エキシマレーザ露光装置用 TTL アライメント法 におけるアライメント光学系の 誤差要因検討と高精度化*

東 木 達 彦** 東 条 徹*** 田 畑 光 雄***
西 坂 武 士† 芳 野 寿 和†† 斎 藤 晋††

The Estimation and Improvement of TTL Alignment Error Budgets for
an Excimer Laser Aligner

Tatsuhiko HIGASHIKI, Toru TOJO, Mitsuo TABATA, Takeshi NISHIZAKA,
Hisakazu YOSHINO and Susumu SAITO

This paper describes studies on the alignment error budgets caused by a TTL (through the lens) alignment optical system (SMART : separated mark TTL alignment) for an excimer laser aligner. Alignment error factors, such as the optical phase fluctuation of the alignment beam, the inclination variation of the alignment incident beam, the tilt of the wafer and the reticle, and the defocus of the reticle, have been analyzed and estimated. It was demonstrated that the total error of the alignment optical system was required to be better than $0.02 \mu\text{m}$ in order to satisfy the positioning strategy of the excimer laser aligner with a $0.05 \mu\text{m}$ (3σ) overlay accuracy. Several compensation methods have been developed and adopted to SMART. As a result, it was obtained experimentally that the total error of the alignment optical system became better than $0.02 \mu\text{m}$. It has met the development goal. The new SMART optical system which was adopted to the KrF excimer laser aligner showed an excellent performance with a better than $0.05 \mu\text{m}$ (3σ) overlay accuracy.

Key words: TTL alignment, error budget, lithography, positioning strategy, overlay accuracy, chromatic aberration, aligner, excimer laser, real-time alignment

1. 結 言

$0.25 \mu\text{m}$ 以下の微細パターンの解像が可能になったエキシマレーザ露光技術¹⁾は、256 Mbit 以上の ULSI を実現するためのクォータマイクロソグラフィ技術として注目されている。このクォータマイクロソグラフィ技術には、解像度の向上とともに、LSI パターンを $0.05 \mu\text{m}$ (3σ) 以下の精度で重ね合わせる高精度なアライメント技術が必要となる²⁾。

TTL (Through the lens) アライメントはウエハとレチクル位置を直接測定できるので、高精度な位置

合わせに適している。ところが、エキシマレーザ等の短波長露光装置に TTL アライメントを適用する場合、投影レンズの色収差により露光光とアライメント光で結像位置が異なる問題が生じ、光学系の設計が困難であった。著者らはこの問題を解決するために、複雑な色収差補正機構を必要とせず色収差の問題を解決した TTL アライメント (SMART) を考案し、光学原理と信号の安定化方法について報告した³⁾⁴⁾。

しかし、 $0.05 \mu\text{m}$ (3σ) 以下の重ね合わせ精度を満足するためには、重ね合わせにおける誤差要因の検討が必要である。特に、アライメント光学系に起因する誤差については、アライメント光軸の傾斜、光路上の空気のゆらぎの影響、レチクル及びウエハの傾斜や光軸方向の変動による誤差等の検討が必要となる。

本報では、SMART 光学方式におけるアライメント誤差要因を検討し、計算と実験で各誤差要因の誤差量を見積もるとともに、補正方法を考案した。この結

* 原稿受付 平成 4 年 11 月 9 日

** 正 会 員 (株)東芝研究開発センタ ULSI 研究所(川崎市幸区小向東芝町 1)

*** 正 会 員 (株)東芝研究開発センタ機械エネルギー研究所(川崎市幸区小向東芝町 1)

† (株)東芝研究開発センタ機械エネルギー研究所

†† (株)トプコン研究所 (東京都板橋区蓮沼町 75-1)

Fig. 1 SMART optics principle

果、検討したSMARTは $0.05\ \mu\text{m}$ (3σ)以下の重ね合わせ精度を満足できる光学系であることが分かった。また、実際にエキシマレーザ露光装置にSMARTを搭載して露光による重ね合わせ精度を評価した結果、目標精度 $0.05\ \mu\text{m}$ (3σ)を達成したので報告する。

2. SMART 光学原理

図1にSMARTの光学原理を示す。露光光に対するウェハの共役位置はレチクル面である。一方、アライメント光に対するウェハの共役位置は露光光とアライメント光との波長が異なるため、レチクルから D だけ離れた仮想結像位置となる。この D が投影レンズの軸上色収差である。SMARTはこの軸上色収差の問題を解決するアライメント法である。図に示すように、レチクル上に2個の格子状マークを設け、上方からそれぞれのレチクルマークに変調周波数が幾分異なったアライメント光を照射する。各々のマークからの回折光(+1, -1次光)は投影レンズを通り、ウェハ上の1個の格子状マークに集光する。このウェハマークからの反射回折光と基準光との位相差を検出することによって、レチクルとウェハの相対位置を知ることができる。

