研究論文

市松格子を用いた二重回折格子法

位置合わせ (第1報)*

—アライメント性能評価—

田 畑 光 雄** 東 条 徹**

Double Diffraction Grating Alignment Method Using Checker Grating (1st Report)
—Alignment Accuracy Evaluation—

Mitsuo TABATA and Toru TOJO

This paper presents TTL (through the lens) double diffraction grating alignment method using checker grating. An interferometric method, which utilizes a novel pair of grating marks located on the mask and wafer, has been developed. This method have the following characteristics: (1) High S/N alignment signal can also be obtained using many processed wafers. (2) Alignment light doesn't expose the resist on the wafer. (3) The alignment signal is not influenced by defocussing on the wafer. (4) The alignment signal can also be detected during exposure, and real time alignment is possible. The performances for this method were experimentally evaluated, using several processed wafers. As a result, closer than $0.15\ \mu\text{m}$ (3σ) accuracy has been obtained.

Key words: alignment, through the lens, double diffraction grating, checker grating

1. 緒 言

超 LSI の高密度化に伴い、回路パタンの微細化が進み、サブミクロンパタンの時代に突入している。縮小型投影露光装置は、露光光の短波長化と高 NA 化によりその解像力の向上が図られ、 $0.5\ \mu\text{m}$ 以下の解像性が期待できるようになってきた。

解像力の向上とともに露光装置の開発上での重要課題の一つとしてアライメントの高精度化がある。

縮小型投影露光装置のアライメント法としては、マスクとウエハを投影レンズを通して位置合わせする TTL (Through The Lens) アライメントが有力とされ、種々の方式が提案され実用化されている。しかし、従来方式では、アライメントマークのエッジを検出するため、半導体プロセスによるウエハ表面の凹凸やマーク形状の劣化等によって精度が悪化する問題があった。

これらのプロセスの影響を受けにくい高精度なアライメント検出方法として、マスクとウエハに回折格子状のマークを設け二重に回折する光を検出する二重回

折の原理を応用した方法^{1)~3)}が、最近特に注目されている。

しかし、 $0.5\ \mu\text{m}$ パターンに対応した高精度アライメントを実現するためには、

- (1) 種々の半導体プロセスで形成されるマークでも高い位置検出精度が得られる。
- (2) アライメント検出光がレジストを露光しない。
- (3) 位置検出信号がデフォーカスに影響されない。
- (4) 位置合わせを行いつつパターン転写を行うリアルタイムアライメントが可能である。

等の条件が必要であると考えられるが、従来の方ではこれらすべてを満足することはできなかった。

筆者らは、これらの条件をすべて満足できる二重回折格子 TTL アライメント法を開発した。特にウエハ格子に市松格子を用いることにより、デフォーカス依存性が無くなる等の諸特性を理論計算と実験により確認し、 $0.15\ \mu\text{m}$ 以下の重ね合わせ精度 ($\bar{x} \pm 3\sigma$) を得たので報告する。

2. 原理及び理論解析

2.1 位置検出原理

図 1 に市松格子を用いた二重回折格子 TTL アライメント法の位置検出原理を示す。

* 原稿受付 昭和 63 年 11 月 2 日。昭和 62 年度精密工学会春季大会学術講演会 (昭和 62 年 3 月 29 日) にて発表

** 正 会 員 (株)東芝 (川崎市幸区堀川町 72)

Fig. 1 Optical alignment system

アライメントするマスクとウエハとは投影レンズを挟んで配置され、それぞれには、一次元回折格子で形成したマスクマーク（以下マスク格子と呼ぶ）と、市松格子で形成したウエハマーク（以下ウエハ格子と呼ぶ）が設けられている。

アライメント光としてレジストを感光しない He-Ne レーザ（633 nm）を用いており、この光はマスク上方から投光され、マスク上に設けられた透過窓を通り、投影レンズを介してウエハ格子を照明する。ウエハ格子で反射する光は二次元方向に回折し、その一部が再び投影レンズを通してマスクに向かう。

