



投影光学系リソグラフィーの評価法

渋谷 真人

(株)ニコン光学本部第2光学部第5光学課 〒140 東京都品川区西大井 1-6-3

(1993年5月24日受付, 1993年10月28日受理)

Evaluation Method for Optical Projection Lithography

Masato SHIBUYA

Industrial Optics Department, Optical Division, NIKON,
1-6-3, Nishi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140

(Received May 24, 1993; Accepted October 28, 1993)

We have already proposed an analytical and intuitive equation for getting practical resolution of optical lithography. However, in the cases that coherence factor σ is large, this method does not give a good approximation for both conventional and annular illumination. In this paper, we derive the equations which are good approximations for these cases. Also, by using these equations, the relations among the resolution, wave-length and focus depth are derived for various lithography systems where the numerical apertures are optimized. We also show that performances of optical lithography methods can be compared clearly and simply with each other by introducing a new parameter.

1. 序

投影光学系リソグラフィーの評価として一般に用いられるラインアンドスペースパターンの実用解像度を、解析的に求めることができる¹⁻³⁾。しかしながら、従来照明法と輪帯照明法において、照明のコヒーレンスファクター σ が大きい場合には、近似精度が悪かった^{1,2)}。本論文では、このような場合にも十分良い近似を与える公式を導く。さらに、これらの公式より、リソグラフィーの各手法において最適化された開口数での、解像力、波長および焦点深度の関係を、新しく提案するパラメーター k_3 を用いて導く。 k_3 によって、各方式の性能比較が明瞭に行われることを示す。

2. 近似精度の向上

2.1 従来法

拡がったインコヒーレント光源からの2光束干渉の概念図を Fig. 1 に示す。点Bの近傍に干渉縞ができ、強度は比例定数を除き次式で表される⁴⁾。

$$I(B) = 1 + \text{REAL} \left\{ \mu(B_1, B_2) \right\} \frac{2a_1 a_2}{a_1^2 + a_2^2} \quad (1)$$

$$\mu(B_1, B_2) = \frac{\int l(s) \exp \{-i2\pi/\lambda \cdot (AB_1 B - AB_2 B)\} ds}{\int l(s) ds} \quad (2)$$

ここで、 $I(B)$ は点Bにおける干渉縞の強度、 a_1, a_2 は二つの光束の振幅の大きさであり、 $|\mu(B_1, B_2)|$ が干渉縞のコントラストを表し、 λ は波長、 $l(s)$ は光源の拡がりを示す。このコントラストを表す(2)式を、投影光学系によるラインアンドスペース像のデフォーカスにおけるコントラストの計算に適用することにより、実用解像度を表す公式を導くことができる。

ラインアンドスペースパターンの0次回折光と±1次回折光を考えると、Fig. 2 に示すように射出瞳上に回折光が作られ、それによる干渉縞が像面(wafer上)にできる。像空間での0次回折光、±1次回折光の波数ベクトルを k_0, k_1, k_{-1} 、各回折光の振幅を a_0, a_1, a_{-1} とすると、デフォーカス d の像面上の点 $B(x, 0, d)$ における干渉縞強度は、三つの回折光間の干渉を考えることによ

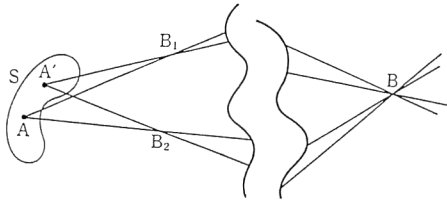


Fig. 1 Interference fringe is made by incoherent expanded source, S, and localized at point B.

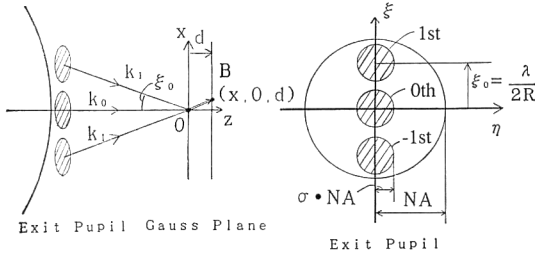


Fig. 2 In the case of conventional illumination, diffracted light waves in image space are shown in left figure and those on exit pupil are shown in right figure.

り以下のように表される^{1,2)}.

$$\begin{aligned}
 I(x) = & a_0^2 + a_1^2 + a_{-1}^2 \\
 & + 2 \cdot a_0 \cdot a_1 \cdot \text{REAL} \left[\frac{\int ds l(s) \exp \{-i(k_1 - k_0)r\}}{\int ds l(s)} \right] \\
 & + 2 \cdot a_0 \cdot a_{-1} \cdot \text{REAL} \left[\frac{\int ds l(s) \exp \{-i(k_{-1} - k_0)r\}}{\int ds l(s)} \right] \\
 & + 2 \cdot a_1 \cdot a_{-1} \cdot \text{REAL} \left[\frac{\int ds l(s) \exp \{-i(k_{-1} - k_1)r\}}{\int ds l(s)} \right]
 \end{aligned} \tag{3}$$

ここで r は点 B の Gauss 像面中心 0 からの位置ベクトルである。Fig. 2 に示すように、瞳座標は光線の方向余弦 ξ, η で表す。積分は光源 $l(s)$ 全面で行う。

具体的な光源形状を考えることにより、上式から解析的な公式を求めることができる。しかしながら、(3)式に基づく従来提案した方法では ± 1 次回折光が瞳でけられないことを仮定しているため、コヒーレンスファクター σ が大きい場合には、厳密な回折積分との一致が悪かった。そこで、以下に示すように、けられを考慮して計算する。

