



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

渋谷 真人・鶴田 匠夫

(株)ニコン光学本部 〒140 東京都品川区西大井 1-6-3

(1992年4月14日受付, 1992年7月14日受理)

Analytical Equation of Image Intensity and Practical Resolution of Optical Projection Lithography

Masato SHIBUYA and Tadao TSURUTA

Optical Designing Department, Nikon Corporation,
1-6-3, Nishi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140

(Received April 14, 1992; Accepted July 14, 1992)

Practical resolution of optical lithography is often defined as the minimum feature size which can be fabricated with acceptable depth of focus. It has been known that by calculating optical image contrast in defocused condition, this practical resolution can be estimated with considerable precision. However, since large volume of calculation is required to know image contrast under partially coherent illumination, evaluation of optical lithography systems has been time consuming. In this paper, we propose an analytical and intuitive method for getting image contrast in defocused condition. By using this method, relations among defocus, numerical-aperture, wavelength, coherence factor and image contrast are derived analytically. The method is applicable to resolution-enhanced optical methods, such as phase-shift method, illumination controll method, and others, and enables quantitative comparison between them.

1. 序

投影光学系リソグラフィーでは、一般に、解像力(R)、焦点深度(DOF)を次式で用いて評価している。

$$R = k_1 \cdot \lambda / NA \quad (1)$$

$$DOF = k_2 \cdot \lambda / NA^2 \quad (2)$$

ここは、 λ は露光波長、 NA は投影光学系のウエファー(像)側開口数、 k_1, k_2 は経験的に決まる定数である。これらの式は簡便にリソグラフィーの評価ができるという利点はあるが、実際の焦点深度はパターン寸法やレジストプロセスに依存するので、実用的な解像力、焦点深度を評価するには、厳密な結像シミュレーションおよびレジストシミュレーションを行わなければならない。

投影光学系リソグラフィーの実用解像度は必要焦点深

度で解像できる最小パターン寸法で定義することができる。この実用解像度は光学的パラメーターだけでなくレジストプロセスにもよるが、最も一般に評価に用いられるラインアンドスペースパターンについては、ラインとスペースのそれぞれの中点の強度によるコントラストで評価できることが実験的に確かめられている¹⁾。レジスト像の寸法精度が $\pm 10\%$ で作られる深度と、コントラストが各レジストプロセスの要求値を満足する深度とが一致するのである。それゆえ、光学像のコントラスト計算によって、実用解像度を十分議論でき、投影光学系リソグラフィーシステムの評価ができることとなる。

しかしながら、部分的コヒーレント照明下のフーリエ結像論による計算量は膨大であり^{2,3)}、コントラストによる評価は必ずしも容易ではない。また、数値計算によ

って評価することはできるが、投影光学系の性能を示すパラメーターの最適化を議論する上での見通しが悪い。本報告では、拡がりのあるインコヒーレント光源による2光束干渉縞コントラストの公式⁴⁾を拡張して、結像光学系のコントラストを求める解析的な式を導く⁵⁾。この式を従来型結像光学系、位相シフト法^{6,7)}、照明制御方式(SHRINC 照明法)⁸⁾などに適用し、厳密なフーリエ結像論による結果と比較する。

2. 理 論

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る、強度は比例定数を除き次式で表される⁴⁾。

$$I(B) = 1 + \text{REAL}[\mu(B_1, B_2)] \frac{2a_1 a_2}{a_1^2 + a_2^2} \quad (3)$$

$$\mu(B_1, B_2) = \frac{\int l(s) \exp\{-i2\pi/\lambda \cdot (AB_1B - AB_2B)\} ds}{\int l(s) ds} \quad (4)$$

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。

これらの2光束干渉縞強度の式を、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してみる。光源の拡がりが、照明光源の大きさに対応し、Fig. 1 における異なる光路が、物体(レチクル)による異なる回折光に対応する。

2.1 従来照明法(円形光源)

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、それら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

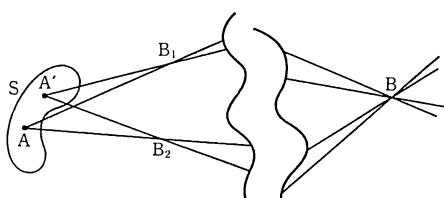


Fig. 1 Interference fringe is made by incoherent expanded source, S, and localized in the vicinity of point B.

