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—

秋 山 伸 幸** 山 内 良 彦**

Precision Position Detecting Technique for Alignment Mark Applied
in a Step-and-Repeat Projection Aligners (1st Report)
—Interference Cancellation within Resist using 4-wavelength Light Illumination—

Nobuyuki AKIYAMA and Yoshihiko YAMAUCHI

Alignment accuracy is one of the most important factors in step-and-repeat projection aligners used for VLSI lithography. An illumination technique is described in which the interference fringes caused by the resist thickness asymmetry on the alignment mark are reduced, thus achieving high alignment accuracy. Using this technique, the following results are obtained: (1) Using 4-wavelength simultaneous illumination where wavelengths differ by increments of 27 nm, the variation of the reflected light intensity becomes less than 27% in the range of 0.5–2.3 μm of resist thickness. (2) Ideal laser wavelengths are 458, 488, 515 and 543 nm. (3) Experimental results, determined using the illumination technique on an alignment mark coated with a resist having asymmetric thickness, give an alignment accuracy of $\pm 0.04 \mu\text{m}$ (3σ).

Key words: step-and-repeat projection aligner, alignment accuracy, alignment mark, thickness asymmetry, 4-wavelength, simultaneous illumination, interference fringes

1. 緒 言

半導体パターンの形成には図1に示す縮小投影露光装置を使用し、レチクル上の合わせマークとウエハ上の合わせマークを検出して、両者の位置ずれ ϵ が零になるようにウエハ又はレチクルを位置決めしてから露光する。合わせ精度とは ϵ の検出精度とウエハ又はレチクルの位置決め精度の和を指すが、中でもレジストが塗布されたウエハ上の合わせマークの検出精度が低く、これの検出精度向上が大きな課題になっている。

縮小投影レンズは設計の制約上、色収差が補正されていないので、単波長光しか使えない。最近の縮小投影露光装置では図1でウエハ上の合わせマーク検出にレーザを使用^{1)~3)}しているのに、レジスト内部で干渉が生じ、特にレジストに塗布むらがあると合わせマークの検出精度が極端に低下する。この問題を解決するために、レジスト厚さの最適化⁴⁾、合わせマーク照明

法の検討⁵⁾⁶⁾、照明波長の最適化⁷⁾⁸⁾など種々の工夫がなされているが決定打を欠いているのが実状である。

図2(1),(2)は塗布むら(塗布の非対称なもの)の総称)のあるレジストにレーザ照明した時の検出像とTV走査線信号を示したものであるが、この信号から合わせマークの中央位置を求めるのは困難なことがわかる。同図(3),(4)は同一パターンを白色光で照明した場合であるが、鮮明に検出できることがわかる。

Fig. 1 Alignment system for use in step-and-repeat camera

* 原稿受付 昭和63年3月24日。昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和63年3月17日)にて発表

** 正 会 員 (株)日立製作所(横浜市戸塚区吉田町292)

Fig. 2 Detected images and TV raster signals of alignment mark coated by resist

Fig. 3 Principle of reflected multiple-beam interference

本研究ではレジストの塗布むらの影響の少ない照明及び検出法を開発し、合わせマークの検出誤差が図2(3)の白色光照明時と比較して $\pm 0.05 \mu\text{m}$ 以下とすることを目的とする。

2. 検出原理

2.1 レジスト内部での多重干渉

図3で屈折率 n_0, n_1, n_2 の試料に波長 λ_0 の光を照射した時の多重干渉反射光強度 I_r は次式で表される。

$$I_r = \frac{r_0^2 + r_1^2 + 2r_0r_1 \cos \varepsilon}{1 + (r_0r_1)^2 + 2r_0r_1 \cos \varepsilon} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{4\pi n_1 h}{\lambda_0}, \quad r_0 = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}, \quad r_1 = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

