

# 位相シフトマスクにおける Forbidden pitch を予測する 解析的公式

田巻 純一<sup>\*\*\*</sup>・渋谷 真人<sup>\*</sup>・中楯 末三<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>東京工芸大学大学院工学研究科メディア工学専攻 〒243-0297 厚木市飯山 1583

<sup>\*\*</sup>株式会社オーク製作所日の出工場 〒190-0182 東京都西多摩郡日の出町平井 28-5

## Analytical Equation Predicting the Forbidden Pattern Pitch for Phase-Shifting Mask

Junichi TAMAKI<sup>\*, \*\*</sup>, Masato SHIBUYA<sup>\*</sup> and Suezou NAKADATE<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Graduate School, Tokyo Polytechnic University, 1583 Iiyama, Atsugi-shi, Kanagawa 243-0297

<sup>\*\*</sup>ORC Manufacturing Co., Ltd., Hinode Factory, 28-5 Hirai, Hinode-Machi, Nishitama-Gun, Tokyo 190-0182

In order to produce various kind of circuit pattern in short-term cycle for smartphone and tablet et cetera, mask-less exposure using DMD (digital mirror device)-mask is useful. Since thick resist is used, large focus depth is required. Moreover, fine resolution is required recently. Not only fine resolution but also large DOF (depth of focus) can be obtained by using PSM (phase shifting mask). However there exists forbidden pattern pitch region for PSM. Since it has been time consuming to predict this region by numerical calculations, we cannot prospect performances of PSM in the preliminary phase. In this paper, we derive analytical equations which give the optimal NA (numerical aperture) and finest resolution and also reveal forbidden region.

**Key words:** optical lithography, depth of focus, resolution, phase-shifting mask, forbidden pitch, PSM, DMD

### 1. はじめに

位相シフトマスク露光<sup>1,2)</sup>においては、Forbidden pitch region (禁止帯)とよばれる現象が存在する。一般的なマスク露光の場合、ある開口数においてパターン線幅を細かくしていくと、徐々にコントラストが落ちていき、あるところで露光パターンが解像しなくなる。ところが、位相シフトマスク露光(PSM)の特定の条件下においては、そこからさらに細いパターン線幅の露光をしていくと再びコントラストが上昇し、パターンが解像する現象が起こる。この、最も微細な解像パターンよりも粗いパターン幅において解像できない領域は、禁止帯とよばれている。この現象を考慮しないと、最も微細なパターンを製造する最適条件や、禁止帯領域での不具合などを見逃してしまう。PSMを用いる半導体の最先端の微細加工の分野では、この禁止帯が与える影響をシミュレーションで評価しているが、特定の線幅条件においてはシミュレーションから結果を確認

していけるものの、露光装置を最適化していく上ではさまざまなパラメーターを考慮しなければならないため、条件を振って検討するときなどは多くの時間をかけて検討する必要がある。

一方で、半導体以外の分野でも、位相シフトマスクによる露光技術が検討されている。スマートフォンやタブレット機器等に代表されるモバイル機器の基板露光などがそれに該当する。これらのモバイル機器は製造サイクルが短いため、マスクレス露光とよばれるDMD等をマクスとして用いる露光機が近年普及してきているが、小型・薄型・省電力化のため、年々微細化が進み、高解像力と深い焦点深度の両立は難しくなっている。それらの基板回路形成に用いられるレジストは厚みがあるため、ある程度の焦点深度が必要とされ、この解決方法として、位相シフトマスクを応用した方法が検討されている。

製造サイクルが短いにもかかわらず、位相シフトマスク

E-mail: j-tamaki@orc.co.jp, shibuya@photo.t-kougei.ac.jp

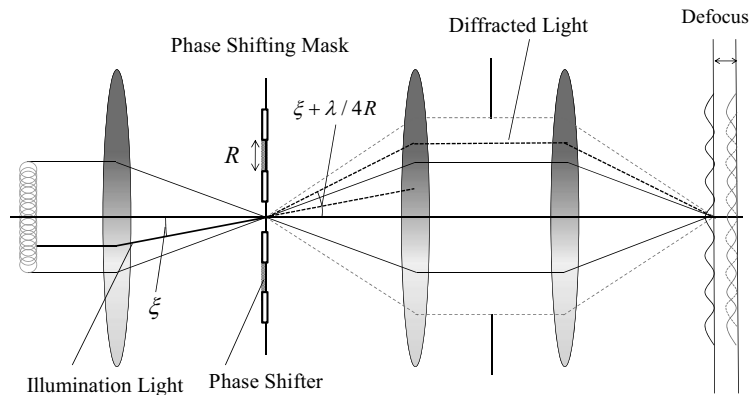


Fig. 1 Imaging of PSM under partial coherent illumination.

