縮小投影露光装置用合わせマークの 高精度検出法 (第2報)*

—斜方照明・斜方検出法の性能と適用限界—

秋 山 伸 幸** 小 泉 光 義***

Precision Position Detecting Technique for Alignment Mark Applied
in a Step-and-Repeat Projection Aligners (2nd Report)

—Characteristics and Application Limits of Oblique Illumination and Oblique Detection—

Nobuyuki AKIYAMA and Mitsuyoshi KOIZUMI

The oblique illumination and oblique detection method, which detects the alignment mark at the exposure position without using through-the-lens technique is proposed, and its characteristics and application limits are analyzed. The alignment mark consists of the $6\text{ }\mu\text{m}$ -width and $5\text{ }\mu\text{m}$ -longitudinal pitch diffraction patterns. The illumination angle is 75° , and 60° -diffraction light is detected. The stable detection is realized by a 4-wavelength (458, 488, 515 and 543 nm) laser illumination, in which the variation of the detected signal is 24% in the range of $0.5\text{--}1.5\text{ }\mu\text{m}$ of pattern depth, 35% in the range of $0.7\text{--}2.7\text{ }\mu\text{m}$ of resist thickness, compared with the signal detected by the single wavelength light illumination. The experimental results give a detection repeatability of $\pm 0.02\text{ }\mu\text{m}$ (3σ) in the range of $1.0\text{--}1.6\text{ }\mu\text{m}$ of resist thickness and a detection error of $\pm 0.03\text{ }\mu\text{m}$ (3σ) in the range of $(-3)\text{--}3\text{ }\mu\text{m}$ of focal error.

Key words: step-and-repeat projection aligner, alignment repeatability, alignment mark, diffraction pattern, thickness asymmetry, 4-wavelength laser

1. 緒 言

縮小投影露光装置では、レジストを塗布したウエハ上の合わせマーク位置の検出が重要な課題であり、本研究第1報では、合わせマークを4波長レーザーで照明することにより高精度位置検出を実現した¹⁾。ゲート長が $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 以下の次世代LSIの露光に使用するエキシマレーザステッパでは、縮小投影レンズが合わせマーク検出に使用する可視光を通しにくいいため、このレンズを通して検出することができない。現在は図1(a)のように、別の光学系で合わせマークを検出した後、縮小投影レンズの下に位置決めして露光する方式が採られているが、位置決め精度が低下する欠点があった。

今回この欠点を除いて、露光位置で合わせマークを検出する図1(b)の方式を開発し、適用限界と性能を

解析したので報告する。

Fig. 1 Concept of alignment mark detection

* 原稿受付 平成元年2月22日、昭和63年度精密工学会
秋季大会学術講演会(昭和63年10月3日)にて発表

** 正 会 員 (株)日立製作所(横浜市戸塚区吉田町292)

*** (株)日立製作所

Fig. 2 Model of alignment mark

Fig. 3 Diffraction at alignment mark

2. 検出方式

縮小投影レンズとウェハの間隙（約 10 mm）に、照明・検出系を挿入して固定し、この光学系を用いてウェハを位置決めして露光する。チップの周辺に図 1 (c) に示す回折式合わせマークを設け、これにレーザを入射角 θ_1 で照射し、回折光（角度 θ_1' ）を検出する方式を開発した。

この方式に近い従来技術には、X 線露光装置用斜方照明、斜方検出方式²⁾がある。この場合にはウェハの上の部分空いているので、 θ_1 を小さく（25°）し、白色照明、正反射光検出方式を採用している。今回は θ_1 を大きく（75°）しなければならないため照度が低下するので、レーザを使用して照度を向上した。また回折光を検出することにより θ_1' を小さく（60°）し、斜方検出を可能とした。

3. 解析

3.1 合わせマークの選定

図 1 (c) の合わせマークを上方から照明した時の n 次の回折光は、図 2 のモデルで表される孤立関数 $v(x)$ のフーリエスペクトル $v(f)$ を式 (1) により求め、 $f=n/p$ とおいた時のフーリエスペクトルから求めることができる。ここでは p は合わせマークパターンのピッチである。

$$v(f) = \int_{-\infty}^{\infty} v(x) e^{-2\pi i f x} dx \quad (1)$$

$$v\left(\frac{n}{p}\right) = \frac{p}{n\pi} (1 - e^{i\delta}) \sin \frac{n\pi a}{p} \quad (2)$$

