研究

X線露光用位置合わせ法の研究*

石 原 直**

Mask Alignment Method for X-Ray Lithography

Sunao ISHIHARA

To achieve accurate pattern registration in proximity printing with divergent X-rays, three dimensional geometrical analysis of registration error factors has been carried out theoretically. Analysis shows that pattern registration is achieved by controlling the relative displacements of mask and wafer along six axes; shifts x and y , rotation θ , spacing z , and inclinations α and β , and that the positioning accuracy required in the each vertical direction can be reduced by a factor of R/D , compared with the horizontal positioning, where R is

wafer radius and D is exposure distance. It is also shown that isotropic wafer distortion can be corrected by proximity gap control, just as a run-out error. According to these considerations, an alignment system has been developed utilizing a six degree of freedom positioner, electro-static gap detectors, photo-electric mark detectors and micro-computer software. The system ability for pattern registration has been evaluated by experimental exposures at an error of less than $\pm 0.2 \mu\text{m}$, which is sufficient for fabricating devices with $1 \mu\text{m}$ design rules.

Key words: mask alignment, X-ray lithography, pattern registration, geometrical analysis, alignment system.

1. は じ め に

Si ウエハ上に微細なパタンを形成するマイクロ加工技術は、VLSI 実現のための重要な基礎技術の一つである。中でも、高精度でパタン創成の可能な電子線でマスクを作り、解像力の高いX線でウエハに転写する加工法は、生産性の高い微細パタン形成が期待できる。

軟X線を用いるリソグラフィ技術は、1972年にMITのSmithらが提案¹⁾して以来、各方面で解析、実験が行われ、高解像性、耐じん性などの優れた特長が確認されている。しかしながら、これまでの応用例は、比較的小さい露光面積でマスク合わせの容易な表面弾性波素子や磁気バブル素子に集中し、半導体デバイスへの応用例は少ない。これは、広い面積にわたっての解像力に見合うパタン合わせの技術が一つのネックとなっていたためである。

リソグラフィにおけるパタン合わせ精度は、経験的に線幅の1/5とされ、最小線幅 $1 \mu\text{m}$ のパタン転写を目標とすると、合わせ精度として $\pm 0.2 \mu\text{m}$ が要求される。

そして、発散光を用いてプロキシミティ露光を行うX線露光では、X線光軸方向も含めた立体的位置合わせが必

要である。これまで、このような位置合わせ法について系統的に論じた報告は見当たらない。また、X線露光用のマスク合わせ法として、McCoyらがX線を用いる方法²⁾、Flandersらが回折格子による方法³⁾などを提案しているが、いずれも実験室段階のものにとどまっている。

本論文は、X線露光法に関する総合的な研究⁴⁾⁵⁾の中で、マスク、ウエハ位置合わせ法についての基本的考察と、それに基づく位置合わせ装置の試作結果の報告である。

2. 位置ずれ誤差要因の解析

X線露光では、プロキシミティ露光でも高い解像力が得られることが大きな利点の一つである。一方、平行な軟X線を得ることはむずかしく、プロキシミティ露光でありながら、発散X線束を用いる。これは、数次にわたる転写パタンの位置合わせを考える上で重要なファクタである。マスクとウエハを理想的な平面の剛体と仮定し、ウエハ上の多層パタン間の重ね合わせ誤差について考察を加える。

マスクパタンのX線によるウエハ面への投影像の、ウエハパタンに対する位置ずれは、ウエハに対するマスクの空間的な位置と姿勢の露光レベル間での誤差によって生じる。いま、マスク、ウエハに関する座標系を図1のように設定する。異なる露光レベル間でのマスクの位置誤差を $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 、姿勢誤差を $\Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \theta$ とすると、マスク上の点 $P(R, \theta)$ は、以下の位置ずれをもってウエハ上の点 P' に投影される。

* 原稿受付 昭和54年11月16日、昭和51年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和51年10月13日)および昭和52年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和52年10月17日)ならびに昭和53年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和53年10月4日)にて発表。