における Forbidden pitch の影響は、シミュレーションソフトによる厳密な計算でしか求めることができず、初期構想の議論や検討設計において非常に見通しが悪いという問題がある。

本研究では、禁止帯の影響を考慮した最適な NA と解像力を得られ、禁止帯領域を明らかにする解析的な式を導出する。L/S パターンの空間像コントラストで、レジストプロセスを含めたりソグラフィーの解像性能の評価ができることが実験的に確かめられており<sup>3)</sup>、コントラストに着目して考察した。かつ、PROLITH を用いたシミュレーションと結果を比較し、その解析式の妥当性を確認する。

この結果は、位相シフト露光を検討する上で単に計算時間が短縮されるというだけでなく、初期の見通しを良くして効率的に議論や設計を進めることを可能とし、より身近にさまざまな分野で位相シフトマスク技術を検討する手助けとなると考える。

なお、本研究は、2013 年 SPIE Advanced Lithography で発表した内容を十分に吟味し<sup>4)</sup>、さらに 3.2.1 項での新たな事項を追加したものである。

## 2. 理 論

部分コヒーレント照明下での限界解像力を求める場合、線幅ピッチが小さくなると回折光が投影レンズ瞳で蹴られるため、コントラストが低下する。またデフォーカスによるパターンの横方向ずれが光源内の各要素光源位置により異なるため、デフォーカスによってコントラストが低下する。

計算パラメータとして、開口数 NA、露光波長  $\lambda$ 、コントラスト C、コヒーレンスファクター  $\sigma$  (物体面における照明 NA を投影レンズ NA で割った値)、デフォーカス  $d$  (半導体露光装置の分野では焦点深度を全幅で考えるが、ここでは半幅のデフォーカスを考えている)、周期パター

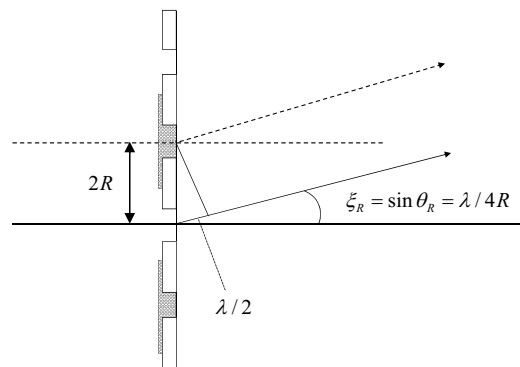


Fig. 2 Direction cosine of diffracted wave.

ンの線幅  $R$  (ピッチは  $2R$  となる) を用いて、回折光のケラレとデフォーカスの 2 つを考慮した解析的な計算式を導出する。

### 2.1 デフォーカスと回折のケラレを別々に考える方法

われわれはすでに別々に考慮した方法について解析的に導いている。以前は Forbidden pitch についての検証を行っていなかったが、Forbidden pitch の影響を解析的に予測するために必要となるので、デフォーカスと回折のケラレを別々に考える方法についてレビューする<sup>5-7)</sup>。

広がったインコヒーレント光源による、部分コヒーレント照明下での位相シフトマスクの結像の様子を Fig. 1 に示す。簡単のため、投影光学系の結像倍率は等倍 (-1 倍) としている。また、マスクが軸上の点光源によって照射されたときの、回折光の方向余弦の概念図を Fig. 2 に示す。ラインアンドスペースパターンマスクの隣り合う開口部分に  $\lambda/2$  の位相差を設けると、それらの干渉効果により基本的に 0 次回折光がなくなり、 $\pm 1$  次回折光だけで像が作られることになる。1 次回折光の進行方向の方向余弦  $\xi_R$  は次式で与えられる。

$$\xi_R = \lambda/4R \quad (1)$$

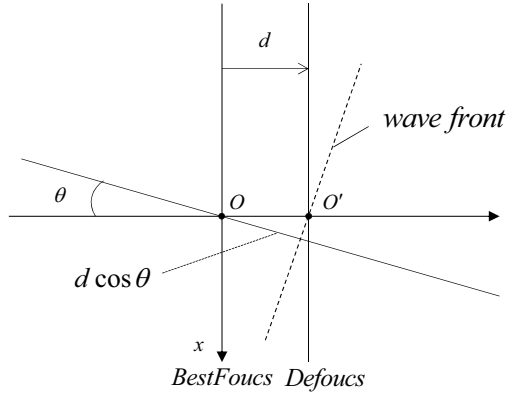


Fig. 3 Optical path difference for inclined plane wave.

像の基本周波数は2つの回折光の方向余弦によって決定される。光源上の1点からの照明光の方向余弦が $\xi$ であるとき、像面での振幅分布 $U_\xi(x)$ は次式で表される。

$$U_\xi(x) = e^{i\left(\xi + \frac{\lambda}{4R}\right)\frac{2\pi}{\lambda}x} + e^{i\left(\xi - \frac{\lambda}{4R}\right)\frac{2\pi}{\lambda}x} \quad (2)$$

このとき、像面上で Fig. 3 のように斜めに進む波面はデフォーカス $d$ によって、光軸に平行に進む波面に対して $d(1 - \cos \theta)$ だけ、光軸上の点 $O'$ において光路が進む。

ここで、 $(1 - \cos \theta)$ は $1 - \sqrt{1 - \sin^2 \theta} \cong \frac{1}{2} \sin^2 \theta + \frac{1}{8} \sin^4 \theta \cong \frac{1}{2} \sin^2 \theta$ で近似することができる( $\sin \theta < 0.5$ であれば、