Fig. 3 より、 ± 1 次回折光のうち瞳を通過する割合

S_0 と回折角の方向余弦 ξ_0 との関係は、部分的コヒーレント OTF と空間周波数の関係と一致する。簡単のため、ライン幅とスペース幅がともに R であるとすれば、 $\xi_0 = \lambda / (2R)$ であり、おおよそ

$$S_0 - 0.45 = - \frac{\lambda / (2R \cdot NA) - 1}{1.5\sigma} \tag{4}$$

の関係が得られる^{1,2)}。NA は結像光学系の開口数である。(3)式の第2項～第5項は S_0 に比例することになる。

(3)式の積分の項は、光源の拡がりによるコントラストの低下を意味する。0次光と ± 1 次回折光の干渉を表す第4項と第5項について、**Fig. 4** に示すように、この拡がり $l(s)$ を瞳内の回折光分布に内接する円形光源で近似して積分することにする。内接円の半径は

$$\{NA - (\lambda / 2R - \sigma \cdot NA)\} / 2 \tag{5}$$

この内接円の中心座標は

$$\{NA + (\lambda / 2R - \sigma \cdot NA)\} / 2 \tag{6}$$

である。この円形近似した1次回折光に対応する0次光を考えると、その中心座標は

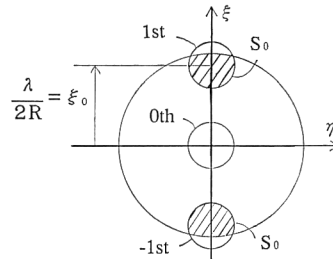


Fig. 3 In the case of conventional illumination, when pattern size is small, first order diffracted wave is partly blocked by pupil aperture.

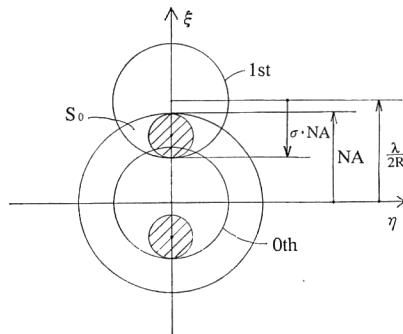


Fig. 4 The interferences between ± 1 st order diffracted waves and 0th one are considered. The decrease of contrast caused by the expanded source is calculated by approximating it as the circle which is drawn by oblique lines.

$$\lambda/2R - \{NA + (\lambda/2R - \sigma \cdot NA)\} / 2 \quad (7)$$

となる。

(3)式の第6項(最終項)は±1次光間の干渉を表しているが、±1次光間の干渉を起こす回折光の割合 S_1 は

$$S_1 = 2S_0 - 1 \quad (8)$$

となる。第6項は S_1 に比例することになる。ただし、 $S_0 < 0.5$ のときは、 $S_1 = 0$ である。また、Fig. 5 よりこの拡がりに内接する円の中心座標は

$$\lambda/2R \quad (9)$$

であり、内接円の半径は

$$NA - \lambda/2R \quad (10)$$

となる。

Fig. 2 に示すように、デフォーカスを d 、像面内の位置を x とし、(4)~(10)式を用いて(3)式を変形すると、

$$\begin{aligned} I(x) = & 1 + 2 \cdot S_0 \cdot a^2 \\ & + 4 \cdot S_0 \cdot a \cdot \cos(\pi x/R) \cdot \cos\{\pi \cdot d \cdot (1 - \sigma) \cdot NA/2R\} \\ & \cdot \frac{2 \cdot J_1[\pi \cdot d \cdot \{(1 + \sigma) \cdot NA - \lambda/2R\} / 2R]}{\pi \cdot d \cdot \{(1 + \sigma) \cdot NA - \lambda/2R\} / 2R} \\ & + 2 \cdot S_1 \cdot a^2 \cdot \cos(2\pi x/R) \cdot \frac{2 \cdot J_1\{2\pi \cdot d \cdot (NA - \lambda/2R)/R\}}{2\pi \cdot d \cdot (NA - \lambda/2R)/R} \end{aligned} \quad (11)$$

となる。コントラストを、ラインとスペースの各々の中心での強度を用いて定義することにより、レジストプロセスを含めたリソグラフィーの評価ができることが示されており⁵⁾、そのようにコントラスト C を定義すると、

$$\begin{aligned} C = & \left[4S_0a \cos(\pi d(1 - \sigma)NA/2R) \right. \\ & \left. \times \frac{2J_1[\pi d\{(1 + \sigma)NA - \lambda/2R\} / 2R]}{\pi d\{(1 + \sigma)NA - \lambda/2R\} / 2R} \right] / \end{aligned}$$

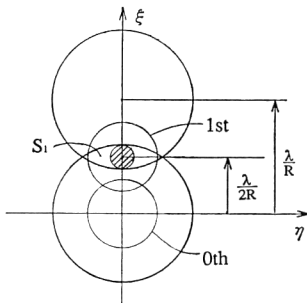


Fig. 5 The interference between +1st order diffracted wave and -1st one is considered. The decrease of contrast caused by the expanded source is calculated by approximating it as the circle which is drawn by oblique lines.

$$\left[\frac{1 + 2S_0 \cdot a^2 + 2S_1 a^2 \frac{2 \cdot J_1\{2\pi \cdot d \cdot (NA - \lambda/2R)/R\}}{2\pi \cdot d \cdot (NA - \lambda/2R)/R}}{1} \right] \quad (12)$$