3. 重ね合わせ誤差の要因

露光装置の重ね合わせ誤差は主に、(1)投影レンズ及び露光光照明光学系 ($3\sigma_{EO}$)、(2)アライメント光学系を含む機械系 ($3\sigma_{EM}$) から発生する。各誤差はそれぞれ独立であるとする、装置全体の誤差 ($3\sigma_E$) は、

$$3\sigma_E = \sqrt{(3\sigma_{EO})^2 + (3\sigma_{EM})^2} \quad (1)$$

と表せる。ここで、各々の要素から発生する誤差の配分が等しい ($3\sigma_{EO} = 3\sigma_{EM}$) と仮定すると、 $0.05\ \mu\text{m}$ (3σ)以下の重ね合わせ精度を満足するには、機械系

Table 1 Mechanical error budget of alignment system

1. Stage positioning error	$\sigma_s = \pm 0.02$
2. Environment	$\sigma_c = \pm 0.02$
3. Alignment optical system	$\sigma_a = \pm 0.02$
Total	$\pm 0.035\ \mu\text{m}$

Table 2 Error budget in alignment optical system

1. Stability	± 0.015
2. Beam inclination error	± 0.005
3. Wafer tilt error	± 0.005
4. Reticle tilt error	± 0.005
5. Phase detection error	± 0.001
Total	$\pm 0.017\ \mu\text{m}$

に要求される誤差 ($3\sigma_{EM}$) を $0.035\ \mu\text{m}$ 以下にする必要がある。

機械系の主要な誤差要因を表1に示す。実験に使用した露光装置において、(1)ステージの位置決め誤差 ($3\sigma_s$) は $0.020\ \mu\text{m}$ 、(2)温度等の環境変化 ($3\sigma_c$) は $0.020\ \mu\text{m}$ と求められたので、(3)TTLアライメント光学系の誤差 ($3\sigma_a$) は $0.020\ \mu\text{m}$ 以下の精度となるように設計する必要がある。

4. アライメント光学系の誤差

アライメント光学系によって発生する誤差 $3\sigma_a$ を、(1)光路上の空気のゆらぎの影響、(2)位相差検出誤差の影響、(3)アライメント光軸の傾斜による影響、(4)ウェハの傾斜による影響、(5)レチクルの傾斜による影響に配分して、それぞれのアライメント誤差の検討を行った。各項目の目標精度を表2に示す。

4.1 光路上の空気のゆらぎの影響とその補正方法

図2に示すように、アライメント信号 (Sig.) の位相はレーザ光源からウェハマーク間の空気のゆらぎ ($\delta_1 \sim \delta_4$) によって変化し、アライメント誤差 ΔX_i となる。投光部とレチクル間の δ_1 及び δ_2 を低減するためには、レチクルに2次元の回折格子を配置してレチクルの位置情報をもたない透過0次光を基準光 (Ref.) とすることで行う。更に、レチクルとウェハ間のアライメント光は、投影レンズを通る部分が少なく空気中を通る部分が少ないため、 δ_3 及び δ_4 の影響は小さく、 $\delta_3 = \delta_4 \approx 0$ と置くことができる。従って、ウェハとレチクルの相対位置を X 、ウェハマークピッチ P とすると、アライメント信号と基準信号の位相差をとったアライメント出力は、

$$\Delta\phi = 4\pi X/P \quad (2)$$

と表され、空気のゆらぎの影響が少ないアライメント

Fig. 2 Improved SMART optical system by reducing the phase variations of the alignment beams

Fig. 3 Signal processor block diagram with error compensation circuit

光学系が実現できる。上述した補正によって予備実験を行ったところ、アライメント信号の安定性 ΔX_v は $0.015 \mu\text{m}$ 以下を達成できることが分かった⁴⁾。

4.2 位相検出誤差の影響とその補正回路

図3に、アライメント信号処理回路を示す。アライメント出力信号は、図2に示すビート信号 (Sig., Ref.) の位相変化を位相検出回路によって測定することで得られる。このため、ビート信号の振幅変化は原理上位相検出の精度に影響しない。しかし、実際には信号処理回路の素子の特性が原因で、信号振幅 (I_a, I_r) の変化に伴う位相検出誤差 $\Delta\phi_s$ が発生する。このため、信号処理回路に補正回路を新たに設けた。