式 (2) で $n=1$ とした時のフーリエスペクトルを最大にするため $a/p=0.5$ とした。また $n=0$ のフーリエスペクトルとの比 A は次式となり、 $a/p=0.5$ の時は $A=0.637$ となる。

$$A = \frac{v\left(\frac{1}{p}\right)}{v(0)} = \frac{\sin \frac{\pi a}{p}}{\frac{\pi a}{p}} \quad (3)$$

1 次回折光の強度 I_1 は次式で表される。

Fig. 4 Intensity of diffracted light

$$I_1 = \left| v\left(\frac{1}{p}\right) \right|^2 = k(1 - \cos \delta), \quad k = \frac{2p^2}{\pi^2} \quad (4)$$

3.2 パターン段差変動の影響の低減

図 3 で合わせマークを角度 θ_1 で照射した時、パターンの上、下面での反射光の位相差 δ は $2 \times \overline{OH}$ となり次式で表される。

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 h \cos \theta_2 \quad (5)$$

$n_2=1.64$, $\theta_2=36.1^\circ$ ($\theta_1=75^\circ$) とし、波長 λ を 515 nm 及び第 1 報¹⁾ で述べた 4 波長 (458, 488, 515, 543 nm) とした場合の δ を式 (5) で求め、式 (4) に代入して求めた場合の I_1 を図 4 (a), (b) に示す。同図 (a) の場合には $\delta=2m\pi$ (m : 正整数) となる h で I_1 が零となる。また h がわずかに変化しただけで検出信号が大きく変化する欠点がある。これに対して同図 (b) の場合には、 h が多少変化しても I_1 の変動は小さく、 $h=0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$ の時に 24% に低減し、 $0.5 \sim 2.3 \mu\text{m}$ の範囲でも 36% に低減していることがわかる。

3.3 レジスト厚さ変動の影響低減

第 1 報では正反射光検出方式において、4 波長照明がレジスト厚さ変動の影響低減に有効なことを述べた。本節では、回折光検出方式においても有効なことを述べる。

図 5 で、レジスト付回折パターン上に角度 θ_1 でレーザを照射した時の 1 次回折光 $k_1, k_2, \dots$ の和 I_0 が求める検出信号である。 k_2 は点 O での 0 次回折光（実線）により生じた 1 次回折光であり、 n は屈折率である。領域 1 → 2 および 2 → 1 の透過係数を $t, \bar{t}$, 0 次および 1 次回折光の反射係数を r, r' , 0 次および 1 次の回折係数を μ_0, μ_1 , 入射光および回折光の振幅及び強度を A_i, A_0, I_i, I_0 とすると強度比 M は式 (7) で表される。なお照明にはレジスト表面での反射率を

Fig. 5 Interference of diffracted light

Table 1 Constant value for computation

n_1	1 (air)	θ_1	75°
n_2	1.64 (resist)	θ'_1	60°
n_3	4.75 (Si)	p	5 μm
"	0.89 (Al)		

低減させると共に、後述する回折格子の回折効率を向上させるためにP偏光を使用する。

$$A_0 = A_i t \mu_1 r_2' \bar{t} \frac{1}{1 + \mu_0 r_2 r_1 e^{i\delta}} \quad (6)$$

$$M = \left| \frac{A_0}{A_i} \right|^2 = \frac{(t \mu_1 r_2' \bar{t})^2}{1 + (\mu_0 r_2 r_1)^2 + 2 \mu_0 r_2 r_1 \cos \delta} \quad (7)$$

ただし、

$$t = \frac{n_1}{n_2} \frac{2N_1}{N_1 + N_2}, \quad \bar{t} = \frac{n_2}{n_1} \frac{2N_2'}{N_1' + N_2'} \quad (8)$$

$$r_1 = \frac{N_i - N_{i+1}}{N_i + N_{i+1}}, \quad r_i' = \frac{N_i' - N_{i+1}'}{N_i' + N_{i+1}'} \quad (9)$$

$$N_i = \frac{\cos \theta_i}{n_i}, \quad N_i' = \frac{\cos \theta_i'}{n_i} \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta_2' &= \sin^{-1} \left(\sin \theta_2 - \frac{\lambda}{n_2 p} \right) \\ \delta &= \frac{2\pi n_2}{\lambda} d (\cos \theta_2 + \cos \theta_2') \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

