2.55$)付近で位置ずれ方向に $d=P_M/4$ だけずれた信号強度の大きい ± 1 次回折光強度が得られる。

Fig. 3 ± 1 st-order diffracted light intensity depending on gap

図4(a)に位置ずれ検出信号として用いる ± 1 次回折光の強度差 ΔI の計算結果を示す。ギャップ14.3, 28.3 μm ($M=1, 2$) 付近では、信号の振幅は小さく、1周期内で4回もゼロクロスする。これに対し21.3, 36.3 μm ($M=1.5, 2.55$) 付近では、信号の振幅は最

Table 1 Calculated conditions

Wavelength λ	0.6328 μm
Mask grating pitch P_M	3 μm
Wafer grating pitch P_W	6 μm
Aperture ratio r_M	0.58
Step width ratio r_W	0.42
Step H	$\lambda/4$
Amplitude transmissivity a	1
b	0
Amplitude reflectivity a'	1
b'	1
Reflective index n'	1

大、且つ、三角波状の単純信号となり、相対位置ずれが $d=0, P_M/2$ においてのみゼロクロスする。したがって、位置ずれ検出に最適な信号は、 $M=k+1/2=0.5, 1.5, 2.5, \dots$ (k は整数)を満たすギャップ7.1 μm , 21.3 μm , 35.6 μm , ...で得られ、このゼロクロス点を利用して位置合わせを行うことができる。

2.2 位置ずれ検出実験

2.2.1 実験方法

位置ずれ検出信号となる ± 1 次回折光強度は、光源に $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$ のHe-Neレーザ、光電変換器にフォトマルを使用した実験装置⁶⁾により測定した。位置ずれ変位測定には静電容量変位計を用いた。

マスク回折格子は、厚さ2 μm の窒化シリコンメンブレン上のタンタル吸収体をドライエッチして作製した。ウエハ回折格子は、理論上最大の強度が得られる約4800 Åの段差に、シリコンウエハをドライエッチして作製した。回折格子のピッチは、それぞれ3 μm , 6 μm , その大きさは、いずれも長さ180 $\mu\text{m} \times$ 幅120 μm である。マスク回折格子の開口比は顕微鏡で測定し、 $r_M=0.58$, ウエハ回折格子の段差幅比は段差計で測定し、 $r_W=0.42$ である。

2.2.2 実験結果

図3(b)に ± 1 次回折光強度 $I_{\pm 1}$ をギャップを14.3 μm から36.3 μm まで変化させて測定した結果を示す。これらの実験結果は、信号形状も含めて理論計算結果ときわめてよく一致する。

図4(b)に ± 1 次回折光の強度差 ΔI の実験結果を示す。実験結果は、理論計算結果とよく一致する。 $M/2$ の周期で信号の振幅は最大から最小まで変化し、 $M=k+1/2$ を満たすギャップ付近で、信号の振幅は最大、波形は三角波状になる。また、このギャップ付近では、 $\pm$ 数 μm のギャップ変動に対して波形の変化は小さく、最大感度の最適位置ずれ検出信号が得られる。

これに比較し、図5に示す等ピッチマークの場合、

Fig. 4 Lateral displacement detection signal depending on gap

ギャップ変動 $0.08 \mu\text{m}$ ($\lambda/8$ に相当) に対して、信号の振幅は最大から最小まで変化すると同時に、その波形

Fig. 5 Lateral displacement detection signal influenced greatly by gap fluctuations with $P_M=3 \mu\text{m}$ and $P_W=3 \mu\text{m}$

は著しく変化する。このため位置ずれ検出信号として用いるには、ギャップを $\pm 0.02 \mu\text{m}$ 以下にサーボする必要がある。この実現は1点サーボでは可能であるが、マスク、ウエハ間の平行出しのために3点同時のギャップサーボが必要であるX線露光装置の位置合わせ方式には適さない。