よい精度で成り立つ)。よって、この影響を考慮したデフォーカス平面上での振幅は次式で表される。

$$U_\xi(x) = e^{i\frac{2\pi}{\lambda}\left(\xi + \frac{\lambda}{4R}\right)x} \cdot e^{i\frac{2\pi}{\lambda}\left[\frac{1}{2}\left(\xi + \frac{\lambda}{4R}\right)^2\right]d} + e^{i\frac{2\pi}{\lambda}\left(\xi - \frac{\lambda}{4R}\right)x} \cdot e^{i\frac{2\pi}{\lambda}\left[\frac{1}{2}\left(\xi - \frac{\lambda}{4R}\right)^2\right]d} \\ = e^{i\frac{2\pi}{\lambda}\left[\xi x + \frac{1}{2}\xi^2 d + \frac{1}{2}\left(\frac{\lambda}{4R}\right)^2 d\right]} \left[ e^{i\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{\lambda}{4R}x + \frac{\lambda}{4R}\xi d\right)} + e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{\lambda}{4R}x + \frac{\lambda}{4R}\xi d\right)} \right] \quad (3)$$

したがって、像の強度は次式で示される。

$$I = 2 \left\{ 1 + \cos \left( \frac{\pi d}{R} \xi + \frac{\pi}{R} x \right) \right\} \quad (4)$$

式(4)を円形の光源上のすべての点光源について積分すると、像強度分布は

$$I = 1 + \cos \left( \pi \frac{x}{R} \right) \cdot \frac{2 \cdot J_1(\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R)}{\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R} \quad (5)$$

与えられ、コントラスト $C$ は

$$C = \frac{2 \cdot J_1(\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R)}{\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R} \quad (6)$$

となる。さらに式(5)のベッセル関数を展開して近似すると、パターン線幅 $R$ は次式で表される<sup>1,2)</sup>。

$$R = \frac{\pi d \sigma NA}{\sqrt{8(1-C)}} \quad (7)$$

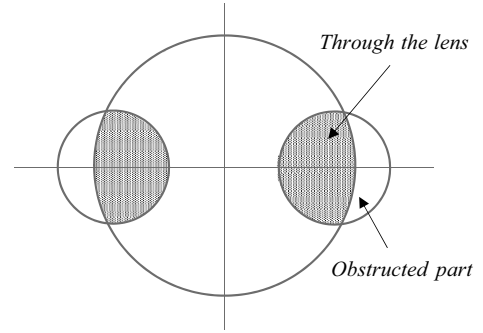


Fig. 4 Obstruction of diffracted waves by the pupil of projection optics.

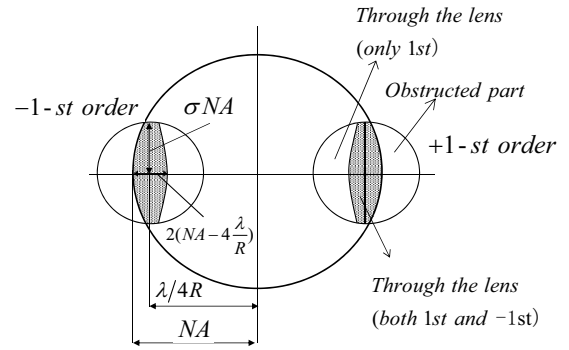


Fig. 5 The part of diffracted wave which cause interference image and the part which does not cause image and only contributes to DC-component.

(ここで $J_1(x) \cong x/2 \left(1 - x^2/8 + x^4/192\right) \cong x/2 \left(1 - x^2/8\right)$ と近似しているが、後で示す Fig. 8 または Fig. 10 の右肩上がりの直線において10%程度の誤差であり、よい近似と考える。)

式(6)、式(7)では、 $\pm 1$ 次回折光がすべて瞳を通過すると仮定しているが、Fig. 4 に示すように実際には回折光の一部が蹴られ、ガウス像面上 $d=0$ でのコントラストも低下する。ケラレによる影響を考えると、 $R$ と $C$ との関係は次式で近似できる<sup>1,2)</sup>。

$$R = \frac{2-C}{(2-C) - \frac{\pi}{4} C \cdot \sigma} \cdot \frac{\lambda}{4NA} \quad (8)$$

なお、この式はあとで導く式(14)に $d=0$ を代入することで導くことができる(近似の精度は悪くない)。

## 2.2 デフォーカスと回折のケラレを同時に考える方法

この節では、デフォーカスの効果とケラレの効果を同時に考慮する新たな方法を導く。 $\pm 1$ 次回折光の瞳面上での様子を Fig. 5 に示す。 $\pm 1$ 次回折光の両方が瞳を通過する部分が干渉成分となり、この干渉する部分(AC成分)の大きさを矩形で近似すると、次式で表される(数値計算し

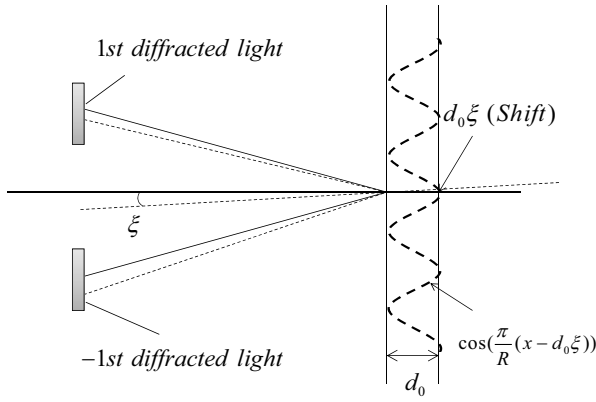


Fig. 6 Image shift due to defocus for a certain point element on the source.