ここで点Oにおける0次および1次回折光の強度を、 I_{00} , I_{10} とし、 $B = I_{10}/I_{00}$ とすると、式(3)から $B = A^2$ となることがわかる。また2次以降の回折光強度は小さいので無視し、0次と ± 1 次回折光強度の和を I_t とすると式(12)となる(図5には+1次回折光を記入している)。

$$I_t = I_{00} + 2I_{10} \quad \therefore \mu_0^2 + 2\mu_1^2 = 1 \quad (12)$$

ただし、 $I_{00} = \mu_0^2 I_t$, $I_{10} = \mu_1^2 I_t$

3.1項で述べたように $A = 0.637$ だから

$$A^2 = \frac{I_{10}}{I_{00}} = \frac{\mu_1^2}{\mu_0^2} = 0.406 \quad (13)$$

式(12), (13)から $\mu_0 = 0.743$, $\mu_1 = 0.473$ となり、これを用いて式(7)の計算ができる。一例として、表1

Fig. 6 Intensity ratio of diffracted light

Fig. 7 Undulation at resist surface beside alignment mark

Fig. 8 Model of undulation of resist surface

の条件で、Alパターン上に波長515 nmおよび4波長(458, 488, 515, 543 nm)で照明した時の M を求めた結果を図6(a), (b)に示す。

同図(a)ではレジスト厚さ d の変動により、検出信号が大きく変化するが、(b)では $d = 0.7 \sim 2.7 \mu\text{m}$ の時に変動が35%に低減している。このことは、検出信号がレジストの塗布むらの影響を受けにくいことを意味している。

3.4 合わせマーク周辺のレジストうねりの影響

図7でパターン近傍のC~C部、D~D部のレジスト表面は、パターンの影響を受けて、同図のように0.05 μm 程度うねっている。この量が $\Delta d_1, \Delta d_2$ のように異なると、この部分からの回折光強度が異なり、y方向の検出信号波形が非対称となるため、位置検出誤差が生じる。ここではこれを解析し、影響度を考察する。

レジスト表面のうねりを図8で表し、点 x におけるレジスト厚さ変化分 Δd を次式で近似する。

Fig. 9 Phase shift caused by resist

Fig. 10 V_1 caused by undulation at resist surface

$$\Delta d = \frac{\Delta d_0}{2} \sin \frac{2\pi}{p} x \quad (14)$$

厚さ Δd 、屈折率 n のレジストに、 θ_1 で入射し、 θ_1' で射出した時のレジストによる位相差 $\Delta\phi$ は、図 9 で、 $n(\overline{AC} + \overline{CD})$ と $\overline{BC} + \overline{CE}$ の差から式 (15) で表される。

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} a \Delta d = z \sin \frac{2\pi}{p} x \quad (15)$$

ただし、

$$a = n(\cos \theta_2 + \cos \theta_2') - (\cos \theta_1 + \cos \theta_1')$$

$$z = a\pi\Delta d_0/\lambda$$

上式の 1 次フーリエスペクトルは次式となる。

$$\begin{aligned} v\left(\frac{1}{p}\right) &= \int_{-\frac{p}{2}}^{\frac{p}{2}} e^{i\left(\frac{2\pi}{p}x - z \sin \frac{2\pi}{p}x\right)} dx \\ &= pJ_1(z) \end{aligned} \quad (16)$$

ここで $J_1(z)$ は 1 次のベッセル関数である³⁾。式 (17) で表される $z=0$ における 0 次の回折光強度で正規化した 1 次回折光強度 V_1 は、式 (18) で表される。

$$|v(0)|_{z=0}^2 = p^2 J_0(0) = p^2 \quad (17)$$

$$V_1 = \frac{\left|v\left(\frac{1}{p}\right)\right|^2}{|v(0)|^2} = J_1^2(z) \quad (18)$$

表 1 の条件を適用すると $a=1.956$ となる。一例として、 $\lambda=0.5 \mu\text{m}$ とし式 (18) で求めた V_1 と Δd_0 の関係を図 10 に示す。同図で Δd_0 が $0.05 \mu\text{m}$ の時には $V_1=0.07$ となり、 $0.07p^2$ の 1 次回折光がパターンの周辺から生じることがわかる。図 7 で Δd_1 と Δd_2 の差が 10% の時には両者の 1 次回折光の差は $0.007p^2$ となり、この分だけ y 方向の検出信号が非対称となる。

合わせマーク周辺にこのようなうねりが生じるのは、実験によれば、パターン段差が $0.5 \mu\text{m}$ 以上の場合に限られる。一方このようなパターンに 4 波長レーザを照射すると、図 4 (b) から、1 次回折光強度 I_1 はほぼ k となることわかる。式 (4) で k は $0.203p^2$ であるから、上記の $0.007p^2$ との比は 0.035 となる。