と表すことができる。

デフォーカス $d=0$ の場合のコントラストとパターン寸法の間を関係を考える。(12)式で $d=0$ とおき、また、実際には ±1 次光間の干渉は考えなくてよいので、 $S_1=0$ とおくと、

$$C = \frac{4a \cdot S_0}{1 + 2a^2 \cdot S_0} \quad (13)$$

となる。(4)、(13)式より、

$$\lambda/2R = \left\{ 1 - 1.5 \left(\frac{C}{4a - 2a^2 C} - 0.45 \right) \cdot \sigma \right\} \cdot NA \quad (14)$$

となる^{1,2)}。

なお、従来提案したように、瞳による1次回折光のけられのない場合のデフォーカス時のコントラストは、

$$\begin{aligned} C = & \frac{4a \cos\{\pi d \lambda / (4R^2)\} \frac{2J_1(\pi d \sigma NA/R)}{\pi d \sigma NA/R}}{1 + 2a^2 + 2a^2 \frac{2 \cdot J_1(2\pi d \sigma NA/R)}{2\pi d \sigma NA/R}} \\ = & \frac{4a \cos\{\pi d \lambda / (4R^2)\}}{1 + 4a^2} \end{aligned} \quad (15)$$

与えられる^{1,2)}。(11)~(15)式中の a は $2/\pi$ であるが、式が見やすいように a のままにしてあり、以下基本的に、本論文ではそのように表記する。

デフォーカス d 、波長 λ 、コヒーレンスファクター σ を与えたときの、開口数 NA と解像力 R との関係を図. 6、Fig. 7、Fig. 8 および Fig. 9 に示す。必要

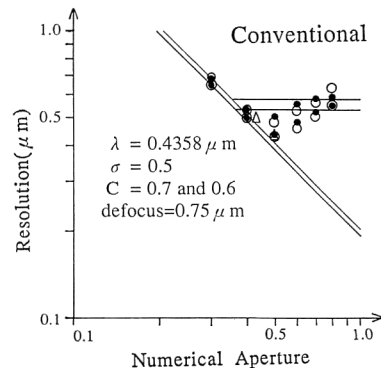


Fig. 6 Relation between numerical aperture and resolution in the case of conventional illumination. Conditions are $\sigma=0.5$, defocus= $0.75 \mu\text{m}$, $\lambda=0.4358 \mu\text{m}$ and contrast= 0.7 and 0.6 . Solid lines are calculated by Eqs. (14) and (15). The values marked with \circ , \bullet and \triangle are calculated by Eq. (12), by the strict Fourier imaging theory and by Eqs. (43) and (44), respectively.

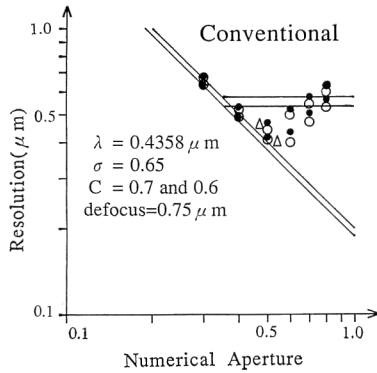


Fig. 7 Relation between numerical aperture and resolution in the case of conventional illumination. Conditions are $\sigma=0.65$, defocus= $0.75 \mu\text{m}$ $\lambda=0.458 \mu\text{m}$ and contrast= 0.7 and 0.6 .

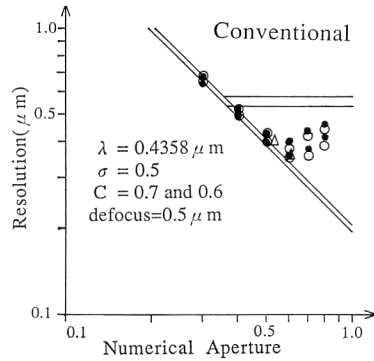


Fig. 9 Relation between numerical aperture and resolution in the case of conventional illumination. Conditions are $\sigma=0.5$, defocus= $0.5 \mu\text{m}$, $\lambda=0.4358 \mu\text{m}$ and contrast= 0.7 and 0.6 .

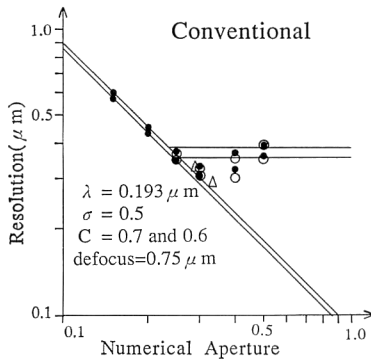


Fig. 8 Relation between numerical aperture and resolution in the case of conventional illumination. Conditions are $\sigma=0.5$, defocus= $0.75 \mu\text{m}$, $\lambda=0.193 \mu\text{m}$ and contrast= 0.7 and 0.6 .

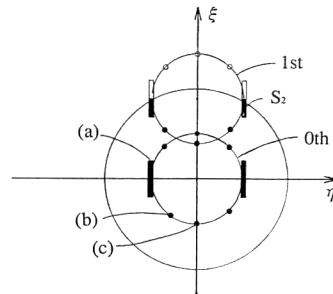


Fig. 10 In the case of annular illumination, the source is approximated as eight small sources. (a) is the line source. (b) and (c) are point sources.