** 正会員 日本電信電話公社武蔵野電気通信研究所(武蔵野市緑町3-9-11)

図1 座 標 系

(a) ギャップ変動による位置ずれ (run-out 誤差)

(b) マスクの傾きによる位置ずれ
図2 マスク、ウエハの幾何学的関係

- (1) X線光軸に垂直な平面方向の位置誤差 $\Delta x, \Delta y$ は、そのまま、ウエハ全面にわたって様な位置ずれを生じる。
- (2) マスクパターンは、図2(a)に示すように、発散光束により半径方向に r だけシフトした位置に投影され、プロキシミティギャップを S 、線源距離を D としたとき、 $r = (R/D)S$ である。 r 自体は位置ずれとはならないが、マスクの位置が露光レベル間で垂直方向に Δz だけ変化すると、半径方向の位置ずれ

$$\Delta r_s = \frac{R}{D} \Delta z \quad (1)$$

を生じる。これを、run-out 誤差と呼ぶ。

- (3) マスクの傾き誤差 $\Delta \alpha, \Delta \beta$ は、図2(b)に $\Delta \alpha$ について示すように、2種類の位置ずれを引き起こす。

一方は、 $\Delta \alpha, \Delta \beta$ に伴って生じるプロキシミティギャップ変化による半径方向の位置ずれで、

$$\Delta r_\alpha = \frac{R}{D} R \sin \theta \sin \Delta \alpha \doteq \frac{R^2 \sin \theta}{D} \Delta \alpha \quad (2)$$

$$\Delta r_\beta = \frac{R}{D} R \cos \theta \sin \Delta \beta \doteq \frac{R^2 \cos \theta}{D} \Delta \beta \quad (3)$$

で表される。他方は、 $\Delta \alpha, \Delta \beta$ で y, x 方向に生じるいわゆる cosine 誤差で、

$$\Delta y_\alpha = -R \sin \theta (1 - \cos \Delta \alpha) \doteq -2R \sin \theta \left(\frac{\Delta \alpha}{2} \right)^2 \quad (4)$$

$$\Delta x_\beta = -R \cos \theta (1 - \cos \Delta \beta) \doteq -2R \cos \theta \left(\frac{\Delta \beta}{2} \right)^2 \quad (5)$$

で表される。 $\Delta y_\alpha, \Delta x_\beta$ は、 $\Delta \alpha, \Delta \beta$ についての2次の項であり、他の位置ずれ成分に比べて十分に小さいと考えてよい。

- (4) z 軸まわりの回転誤差 $\Delta \theta$ は、円周の接線方向に、半径に比例する位置ずれ

$$\Delta t = R \Delta \theta \quad (6)$$

を生じる。

ウエハ上の各点では、以上の位置ずれのベクトル和だけ、パターン位置ずれを生じることになる。合成ベクトルの直交軸成分を $\Delta X, \Delta Y$ として以上の誤差をまとめると、

$$\begin{aligned} \Delta X = & \Delta x + \frac{R \cos \theta}{D} \Delta z - R \sin \theta \Delta \theta \\ & + \frac{R^2 \cos \theta}{D} (\sin \theta \Delta \alpha - \cos \theta \Delta \beta) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Delta Y = & \Delta y + \frac{R \sin \theta}{D} \Delta z + R \cos \theta \Delta \theta \\ & + \frac{R^2 \sin \theta}{D} (\sin \theta \Delta \alpha - \cos \theta \Delta \beta) \end{aligned} \quad (8)$$