ここで、アライメント光は露光光とは波長が異なるため色収差を生じ、反射回折光はマスク上に像を結ばない。本方式ではこの問題を、マスクと投影レンズの間に設けた色収差補正ミラーで解決している。すなわち、反射回折光の一部を2枚のミラーで折り曲げ、マスク格子に導いており、光路長を長くして上記色収差を補正している。また、色収差補正ミラーは反射回折光の(0, 1)次光と(±1, 1)次光（二次元回折次数を示す）だけをマスク格子に導き、空間フィルタの役目も果たしている。さらに、ウエハ格子に市松格子を用いているため、(0, 1)次光は無視でき、2光束のみをマスク格子に導くことができる。なお、このミラーは露光光路外に設置できるため、転写を妨げず、リアルタイムアライメントを可能にしている。

色収差補正ミラーを通った光束は、重ね合わせの干渉の結果、マスク上で干渉じまを形成するため、マスク格子とこの干渉じまとの重なり具合によってマスク透過回折光の光量に変化する。したがって、マスク透過回折光を検出することによってマスクとウエハの相

Fig. 2 Modeling for gratings

対位置を検出することができる。また、マスク上で2光束の干渉となるため、後述するように検出信号はデフォーカスに依存しない。

2.2 理論解析

ウエハ格子で回折するスペクトルを W_{mn} 、マスク格子で回折するスペクトルを M_n とすると、マスク格子を透過回折する出力スペクトル U_{mn} は次式で表される。

$$U_{mn} = \sum_k W_{kn} M_{m-k} \exp\{-i(kX + k^2 Z)\} \quad (1)$$

ここで、 $X = 2\pi x/p$ 、 $Z = 2\pi \lambda z/(2p^2)$ 、 p は格子ピッチ、 x はウエハ格子の X 軸方向変位、 z は光軸方向変位 (defocus)、 m, n, k はスペクトルの次数である。

図2に示すように、各パタンの白地部と黒地部の透過率（反射率）をそれぞれ、1 と $a_M = t_M \exp(i\phi_M)$ 、1 と $a_W = t_W \exp(i\phi_W)$ とすると、各スペクトルは

$$M_n = \frac{\sin n\pi}{n\pi} a_M + \frac{\sin \alpha_M n\pi}{n\pi} (1 - a_M) \quad (2)$$

$$W_{mn} = \frac{1}{mn\pi^2} (1 - a_W) \{ [\sin(1 - \alpha_W)m\pi - \sin m\pi] \times [\sin(1 - \alpha_W)n\pi - \sin n\pi] + \sin \alpha_W m\pi \sin \alpha_W n\pi \} + \sin m\pi \sin n\pi \quad (3)$$

となる。ここで、 t_M, t_W は振幅透過率、 ϕ_M, ϕ_W は位相シフト、 $\alpha_M = d_M/p$ 、 $\alpha_W = d_W/p$ は開口比である。なお、寸法は、ウエハ上でのイメージとして考え、ウエハ上縮小値とする。前述したように、ウエハ回折スペクトルの中でマスク格子に導かれるものは(±1, 1)次、(0, 1)だけなので、式(3)から各スペクトルは

$$W_{\pm 11} = \pm \frac{2}{\pi^2} (a_W - 1) \sin^2 \alpha_W \pi \quad (4)$$

$$W_{01} = 0 \quad (5)$$

となる。すなわち、ウエハ格子からの(±1, 1)次の2光束のみが干渉に寄与する。

Fig. 3 Calculation alignment signal (using checker grating)