位相検出回路には、高速で高分解能な出力信号を得るため、時間分割方式を採用した。光電変換器からのビート信号 (Sig., Ref., 各々 100 kHz) は、それぞれリミットアンプで増幅され、バンドパスフィルタを通してから零点検出用コンパレータに入る。コンパレータで得られたデジタル信号によってフリップ・フロップ回路を動作させ、

時間差から位相差を検出する。出力信号の分解能は、 0.072° ($4.0 \times 10^{-4} \cdot \pi \text{ rad}$) 以下である。これは、ウエハの位置換算で 0.5 nm に相当する。

一方、位相検出誤差 $\Delta\phi_s$ の補正は、あらかじめ測定した $\Delta\phi_s$ と信号振幅 (I_a, I_r) の関係を補正回路内の CPU に記憶しておき、 I_a 及び I_r の変化に応じたアライメント信号の補正値をデジタルディレイ回路に加えることで行う。この補正回路によって、アライメント信号処理回路は、ビート信号の振幅値が変化した場合でも分解能 0.5 nm 以下の安定した出力信号を得ることができる。

4.3 アライメント光軸傾斜による影響

SMART 光学系は投影レンズの光軸に対して 2 光束が対称であるので、原理上ウエハ及びレチクルのデフォーカスによるアライメント誤差は発生しない。しかし、実際にはアライメント光軸は図4に示すように設計値より $\Delta\alpha_0$ 傾斜していると考えられる。光軸が $\Delta\alpha_0$ 傾斜した場合のアライメント誤差 ΔX_{Wz} は、

$$\Delta X_{Wz} = Z_w \cdot \sin\left(\Delta\alpha_0 \cdot \frac{D+E+f_2}{f_2}\right) \quad (3)$$

と表される。ここで、 Z_w はウエハ面の凹凸やレジストの膜厚変化によるウエハ面のデフォーカス量を示す。また、 E, f_2 は図に示した投影レンズの定数を示し、各々レチクル面から入射瞳位置及び入射瞳位置から主平面の距離を表す。

図5に、式(3)を用いてアライメント光軸傾斜 $\Delta\alpha_0$ とアライメント誤差 ΔX_{Wz} の関係を求めた結果を示す。ここでは、 Z_w は多層レジストを使用した場合を仮定して $3 \mu\text{m}$ として計算した。アライメント誤差を $0.005 \mu\text{m}$ 以下にするためにはアライメント光軸の傾斜角度を $1.45 \times 10^{-4} \text{ rad}$ ($30''$) 以下にする必要があ

Fig. 4 Alignment error by alignment beam inclination

Fig. 5 Calculation results of alignment error by alignment beam inclination and reticle tilt

Fig. 6 Calculation result of alignment error by wafer tilt

る。

4.4 ウエハの傾斜による影響

ウエハの傾斜 $\Delta\theta_w$ はアライメント出力信号の周期誤差となり、アライメント誤差 ΔX_{wt} は、

$$\Delta X_{wt} = X \cdot \{1 - \cos(\Delta\theta_{wx})\} \quad (4)$$

と表せる。

図6に、式(4)を用いてウエハの傾斜 $\Delta\theta_{wx}$ とアライメント誤差 ΔX_{wt} の関係を求めた結果を示す。ここでは、ウエハとマスクの相対変位 X に対して ΔX_{wt} が最大となる位置 ($X = P/4 = 1.25 \mu\text{m}$) で計算を行った。アライメント誤差を $0.005 \mu\text{m}$ 以下にするためにはウエハの傾斜角度は 5.1° (0.089 rad) 以下であればよい。

4.5 レチクルの傾斜による影響

レチクルが $\Delta\theta_r$ だけ傾斜すると、図7の破線で示すように、2つのアライメント光はレチクル内で屈折して実線の位置に平行移動する。この時、ウエハ上に集光するアライメント光軸が傾斜するため、ウエハのデフォーカス Z_w によるアライメント誤差 ΔX_{Rt} が発生する。レチクルの屈折率を n 、レチクルの厚さを t と置くと、アライメント誤差は、

$$\Delta X_{Rt} = Z_w \cdot \sin(\Delta\alpha_{w2})$$

Fig. 7 Alignment error by reticle tilt

$$\Delta\alpha_{w2} = \frac{1}{f_1} \cdot \left(1 + \frac{f_2}{E+D}\right) \cdot t \cdot \left(1 - \frac{1}{n}\right) \cdot \Delta\theta_{Rx} \quad (5)$$