となり、位置合わせには、6軸の制御が必要である。

これから、以下の性質が明らかとなる。

- (1) 水平方向の誤差 $\Delta x, \Delta y, \Delta \theta$ に対して、垂直方向の誤差 $\Delta z, \Delta \alpha, \Delta \beta$ が引き起こす位置ずれは、パラメータ R/D 倍だけ小さい。したがって、水平方向に対して垂直方向の各制御軸への要求精度は、パラメータ R/D で決められる値だけ低くなる。
- (2) R は、姿勢制御（回転と傾き）への要求精度を示すパラメータで、露光面積が大きくなるほど姿勢制御の重要度が増大する。
- (3) 位置ずれの現れ方は、ウエハ面内の角度位置に対して周期的であり、 x, y 軸上は、誤差要因の分離が

容易な場所である。

これまでの議論は、理想的な平面の試料を仮定して進めてきたが、実際には、試料は様々のひずみを有している。その中で、パタン位置ずれの原因として最も大きいのはプロセスによるウエハの変形である。ウエハ加工プロセスでウエハ表面に付着された膜は、その内部応力によりウエハに反りを与え、結果としてパタンピッチが変化する。例えば、MOSプロセスにおいて、50 mm ピッチで $-0.2 \sim +0.8 \mu\text{m}$ のピッチ変化が報告されている⁶⁾。反りはプロキシミティギャップの変動をもたらし、ピッチ変化はそのまま位置ずれとなる。このピッチ変化は、ほぼ等方的なものとみなせるため、ウエハ面内のピッチ変化による位置ずれの分布は、式(1)の run-out 誤差と等価な性質を有する。したがって、プロキシミティギャップの制御によって、ウエハ伸縮に伴う位置ずれの修正が可能である。

3. 位置合わせ制御法

ウエハ面内の異なる3点で、ウエハパタンに対するマスクパタン投影像の xy 方向の位置ずれを測定すれば、式(7)、(8)より、6元連立1次方程式

$$A\mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (9)$$

が成立する。ここに、 $\mathbf{x}$ は位置、姿勢の誤差ベクトル、 $\mathbf{b}$ は3点で測定された位置ずれベクトル、 A は位置ずれ測定点の配置で決まる係数マトリクスである。 $|A| \neq 0$ となるよう配置を選べば、方程式(9)は一意に解け、各軸方向の誤差成分を完全に分離できる。したがって、上記位置ずれ測定手段と6軸移動機構で、位置合わせ装置を構成することが可能である。

しかしながら、マスクパタンのX線投影像の位置測定は簡単でなく、6元連立方程式を逐次解きながら制御する方式は実用的でない。そこで、より単純な装置構成の可能な制御方式を考える必要がある。先に論じた制御軸への要求精度を決めるパラメータ R/D は、通常0.1以下であり、実現精度の観点から垂直方向と水平方向の制御を分けて考える。

1) プロキシミティギャップ制御法

ウエハ面に対するマスク面の垂直方向の空間的位置と姿勢は、異なる3点における両者間のギャップ値で一意に記述できる。そこで、3点でマスク、ウエハ間のギャップ s_1, s_2, s_3 を測定し、

$$s_1 = s_2 = s_3 = S \quad (10)$$

という制御を行えば、平行なプロキシミティギャップ S を設定できる。いま、垂直方向に弾性的に支持されたマスクに、異なる3点で個別の変位 $\Delta d_j (j=1, 2, 3)$ を与え

図3 ギャップ制御の幾何学的関係

ると、三つの測定点における変位 $\Delta s_i (i=1, 2, 3)$ は、

$$\Delta s_i = \sum_{j=1}^3 c_{ij} \Delta d_j \quad (11)$$

で表される。ここに、 c_{ij} は測定点と駆動点の相対配置で決まる係数マトリクスである。式(11)において、 $\Delta s_i = S - s_i$ においてできる3元連立方程式を解き、求めた Δd_j だけ各点を駆動すれば、式(10)の制御が実現される。図3は、係数マトリクスが最も単純となる測定点、駆動点の配置を示す。このとき、測定点、駆動点の半径位置の比 $e = R_2/R_1$ を用いて、上記連立方程式の解は、

$$\begin{bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_2 \\ \Delta d_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1+2e & 1-e & 1-e \\ 1-e & 1+2e & 1-e \\ 1-e & 1-e & 1+2e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S-s_1 \\ S-s_2 \\ S-s_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