ここで $n_0 = 4.75$ (Si), $n_1 = 1.64$ (レジスト), $n_2 = 1$ (空気)を代入し、分母を1と近似すると式(1)は次式となる。

$$I_r \approx 0.291 + 0.232 \cos \varepsilon \quad (2)$$

上式から I_r は近似的に $\cos \varepsilon$ の関数となり位相を ε として良いことがわかる。

Fig. 4 Conditions for interference cancellation

2.2 二つの単波長(λ_1, λ_2) 光の干渉

式(2)で I_r の中の $\cos \varepsilon$ に着目して、二つの波長 λ_1, λ_2 で照明した時の多重干渉反射光強度の性質を調べる。二つの波長の差を $\Delta \lambda$ として以下のように表す。

$$\lambda_1 = \lambda_0 + \frac{\Delta \lambda}{2}, \quad \varepsilon_1 = \frac{4\pi n_1 h}{\lambda_0 + \frac{\Delta \lambda}{2}}$$

$$\lambda_2 = \lambda_0 - \frac{\Delta \lambda}{2}, \quad \varepsilon_2 = \frac{4\pi n_1 h}{\lambda_0 - \frac{\Delta \lambda}{2}}$$

$$I = \cos \varepsilon_1 + \cos \varepsilon_2$$

$$= \cos \frac{4\pi n_1 h}{\lambda_0} \cdot \cos \frac{2\pi n_1 \Delta \lambda h}{\lambda_0^2} \quad (3)$$

第1項は高周波成分、第2項はビート成分である。第2項が零になる条件は位相が $\pi/2$ になることであり、この時以下の関係が成立する。

$$\Delta \lambda \cdot h = \frac{\lambda_0^2}{4n_1} \quad (4)$$

$n_1 = 1.64$, $\lambda_0 = 0.5 \mu\text{m}$ と仮定して代入すると、

$$\Delta \lambda \cdot h = 0.0381 \quad (5)$$

これを図4に示す。一例としてArレーザの波長488 nmと515 nmの発振光で照明する場合を考えると、 $\Delta \lambda$ は27 nmとなり、 h は1.4 μm となる。波長488 nmの時の I_r を I_{r1} 、波長515 nmの時の I_r を I_{r2} として $I_A = I_{r1} + I_{r2}$ を図7(b)に示す。レジスト厚さ h が1.4 μm の近傍で干渉の影響がなくなっているが、これの前後では影響が大きく、レジスト塗布むらがある時には合わせマークの検出誤差が大きくなることが予想される。

2.3 ビート信号(式(3))の加算

式(3)のビート信号にもう一つのビート信号を加算して、干渉の影響の少ない領域を拡大することを考える。式(3)における λ_0 を基準波長と名付ける。二つのビート信号の基準波長を $\lambda_{01}, \lambda_{02}$ とし、両者の波長

差を $\Delta\lambda_0$ とすると、4つの波長 $\lambda_1 \sim \lambda_4$ は以下のように表される。

$$\lambda_1 = \lambda_{01} + \Delta\lambda/2 = \lambda_0 + \Delta\lambda_0/2 + \Delta\lambda/2$$

$$\lambda_2 = \lambda_{01} - \Delta\lambda/2 = \lambda_0 + \Delta\lambda_0/2 - \Delta\lambda/2$$

$$\lambda_3 = \lambda_{02} + \Delta\lambda/2 = \lambda_0 - \Delta\lambda_0/2 + \Delta\lambda/2$$

$$\lambda_4 = \lambda_{02} - \Delta\lambda/2 = \lambda_0 - \Delta\lambda_0/2 - \Delta\lambda/2$$

位相 $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_4$ は以下になる。

$$\varepsilon_1 = \frac{4\pi n_1 h}{\lambda_1} \doteq \frac{4\pi n_1 h}{\lambda_0} \left(1 - \frac{\Delta\lambda_0 + \Delta\lambda}{2\lambda_0} \right)$$

$$\varepsilon_2 \doteq k \left(1 - \frac{\Delta\lambda_0 - \Delta\lambda}{2\lambda_0} \right)$$

$$\varepsilon_3 \doteq k \left(1 + \frac{\Delta\lambda_0 - \Delta\lambda}{2\lambda_0} \right)$$

$$\varepsilon_4 \doteq k \left(1 + \frac{\Delta\lambda_0 + \Delta\lambda}{2\lambda_0} \right)$$

$$\text{但し, } k = \frac{4\pi n_1 h}{\lambda_0}$$

波長 λ_1, λ_2 で照明した時の多重干渉反射光強度を I_1 、波長 λ_3, λ_4 で照明した時のそれを I_2 とすると、各々は次式で表される。

$$I_1 = \cos \varepsilon_1 + \cos \varepsilon_2$$

$$= 2 \cos \frac{4\pi n_1 h}{\lambda_0} \left(1 - \frac{\Delta\lambda_0}{2\lambda_0} \right) \cos \frac{2\pi n_1 h \Delta\lambda}{\lambda_0^2} \quad (6)$$

$$I_2 = 2 \cos \frac{4\pi n_1 h}{\lambda_0} \left(1 + \frac{\Delta\lambda_0}{2\lambda_0} \right) \cos \frac{2\pi n_1 h \Delta\lambda}{\lambda_0^2} \quad (7)$$