(a) Two beams (b) Three beams

Fig. 4 Effect of defocusing

2.3 計算結果

既に述べたように、マスクにはウエハから $(\pm 1, 1)$ 次回折光だけが導かれるため、マスク透過回折光は検出方向にのみ回折し、 U_{m1} で表される。この回折光の中で m が奇数の場合は x の項が消去され、位置ずれに対して感度が無い。そこで、 m が偶数の場合の代表として $m=0$ すなわち U_{01} に着目した。式 (1) ~ (5) からその強度 I_{01} を求めると、次式となる。

$$\begin{aligned} I_{01} &= I_c \cdot U_{01} \cdot U_{01}^* \\ &= I_c' \cdot (1 - \cos 2X) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 I_c は定数であり、 I_c' は次式で表される。

$$\begin{aligned} I_c' &= I_c \cdot \frac{8}{\pi^6} (1 + t_w^2 - 2t_w \cos \phi_w) (1 + t_m^2 \\ &\quad - 2t_m \cos \phi_m) \times \sin^4(\alpha_w \pi) \cdot \sin^2(\alpha_m \pi) \end{aligned} \quad (7)$$

式 (6), (7) からわかるように、 I_{01} は変位 x に関し周期 $p/2$ の周期関数となり、パラメータ $t_m, t_w, \phi_m, \phi_w, \alpha_m, \alpha_w$ については、強度変化の振幅に影響を与えるだけで、位相のずれ（位置ずれ）には寄与しない。 $p=4 \mu\text{m}$ としたときの無次元強度変化 $\bar{I}_{01} (=I_{01}/I_c')$ の計算結果を図 3 に示す。コントラストの高い信号が得られることがわかる。また、式 (6) 中 Z の項が消去され、デフォーカスに依存しないこともわかる。これは、2 光束のみのウエハ回折光が使われ、図 4 (a)

Fig. 5 Two dimensional grating

Fig. 6 Calculation alignment signal (using two dimensional grating)

に示すようにマスク上で 2 光束の干渉となるためである。つまり、デフォーカス位置においてもフォーカス位置と同様に 2 光束の行路長が等しくなり、同じ干渉条件となる。

比較の意味で、ウエハ格子として図 5 に示す二次元格子を用いた場合を調べると、強度変化 I_{01} は次式で表せる。

$$\begin{aligned} I_{01} &= I_b \cdot C^2 D \left\{ \frac{\alpha_w}{4} + \frac{2\alpha_w C}{\pi} \cdot \cos Z \cdot \cos X \right. \\ &\quad \left. + \frac{4C^2}{\pi} \cdot \cos^2 X \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $C = (\sin \alpha_w \pi) / \pi$ 、 $D = (1 - t_w) + t_w \sin^2(\phi_w / 2)$ 、 I_b は定数である。ただし、ここではマスク格子を理想振幅格子と考え、 $t_m=0$ 、 $\alpha_m=0.5$ とした。式 (8) からわかるように、市松格子の場合と異なり、 I_{01} には周期 p の成分と周期 $p/2$ の成分とが現れる。その変化はパラメータ t_w, α_w, ϕ_w の値によって異なり、デフォーカスにも依存する。ウエハ格子を理想位相格子 ($t_w=1$ 、 $\alpha_w=0.5$ 、 $\phi_w=\pi$) とし、 $p=4 \mu\text{m}$ 、 $Z=0, 5, 10 \mu\text{m}$ としたときの無次元強度変化 $\bar{I}_{01} (=I_{01}/I_b \cdot CD)$ の計算結果を図 6 に示す。この結果から、強度変化はデフォーカスに大きく依存し、その振幅、コントラストとも変化することがわかる。これは、二次

Fig. 7 Experimental apparatus

元格子の場合、 $(\pm 1, 1)$ 次と $(0, 1)$ 次の 3 光束のウェハ回折光が使われ、図 4 (b) に示す 3 光束の干渉となるためである。つまり、3 光束の行路長はフォーカス位置とデフォーカス位置とは異なり、同じ干渉条件とはならない。

以上の結果から、ウェハマークに市松格子を用い、マスク回折光の U_{01} を検出することにより、デフォーカス依存性の無い高コントラストの信号が得られることが明らかになった。