となる。

2) 平面方向の位置合わせ制御法

マスクとウエハが平行な間隙をもって対向配置された状態で、残る変数 $\Delta x, \Delta y, \Delta \theta$ に関する制御は、フォトリソグラフィにおけるマスク合わせと同様で、種々の方法が考えられる^{7)~9)}。ここでは、先に述べたウエハ伸縮による位置ずれの補正も考慮する。前章での考察に基づき、 xy 方向位置ずれ測定マークを x 軸上の2点 $P_L(R_0, \pi)$, $P_R(R_0, 0)$ に配置し、誤差要因として $\Delta x, \Delta y, \Delta \theta, \Delta s$ を考えると、式(7)、(8)は、左右測定点 P_L, P_R で

$$\left. \begin{aligned} \Delta X_L &= \Delta x - \frac{R_0}{D}(S + \Delta s) \\ \Delta X_R &= \Delta x + \frac{R_0}{D}(S + \Delta s) \\ \Delta Y_L &= \Delta y - R_0 \Delta \theta \\ \Delta Y_R &= \Delta y + R_0 \Delta \theta \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

と単純化される。ここで、 $(R_0/D)S$ は、ウエハマークが前回の露光レベルで焼き込まれた時の run-out である

図4 位置合わせシステムの構成

が、全露光レベルでウエハマークを共用すれば、 $(R_0/D)S=0$ となる。また、 $(R_0/D)\Delta s$ は、式(1)で示されるギャップの変動による run-out 誤差であるが、マスクマークの位置を測る(そのX線による投影像ではない)場合には、ウエハ伸縮によるマークピッチ変化に相当する。以上の条件で式(13)を解くと、

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= (\Delta X_L + \Delta X_R)/2 \\ \Delta y &= (\Delta Y_L + \Delta Y_R)/2 \\ \Delta \theta &= (\Delta Y_R - \Delta Y_L)/2R_0 \\ \Delta s &= D(\Delta X_R - \Delta X_L)/2R_0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

となる。ただし、X線露光におけるプロキシミティギャップは、解像力、転写パターン品質に関係する量である⁵⁾ことに注意を要する。 Δs の制御を行うかどうかは、その露光レベルにおける合わせ精度と線幅精度に対する要求の度合に応じて判断しなければならない。

4. 位置合わせ装置

4.1 装置の試作

図4に試作した位置合わせシステムの構成を示す。装置はマイクロコンピュータで制御し、前章で考察したアルゴリズムをソフトウェアで実現する方式とした。

位置合わせ機構は、マスク側の3点駆動Zステージとウエハ側の $xy\theta$ ステージから構成した。各ステージとも板ばねによる完全弾性支持構造で、駆動コイルに発生する電磁力とばねの弾性力のつりあいで位置決めを行うため、摩擦やバックラッシュがない。 θ ステージでは、駆動に交流電圧を重ねる電圧印加法を用いることで、電歪素子特有のヒステリシスを除いた。レーザ干渉計による測定の結果、各軸とも、 $0.01\mu\text{m}$ オーダの移動分解能を有していた⁴⁾。

図5 超小形ギャッププローブ

ギャップ検出には、非接触でかつ高い検出分解能を得るため、静電容量方式¹⁰⁾を用いた。大気中露光⁴⁾を行うためのマスク上方での空間的制約と測定の安定性向上のために、図5に示す超小形プローブを試作し用いた。また、本方式は、LC発振の基本式

$$F = \{2\pi\sqrt{L(C_0 + \epsilon_0 A_0/s)}\}^{-1} \quad (15)$$

F : 発振周波数、 L : 発振器のインダクタンス、 C_0 : 固定容量、 ϵ_0 : 真空の誘電率、 A_0 : プローブの電極面積

で表される非線形特性を有するため、式(15)を $\epsilon_0 A_0/C_0 s$ について級数展開して得られる関係式

$$F_{s\infty} - F \doteq F_{s\infty} \frac{\epsilon_0 A_0}{2C_0} \frac{1}{s} \quad (16)$$