なコントラスト C として 0.7 と 0.6 を考えており、 0.6 の方が高解像となっている。●が厳密な回折積分によるものである。ただし、デフォーカスの波面収差は光線の方向余弦 ξ の 2 乗に比例するとしている。実線は (14) 式および従来提案した公式 (15) 式による。○が (12) 式による結果である。近似精度が向上していることがわかる。

2.2 輪帯光源

輪帯光源の場合にも従来提案した方法では ± 1 次回折光が瞳でけられないとして計算しているため、 σ が大きくなると近似精度が悪くなる^{1,2)}。そこで、輪帯照明を Fig. 10 に示すような八つ目の光源と見なし、各光源の回折光が瞳を通過するかどうかによって場合わけすると、この乖離を小さくできる。さらに、解像力の最も得られるのはおおよそ $NA = \lambda/2R$ の付近であり、この付近を解析的に導くために、Fig. 10 に示すように八つ目の照明光源のうち図中 (a) で示してある光源を直線状の

光源として近似し、この直線部分のうち瞳を通る割合を S_2 とする。この直線光源の拡がりによるコントラストの低下は無視するが、瞳を通る光量変化は考慮することとする。 S_2 が 0.5 より大きいときには、 ± 1 次回折光間での干渉を考慮することとする。 S_2 が $0 \sim 1$ の範囲では、(3) 式を変形して整理すると、像強度分布は次のように表される。

$$\begin{aligned}
 I(x) = & 8 + 6 \cdot a^2 + 4 \cdot S_2 \cdot a^2 \\
 & + 4 \cdot a \cdot \cos(\pi x/R) \cdot \cos\{\pi d(\sigma NA - \lambda/4R)/R\} \\
 & + 8 \cdot a \cdot \cos(\pi x/R) \cdot \cos\{\pi d(\sigma NA/\sqrt{2} - \lambda/4R)/R\} \\
 & + 8 \cdot S_2 \cdot a \cdot \cos(\pi x/R) \cdot \cos(\pi d\lambda/4R^2) \\
 & + 8 \cdot (S_2 - 0.5) \cdot a^2 \cdot \cos(2\pi x/R)
 \end{aligned} \tag{16}$$

また、 S_2 はおおよそ次式で表せる。

$$S_2 = 0.5 + \frac{4(\sqrt{1-\sigma^2} \cdot NA - \lambda/2R)}{\pi \cdot \sigma \cdot NA} \tag{17}$$

(16) 式で、第 4 項は八つ目の一番端の光源 (c) からの 0 次光と 1 次光の干渉項、第 5 項はその隣の光源 (b) からの同様の干渉項、第 6 項は光源 (a) からの同様の干渉項

である。最後の項 (第7項) は光源 (a) からの ±1 次回折光間の干渉項であり、 S_2 が 0.5 より小さいときはなくなる。コントラストは、

$$C = [4 \cdot a \cdot \cos\{\pi d(\sigma NA - \lambda/4R)/R\} + 8 \cdot a \cdot \cos\{\pi d(\sigma NA/\sqrt{2} - \lambda/4R)/R\} + 8 \cdot S_2 \cdot a \cdot \cos(\pi d\lambda/4R^2)] / [8 + 6 \cdot a^2 + 4 \cdot S_2 \cdot a^2 + 8 \cdot (S_2 - 0.5) \cdot a^2] \quad (18)$$

と表される。他の場合においても同様に強度分布およびコントラストを表す式が導ける。

ガウス像面でのコントラストは、実際には ±1 次回折光間の干渉が起きない場合を考えればよく、光源を輪帯のまま扱って、1 次回折光のうち瞳内の割合を考慮して、コントラストは次のように解析的に表せる^{1,2)}。

$$\frac{\lambda}{2R} = \sigma \cdot NA \cdot \cos\left(\frac{\pi C}{4a - 2a^2 C}\right) + NA \cos\left[\sin^{-1}\left\{\sigma \sin\left(\frac{\pi C}{4a - 2a^2 C}\right)\right\}\right] \quad (19)$$

また、従来提案したように、瞳による 1 次回折光のけられない場合のデフォーカス時のコントラストは、

$$C = \frac{4a \cos\{\pi d\lambda/4R^2\} \cdot J_0(\pi d\sigma NA/R)}{1 + 2a^2 + 2a^2 \cdot J_0(2\pi d\sigma NA/R)} \approx \frac{4a \cos\{\pi d\lambda/4R^2\}}{1 + 4a^2} \quad (20)$$

で与えられる^{1,2)}。

Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14 には厳密な回折積分の結果を ● で示す。(19), (20) 式を実線で示す。(18) 式を含む場合わけによって求めた計算結果を ○ で示

してある。場合わけによって十分良く近似されており、解像力の最もよい付近は(18)式でよく近似されることに

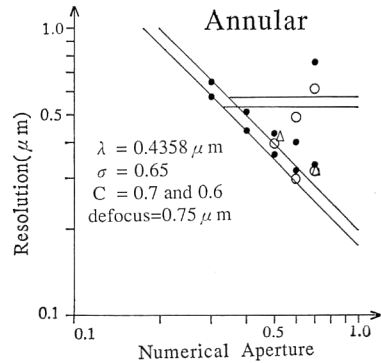


Fig. 12 Relation between numerical aperture and resolution in the case of annular illumination. Conditions are $\sigma=0.65$, defocus= $0.75 \mu\text{m}$, $\lambda=0.4358 \mu\text{m}$ and contrast= 0.7 and 0.6 .

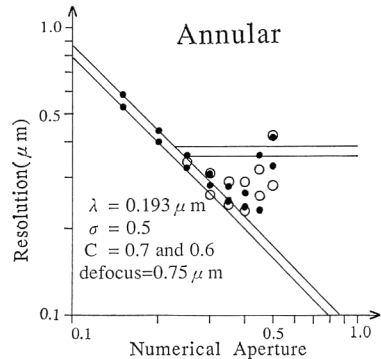


Fig. 13 Relation between numerical aperture and resolution in the case of annular illumination. Conditions are $\sigma=0.5$, defocus= $0.75 \mu\text{m}$, $\lambda=0.193 \mu\text{m}$ and contrast= 0.7 and 0.6 .