ここで $I_1 + I_2$ を考える。第2項は共通のビート成分であり、位相が $\pi/2$ になる時の h を h_0 とする。式(6), (7)の第1項は高周波成分であり、その位相差 $\Delta\varepsilon$ が $2m\pi$ ($m=0, 1, 2, \dots$) の時に共振を起こすが、 $h=h_0$ の時には第2項のために振幅が零になる。そこで、 $h=h_0$ 、 $\Delta\varepsilon=2\pi$ とすると次式となる。

$$\Delta\varepsilon = \frac{4\pi n_1 h_0 \Delta\lambda_0}{\lambda_0^2} = 2\pi \quad (8)$$

$$\therefore \Delta\lambda_0 = \frac{\lambda_0^2}{2n_1 h_0} \quad (9)$$

一例として $h_0 = 1.4 \mu\text{m}$ とすると $\Delta\lambda = 27.2 \text{ nm}$ 、 $\Delta\lambda_0 = 54.4 \text{ nm}$ となり、式(6), (7)は次式となる。

$$I_1 = 2 \cos 12.406\pi h \cdot \cos 0.357\pi h \quad (10)$$

$$I_2 = 2 \cos 13.834\pi h \cdot \cos 0.357\pi h \quad (11)$$

計算結果を図5に示し、加算結果を図6に示す。 $h = 1.4 \mu\text{m}$ で $I_1 + I_2$ が零になり、その前後では式(8)の $\Delta\varepsilon$ が $\pm\pi$ になるため $I_1 + I_2$ が零になっている。二つのビート信号の加算により、 $I_1 + I_2$ の変化を $h = 0.5 \sim 2.3 \mu\text{m}$ にわたって27%以下にすることができ

2.4 4種のレーザの選択

Fig. 5 Calculated intensity I_1 (Eq.(10)), I_2 (Eq.(11))

Fig. 6 Calculated intensity $I_1 + I_2$

Table 1 Laser wavelength for illumination

Laser tube	Wavelength	Difference
He-Ne	543 nm	28 nm
	515 nm	27 nm
Ar	488 nm	30 nm
	458 nm	30 nm

上記の理論では $\Delta\lambda = 27.2 \text{ nm}$ 、 $\Delta\lambda_0 = 54.4 \text{ nm}$ 、すなわち波長差が 27.2 nm の4種の光が必要であるが、この条件を満たすレーザを選択するのは困難である。ここでは実用上使用可能であり、且つ波長差がおおむね等しいものとして、表1に示すレーザを選択した。

この4種類のレーザで同時照明した時、及び波長 $515, 488 \text{ nm}$ の2波長で同時照明した時の多重干渉反射光強度を、式(1)を用いて求めたものを各々図7(a), (b)に示す。干渉の影響の少ない領域は同図(b)では $h = 1.2 \sim 1.7 \mu\text{m}$ であるが、同図(a)では $h = 0.5 \sim 2.3 \mu\text{m}$ に拡張されており、反射光強度の変化は30%以下になっている。レジストの塗布むらに有する合わせマークを表1に示した4波長のレーザで同時に照明した時の検出精度をシミュレーションにより求めた。

3. シミュレーション結果

3.1 レジスト塗布むらのモデル化

国吉ら⁹⁾の研究によれば、ストライプ状の凹又は凸パターン上にレジストを塗布した場合の厚さ t_0 は図8

Fig. 7 Intensity ratio of reflected multi-beam interference illuminated simultaneously by 4 or 2 alignment wavelengths

Fig. 8 Schematic model of spun-on resist

Table 2 Decrease coefficient of resist thickness

t μm	k (=Δt/d)
0.5-1.6	0.44
1.7-2.5	0.36

(a) で領域を I ~ IV に分割し, Δt を kd とおけば次式で表される.

$$\text{I} : t_0 + (1-k)d \quad (12)$$

$$\text{II} : t_0 + (1-k)d + (kd - d^2/2t_0)\{x - (w/2 - 1)\}^2 \quad (13)$$

$$\text{III} : t_0 - (d/|d|)(d^2/2t_0)\{x - (w/2 + 1)\}^2 \quad (14)$$

$$\text{IV} : t_0 \quad (15)$$

ここで k は実験で求めたもので表 2 に示す*.