Fig. 11 Experimental apparatus

Fig. 12 Illumination system

すなわち 4 波長レーザ照明時には、合わせマーク周辺のレジストうねりによる検出信号の非対称性は、合わせマーク検出信号の 3.5% となる。シミュレーションの結果、これによる合わせマーク位置検出誤差は $0.01 \mu\text{m}$ 以下であり、無視して差し支えないことがわかった。

4. 装置の構成

4.1 実験装置

縮小投影露光装置の全体構成を図 11 に示す。レチクル上の合わせマークは別に検出し、ウエハ上の合わせマークは縮小投影レンズとウエハの間に設けた光学系により斜方照明・斜方検出する。今回は特に実線で示した部分を製作して実験した。

4.2 照明系

図 12 で He-Ne レーザ（波長 543 nm）と Ar レーザ（波長 458, 488, 515 nm）をダイクロイックミラーで加算して照明している。Ar レーザの分光発振強度は図 13 (a) のように波長による差が大きいので、同図 (b) の分光透過率を有する干渉フィルタを通して、同図 (c) のようにほぼ等しい強度にしている。この中には比較的強度の大きい波長 476 nm の光が含まれているが、この除去法は 4.4 項で述べる。

4.3 対物レンズ系

図 14 で、1 次回折光を反射プリズムで反射させて、光路を水平にした後、上下面を削り落として扁平にした対物レンズで平行光にする。その後図 11 で示したコリメータレンズで集光し、回折格子の上に結像させ

Fig. 13 Equalization of spectral intensity

Fig. 14 Objective lens system

Table 2 Characteristics of objective lens

Numerical aperture	Horizontal : 0.23 Vertical : 0.15
Focal length	17.05 mm
Outer size	8 mm (V) × 12 mm (H)
Working distance	19.18 mm

る。微小な焦点合わせにはコリメータレンズを上下させる。合わせマークの観察には顕微鏡を使用し、照明位置を確認しながら実験している。対物レンズの特性を表2に示す。

4.4 第一実像処理光学系

合わせマークを 60° の方向から検出しているのので、第1実像は傾斜し、光軸との角度は図15(a)に示すように、 6.6° になっている。この位置に回折格子(2000本/mm)を設け、垂直上方に回折させ、リレーレンズで拡大している。対物レンズを5倍、リレーレンズを20倍にしているのので、TVカメラの1画素は $0.18\ \mu\text{m}$ である。

回折格子に当たった光は波長ごとに分光し、リレーレンズに入る。今一つの波長の回折光に着目すると同図(c)のように第2実像が検出される。次にリレーレンズの射出瞳と第2実像が共役になる位置にシリンドリカルレンズを挿入すると、同図(d)のように x 方向に圧縮され、 y 方向には変化を受けない像ができる。図12の照明系を用いた場合には回折格子で分光し、リレーレンズの異なった位置に入射するので、シリンドリカルレンズ通過後の実像は同図(d)のように波長ごとに異なった位置に結像する。同図(e)は、(d)の像を左右方向に投影した時のビデオ信号であ

Fig. 15 Optical system for 1st-image

Fig. 16 Undulation on resist surface

る。この信号をコンピュータに入力し、必要な波長の信号のみを抽出すると共に、強度差を補正する定数を掛けた上で、(d)の画像信号を上下方向に加算して信号を求めている。

以上の処理により、照明光の分光強度差を補正すると共に、必要な波長の信号だけを抽出して、合わせマークの信号を求めることができる。

5. 実験結果

合わせマークには、幅 $6\ \mu\text{m}$ 、 $2.5\ \mu\text{m}$ ライン&スペース(ピッチ $5\ \mu\text{m}$)の凹形パターンを使用し、これに厚さ $1.0\sim 1.6\ \mu\text{m}$ のレジストを塗布した。これを上方から、波長 $546\ \text{nm}$ の光で照明した結果を図16に示す。全体としては、干渉しま2本のレジスト塗布むらが見えるが、合わせマーク周辺部のみに限定すると約 $40\ \text{nm}$ である。この値は直線パターンでのレジスト塗布むら($100\ \text{nm}$)¹⁾に比べると小さな値になっている。なお同図には参考までに凸形パターンも示してあり、説明は省略するが、このパターンでも実験してある。この場合のパターン段差は約 $1\ \mu\text{m}$ である。