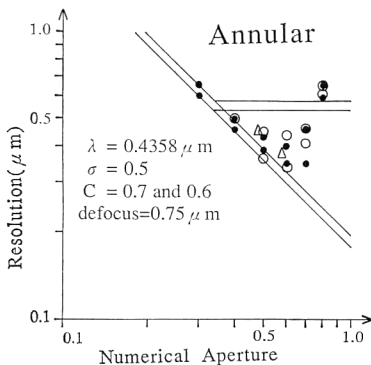


Fig. 11 Relation between numerical aperture and resolution in the case of annular illumination. Conditions are $\sigma=0.5$, defocus= $0.75 \mu\text{m}$, $\lambda=0.4358 \mu\text{m}$ and contrast= 0.7 and 0.6 . Solid lines are calculated by Eqs. (19) and (20). The values marked with ○, ● and △ are calculated by the approximation of eight small sources which includes Eq. (18), by the strict Fourier imaging theory and by Eqs. (46) and (47), respectively.

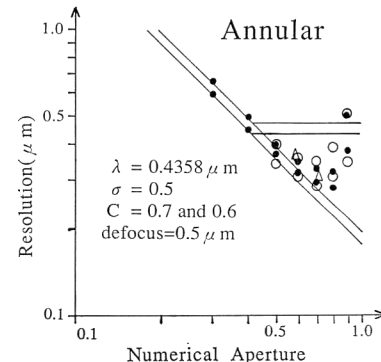


Fig. 14 Relation between numerical aperture and resolution in the case of annular illumination. Conditions are $\sigma=0.5$, defocus= $0.5 \mu\text{m}$, $\lambda=0.4358 \mu\text{m}$ and contrast= 0.7 and 0.6 .

なる。

3. 投影光学系リソグラフィーの比較

従来法と輪帯照明法について、近似の良い実用解像度を表す公式が導かれた。位相シフト法および変形照明法 (SHRINC) については、すでに近似のよい公式が導かれており、これらを用いて投影光学系リソグラフィーの手法を比較してみる。

3.1 位相シフト

位相シフト法は、マスクの開口部に位相差を生じさせ、それらの干渉効果を利用し、高解像、高コントラストな像を作るものである^{6,7)}。ラインアンドスペースパターンマスクの隣合う開口部間に $\lambda/2$ の位相差をもうけると、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、Fig. 15に示すように ± 1 次回折光だけで像が作られることになる。像の基本周波数は、二つの回折光の開き角で決まるので、従来法に比べてより微細なパターンができることが予想される。像強度分布は

$$I(x) = 1 + \cos(\pi \cdot x/R) \frac{2 \cdot J_1(\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R)}{\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R} \quad (21)$$

で与えられ、コントラスト C は

$$C = \frac{2 \cdot J_1(\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R)}{\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R} \quad (22)$$

となる^{1,2)}。さらに(22)式の Bessel 関数を展開して近似すると、

$$\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R = \sqrt{8(1-C)} \quad (23)$$

となる。位相シフトの場合に σ を大きくすれば、従来法の場合と同様に瞳によるけられを考慮して(21)式を書き換える必要があるが、実際の位相シフト法での σ は小さいので問題ない。

(22)式では、 ± 1 次回折光がすべて瞳を通過すると仮定しているが、ガウス像面上 $d=0$ でのコントラストは、 ± 1 次回折光のけられによって決まる。そのときの、 R と C との関係は次式で与えられる^{1,2)}。

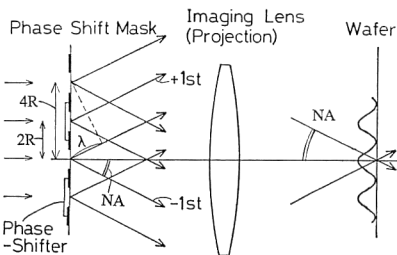


Fig. 15 The principle of phase-shift method.

$$\lambda/4R = \left\{ 1 - 1.5 \left(\frac{1}{2-C} - 0.45 \right) \cdot \sigma \right\} \cdot NA \quad (24)$$

Fig. 16には、(22)、(24)式による結果を実線で、(23)式を点線で、厳密な回折積分の結果を●で示してある。(23)式で十分よく近似されるので、(23)と(24)式の交点を最適な NA とし、 Δ で示してある。そのときの解像力 R を、位相シフト法の解像限界と考えることができる。(23)、(24)式より、 NA を消去すると、

$$R = \frac{\sqrt{\pi \cdot \sigma}}{2 \left[1 - 1.5 \left(\frac{1}{2-C} - 0.45 \right) \cdot \sigma \right]^{1/2}} \cdot \sqrt{d \lambda} = k_3 \cdot \sqrt{d \lambda} \quad (25)$$

となる。最適化した場合の解像限界 R は、比例係数を k_3 として、 $\sqrt{d \lambda}$ に比例することになる。 k_3 はコントラスト C とコヒーレンスファクター σ の関数である。

k_3 が小さい方が、より微細なパターンを形成できることとなり、 k_3 を他の方式についても求めることができれば、各光リソグラフィーの方式の性能比較が容易にできることになる。

また、最適な NA (図中 Δ の点) は、

$$NA = \frac{(1-C)^{1/4}}{(2)^{1/4} \sqrt{\pi \sigma}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - 1.5 \sigma [1/(2-C) - 0.45]}} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{d}} \quad (26)$$