を利用し、図4に示す回路構成で線形化した。試作したギャップ検出器とレーザ干渉計で、同一物体の変位を同時測定したところ、測定値の差の最大値は $0.5\mu\text{m}$ であった。

位置ずれ検出は、 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ メンブレンのX線マスク¹¹⁾が可視光に対して高い透明度をもつことを利用して、振動形光顕微鏡により、顕微鏡内の基準スリットとマスク、ウエハのアライメントマーク拡大像($10\times$)の相対位置を検出する方式とした。この反射形

明部はAuパタン，暗部は透明メンブレン
(a) マスクマーク

明部はSi主面，暗部は微小くぼみ群
(b) ウエハマーク

(c) ウエハマーク断面図
(100)ウエハの場合

中央部：目視観察用，周辺部：光電検出用

図6 アライメントマーク

検出法¹²⁾における精度確保には，アライメントマークのコントラストが重要である．特にウエハマークでは，ウエハ加工プロセスでの表面変化によるコントラスト低下を防ぐ必要がある．そこで，異方性エッチングで形状加工を施したマークを用い，高コントラストを確保した．図6にアライメントマークの形状，構造を示す．マスクマークのバックグラウンドが暗部となるよう配慮してある．図7に，本方式で反射率の最悪条件である表面状態のウエハマークを検出した例を示す．これより，位置ずれがゼロの近傍における位置検出分解能は， $0.1\mu\text{m}$ 以下である．

4.2 重ね合わせ精度の評価

試作した装置の合わせ精度の評価を目的に，露光実験による転写パタンの位置ずれ測定を行った．ウエハ上に重ね露光のされたパタン相互の位置ずれには，装置自体

図7 マーク検出分解能と検出再現性

図8 パタン位置ずれの分布

の合わせ誤差に加えて，露光レベル間のマスク誤差，ウエハひずみ，平面度不良など，様々の誤差要因が含まれる．ここでは装置固有の精度を抽出するため，2レベルのマスクで1枚のウエハを同一プロセス条件で繰返し露光することにより試料自体の誤差の影響を除き，パタン合わせ状態の再現性で合わせ精度を評価した．

図8に，プロキシミティギャップ $10\mu\text{m}$ で4回の露光を繰返し，露光ごとにウエハ内の18点で測定した位置ずれの分布を示す．ばらつきの大きさは， x 方向で $\sigma = 0.13\mu\text{m}$ ， y 方向で $\sigma = 0.08\mu\text{m}$ であった．

さらに詳細な精度評価を行うため，プロキシミティギャップの設定値を変えた3回の露光を加え，誤差要因の分離を行った．表1は，ウエハ内3点での位置ずれデータを組合わせて式(9)の6元連立方程式を解き，装置の制御軸に対応する誤差を分離した結果である． $R/D=$

表1 分離された誤差要因

No.	ギャップ (μm)	Δx (μm)	Δy (μm)	Δz (μm)	$\Delta\theta$ (μrad)	$\Delta\alpha$ (mrad)	$\Delta\beta$ (mrad)
1	10	-0.16	0.06	0.5	-2.3	-0.01	0.12
2	10	0.04	0.01	-0.6	-0.8	-0.21	-0.34
3	10	-0.13	-0.06	1.2	1.0	-0.01	0.15
4	10	-0.02	0.00	-1.3	2.3	0.22	0.09
5	20	-0.02	0.15	9.9	3.0	0.08	-0.15
6	30	0.10	0.28	17.0	5.3	0.41	0.04
7	40	-0.13	0.13	28.5	-4.1	0.26	0.46