3. 実験装置及び実験方法

3.1 実験装置

図 7 に実験装置の概略構成を示す。主な構成としては、検出光学系、ウェハテーブル系、Z センサ系、信号処理回路、アライメントサーボ回路等からなる。

検出光学系は、既に述べた通りであるが、同期検波の信号処理を行うために、AOD (音響光学偏向素子) を用いて入射光を振動させ、A 格子と B 格子とを交互に照明している。

信号処理は、後述するマーク構成を使った差動検出⁴⁾と同期検波とを組み合わせて行った。すなわち、位相差のある A 信号と B 信号の差分を検出することにより、ゼロ点 (A 信号と B 信号がバランスする位置) をクロスする位置検出特性を得ることができる。なお、同期検波処理は市販のロックインアンプを使用して行った。

ウェハテーブルはウェハ面内の一次元方向に微動可能なピエゾ駆動の X テーブル、調整用粗動テーブル等からなる。

アライメントサーボは、アライメント信号とウェハピエゾテーブルによるゼロ点サーボとした。

Z センサ系はウェハ面の高さ方向の位置を測定する

(a) Mask grating mark

(b) Wafer grating mark

Fig. 8 Geometry of mask and wafer marks

ものであり、光学式検出器を用いている。

3.2 マーク形状及び差動検出

実験に用いたマスク格子及びウェハ格子の形状を図 8 に示す。マスク格子は A_M, B_M 、ウェハ格子は A_W, B_W と各々対の格子が対応する形で配置されている。個々の格子寸法及びピッチはウェハ上換算で同一とし、それぞれ $96 \mu\text{m} \times 96 \mu\text{m}$ 、 $p = 4 \mu\text{m}$ とした。マーク間距離はウェハ上で Δ だけずれるように、それぞれ $ML, L + \Delta$ (M は光学倍率、 $L = 120 \mu\text{m}$ 、 $\Delta = 0.8 \mu\text{m}$) とした。これは、それぞれの重なり合う格子 ($A_M - A_W$)、($B_M - B_W$) から得られる A 信号と B 信号との差分をとり、バランスした位置をゼロ点とする差動検出を行うためである。

4. 実験結果と考察

4.1 基本特性及びデフォーカス依存性

図 9 に、ウェハ市松格子とマスク一次元格子の組合せの場合の出力曲線、すなわち、位置ずれに対する信号 (光量) 変化を示す。ただし、ここでは基本特性を調べるため、入射光を振動させずブリアンプ出力を直接取った。なお、横軸は静電容量形変位計で測定したウェハの X 方向変位である。また、ウェハマークはレジスト膜で形成したパターンである。Z はウェハのデフォーカスで、 $0 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m}$ 、 $10 \mu\text{m}$ と変化させた。

得られた出力曲線は、計算結果 (図 3) と非常に良く一致している。 $10 \mu\text{m}$ までデフォーカスさせても、特性の違いはほとんど現れず、デフォーカス依存性が

Fig. 9 Experimental alignment signal (using checker grating)

Fig. 10 Experimental alignment signal (using two dimensional grating)

無いことが実証できた。

図10に、二次元格子を用いた場合の出力曲線を示す。ウェハのデフォーカス(Z)を同様に $0\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ と変化させた。出力曲線はデフォーカスに依存して変化し、非対称性も現れている。また、市松格子の場合に比べてコントラストも悪いと言える。非対称性の原因は、光束が通過するレンズ内の収差等により波面(位相)の乱れが生じるためと考えられる。

これらの結果から、本検出方式において、特に市松格子マークを用いることにより、デフォーカス依存性が無くコントラストの良い位置検出が得られることが確認できた。

4.2 位置検出特性及びサーボ実験

図11に、同期検波処理を行った後の信号の出力曲線(位置検出特性)を示す。同図にはゼロ点付近の出力の時間安定性をあわせて示す。ゼロ点をクロスする領域ではほぼ直線とみなすことができ、ゼロ点サーボ