で与えられる。

なお、(25)式の関係は、一般に用いられている経験式より、形式的に導くことができる。光リソグラフィーの解像力 R 、深度 d は、波長 λ 、開口数 NA によって、

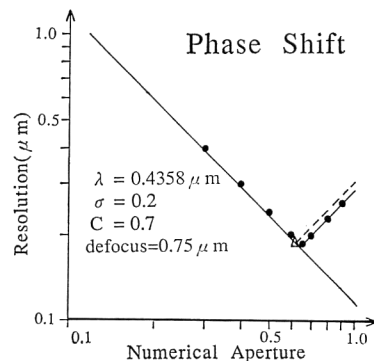


Fig. 16 Relation between numerical aperture and resolution in the case of phase shift method. Conditions are $\sigma=0.2$, defocus= $0.75 \mu\text{m}$, $\lambda=0.4358 \mu\text{m}$ and contrast= 0.7 . Solid lines are calculated by Eqs. (22) and (24). Dotted line is calculated by Eq. (23). The values marked with ● and Δ are calculated by the strict Fourier imaging theory and by Eq. (25) and (26), respectively.

経験的に次のように表される。

$$R = k_1 \lambda / NA \quad (27)$$

$$d = k_2 \lambda / NA^2 \quad (28)$$

(27), (28)式より NA を消去すると

$$R = (k_1 / \sqrt{k_2}) \sqrt{d \lambda} \\ = k_3 \sqrt{d \lambda} \quad (29)$$

となり, (25)式と形式的に一致する。

3.2 SHRINC 照明法

SHRINC 照明法⁹⁾では, 0次回折光と+1次回折光により像が作られる。Fig. 17 に投影光学系の瞳に対する光源形状を示す。小光源の半径を $\sigma \cdot NA$, 小光源中心の瞳座標 ξ , η 軸からの距離を $\sigma_0 NA$ とすると, 比例定数を除いて強度は

$$I(x) = 1 + a^2 + 2 \cdot a \cdot \cos \{ \pi d (\sigma_0 NA / R - \lambda / 4R^2) \} \\ \cdot \cos(\pi x / R) \cdot \frac{2 \cdot J_1(\pi d \cdot \sigma \cdot NA / R)}{\pi d \cdot \sigma \cdot NA / R} \quad (30)$$

コントラストは,

$$C = \frac{2a \cdot \cos \{ \pi d (\sigma_0 NA / R - \lambda / 4R^2) \}}{1 + a^2} \\ \cdot \frac{2 \cdot J_1(\pi d \cdot \sigma \cdot NA / R)}{\pi d \cdot \sigma \cdot NA / R} \quad (31)$$

となる^{1,2)}。さらに, \cos および Bessel 関数を展開して近似すると,

$$C = \frac{2a}{1 + a^2} \cdot \left[1 - \frac{\pi^2 d^2}{32R^2} \left\{ (16\sigma_0^2 + 4\sigma^2) NA^2 - \frac{8\sigma_0 \lambda}{R} NA + \frac{\lambda^2}{R^2} \right\} \right] \quad (32)$$

となる。

線幅が微小となったときの Gauss 像面でのコントラストは,

$$R = \frac{\lambda / (2NA)}{\sqrt{\left\{ 1 - 1.5 \left(\frac{C}{2a - a^2 \cdot C} - 0.45 \right) \cdot \sigma \right\}^2 - \sigma_0^2 + \sigma_0}} \quad (33)$$

で与えられる^{1,2)}。

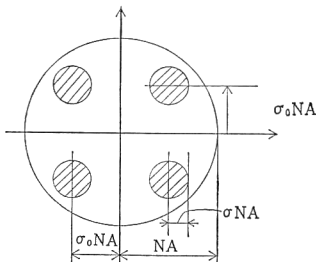


Fig. 17 Configuration of effective source of SHRINC.

Fig. 18 には, (32), (33)式の結果を実線で, 厳密な回折積分の結果を●で示してあり, (32)式で十分よく近似できることがわかる。デフォーカス時において, パターン寸法が粗くなると, かえってコントラストが低下する傾向がある。これは, 対になっている小光源によって作られる像強度分布の位相のずれが大きくなるためである。これも(32)式の解として与えられるものであり, それを Fig. 18 には点線で示してある。この点線はほぼ垂直になっているので, SHRINC における最適な開口数を, 実線と点線の交点と考えてもよいであろう。この点を Fig. 18 に△で示してある。この点での解像力 R は, (32)式を NA について解いたときの重根条件より,

$$R = \frac{\sqrt{\pi \sigma}}{2(2)^{1/4} (4\sigma_0^2 + \sigma^2)^{1/4} [1 - c \cdot (1 + a^2) / 2a]^{1/4}} \cdot \sqrt{\lambda d} \\ = k_3 \sqrt{d \lambda} \quad (34)$$

と求まる。交点の NA は最適な開口数であり, (32), (34)式より

$$NA = \frac{2(2)^{1/4} \sigma_0}{\sqrt{\pi \sigma \cdot (4\sigma_0^2 + \sigma^2)^{3/4}}} \cdot \left\{ 1 - \frac{(1 + a^2)}{2a} \cdot C \right\}^{1/4} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{d}} \quad (35)$$

となる。

Fig. 19 に示すように, パターン寸法に対して常に0次回折光と1次回折光とが対称の位置にくるように, 小光源位置を最適化した場合には,

$$C = \frac{2 \cdot a}{1 + a^2} \cdot \frac{2 \cdot J_1(\pi d \cdot \sigma \cdot NA / R)}{\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA / R} \quad (36)$$