てみると、後で示す Fig. 10 および Fig. 12 のプロットにおいて 10% 程度の誤差であり、十分な近似と考える).

$$AC = 4\sigma NA \left( NA - \frac{\lambda}{4R} \right) \quad (9)$$

±1 次光の片方しか瞳を通過しない部分は、干渉縞をつくらず DC 成分となる。干渉しない部分 (DC 成分) の +1 次光、もしくは -1 次光の回折波の大きさは、Fig. 5 を参照して次式で示される。

$$\begin{aligned} DC &= \frac{1}{2} (\pi(\sigma NA)^2 - AC) \\ &= \frac{1}{2} \left( \pi(\sigma NA)^2 - 4\sigma NA \left( NA - \frac{\lambda}{4R} \right) \right) \end{aligned} \quad (10)$$

よって像強度分布は、以下のようにまとめられる。

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2} \left( \pi\sigma^2 NA^2 - 4\sigma NA^2 + \frac{\sigma NA\lambda}{R} \right) \\ &+ \left( 4\sigma NA^2 - \frac{\sigma NA\lambda}{R} \right) \left( 1 + A \cdot \cos \left( \frac{2\pi}{2R} x \right) \right) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで A は、デフォーカスによるコントラストの低下を表す。

Fig. 6 に示すように、デフォーカスが  $d$ 、光源上のある点からの照明光の方向余弦が  $\xi$  のとき、二光束干渉縞は光軸の垂直方向に近似的に  $d\xi$  シフトする ( $d \tan \theta = d \sin \theta / \cos \theta = d\xi / \sqrt{1 - \xi^2} \cong d\xi(1 - \xi^2/2)$  は、 $0.5 > \xi$  であれば、よい近似で成り立つ)。すなわち、移動距離は点光源の方向余弦  $\xi$  に依存する。このとき、光源位置によってシフト (位置ずれ) 量が異なるために、コントラストの低下が起こる。この干渉する部分を矩形で近似しているので、位置ずれによるコントラストの低下  $A$  は、次式で表される。

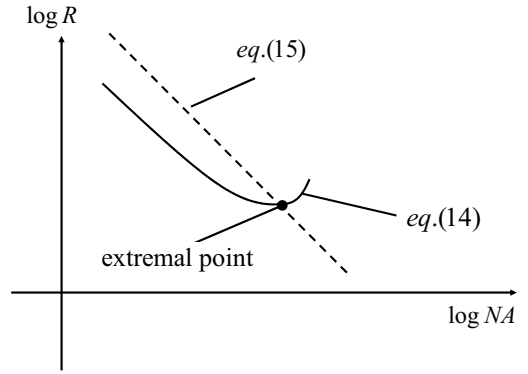


Fig. 7 Eq. 14, its extremal point and Eq. 15 are schematically drawn.

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2 \left( NA - \frac{\lambda}{4R} \right)} \int_{-(NA - \lambda/4R)}^{NA - \lambda/4R} \cos \left( \frac{\pi}{R} (x - d\xi) \right) d\xi \\ &= \frac{\sin \left( \frac{\pi d}{R} \left( NA - \frac{\lambda}{4R} \right) \right)}{\frac{\pi d}{R} \left( NA - \frac{\lambda}{4R} \right)} \cdot \cos \left( \frac{\pi}{R} x \right) \\ &= \sin c \left( \frac{\pi d}{R} \left( NA - \frac{\lambda}{4R} \right) \right) \cdot \cos \left( \frac{\pi}{R} x \right) \end{aligned} \quad (12)$$

式 (12) を式 (11) に代入すると

$$\begin{aligned} I(x) &= \left( \frac{\pi\sigma^2 NA^2}{2} + 2\sigma^2 NA^2 - \frac{\sigma NA\lambda}{2R} \right) \\ &+ \left( 4\sigma NA^2 - \frac{\sigma NA\lambda}{R} \right) \cdot \sin c \left( \frac{\pi d}{R} \left( NA - \frac{\lambda}{4R} \right) \right) \\ &\cdot \cos \left( \frac{\pi}{R} x \right) \end{aligned} \quad (13)$$

となる。さらに sinc 関数を近似して、コントラストを求めると次式が得られる。 ( $\sin c(x) \cong x - x^3/6 + x^5/120 \cong x - x^3/6$

と近似している。  $x = \frac{\pi d}{R} \left( NA - \frac{\lambda}{4R} \right)$  とし、後で示す Fig. 10 および Fig. 12 のプロットについてみると、  $x^3/6 \gg x^5/120$  となっており、よい近似と考える。)

$$C = \frac{4NA - \frac{\lambda}{R}}{\left( \frac{\pi\sigma}{2} + 2 \right) NA - \frac{\lambda}{2R}} \left( 1 - \frac{1}{6} \frac{\pi^2 d^2}{R^2} \left( NA - \frac{\lambda}{4R} \right)^2 \right) \quad (14)$$

式 (14) が、まさしく、デフォーカスと回折のケラレの両方を同時に考慮することにより解析的に導出された、 $NA, R, d, C, \lambda$  の関係を表す関係式である。この式は模式的に Fig. 7 のように表すことができる (より正確には Fig. 10 に表される)。この曲線の極値が、最適な開口数とその