以上述べたように倍ピッチマークを用いることによって、ギャップ変動の影響は、等ピッチマークの場合に比較し、次式で与えられる倍率で軽減される。

$$\frac{\lambda/8}{M/2} = \left(\frac{\lambda}{2P_M} \right)^2 \quad (5)$$

回折格子のピッチが $3 \mu\text{m}$ の場合、 $1/50$ 以下とその軽減割合はきわめて大きい。したがって、位置ずれを検出する倍ピッチマークと、単一回折格子法を適用してギャップを検出するギャップ専用マークを組み合わせることによって、特定のギャップ値 $z = P_M^2(k+1/2)/\lambda$ 付近において、実用性の高い位置合わせ方式を実現できる。

3. 位置合わせ実験

3.1 位置合わせ方式

3.1.1 位置合わせマーク

図6に位置ずれとギャップを同時に検出するための位置合わせマークを示す。このマークは位置ずれ検出用倍ピッチマークとギャップ専用マークを互いに直交させ、同一レーザスポット内に配置したマークである。直交配置により、それぞれのマークからの回折光を互いに干渉することなく受光できる。

上述したように最良の位置ずれ検出信号を得るためには、ギャップを $M = \lambda z / P_M^2 = k + 1/2$ を満たすギャップ値 z_0 に設定する必要がある。一方、単一回折格子法によるギャップ検出は、信号が最大になる $M' = \lambda z / P_M'^2 = k'$ (k' は整数) を満たすギャップ値 z_0' で行われる。したがって、位置ずれとギャップを同時に検出するためには、 z_0 と z_0' がほぼ等しい、すなわち、位置ずれ検出用マスクマークの回折格子ピッチ P_M

Fig. 6 Alignment mark

とギャップ検出用マスクマークの回折格子ピッチ P_M' の間に次式の関係が成立しなければならない。

$$\left(k + \frac{1}{2}\right)P_M^2 = k'P_M'^2 \quad (6)$$

ここで、 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 、 $P_M = 3 \mu\text{m}$ 、 $k = 1$ 、 $k' = 1$ とすると、 $z_0 = 21.3 \mu\text{m}$ 、 $P_M' = 3.7 \mu\text{m}$ と計算され、 $z_0' = 21.6 \mu\text{m}$ となる。

3.1.2 位置合わせ制御手順

図7に位置ずれ検出用マスクマークの回折格子ピッチを P_M 、ギャップ検出用マスクマークの回折格子ピッチを P_M' とした時の位置合わせの制御手順を示す。位置合わせ制御は、位置ずれ信号が最適になるギャップ値に設定した後、位置合わせサーボする以下の手順で行われる。ギャップ設定に用いられるギャップ検出信号は、前報で述べたように $P_M'^2/\lambda$ 周期で変化する包絡波と $\lambda/2$ 周期の干渉波からなる。前者は絶対ギャップ z_0' の検出に用いられ、後者は最適な位置ずれ検出信号を得るためのギャップ z_0 への設定とギャップサーボに用いられる。

- ① 機械的に $M' = 1$ と $M' = 2$ の間のギャップにブリギャップ設定する。
- ② ブリギャップ設定位置から包絡波の最大値検出を行いつつギャップを減少させ、最大値を検出した時点（ギャップ $z = z_0'$ ）から干渉波のカウントを始める。最大のピークをもつ干渉波（以後最大干渉波と呼ぶ）より小さいピークをもつ干渉波を所定の本数以上検出した時点で、最大干渉波を行き過ぎたと認知する。
- ③ 反転して、干渉波本数を数えつつギャップを増加させ、ギャップ設定値（ $z = z_0$ ）まで戻る。
- ④ そのギャップ値における干渉波の中腹付近に基準電圧を設け、ギャップサーボを行う。

- ⑤ それと同時に位置ずれ検出信号のゼロクロス点で位置合わせサーボを行う。

以上で位置合わせを完了する。

3.2 実験結果

位置ずれ検出実験に用いた装置を用いて、位置合わせ実験を行った。ギャップ検出マークは、長さ $150 \mu\text{m} \times$ 幅 $150 \mu\text{m}$ の大きさのものを、直交配置したギャップ検出マークからの回折光を光電変換するために、シリコンフォトダイオードを使用した。

