色収差 2 重焦点法による SR ステップ用 アライメント装置の開発*

宮 武 勤** 浜 田 史 郎***

Chromatic Bifocus Alignment System for SR Stepper

Tsutomu MIYATAKE and Shiro HAMADA

This paper describes an alignment system developed for synchrotron radiation (SR) X-ray stepper. A bifocal lens, which has two object planes and a single image plane on a common optical axis utilizing a longitudinal chromatic aberration, is applied to the alignment system. The chromatic bifocal lens observes high contrast images of alignment marks printed on a mask and wafer. To be unaffected by resist film coated on the wafer and a gap variation between mask and wafer, the wafer marks are observed with broadband light illumination. The mark images are focused on a CCD line sensor, and the video signal is digitized and used for the alignment algorithm. The algorithm calculates the displacement between the mask and wafer with a new correlation function. The alignment system detects the displacement between the mask mark and wafer marks with precision of better than 13 nm.

Key words: SR, X-ray stepper, mask, wafer, alignment, chromatic bifocal lens.

1. は じ め に

高輝度な X 線源であるシンクロトロン放射光 (SR 光) を光源に用いた X 線リソグラフィは、解像性の良さと深い焦点深度及び高いスループットの点からクォータミクロン領域における超 LSI の製造に有望な技術とされている。この X 線リソグラフィはマスクとウエハを数十 μm の間隔 (ギャップ) で平行に近接させて、X 線によりパターン転写を行う露光技術である。

このような微小なパターンを露光する X 線露光装置 (SR ステップ) においては、最小線幅に応じてマスクとウエハを高精度に位置合わせすることが要求される。そのためには、数 nm から数十 nm の許容値でマスクとウエハの相対位置を検出する (アライメント) ことが必要である。

このアライメント技術としては、各種の方式が提案されている^{1)~4)}。しかしそれぞれ高い検出分解能をもつものの、レジスト膜の影響やマスクとウエハのギャップ変動の影響などによる位置検出誤差の問題を

抱えている。

このため、それら要因の影響を受けずに 10 nm オーダの位置検出分解能を実現するアライメント技術について研究を進め⁵⁾⁶⁾、次の成果を得た。

- (1) マスクとウエハを 2 つの異なる波長の光により拡大して観察する色収差 2 重焦点法
- (2) レジスト膜の影響を受けにくいウエハの帯域光照明を色収差 2 重焦点法に適用する方法
- (3) 観察したマスクマークとウエハマークの像からマーク間の光軸直交方向の相対位置を正確に求める相似性パターンマッチング信号処理方法

本論文は、これらの研究成果により開発した SR ステップ用アライメントの構成と評価結果⁷⁾について述べる。

2. マスクとウエハの位置検出方法

2.1 色収差 2 重焦点法

図 1 にレンズの軸上色収差を示す。レンズに白色光を入射すると、波長により屈折率が異なるために複数の焦点が生じる。この焦点のずれを軸上色収差と呼びこの性質を 2 重焦点法に利用している。

図 2 に色収差 2 重焦点法を示す。A 点はレンズの主平面位置を表し、波長 α と波長 β ($\alpha < \beta$) の軸上色収差に相当する距離だけ離れた位置にウエハとマスク

* 原稿受付 平成 4 年 3 月 30 日

** 正 会 員 住友重機械工業(株) (東京都田無市谷戸町 2-1-1)

*** 住友重機械工業(株) (東京都田無市谷戸町 2-1)

Fig. 1 Longitudinal chromatic aberration of lens

Fig. 2 Principle of bifocal lens utilizing chromatic aberration

Fig. 3 Optical action of pattern barrier filter

を設置している。波長 α の光線によるウェハとマスクの像は、各々 B 点と C 점에結像している。一方、波長 β の光線によるウェハとマスクの像は、各々 C 点と D 점에結像している。ここで、C 점에着目すると波長 α によるマスクの像と波長 β によるウェハの像が同時に結像している。これにより、同一光軸上に 2 つの焦点と 1 つの像点をもった光学系が実現する。また、マスクとウェハの像の鮮明度は、各像の結像波長とレンズの NA によって決まる。