ときの解像力を与える。

しかし、式 (14) から極値を求めるのは容易ではない。そのため、Fig. 7 にて示した、極値を通る点線で示した直線を計算の便宜上導入する。実数であるパラメーター  $\alpha$  を用いて

$$\alpha NA = \lambda/4R \quad (15)$$

と置く。式 (15) を式 (14) に代入すると次式が得られる。

$$C = \frac{8(1-\alpha)}{\pi\sigma+4-4\alpha} \left( 1 - \frac{8}{3} \frac{\pi^2 d^2}{\lambda^2} \alpha^2 (1-\alpha)^2 NA^4 \right) \quad (16)$$

また、式 (14) を  $NA$  で偏微分し、極値条件  $\frac{\partial C}{\partial NA} = 0$  を

用いると次式となる。

$$0 = \frac{\partial C}{\partial NA} \Big|_{R,d} = \frac{2\pi\sigma NA + 8NA - 2\frac{\lambda}{R} - 2\pi\sigma NA - 8NA + \frac{\pi\sigma\lambda}{2R} + \frac{2\lambda}{R} \cdot \left( 1 - \frac{1}{6} \frac{\pi^2 d^2}{R^2} \left( NA - \frac{\lambda}{4R} \right)^2 \right)}{\left( \left( \frac{\pi\sigma}{2} + 2 \right) NA - \frac{\lambda}{2R} \right)^2} + \frac{4NA - \frac{\lambda}{R}}{\left( \frac{\pi\sigma}{2} + 2 \right) NA - \frac{\lambda}{2R}} \cdot \left( -\frac{1}{3} \frac{\pi^2 d^2}{R^2} \left( NA - \frac{\lambda}{4R} \right) \right) \quad (17)$$

式 (15) と式 (17) より、

$$2\pi\sigma\alpha = \frac{16}{3} \frac{\alpha^2 \pi^2 d^2}{\lambda^2} (1-\alpha)^2 (\alpha\pi\sigma + 2\pi\sigma + 8\alpha) NA^4 \quad (18)$$

が得られる。

ここで、式 (16)、式 (18) を  $NA^4$  についてまとめると

$$NA^4 = \left( 1 - \frac{C(\pi\sigma+4-4\alpha)}{8(1-\alpha)} \right) \left( \frac{3}{8} \frac{\lambda^2}{\pi^2 d^2 \alpha^2 (1-\alpha)^2} \right) \quad (19)$$

$$NA^4 = \frac{3\sigma\lambda^2}{8\alpha\pi d^2 (1-\alpha)^2 (2\pi\sigma+8+(\pi\sigma-8)\alpha)} \quad (20)$$

となる。式 (19) = 式 (20) として  $\alpha$  を求めると、

$$\alpha = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (21)$$

となる。ただし、 $a, b, c$  は以下のように与えられる。

$$a = (-8+4C)(\pi\sigma-8)+8\pi\sigma \quad (22)$$

$$b = (-8+4C)(2\pi\sigma+8)+(8-C\pi\sigma-4C)(\pi\sigma-8)-8\pi\sigma \quad (23)$$

$$c = (2\pi\sigma+8)\cdot(8-C\pi\sigma-4C) \quad (24)$$

式 (19) と式 (21)、あるいは式 (20) と式 (21) から、コントラスト  $C$ 、デフォーカス  $d$ 、コヒーレンスファクター  $\sigma$  を与えたときの  $NA$  の最適値が求められる。さらに式 (15) から、そのときの最良解像力  $R$  が求められる。

ここで、このときの  $R$  は式 (15)、式 (19) より

$$R = \frac{\lambda}{4\alpha NA} = \frac{\lambda}{4\alpha} \cdot \sqrt{\frac{\pi d \alpha (1-\alpha)^2}{\lambda}} \cdot \left( \frac{3}{8} - \frac{3C(\pi\sigma+4-4\sigma)}{64(1-\alpha)} \right)^{-\frac{1}{4}} = \beta(\sigma, C, \alpha) \cdot \sqrt{d\lambda} \quad (25)$$

$$\beta(\sigma, C, \alpha) = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \cdot (1-\alpha) \left( \frac{3}{8} - \frac{3C(\pi\sigma+4-4\sigma)}{64(1-\alpha)} \right)^{-\frac{1}{4}} \quad (26)$$

と表すことができる。また、式 (21) より  $\alpha$  は  $C$  と  $\sigma$  から求めることができる。

一方、次の関係は一般によく知られている。

$$R \propto \frac{\lambda}{NA}, \quad d \propto \frac{\lambda}{NA^2} \quad (27)$$

この式から形式的に  $NA$  を消去して

$$R \propto \sqrt{\lambda d} \quad (28)$$

となる。ここで式 (25) と式 (28) が一致することが確認できる。式 (28) は単に形式的にあたえられているだけであるが、式 (25) は物理的な意味をもつ関係として導出される<sup>6)</sup>。

### 3. シミュレーション

前節で導出した式を用いることにより、諸条件 ( $\lambda$ ,  $\sigma$ ,  $d$  を与えたとき) における最良解像力  $R$  とそのときの最適  $NA$  を求めることができ、また、必要な解像力を与えたときの最適  $NA$  と焦点深度  $DOF$  を計算することが可能となった。また、2.1 節と 2.2 節の 2 つの計算結果を併用することで、Forbidden pitch の解像力への影響を見通しよく把握できる。

本節では解析式の妥当性を確認するために、汎用の光学シミュレーションプログラム PROLITH (high NA scalar mode) を用いて、コントラストを厳密なスカラー回折シミュレーションで求め、前節で導いた式 (7)、(8)、(15)、(19)、(21) による結果と比較する。