Fig. 11 Experimental alignment signal by lock-in detection

Fig. 12 Alignment servo signal

可能な位置検出特性が得られた。また、ゼロ点付近の出力のふらつきは変位に換算すると $0.03\mu\text{m}$ 以下となり、高い分解能を有することが確認できた。

この位置検出信号を用いて、ウェハテーブルにフィードバックをかけ、アライメントサーボを行った結果を図12に示す。約 $0.2\mu\text{m}$ 離れた位置からサーボをかけたときの出力信号の変化である。この結果からアライメントサーボにより、 $0.05\mu\text{m}$ 以内に位置合わせできることが確認できた。

4.3 合わせ精度評価

以上述べたアライメントサーボを用いて重ね合わせ精度評価を行った。その手順を以下に示す。

- (1) あらかじめウェハには、実際にプロセスで形成される断面形状のマークとバーニヤ(凹)パターンを作っておく。
- (2) マスクとウェハをセットし、粗動テーブルを用いて粗アライメントを行い、 Z センサを用いて高さ方向の位置合わせを行う。
- (3) アライメントサーボをかけ、バーニヤ(凸)パターンを下地のバーニヤ(凹)パターンに重ねて焼

Fig. 13 Overlay accuracy for four kinds of processed wafers

き付ける。

(4) パーニヤパタンのずれ量を測定する。

図 13 にプロセスで形成した 4 つのサンプルについて評価した結果を示す。すべてのサンプルについて 3σ で $0.15\mu\text{m}$ 以下を満足する良好な重ね合わせ精度結果を得ることができた。

また、サンプル D の結果に示されるように、従来精度が悪化するとされている Al 膜を被覆した工程のマークでも精度が悪化しないことは注目される。これは一つのウエハマークが比較的大きな領域 ($96\mu\text{m}$ □) を持っており、Al 膜の局所的な凹凸があってもその影響は平均化されるためと考えられる。

この結果から、本アライメント方式では、マークのプロセスに影響されずに高い精度が得られることが確認できた。

5. 結 言

二重回折格子 TTL アライメント法を開発し、その基本原理と諸特性を理論解析と実験により確認した。さらに、実際の半導体プロセスで形成したマークを用いてそのアライメントを評価した。

その結果、良好な位置検出信号が確認でき、以下の結果を得た。

(1) ウエハマークに市松格子を用い、マスク透過回折光 U_0 を検出することにより、デフォーカスに依存せず、コントラストの良い位置検出信号が

得られる。

(2) 格子条件を表すパラメータ t_M , t_W , ϕ_M , ϕ_W , α_M , α_W は信号の強度にのみ影響を与える。

(3) アライメント信号によるサーボを行い、 $0.05\mu\text{m}$ 以内の位置決めを達成した。

(4) プロセス形成マークを用いて $3\sigma = 0.15\mu\text{m}$ 以下の高い重ね合わせ精度を得た。

(5) 本方式では、マーク面内の平均化効果により、Al 被覆マークでも精度が悪化しない。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、多くの協力を頂いた(株)東芝・総合研究所機器試作部の永井秀雄氏、小山房幸氏、陰山和夫氏、小林登氏はじめ関係各位に深く感謝します。

参 考 文 献

- 1) G. Bouwhuis & S. Wittekoek: Automatic Alignment System for Optical Projection Printing, IEEE Trans. Electron Devices, **ED-26**, (1979) 723.
- 2) G. Dubroeuq, M. Lacomat & D. Sullerot: Double Diffraction Gratings as Keys for High Contrast Alignment on Wafer Steppers, Microcircuit Engg. 80 Conf., (1980) 181.
- 3) W. R. Trunna, Jr.: An Improved Alignment System for Wafer Steppers, SPIE, 470, Optica Microlithography III, (1984) 62.
- 4) サーボ技術マニュアル, 上巻, 新技術開発センタ (1980) III-81.