本研究では幅 $6 \mu\text{m}$, 段差 $0.5 \sim 1.5 \mu\text{m}$ の凹又は凸状のストライプパターンを使用しているが, この上に厚さ $0.5 \sim 2.5 \mu\text{m}$ のレジストを粘度を変えて種々の条件で塗布し, 表面形状を測定した. その結果塗布むらはまだ

らかに増加・減少しているので, 図 8 (b) のような三角関数で表現したモデルが適当なことがわかった. 塗布むらの成分 t_b は同図 (b) で領域を V, VI に分割して, 次式で表した. また t は式 (18) となる.

$$\text{V} : t_s[1 - \cos(\pi x/3)]/2 \quad (16)$$

$$\text{VI} : t_s[1 + \cos\{\pi(x-3)/6\}]/2 \quad (17)$$

$$t = t_a + t_b \quad (18)$$

3.2 多重干渉反射光強度分布

式 (18) の厚さ分布を有するレジストに, 表 1 に示した 4 波長光を個別及び同時に照射した時の反射光強度分布を, 横軸を $0.1 \mu\text{m}$ 単位に分割して式 (1) を用いて求めた結果の例を図 9 に示す.

同図は, $w = 6 \mu\text{m}$, $d = 0.8 \mu\text{m}$, $t_0 = 1.4 \mu\text{m}$, $t_s = 0.14 \mu\text{m}$ の場合であるが, 単一波長の時には干渉の影響が大きく, 4 波長同時照明の時には影響が大幅に低減している.

3.3 中央位置の算出と結果

合わせマークの位置検出では図 10 で波形の中央位置 X_c を求めるが, これには対称性パターンマッチング⁹⁾が有効である. これは同図で点 X を決め, 次式で $Z(X)$ を求めて, これが最小となる点 X_c を求める.

Fig. 9 Calculated alignment signal
 $d = 0.8 \mu\text{m}$, $t_0 = 1.4 \mu\text{m}$, $t_s = 0.14 \mu\text{m}$

* 本データは国吉伸治氏 (日立製作所) より提供を受けたものである.

Fig. 10 Principle of pattern matching in use of symmetry

Fig. 11 Alignment error caused by asymmetric resist thickness

$$Z(X) = \sum_{j=1}^{70} \{I_r(X+J) - I_r(X-J)\}^2 \quad (19)$$

次に X_c の前後2サンプル ($0.2 \mu\text{m}$) の $Z(X)$ を採り、これに二次曲線を当てはめて、これを最小にする x を x_c とおき、 $0.001 \mu\text{m}$ 単位で求めている。

4波長レーザ同時照明において、図8の t_s を変化させた時の x_c の変化を上記したシミュレーションで求めた結果を図11に示す。 t_s が $0.2 \mu\text{m}$ 以下の場合には、 x_c の変化は $0.04 \mu\text{m}$ 以下となっていることがわかる。

Fig. 12 Schematic configuration of experimental apparatus

Table 3 Parts for experimental apparatus

Objective lens	MPlan 20× (Olympus)
Relay lens	M 5× (Olympus)
Beam expander	6×
TV camera	KP-240 (Hitachi denshi)

4. 実験装置

以上の理論及びシミュレーション結果を検証するために実験装置を製作して実験した。実験装置を図12に、使用部品を表3に示す。照明にはHe-NeレーザとArレーザを使用し、波長を543, 515, 488, 458 nmに切り換えてウエハ上のパターンを垂直落射照明している。

パターンは対物レンズとリレーレンズで拡大してTVカメラで検出し、コンピュータで画像処理している。これらの画像を加算して平均値をとることにより4波長光同時照明の効果を得ている。また白色光（波長400～600 nm）照明も可能となっている。

5. 実験結果

実験に用いた試料は1Mbit DRAM用のウエハであり、幅 $6 \mu\text{m}$ 、長さ $100 \mu\text{m}$ の凹又は凸形のストライプパターンをダイシングエリアに設けたものである。パターンの段差構造は複雑であるが、段差は $0.1 \sim 1.5 \mu\text{m}$ である。これにレジストを $1.0 \sim 1.6 \mu\text{m}$ の厚さに、種々の条件で塗布したものを試料として使用した。表面形状を測定した結果、凸形パターンの方が凹形パターンよりレジストの塗布むら (t_s) が大きく、最大 $0.1 \mu\text{m}$ であった。