2.2 パターンバリアフィルタ

図 2 に示すようにマスクとウェハ上に棒状のマークを置くと、C 点では図 3 (a) に示すような結像ができ

(a) Single wavelength light illumination

(b) Broad band light illumination

Fig. 4 Effects on broad band light illumination

る。波長 α で結像したマスクマーク上には、波長 β で D 점에結像しているマスクマーク像がぼやけた像となって重なる。一方、波長 β で結像したウェハマーク上には、波長 α で B 점에結像しているウェハマーク像がぼやけた像となって重なる。さらに、C 点で同時に結像したウェハマークとマスクマークは互いにフレアとなって互いの像のコントラストを低下させている。この 2 つの現象が図 2 に示す 2 重焦点レンズの像質を大きく低下させている。

そこで、この像質の低下をなくす作用をもつ素子が図 3 (b) に示すパターンバリアフィルタ (PB フィルタ) である。このフィルタは図 2 に示すように E 점에置かれる。また、このフィルタはマスクマークとウェハマークの形状と配置に応じて 3 つの部分から構成される。中央の部分 I は、波長 α の光線を透過するが、波長 β のぼやけた像と波長 β のフレアを遮断するので C 点には鮮明な波長 α のマスクマークが結像する。両側の部分 II は、波長 β の光線を透過するが、波長 α のぼやけた像と波長 α のフレアを遮断するので、C 点には鮮明な波長 β のウェハマークが結像する。以上の作用により、図 2 に示す 2 重焦点レンズでは C 点において理想的な結像が得られる。

2.3 ウェハマークの帯域光照明

ウェハマークの上には、常に感光剤であるレジスト膜が薄く ($1\mu\text{m}$ 前後) 塗布されている。単色光線 (e 線: 546nm) をそのようなマークに入射すると、図 4 (a) に示すように、マーク像に干渉じまが重なるためにマーク像がひずんでしまう。この干渉じまは、マーク段差付近でレジスト膜厚が変動するために生じている。

一方、帯域をもった光線 ($546\text{nm} \leq \lambda \leq 650\text{nm}$) を同じマークに入射すると、図 4 (b) に示すように干渉じまがなくなり、マーク像が鮮明に結像している。理由は、連続した各々の波長の光線により生じた干渉じまが足し合わされて平均化されるため、干渉じまのコントラストがほとんどなくなってしまうためである。

Fig. 5 Application of achromatization to chromatic bifocal lens

Fig. 6 Alignment video signal

次に、この帯域光による結像を色収差2重焦点レンズに適用するための方法を説明する。図5(a)に示すように、2重焦点レンズに波長 γ ($\gamma > \beta$)の光線を入射する。波長 γ によるウェハマークとマスクマークの像は、各々F点とG点に結像する。F点のウェハマーク像をC点に結像させるためには、波長 β と波長 γ の光線に対して焦点の色消し($f\beta = f\gamma$)をすればよい。その結果を図5(b)に示す。波長 β と波長 γ の焦点が一致しているので、波長 β と波長 γ の光線は同じ光路を通りC点に結像する。従ってC点では、波長 β と波長 γ で結像するウェハマークを観察することができる。

帯域光によりウェハマークを観察するためには、色消しの対象となる波長を、前記2波長(β, γ)から帯域光の波長に置き換えればよい。その実例を図10に示す。この図は、対物レンズの軸上色収差を表している。帯域光の波長域は546 nmから650 nmまでである。ウェハマークはこの帯域光で結像する。一方、マスクマークは単色光(436 nm)で結像する。また、両方のマークは光軸方向に40 μm 離れている。