図9 プロキシミティギャップの一般性

0.1を考慮すると、各制御軸とも位置ずれに対してほぼ均等な影響度であるが、マスクの傾きが比較的大きい。これは、試料の平面度不良の影響であろう。図9は、ウェハ内の同一半径位置で同一ギャップを仮定し、種々の同心円上にある3点の位置ずれデータからrun-out量を求めて半径Rに対してプロットしたものである。理論値と測定値は比較的良好な一致を示しているが、ここでも、試料の平面度不良の影響が見られる。

以上の結果から、試作した装置は $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 以下の重ね合わせ精度を持ち、 $1 \mu\text{m}$ ルールのVLSIのリソグラフィに適用可能な性能を有していると考えられる。

5. ま と め

VLSI実現のためのX線露光法への適用を目的に、マスクとウェハの高精度位置合わせ法について検討し、以下の結論を得た。

- (1) X線露光におけるパタン位置ずれ誤差要因について解析し、位置合わせ制御の要求条件を明らかにした。
- (2) 3点のギャップ計測とxy方向各2点のマスク、ウェハ相対位置計測による6軸位置合わせ制御法を

提示した。

- (3) 弾性支持6軸微動機構、静電容量形ギャップ測定方式、および高コントラストアライメントマークの反射形位置検出方式を組合わせて、高精度位置合わせ装置を開発した。

- (4) 試作装置のパタン重ね合わせ精度を露光実験により評価し、合わせ精度 $\pm 0.2 \mu\text{m}$ を得た。

ここで開発した位置合わせ装置は、既にX線源と組合わせて、半導体デバイスの試作プロセスに供せられている。今後は、サブミクロンパタンの転写を可能とする位置合わせ精度の実現が目標である。大面積の一括露光法では試料の平面度向上、装置としてはステップアンドレピートシステムの実現が課題となろう。

おわりに、本研究遂行にあたり指導、助言をいただいた当所山崎特殊加工研究室長、中山調査役、日本通信技術(株)大塚調査役、ならびに装置製作に協力いただいた日本光学工業(株)に対し、謝意を表します。

文 献

- 1) D.L. Spears and H.I. Smith: High Resolution Pattern Replication Using Soft X-Rays, Electron Lett., 8, 4, (1972) 102.
- 2) J. H. McCoy and P. H. Sullivan: Mask Alignment for the Fabrication of Integrated Circuits Using X-Ray Lithography, Solid State Technol., Sept. (1976) 59.
- 3) D. C. Flanders and H. I. Smith: A New Interferometric Alignment Technique, Appl. Phys. Lett., 31, 7, (1977).
- 4) S. Yamazaki, S. Nakayama, T. Hayasaka and S. Ishihara: X-Ray Exposure System Using Finely Position Adjusting Apparatus, J. Vac. Sci. Technol., 15, 3, (1978) 987.
- 5) 中山 了, 早坂東亜, 山崎新一: X線投影露光法, 研究実用化報告, 27, 9 (1978) 210.
- 6) L. D. Yau: Correlation between Process-induced In-plane Distortion and Wafer Bowing in Silicon, Appl. Phys. Lett., 33, 8, (1978) 756.
- 7) 大島康次郎: マイクロサーボ, 計測と制御, 14, 12 (1975) 22.
- 8) 石原 直, 竹内信行, 吉田和衛: マスク, ウェハ位置合わせの自動制御, 昭和51年度精機学会 秋季大会学術講演会前刷 (1976) 357.
- 9) 平賀亮三, 鈴木章義, 奥津和久: 自動マスク合わせ装置, 半導体・集積回路技術第13回シンポジウム論文集, 7 (1977) 42.
- 10) 川口英太郎ほか: 微小ギャップ測定方式の検討, 昭和52年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1977) 167.
- 11) T. Kadota et al.: Preparation of X-Ray Lithography Masks with Large Area Sandwich Structure Membrane, J. J. A. P., 17, 8, (1978) 1447.
- 12) 石原 直ほか: 反射形マークによる位置検出法, 昭和53年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1978) 427.