図13(a)～(d)は段差 $0.5 \mu\text{m}$ の凸形パターンに $1.6 \mu\text{m}$ のレジストを塗布し、4波長のレーザを個別に照射した時のTV画像及び走査線信号を示したものであるが、干渉の影響が大きいことがわかる。同図(e)は(a)～(d)の平均であり、(f)は白色光照明時の信号である。(e)は干渉の影響が少なく、(f)に近づいていることがわかる。

合わせマークの真の位置は不明であるが、(f)が最も真の位置に近いものと考えられる。(e), (f)の信号に式(19)の対称性パターンマッチング法を適用して、それぞれの中央位置を求め、両者の位置の差を検出誤差としたものを図14に示す。同図から検出誤差は $\pm 0.04 \mu\text{m}$ (3σ) であるこ

No	Wave-length	Image	TV-Signal
a	543 nm
b	515 nm
c	488 nm
d	458 nm
e	4-Wave-length
f	White light

Fig. 13 Detected images and signals of alignment mark illuminated by laser and white light

Fig. 14 Alignment accuracy using signals of 4 wavelength (543, 515, 488, 458 nm) alignment

とがわかる。

6. 結 言

縮小投影露光装置における合わせマークの検出精度の向上を目的として、合わせマーク上のレジストの塗布むらの影響低減法を検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 照明に、それぞれの波長差が 27 nm の 4 つの波長の光を使用することにより、レジスト厚さが 0.5~2.3 μm にわたって、反射光強度変化は 27% 以下となる。
- (2) 4 波長光として、波長が 543, 515, 488, 458 nm のレーザを使用しても差し支えなく、この場合には反射光強度変化は 30% 以下となる。

- (3) 各種工程中のウェハ上の合わせマーク (幅 6 μm, 長さ 100 μm) にレジストを塗布 (厚さ 1.0~1.6 μm, 塗布むら高さ 0~0.1 μm) して、上記 4 波長レーザで照明して検出した結果、検出誤差は ±0.04 μm (3σ) 以下であった。

以上の結果は従来の検出誤差 (0.2~0.25 μm) よりはるかに小さく、今後の高集積半導体露光用の装置に十分適用可能な値である。

なお、縮小投影レンズを通して 4 波長レーザを照射し、検出するとレンズの色収差のために実像は波長ごとに異なった位置に形成される。これに対しては検出系の光路を波長ごとに分離して、それぞれの光路長を変えて、再度合成することによって同一面上に実像を形成することができる。これは従来技術で実現できるので本報告では説明を省略している。

最後に御協力頂いた国吉伸治氏、水野文夫氏、肥田宏之氏、中田俊彦氏、森岡洋氏 (日立製作所) に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) A. Suzuki: Double Telecentric Wafer Stepper Using Laser Scanning Method, SPIE, Vol. 538, Optical Microlithography, IV, (1985) 2.
- 2) S. Murakami, T. Matsuura, M. Ogawa & M. Uehara: Laser Step Alignment for a Wafer Stepper, SPIE, Vol. 538, Optical Microlithography, IV, (1985) 9.
- 3) Y. Oshida, M. Shiba & A. Yoshizaki: Relative Alignment by Direct Wafer Detection Utilizing Rocking Illumination of Ar Ion Laser, SPIE, Vol. 633, Optical Microlithography, V, (1986) 72.
- 4) H. Ohtsuka, T. Taguchi, G. Kushibiki & T. Koikeda: Double Structured Alignment Mark for Enhanced Automatic Alignment, SPIE, Vol. 538, Optical Microlithography, IV, (1985) 102.
- 5) C. P. Kirk: Theoretical Methods for the Optical Alignment of Wafer Stepper, SPIE, Vol. 772, Optical Microlithography, VI, (1987) 134.
- 6) D. R. Beaulieu & P. P. Hellebrekers: Dark Field Technology - A Practical Approach to Local Alignment, SPIE, Vol. 772, Optical Microlithography, VI, (1987) 142.
- 7) S. K. Yao: Optical Consideration in Target Alignment Using Non-actinic Wavelength Microscope, SPIE, Vol. 538, Optical Microlithography, IV, (1985) 118.
- 8) 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.
- 9) 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.