Fig. 17 Video signal of diffracted light (Wafer; 4 MDRAM through-hole)

4 MDRAM ウェハを例にとり、従来最も検出精度が低かった TH (Through hole) 工程ウェハ上の合わせマークを検出した結果を図 17 に示す。TV モニタ像は図 15 (d) に相当するものである。(1)~(4) はこの像の内、各々波長 458, 488, 515, 543 nm の信号波形であり、(5) はこれらに 4.4 項で述べた強度補正係数を掛けた上で平均化した信号波形である。単波長照明の場合には、パターン段差の非対称性およびレジスト厚さの不均一性等により、信号波形も非対称になっているが、平均化した信号の対称性は優れていることがわかる。

図 17 の平均化信号に対称性パターンマッチング法⁵⁾を適用して、波形の中央位置を求めた結果を図 18 に示す。同図で、検出再現性は $\pm 0.02 \mu\text{m}$ (3σ) である。またウェハを上下方向に $\pm 3 \mu\text{m}$ 移動させた時の検出誤差は図 19 のように $\pm 0.03 \mu\text{m}$ (3σ) であった。4 MDRAM における、TH 工程以外 (L, FG, N, SG, TG, CONT, A 1-1, A 1-2) のウェハにレジスト (厚さ $1.0 \sim 1.6 \mu\text{m}$) を塗布して合わせマークを検出した結果、すべて上記の値以下の誤差であった。本方式は斜方検出し、第 1 実像を回折格子上に形成しているため、焦点ずれの影響を受けやすい。しかし光学系調整時に、光路中に基準となるピンホールを設け、調整用のレーザー光がここを $\pm 0.2 \text{ mm}$ の精度で通るように、対物レンズの位置や回折格子の姿勢を調整した。これにより、照明光、合わせマークの長手方向、検出系光軸との角度を $\pm 0.1^\circ$ 以下として上記の精度を得た。

6. 結 言

縮小投影レンズを通さずに露光位置で合わせマークを検出する、斜方照明・斜方検出方式を立案し、性能

Fig. 18 Repeatability of position detection

Fig. 19 Detection error caused by focal position shift

と適用限界を解析した結果、以下の結論を得た。

- (1) 合わせマークに、長手方向ピッチ $5 \mu\text{m}$ の回折パターンを使用し、入射角 75° でレーザーを照射し、回折角 60° で 1 次回折光を検出することによって、合わせマークの検出が可能である。
- (2) 照明に 4 波長レーザー (458, 488, 515, 543 nm) を使用することにより、単波長レーザーに比べて、パターン段差が $0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$ の時、検出信号変化は 24% になり、レジスト厚さが $0.7 \sim 2.7 \mu\text{m}$ の時、検出信号変化は 35% になる。また合わせマーク周辺のレジストうねりの影響も低減し、位置検出誤差は $0.01 \mu\text{m}$ 以下になる。
- (3) 4 MDRAM における各種工程中のウェハ上の合わせマークを検出した結果、検出再現性 $\pm 0.02 \mu\text{m}$ (3σ)、焦点ずれ ($\pm 3 \mu\text{m}$) による検出誤差 (含再現性) $\pm 0.03 \mu\text{m}$ (3σ) であった。

以上の結果は従来の方式 (図 1 (a)) の検出誤差 ($0.2 \mu\text{m}$) よりはるかに小さく、今後の高集積半導体用露光装置に適用可能である。

最後にご協力頂いた、日立製作所デバイス開発センタ、水野文夫氏、肥田宏之氏、同社那珂工場、吉崎敦浩氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 秋山伸幸, 山内良彦: 縮小投影露光装置用合わせマークの高精度検出法 (第 1 報) ——4 波長光照明によるレジスト内干渉の低減, 精密工学会誌, 54, 10 (1988) 1963.
- 2) 見坊行雄ほか: 斜方検出による精密位置決め, 昭和 61 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, No. 379 (1986) 701.
- 3) 例えば, 森口繁一, 宇田川健久, 一松 信: 数学公式 III, 岩波全書 (1964) 148 および 178.
- 4) S. Kuniyoshi, T. Terasawa, T. Kurosaki & T. Kimura: Contrast Improvement of Alignment Signals from Resist Coated Patterns, J. Vac. Sci. Technol., B5, 2, (1987) 555.
- 5) 小泉光義, 秋山伸幸, 大島良正, 久邇朝宏: LSI 用投影式露光装置における高精度位置自動検出法, 計測自動制御学会論文集, 17, 2 (1981) 243.