と表すことができる。ここで、 f_1 は投影レンズの主平面からウエハ面の距離を表す。

図5に、式(6)を用いてレチクルの傾斜 $\Delta\theta_{Rx}$ とアライメント誤差の関係を求めた結果を示す。アライメント誤差を $0.005 \mu\text{m}$ 以下にするためにはレチクルの傾斜角度を $3.5 \times 10^{-4} \text{ rad}$ ($72''$) 以下にする必要がある。

以上、アライメント光学系で発生する誤差要因を検討した結果、4.1~4.5節で述べた各誤差要因は目標精度以下にすることが可能であり、 $0.05 \mu\text{m}$ (3σ) 以下の重ね合わせ精度を達成するエキシマレーザ露光装置の開発が可能であることが分かった。

5. 実験結果と考察

実際に試作したエキシマレーザ露光装置に X , Y の2軸のSMARTを搭載して、第4章で述べた各誤差要因が目標値以下になることを確認した。アライメント光路上の空気のゆらぎによるアライメント信号の安定性 ΔX_v は、レチクルマークからの基準光をとる方法によって $0.015 \mu\text{m}$ が得られることはすでに報告した⁴⁾。

図8は、図3で示したアライメント信号振幅変化による位相検出誤差と、補正効果を示したものである。補正を施していない場合、アライメントビート信号の信号振幅 I_b , I_r の変化に対して 30 nm であった位相検出誤差(図の○)は、補正回路によってアライメント出力信号の分解能以下(図の●)に低減することができた。

図9は、アライメント出力信号の分解能 ΔX_d を測定した結果である。分解能は、圧電素子とヒンジ機構を用いた微動ステージを 0.6 nm 単位で移動させ(移動量は静電容量センサで測定)、その時のアライメント信号の変化を測定することで求めた。測定の結果、

Fig. 8 Phase detection error induced by the change of alignment beat signal amplitude, and effect on the phase error compensation method

Fig. 9 Experimental result of alignment output signal resolution

アライメント信号の分解能は設計値に近い0.6 nmを得ることができた。

アライメント光軸傾斜は、光学的調整機構を設けることで目標値30"以下に補正した。補正後のアライメント光軸傾斜の影響を確認するため、ウエハZステージを光軸のデフォーカス方向に $Z_w = \pm 100 \mu\text{m}$ 移動させ、この時のアライメント誤差 ΔX_{wz} , ΔY_{wz} (X, Y方向)の変化を測定した。実験の結果を図10に示す。デフォーカス $3 \mu\text{m}$ あたりのアライメント誤差はX, Y軸とも $0.005 \mu\text{m}$ 以下であった。先の計算結果と比較すると、アライメント光軸の傾斜は十分に補正されていることが確認できた。

図11はウエハをウエハ・ティルトステージで $\Delta \theta_{wx}$, $\Delta \theta_{wy}$ 傾斜させた時のアライメント誤差 ΔX_{wt} , ΔY_{wt} を測定した結果である。ウエハ・ティルトステージの傾斜は、 $3.3 \times 10^{-4} \text{ rad}$ (2.3', 15 mm角のウエハチップ周辺で $\pm 5 \mu\text{m}$ のZ方向の移動に相当)だけ与えた。ウエハチップの周辺でZ方向の移動 $1 \mu\text{m}$ に相当する傾きが発生した場合のアライメント誤差は $\Delta X_{wt} = 0.0005 \mu\text{m}$, $\Delta Y_{wt} = 0.003 \mu\text{m}$ であり、目標

Fig. 10 Experimental result of alignment error by wafer defocus

Fig. 11 Experimental result of alignment error by wafer tilt

値 $0.005 \mu\text{m}$ 以下であることが分かった。

図12は、レチクルをレチクル・ティルトステージで $\Delta \theta_{rx}$, $\Delta \theta_{ry}$ 傾斜した時のアライメント誤差 ΔX_{rt} , ΔY_{rt} を測定した結果である。レチクル・ティルトステージの傾斜は、 $7.8 \times 10^{-5} \text{ rad}$ (0.27', 5 inレチクル周辺で $10 \mu\text{m}$ のZ方向の移動に相当)だけ与えた。レチクルの周辺でZ方向の移動 $1 \mu\text{m}$ に相当する傾きが発生した場合のアライメント誤差は $\Delta X_{rt} = 0.0045 \mu\text{m}$, $\Delta Y_{rt} = 0.0030 \mu\text{m}$ となり、目標値 $0.005 \mu\text{m}$ 以下であることが分かった。