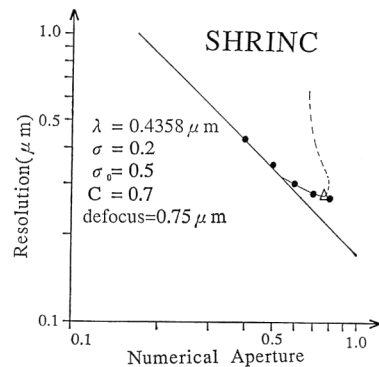


Fig. 18 Relation between numerical aperture and resolution in the case of SHRINC. Conditions are $\sigma = 0.2$, $\sigma_0 = 0.5$, defocus = $0.75 \mu\text{m}$, $\lambda = 0.4358 \mu\text{m}$ and contrast = 0.7 . Solid straight line is calculated by Eq. (33). Solid curve and dotted curve are calculated by Eq. (32). The values marked with ● and △ are calculated by the strict Fourier imaging theory and by Eqs. (34) and (35), respectively.

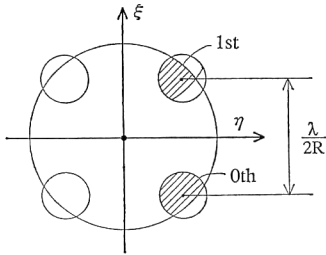


Fig. 19 In the case of SHRINC, positions of 0th order and 1st order diffracted waves are symmetry.

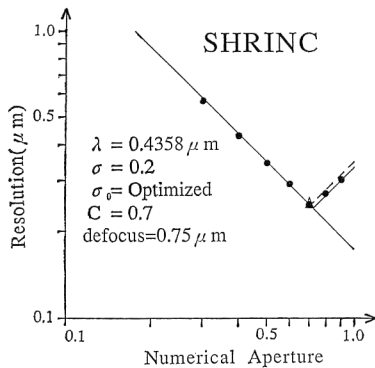


Fig. 20 Relation between numerical aperture and resolution in the case of SHRINC. Positions of 0th order and 1st order diffracted waves are symmetry as shown in Fig. 19. Conditions are $\sigma = 0.2$, defocus = $0.75 \mu\text{m}$, $\lambda = 0.4358 \mu\text{m}$ and contrast = 0.7 . Solid lines are calculated by Eqs. (36) and (38). Dotted line is calculated by Eq. (37). The values marked with ● and ▲ are calculated by the strict Fourier imaging theory and by Eqs. (39) and (40), respectively.

となる^{1,2)}. Bessel 関数を展開して近似すると

$$\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA / R = \sqrt{8 \{1 - (1 + a^2) / 2a \cdot C\}} \quad (37)$$

となる。また、線幅が微小となったとき、小光源が瞳でけられるようになったときの、ガウス像面でのコントラストは、

$$\frac{\lambda}{2\sqrt{2}R \cdot NA} = 1 + \frac{0.36a - 0.45C(1 + a^2)}{1.64a - C(1 + a^2)/1.5} \cdot \sigma \quad (38)$$

で与えられる^{1,2)}。Fig. 20 には、(36)式と(38)式を実線で、(37)式を点線で、厳密な回折積分を●で示してある。(37)式で十分よく近似されており、(37)式と(38)式の交点(図中▲)が最適な NA を与えると考えられる。 (37)、(38)式より NA を消去すると、

$$R = \left[\sqrt{\pi \cdot \sigma} \left\{ 2\sqrt{2} \sqrt{1 + \left(\frac{0.36a - 0.45(1 + a^2)C}{1.64a - 0.67(1 + a^2)C} \right) \sigma} \right. \right.$$

$$\left. \cdot \left(1 - \frac{1 + a^2}{2a} C \right)^{1/4} \right] \cdot \sqrt{d \lambda}$$

$$= k_3 \cdot \sqrt{d \lambda} \quad (39)$$

となる。また、交点の NA は

$$NA = \frac{\left(1 - \frac{1 + a^2}{2a} C \right)^{1/4}}{\sqrt{\pi \cdot \sigma} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{0.36a - 0.45(1 + a^2)C}{1.64a - 0.67(1 + a^2)C} \right) \sigma}} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{d}} \quad (40)$$

となる。

3.3 従来法

従来法の最適な開口数は、(12)式を NA で微分し、極値を求めることにより得られるが、簡単な形にはならない。Fig. 6~9 の数値計算結果をみると、ほぼ直線 $\lambda/2R = NA$ 上に最適値がある。ここで、近似精度は多少劣るが、(12)式の cos およびベッセル関数 J_1 を展開して近似すると、

$$C = [4S_0a \{1 - \{\pi d(1 - \sigma)NA/2R\}^2/2 - \{\pi d((1 + \sigma)NA - \lambda/2R)/2R\}^2/8\}] / [1 + 2S_0 \cdot a^2 + 2S_1a^2 \{1 - \{2\pi d(NA - \lambda/2R)/R\}^2/8\}] \quad (41)$$

となる。(41)式と

$$\lambda/2R = NA \quad (42)$$

との交点を求めると、(4)、(8)式より $S_0 = 0.45$, $S_1 = 0$ として

$$R = \frac{\sqrt{\pi}}{2(2)^{1/4}} \cdot \frac{\{(1 - \sigma)^2 + \sigma^2/4\}^{1/4}}{\{1 - (1 + 0.9a^2)/1.8a \cdot C\}^{1/4}} \cdot \sqrt{d \lambda} = k_3 \cdot \sqrt{d \lambda} \quad (43)$$

となる。また、交点の NA は

$$NA = \frac{(2)^{1/4}}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\{1 - (1 + 0.9a^2)/1.8a \cdot C\}^{1/4}}{\{(1 - \sigma)^2 + \sigma^2/4\}^{1/4}} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{d}} \quad (44)$$