実験結果を図8に示す。A, C はギャップおよび位置ずれ検出信号、B, D は静電容量形変位計で測定したギャップおよび位置ずれ変位量である。位置合わせは、図7の②～⑤の順序で行った。最

Fig. 7 Gap and alignment control procedure

Fig. 8 Alignment control results

大干渉波より小さいピークをもつ干渉波を5本検出した時、最大干渉波を行き過ぎたと認知し、反転して、干渉波4本をカウントした時点でギャップ設定を終了し、ギャップサーボ、位置ずれサーボを行った。この時のギャップ変動、位置ずれ変動は、いずれも $\pm 0.02 \mu\text{m}$ であり、高精度の位置合わせサーボが達成されている。制御時間は、ギャップ設定約2s、位置合わせ約0.5sである。

4. 結 言

位置ずれ検出信号がギャップ変動の強い影響を受ける従来の2重回折格子法では、安定した検出が不可能なため、ギャップ変動の影響を1/50以下に低減した倍ピッチ2重回折格子法を考案した。この方法は、ウェハ回折格子のピッチをマスク回折格子のピッチの倍とし、マスク上面回折光とマスク、ウェハ回折格子からの透過回折光の干渉を無くしたもので、 ± 1 次回折光の強度差を利用して位置ずれ検出を行うものである。この倍ピッチ2重回折格子法のギャップ変化に対する信号特性を理論、実験の両面から明らかにし、それらが互いにきわめて良く一致することを示すとともに、ギャップを検出する単一回折格子法を組み合わせ、X線露光装置に適用できる高精度位置合わせ方式を

実現した。以下に主な結果を要約して示す。

- (1) 倍ピッチ2重回折格子法により得られる ± 1 次回折光の強度差 ΔI は、 $M = \lambda z / P_m^2 = k + 1/2$ (k は整数)を満たすギャップ z で、位置ずれ検出に最適な振幅が最大で、三角波状の単純信号となる。
- (2) 上記位置ずれ検出信号は、 $\pm$ 数 μm のギャップ変動に対して波形の変化は小さいので、マスク、ウェハ間の相対位置、ギャップ、あおりを制御する実用信号として用いることができる。
- (3) 倍ピッチ2重回折格子法と単一回折格子法を組み合わせることにより、位置ずれ、ギャップともに $\pm 0.02 \mu\text{m}$ の高精度サーボを達成できる。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、御助言を頂いたNTT電気通信研究所・中山了氏(現住友金属工業(株))、早坂東亜氏、マスク製作に御協力を頂いた吉原秀雄博士、大久保高志氏、小沢章氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) T. Hayasaka, S. Ishihara and H. Kinoshita: 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) R. B. McIntoch, Jr., G. P. Hughes, J. L. Kreuzer and G. R. Conti, Jr.: X-ray Step-and-repeat Lithography System for Submicron VLSI, SPIE Proc., 632, (1986) 156.
- 3) B. Fay, J. Trotel and A. Frichet: Optical Alignment System for Submicron X-ray Lithography, J. Vac. Sci. Technol., 16, 6, (1979) 1954.
- 4) H. Kinoshita, A. Une and M. Iki: A Dual Grating Alignment Technique for X-ray Lithography, J. Vac. Sci. Technol., B, 1, 4, (1983) 1276.
- 5) B. S. Fay and W. T. Novak: Advanced X-ray Lithography System, SPIE Proc., 632, (1986) 146.
- 6) 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(第1報)——単一・2重回折格子によるギャップ・位置検出, 精密工学会誌, 53, 5(1987)717.
- 7) Y. Torii and Y. Mizushima: Theory of Alignment Monitoring by Diffraction from Superimposed Dual Gratings, J. Opt. Soc. Amer., 68, 12, (1978) 1716.