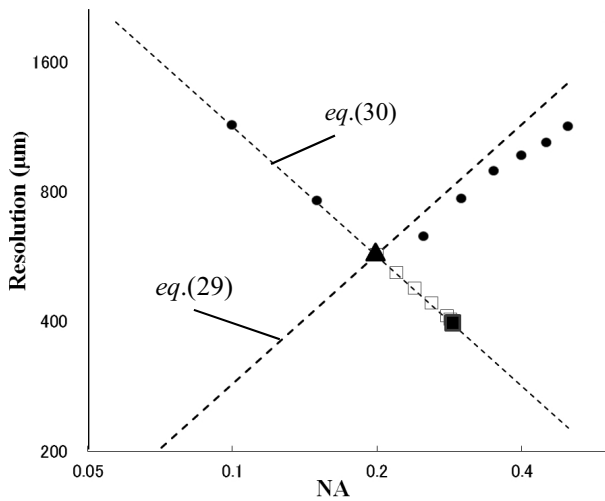


Fig. 8 Characteristic relation between  $NA$  and  $R$ . Here  $C = 0.4$ ,  $d = 10 \mu\text{m}$  and  $\sigma = 0.2$ .

### 3.1 解像力と NA の特性関係

コントラスト  $C = 0.4$  を満足する  $R$  と  $NA$  の関係は、デフォーカスの影響のみを考慮した式 (7) より

$$R > 1.43 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA \quad (29)$$

である。また、回折によるケラレのみを考慮した式 (8) より

$$R \geq \frac{\lambda}{2.5(1.6 - 0.314\sigma)NA} \quad (30)$$

となる。

Fig. 8 に、 $\lambda = 0.436 \mu\text{m}$ ,  $\sigma = 0.2$ ,  $d = 10 \mu\text{m}$  としたときの厳密な回折計算結果を ●、式 (29) を右上がりの直線、式 (30) を右下がりの直線で示す。ここで、シミュレーション結果のパターン最小線幅  $R$  と最適な  $NA$  値を ▲ で示したが、この点が式 (30) と式 (29) の交点と一致しており、最適条件を明らかにする条件として、従来の導出式の有効性が再確認できた。このときの導出式による最適条件は  $R = 570 \text{ nm}$ ,  $NA = 0.2$  で、シミュレーションによる結果は  $R = 580 \text{ nm}$ ,  $NA = 0.23$  である。

しかしながら、式 (30) に沿ってより高  $NA$  となる領域において、微細なパターンが解像していることが確認される。これを Fig. 8 に □ でプロットした。この現象は、Fig. 9 を用いて説明することができる。

通常、 $NA$ ,  $\sigma$  を固定して、 $R$  vs  $C$  のグラフで横軸に沿って解像線幅を細かくしていくと、コントラストが単調に低下し、ある線幅に到達した時点で必要コントラストの条件を満たさなくなる。しかし、必要コントラストがあまり高くないような条件では、パターン線幅がさらに細くなり、光源の中で干渉する部分 (AC 成分) が小さくなる

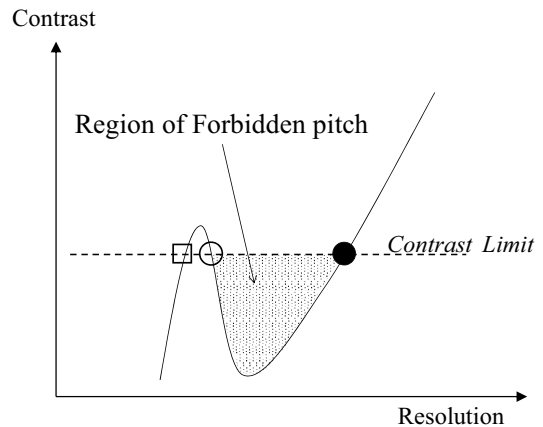


Fig. 9 Explaining the forbidden region of pattern pitch.

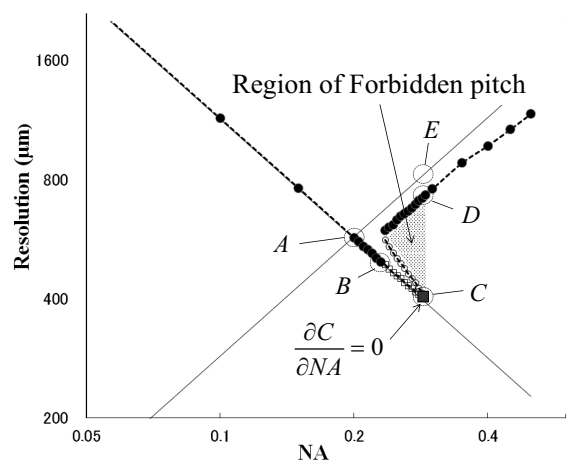


Fig. 10 Characteristic relation between  $NA$  and  $R$ , and forbidden pitch region.