となる。Fig. 5~8 には、(43)、(44)式で求めた最適値を△で示してある。

3.4 輪帯照明法

最適 NA の近傍は(18)式で表すことができるので、(18)式を NA で微分し、極値を求めることにより最適 NA が得られるが、従来法と同様簡単な形にはならない。Fig. 11~14 の数値計算結果をみると、従来法と同じように(18)式と(42)式の交点が、おおよそ最適化された NA を与えると考えられる。ここで、近似精度は多少劣るが、(18)式を展開すると、

$$C = \frac{4 \cdot a}{8 + 6 \cdot a^2 + 4 \cdot S_2 \cdot a^2 + 8 \cdot (S_2 - 0.5) \cdot a^2} \cdot [3 + 2 \cdot S_2 - \{\pi d(\sigma NA - \lambda/4R)/R\}^2/2 - \{\pi d(\sigma NA/\sqrt{2} - \lambda/4R)/R\}^2]$$

Table 1 k_3 calculated by Eqs. (25), (34), (39), (43) and (46).

	σ	σ_0	$C=0.7$	$C=0.6$
Conventional	0.5	—	0.873	0.762
	0.65	—	0.806	0.705
Annular	0.5	—	0.794	0.659
	0.65	—	0.728	0.540
Phase-shift	0.2	—	0.335	0.309
SHRINC	0.2	0.35	0.566	0.512
	0.2	0.5	0.478	0.433
SHRINC opt.	0.2	—	0.430	0.380

$$-S_2 \{ \pi d \lambda / 4R^2 \}^2 \tag{45}$$

となる。(42)式が成立する条件下では $S_2 < 0.5$ となり ± 1 次光間の干渉が生じないことに注意し、(42)、(45)式より NA を消去すると、

$$R = \frac{\sqrt{\pi}}{2(2)^{1/4}} \cdot \frac{\{(2\sigma-1)^2 + (2\sigma-2)^2 + 2S_2\}^{1/4}}{\{3+2S_2-(4+3a^2+2S_2a^2)C/2a\}^{1/4}} \cdot \sqrt{d\lambda}$$

$$= k_3 \cdot \sqrt{d\lambda} \tag{46}$$

$$S_2 = 0.5 + \frac{4(\sqrt{1-\sigma^2}-1)}{\pi \cdot \sigma} \tag{47}$$

となる。また、交点の NA は

$$NA = \frac{(2)^{1/4}}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{\{3+2S_2-(4+3a^2+2S_2a^2)C/2a\}^{1/4}}{\{(2\sigma-1)^2 + (2\sigma-\sqrt{2})^2 + 2S_2\}^{1/4}} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{d}} \tag{48}$$

となる。(46)~(48)式より求めた最適値を Fig. 11~14 に Δ で示してある。

3.5 各方式の比較

要求されるコントラストを 0.7 と 0.6 としたときの各方式の k_3 を、(25)、(34)、(39)、(43)および(46)式より求め、Table 1 にまとめた。 k_3 によって、各リソグラフィー方式の比較検討が容易に行える。

他の方式に比べて、輪帯照明では、必要なコントラストが小さくなったときの k_3 の減少が著しく、高解像または高深度が得られることがわかる。

位相シフト法が他の方式に比べて、高解像、高深度を得ることが明瞭である。SHRINC では、照明法を工夫しただけにもかかわらず、従来法、輪帯照明法に比べ格段に優れており、位相シフト法におけるマスク製造の困難さの問題などもなく実用的である。

Table 1 の範囲では、どの方法も σ が大きいほうが

高解像 (高深度) となるが、従来法では、(43)式より $\sigma = 0.8$ が最適であることが導かれる。ただし、実際のリソグラフィーでは孤立パターンなども考慮して σ 値を決める必要がある。

なお、(25)、(34)、(39)、(43)、(46)式で d を小さくしていくと、いくらでも微細な像が作られることになるが、この時には(26)、(35)、(40)、(44)、(48)式より、最適化 NA が大きくなり 1 を越えてしまうため、非現実的な解となる。

4. ま と め

投影光学系リソグラフィーの評価として一般に用いられるラインアンドスペースパターンの実用解像度を、解析的に求める公式は、従来照明法と輪帯照明法において、照明のコヒーレンスファクター σ が大きい場合には、近似精度が悪かった。本論文では、このような場合にも十分良い近似を与える公式を導き、リソグラフィーの解析的評価がさらに一般的に行えるようになった。

各方式において最適化された開口数における、解像力と深度の関係を新しいパラメーター k_3 を用いて表した。 k_3 はコントラスト、コヒーレンスファクターの関数であり、 k_3 の大小によって、各リソグラフィー方式の性能比較を、明瞭に示すことができる。

文 献

- 1) 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.
- 2) M. Shibuya and T. Tsuruta: “Resolution vs depth of focus in the resolution-enhanced optical system for lithography,” Proc. SPIE, **1780** (1992) 117-131.
- 3) 渋谷真人, 鶴田匡夫: “投影光学系リソグラフィーの実用解像度”, 第 39 回応用物理学関係連合講演会予稿集, 30 pNA-3 (1992).
- 4) 鶴田匡夫: 応用光学II (培風館, 1990) p. 7.
- 5) 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.
- 6) M.D. Lenvenson, 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.
- 7) 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.
- 8) N. Shiraishi, S. Hirukawa, Y. Takeuchi and N. Magome: “New imaging technique for 64 M-DRAM,” Proc. SPIE, **1674** (1992) 741-752.