2.4 相似性パターンマッチング信号処理

図2のC点にカメラを置いて、マスクマークとウェハマークの像を観察すると、図6に示すような信号波形が得られる。両側のピークがウェハマークの信号

Fig. 7 First derivative of alignment signal

波形を、中央のピークがマスク信号を表している。信号処理の目的は、この信号間の距離を求めることである。

まず、各マークのコントラスト変化を強調するために、1次微分処理をした波形を図7に示す。相似性パターンマッチング処理を、この信号波形に対して適用する。適用方法は、四角で囲んだ各マークの信号波形間で相関を取り、相関値が最大となる値をマーク間の距離 W としている。相似性パターンマッチングは、式(1)により定義され、対象となる波形間の相関を極めて短時間の内に求めることができる。この関数は、 W と P を変数にもちマーク間の距離を表す W に対して極めて敏感な関数となっている。

$$A(P, W) = \sum_{j=1}^R V'(P+j) \times V'(P+W+j) \quad (1)$$

ただし、 P : 相関区間の開始点、 R : 相関区間、 W : 2つの対象波形の距離、 V' : センサ出力の1次微分値である。

3. 装置の構成と光学特性

3.1 装置構成

図8に装置の構成を示す。色収差2重焦点光学系は対物レンズ(NA=0.32, 10倍)とパターンバリアフィルタ及びリレーレンズ(10倍)から構成される。この光学系で40 μm の間隔で離れたマスクマークとウェハマークを拡大して1次元CCDカメラ上に結像させている。結像したマーク像は電気信号に変換された後、相似性パターンマッチング信号処理により両マーク間の光軸直交方向の相対位置が計測される。この光学系と露光光であるX線との干渉を少なくするために、光学系はウェハ面の法線に対して50°傾いている。ただし検出光軸は、対物レンズ先端の反射ミラーで反射されてウェハ面に対して垂直になっている。光学系の大きさは約 $\phi 30 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}^{(1)}$ である。また、照明光はファイバを通して光学系に入射している。

Fig. 8 Schematic diagram of chromatic bifocus alignment system for SR stepper

Fig. 9 Illumination light

Fig. 10 Longitudinal chromatic aberration curves of objective lens

本SRステッパではマスクとウエハの3軸方向の相對位置を計測するため、この装置は3台搭載される。

3.2 光学特性

マスクとウエハは図9に示す単色光(g線: 436 nm)と帯域光($546 \text{ nm} \leq \lambda \leq 650 \text{ nm}$)により落射照明される。対物レンズは図10の軸上色収差特性をもつ2重焦点レンズであり、前記単色光と帯域光の波長に対して40 μmの軸上色収差が得られている。この特性からマスクマークはg線で結像し、ウエハマークは前記の波長域の帯域光で結像する。パターンバリアフィルタは図3に示す形状をしており、部分Iと部分IIは各々図11の分光透過特性をもっている。部分

Fig. 11 Spectral transmissivity of pattern barrier filter

Fig. 12 Schematic diagram of alignment experiment for chromatic bifocal lens

Iは、g線で結像するマスクマークの光線だけを透過する。部分IIは、帯域光で結像するウエハマークの光線だけを透過する。

4. 性能評価

4.1 位置検出精度

図12に実験装置を示す。実験装置は、ウエハステージは固定で、微動ステージに吸着されたX線マスクが動く構造となっている。微動ステージは、一軸のヒンジ機構でアクチュエータに圧電素子、その変位量の検出に静電容量センサを用いている。実験は、微動ステージを0.01 μmピッチで0 μmから0.18 μmの範囲でステップ駆動させ、アライメント装置でマスクとウエハマークの光軸直交方向の相對位置を検出することによって行った。また、X線マスクのマークコントラストを向上させるためにX線透過膜の膜厚を調整した。具体的には、g線に対するマーク(タンタル)の反射率をマーク周辺のプラック部分の反射率よりも小さくした。ウエハマークは、Siをエッチングしたパターン上にレジスト(SAL 601-ER 7)が約1 μm塗布されている。各マークは図2に示す形状をしている。マスクマークの寸法は幅0.8 μm×長さ100 μm、ウエハマークの寸法は幅32 μm×長さ100 μmである。

図13に実験結果を示す。横軸はマスクステージの駆動量を、縦軸はアライメント装置の検出値を示す。

Fig. 13 Sample standard deviation (3σ) and sample mean of the alignment output

Fig. 14 Schematic diagram of alignment experiment for broad band light illumination