ことで、光源上の各点からの照明による像が、デフォーカスによって相対ずれることにより発生するコントラスト低下の影響が小さくなる。そのため、細かいパターンで再度コントラストが上昇する。すなわち、コントラストの谷間のような現象、Forbidden pitch が起こる。

Fig. 9 に、Forbidden pitch が発生している範囲を点プロットエリアで示した。ここではコントラストを満たす線幅条件がForbidden pitch を挟み、2つの解として存在することになる。そのForbidden pitch 上側の領域での最小解像線幅条件を ● で、Forbidden pitch より微細になり再び線幅条件を満たすようになるForbidden pitch 下側の解像領域での最大解像線幅条件を ○ で、Forbidden pitch 下側の解像領域での最小解像線幅条件を □ で示す。

Fig. 9 に示す現象によると、Forbidden pitch の下側の解像領域は幅をもっていると予測されるため、詳細にシミュレーションした結果を Fig. 10 に示す。Forbidden pitch region が斜線によって示されている。このときの極値条件

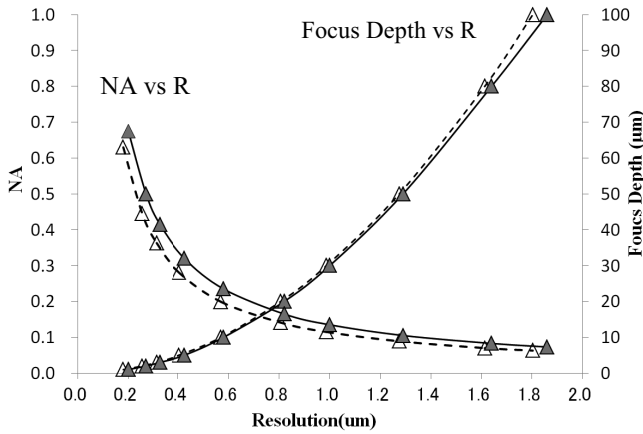


Fig. 11 Optimal NA and focus depth are plotted as function of  $R$  without considering the finer region under the forbidden region. Here  $\lambda = 0.436 \mu\text{m}$ ,  $\sigma = 0.2$  and  $C = 0.4$ .

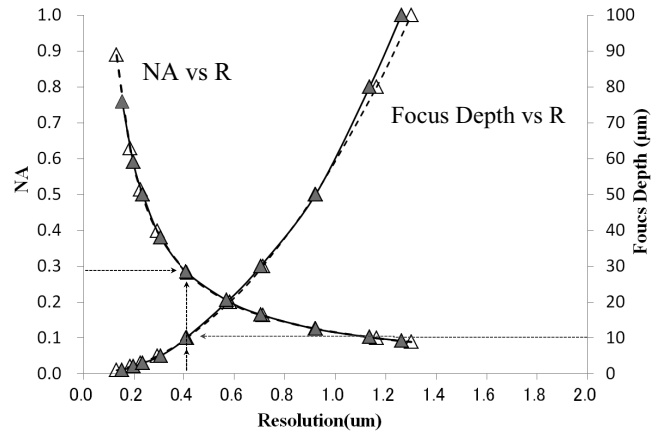


Fig. 12 Optimal NA and focus depth are plotted as functions of  $R$  with considering the finer region under the forbidden region. Here  $\lambda = 0.436 \mu\text{m}$ ,  $\sigma = 0.2$  and  $C = 0.4$ .

は、 $\frac{\partial C}{\partial NA} = 0$ で与えられる。

さらに、Forbidden pitch 下側の解像領域での線幅が最も小さくなる条件（最適条件）を Fig. 10 に ■ で示す。この値は、シミュレーションより、 $NA = 0.285$ ,  $R = 405 \text{ nm}$  である。同じ  $NA$  に対しての、Forbidden pitch の上側領域の最小線幅 (Fig. 10 : 点 D) は、シミュレーションより  $NA = 0.285$ ,  $R = 717 \text{ nm}$  となる。同条件にて、2.2 節で求めた式 (15), (19), (21) より最適条件 (Fig. 10 : 点 C) を計算すると、最適開口数  $NA = 0.281$ , 最良解像力  $R = 411 \text{ nm}$  が求められ、シミュレーション結果とよく一致する。このとき、式 (29) に  $NA = 0.281$  を与えると Forbidden pitch の上側領域 (Fig. 10 : 点 E) での最小線幅  $R = 806 \text{ nm}$  が得られ、シミュレーション結果の  $717 \text{ nm}$  とおおよそ一致する。

以上の Forbidden pitch region の現象より、位相シフトマスクによる露光ではバイナリマスク（白黒マスク）の露光とは異なり、 $NA$  の選択に注意が必要であることがわかる。ある特定の線幅（ピッチ）のラインアンドスペースパターンのみを必要とする場合は、2.2 節の式 (19), (21), (22), (23), (24) で求めた最適条件の  $NA$  を選択することで、より深い DOF をもちながら解像力が高い光学系を採用することができる。しかし、さまざまな線幅のパターンを同時に露光する場合にこの最適条件の  $NA$  を選択すると、Forbidden pitch 内の線幅では解像しないので問題となる。そこで 2.1 節で求めた式 (7) と式 (8), すなわち式 (29) と式 (30) の交点で表される条件を選択する必要がある。

### 3.2 解像力を求める最適 NA と焦点深度の関係

3.1 節では、コントラスト  $C$ , デフォーカス  $d$ , 波長  $\lambda$ , コヒーレンスファクター  $\sigma$  を固定条件として、 $R$  と  $NA$  の関係あるいは  $R$  と  $NA$  の最適値を求めた。本節では、目標とする解像力に対する最適  $NA$  と焦点深度を得るため、実際にはデフォーカス  $d$  を変えてシミュレーションと解析式により、最適  $NA$  と解像力  $R$  を求め、それをもとに、 $R$  に対する  $NA$  と  $d$  をグラフにプロットしている。