以上の結果からSMART光学系で発生する誤差($3\sigma_a$)を予想すると、

$$\begin{aligned} 3\sigma_a &= \sqrt{\Delta X_v^2 + \Delta X_d^2 + \Delta X_{wz}^2 + \Delta X_{wt}^2 + \Delta X_{rt}^2} \\ &= \{(0.015)^2 + (0.0006)^2 + (0.0045)^2 \\ &\quad + (0.003)^2 + (0.0045)^2\}^{1/2} \\ &= 0.017 \mu\text{m} \end{aligned} \quad (6)$$

Fig. 12 Experimental result of alignment error by reticle tilt

Fig. 13 Overlay accuracy

となり、SMART 光学方式は目標精度 $0.02 \mu\text{m}$ を達成できることが分かった。

次に、KrF エキシマレーザ露光装置を用いた露光転写実験により、SMART の重ね合わせ精度を評価した結果を図 13 に示す。アライメントマークを SiO_2 層に形成したウェハ（ウェハ 10 枚、測定 210 点）と、Poly-Si 層に形成したウェハ（ウェハ 5 枚、測定 105 点）を使用した。実験の結果、重ね合わせ精度は X, Y 2 軸とも $0.05 \mu\text{m}$ (3σ) 以下が得られ、目標精度を達成することができた。

6. 結 論

- (1) $0.05 \mu\text{m}$ (3σ) 以下の重ね合わせ精度を得るためには、アライメント光学系に $0.02 \mu\text{m}$ 以下の精度が要求される。SMART 光学方式のアライメント誤差要因を検討し、各要因の誤差量を見積もった結果、(a) アライメント信号の位相ゆらぎ $< 0.015 \mu\text{m}$, (b) アライメント出力信号の分解能 $< 0.001 \mu\text{m}$, (c) アライメント光軸傾斜による影響 $< 0.005 \mu\text{m}$, (d) ウエハの傾斜による影響 $< 0.005 \mu\text{m}$, (e) レチクルの傾斜による影響 $< 0.005 \mu\text{m}$, とすることで、目標精度 $0.02 \mu\text{m}$ 以下を達成できることが分かった。
- (2) アライメントビート信号と基準ビート信号の位相差を高速、高精度に検出するため、時間分割方式を信号処理回路に適用した。また、ビート信号の振幅変化に対する位相検出誤差を低減させる補正回路を設けた。この結果、アライメント出力信号はビート信号振幅に依存せず、 0.6 nm の分解能以下に誤差を低減することができた。
- (3) SMART をエキシマレーザ露光装置に搭載して上記 (a)~(e) の誤差量を測定した結果、各々の目標値を満足し、SMART 光学系で許容される目標値 $0.02 \mu\text{m}$ 以下を達成できることが分かった。
- (4) 実際の露光による重ね合わせ精度をウェハプロセスマークを使用して評価した結果、 $0.05 \mu\text{m}$ (3σ) 以下の高い重ね合わせ精度を得た。

謝 辞

本研究を行うにあたり、貴重なご指導、ご助言を頂きました(株)トプコン研究所の増山正幸氏、(株)東芝研究開発センタの内田憲男氏、桑原理氏、高橋良彦氏、永井秀雄氏、田中国義氏、小山房幸氏に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 笹野幹雄, 石田真二, 田辺容由, 福沢真一, 相崎尚昭: KrF エキシマレーザーステップ用レベンソン型位相シフトマスクの評価, 応用物理学会春季学術講演会予稿集, 30 p-NA-18 (1992) 545.
- 2) M. Suzuki and A. Une: An Optical-heterodyne Alignment Technique for Quarter-micron X-ray Lithography, J. Vac. Sci. Technol. B, 7, 6, Nov./Dec. (1989) 1972.
- 3) T. Higashiki, T. Tojo, M. Tabata, T. Nishizaka, M. Matsumoto and Y. Sameda: A Chromatic Aberration-free Heterodyne Alignment for Optical Lithography, Jpn. J. Appl. Phys., 29, 11, (1990) 2568.
- 4) 東条 徹, 東木達彦, 田畑光雄, 西坂武士: 投影露光装置用 TTL アライメント法, 精密工学会誌, 58, 3 (1992) 539.