これから次の位置検出精度が得られた。ただし、位置検出分解能は検出値45回の偏差(3σ)を表し、リニアリティは検出値45回の平均値と近似直線との差の最大値を表す。

位置検出分解能(3σ) $\leq 0.013 \mu\text{m}$

リニアリティ $\leq 0.002 \mu\text{m}$

4.2 帯域光照明の効果

図14に実験装置を示す。1つのウェハマークは3本の棒状のマークから構成されている。このウェハマークは10種類ある。各マークの違いは、中央の棒状マークの位置が、両側の棒状マークの中心位置に対して、 $0 \mu\text{m}$ から $0.18 \mu\text{m}$ まで $0.02 \mu\text{m}$ ピッチで変化していることである。この10種類のマークを単色光(e 線 $=546 \text{ nm}$)と帯域光($546 \text{ nm} \leq \lambda \leq 650 \text{ nm}$)で各々検出した。

図15に実験結果を示す。横軸は、各ウェハマークにおける中央の棒状マークの位置ずれを表し、縦軸はアライメント装置の検出値を表す。これから単色光の場合は検出誤差が大きく、最大で約 $0.08 \mu\text{m}$ の誤差

Fig. 15 Alignment accuracy with illumination variation

Fig. 16 Alignment accuracy with focus shift

が出ている。原因は図4(a)で示すように、マーク像のひずみである。一方、帯域光の場合はほとんど検出誤差がない。これは図4(b)で示すように、マーク像が鮮明に観察されるためである。

4.3 フォーカス変動

図12に示す実験装置において、アライメント装置の位置を、光軸方向に $1 \mu\text{m}$ ピッチで $-3 \mu\text{m}$ から $+3 \mu\text{m}$ の範囲で移動させて、各フォーカス位置でマスクとウェハの相対位置を検出した。

図16に結果を示す。図において横軸はフォーカス変動量を、縦軸はアライメント装置の検出値を表す。フォーカス変動と共に検出値が変化しており、対物レンズ焦点深度($\pm 1.5 \mu\text{m}$)における検出値の変化量は $0.02 \mu\text{m}$ 以下であることがわかった。

5. ま と め

SR ステッパ用アライメント装置において、その位置検出精度が、レジスト膜の影響やマスクとウエハに対するフォーカス変動の影響をほとんど受けない方式を開発した。

その結果、以下の結論を得た。

- (1) 色収差2重焦点光学系により光軸方向に40 μm 離れたX線マスクとウエハがそれぞれ単色光と帯域光で同じ像面に結像することを実証した。
- (2) 観察したマスクマークとウエハマークの像からマーク間の光軸直交方向の相対位置を正確に求める相似性パターンマッチング信号処理の有用性を実証した。
- (3) 帯域光で結像したウエハマークの像が、レジスト膜中で生じる干渉じまの影響を受けずに鮮明に観察されることを実証した。さらに、位置検出精度がレジスト膜の影響を受けないことを実証した。
- (4) 3 μm 程度のフォーカス変動は、位置検出精度にはほとんど影響しないことを実証した。
- (5) 以上により開発した装置が0.013 μm よりも高い位置検出分解能をもつことを実証した。

今後は、開発した装置をSRステッパに搭載して⁸⁾、X線露光による性能評価と実際のLSI製造プロセスへの適用性を評価する予定である。

参 考 文 献

- 1) A. Une et al.: High Throughput and Accuracy X-ray Stepper with Plasma Source, SPLE Proc., Vol. 773, VI, (1987).
- 2) 田中良治ほか: 差動型LFZP法によるX線露光装置における位置ずれ検出, 昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 第3分冊, (1987) 949.
- 3) 内田憲男ほか: 二重回折格子による間隙変化に鈍感なマスクとウエハの位置合わせ法, 精密工学会誌, 54, 10 (1988) 1951.
- 4) 宇根篤暢ほか: 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.
- 5) 宮武 勤, 浜田史郎: 色収差2重焦点装置による高精度位置検出(第1報), 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 第3分冊, (1989) 667.
- 6) 宮武 勤, 浜田史郎: 色収差2重焦点装置による高精度位置検出(第2報), 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 第3分冊, (1990) 1063.
- 7) 宮武 勤, 浜田史郎: 色収差2重焦点装置による高精度位置検出(第3報), 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 第1分冊, (1991) 347.
- 8) 佐藤文昭ほか: SR用たて形ステッパの開発, 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 第1分冊, (1991) 367.