#### 3.2.1 瞳による回折光のケラレとデフォーカスの影響を別々に扱ったときの最適条件

Forbidden pitch の下側の解像領域は考えずに、瞳による回折光のケラレとデフォーカスの影響を別々に扱ったときの最適条件を考えてみる。Fig. 11 には、 $\lambda = 0.436 \mu\text{m}$ ,  $\sigma = 0.2$ ,  $C = 0.4$  の設定条件における最適条件について、横軸を解像線幅  $R$  として、縦軸に開口数  $NA$  とデフォーカス  $d$  をプロットした。この場合、 $d$  は解像可能な焦点深度（半幅）と考えてよいので、グラフには Focus Depth とした。式 (30) と式 (29) の交点より求められる計算結果 (Fig. 10 における点 A) を  $\Delta$  と点線で、PROLITH による厳密なスカラーシミュレーションによる結果 (Fig. 10 における点 B) を  $\blacktriangle$  と実線で示した。

この結果より、解像力  $R$  に対する  $NA$  とデフォーカスの関係においても、シミュレーションと解析式による計算結果がほぼ一致していることが確認でき、従来の導出式の有効性が再確認できた。

#### 3.2.2 Forbidden pitch の下側での最適条件

瞳による回折光のケラレとデフォーカスによる影響を同時に考慮したときの最適条件、すなわち Fig. 8 および Fig. 10 において ■ で表した Forbidden pitch の下側での最小線

幅解像条件について考える。Fig. 12 には、 $\lambda = 0.436 \mu\text{m}$ 、 $\sigma = 0.2$ 、 $C = 0.4$  の設定条件における、この最適条件について、横軸を最小線幅解像力  $R$  として、縦軸にそのときの開口数  $NA$  とデフォーカス  $d$  を示した。Fig. 11 と同じく、デフォーカスは解像可能な焦点深度と考えることができる。式 (21) と式 (25) による結果を  $\Delta$  と点線で、PROLITH による厳密なスカラーシミュレーション結果を  $\blacktriangle$  と実線で示した。

ここでも、導出した解析的な式の結果と、厳密なシミュレーションの結果が一致していることが確認された。さらに、式 (25) によって示される  $d$  が  $R$  の 2 乗に比例するという関係が確認された。

#### 4. ま と め

位相シフトマスクにおける最適解像力を求める解析的な公式を導いた。デフォーカスによるコントラスト低下と、回折光のケラレによるコントラスト低下を同時に考慮することで、Forbidden pitch region (禁制帯) の下側の最も微細なパターンとなる最適値が求められる公式である。さらに、PROLITH を用いたシミュレーション結果より、解析式の妥当性を確認することができた。一方、われわれはデフォーカスの効果と回折光のケラレの効果を独立して考えた公式をすでに導いているため、それにより Forbidden pitch より上側の領域での最適値を得ることも可能であり、同じくシミュレーションによって妥当性を再確認した。したがって、本論文で導出した、新たな公式との組み合わせにより、位相シフトマスクの Forbidden pitch region を解析的に予測することが可能となった。

また、位相シフトマスク露光における Forbidden pitch region の現象は一般的にあまり知られていないが、コン

ベンショナルでの露光とは異なり、 $NA$  の選択に注意が必要である。ある特定の線幅のみを必要とする場合は、Forbidden pitch の下側の最適  $NA$  を選択することで、より深い DOF をもちながら解像力が高い光学系を検討することができる。

本研究で求めた解析的な方程式は、従来のシミュレーションを用いて検討する方法に比べ、さまざまなパラメータを変えた場合の結果を簡単に確認することができる。そのため時間や費用を大きく抑えることができ、さらに位相シフトマスクによる効果を見通しよく検討することができる。この結果は、さまざまなリソグラフィーのフィールド、特に、スマートフォンやタブレットといった短期サイクルでさまざまなプリント基板回路パターンを必要とする露光機の光学系検討において有用である。

#### 文 献

- 1) M. D. Levenson, N. S. Viswanathan and R. A. Simpson: "Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask," IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-29** (1982) 1828-1836.
- 2) 渋谷真人: "透過照明用被投影原版", 特許出願公開昭 57-62052, 特許出願公告昭 62-50811.
- 3) H. Fukuda, A. Imai, T. Terasawa and S. Okazaki: "New approach to resolution limit and advanced image formation techniques in optical lithography," IEEE Trans. Electron. Dev., **38** (1991) 67-75.
- 4) J. Tamaki, M. Shibuya and S. Nakadate: "Analytical equation predicting the forbidden pitch for phase-shifting mask," Proc. SPIE, **8683** (2013) 86832A.
- 5) M. Shibuya and T. Tsuruta: "Resolution vs depth of focus in the resolution-enhanced optical system for lithography," Proc. SPIE, **1780** (1992) 117-131.
- 6) 渋谷真人, 鶴田匡夫: "像強度の解析的公式と投影光学系リソグラフィーの実用解像度", 光学, **21** (1992) 688-697.
- 7) 渋谷真人: "投影光学系リソグラフィーの評価法", 光学, **23** (1994) 29-37.