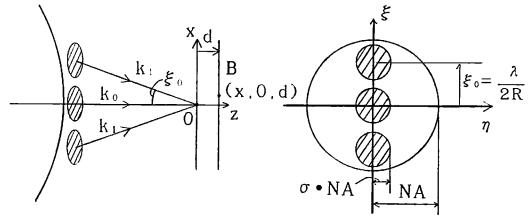


Fig. 2 In the case of conventional illumination, diffracted light waves in image space are shown in left figure and those on exit pupil are shown in right figure.

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り以下のように表される。

$$I(x) = a_0^2 + a_1^2 + a_{-1}^2$$

$$+ 2 \cdot a_0 \cdot a_1 \cdot \text{REAL} \left\{ \frac{\int dsl(s) \exp[-i(k_1 - k_0)r]}{\int dsl(s)} \right\}$$

$$+ 2 \cdot a_0 \cdot a_{-1} \cdot \text{REAL} \left\{ \frac{\int dsl(s) \exp[-i(k_{-1} - k_0)r]}{\int dsl(s)} \right\}$$

$$+ 2 \cdot a_1 \cdot a_{-1} \cdot \text{REAL} \left\{ \frac{\int dsl(s) \exp[-i(k_{-1} - k_1)r]}{\int dsl(s)} \right\}$$

ここで r は点 B のガウス像面中心 0 からの位置ベクトルである。回折光の射出瞳での座標を、伝播方向の x, y 方向余弦 ξ, η で表し、 ξ_0 を光源の中心からの照明光の1次回折光の x 方向余弦とする。上式に

$$r = (x, 0, d)$$

$$k_0 = 2\pi/\lambda \cdot (\xi, \eta, \sqrt{1 - \xi^2 - \eta^2})$$

$$= 2\pi/\lambda \cdot (\xi, \eta, 1 - \xi^2/2 - \eta^2/2)$$

$$k_1 = 2\pi/\lambda \cdot (\xi + \xi_0, \eta, \sqrt{1 - (\xi + \xi_0)^2 - \eta^2})$$

$$= 2\pi/\lambda \cdot (\xi + \xi_0, \eta, 1 - \xi^2/2 - \xi_0^2/2 - \xi\xi_0 - \eta^2/2)$$

などを代入し、±1 次光は多くの場合等しい振幅なので、 $a_0 = 1, a_1 = a_{-1} = a$ と規格化して整理すると、比例定数を除いて

$$I(x) = 1 + 2 \cdot a^2$$

$$+ 4 \cdot a \cdot \cos(\pi \xi_0^2 d / \lambda) \cdot \cos(2\pi \xi_0 x / \lambda)$$

$$+ \frac{\int \rho d\rho d\theta \exp[-i2\pi/\lambda \cdot \xi_0 \cdot d \cdot \rho \cdot \cos\theta]}{\int \rho d\rho d\theta}$$

$$+ 2a^2 \cdot \cos(4\pi \xi_0 x / \lambda)$$

$$+ \frac{\int \rho d\rho d\theta \exp[-i2\pi/\lambda \cdot 2 \cdot \xi_0 \cdot d \cdot \rho \cdot \cos\theta]}{\int \rho d\rho d\theta} \quad (5)$$

となる。なお光源は ξ 方向に対称であると仮定し、また

積分変数を ξ, η から極座標 ρ, θ に変換した。

一般には円形光源が用いられており、(5)式の ρ の積分範囲は $0 \sim \sigma \cdot NA$ であり、これを実行して整理すると⁹⁾、

$$\begin{aligned} I(x) = & 1 + 2 \cdot a^2 \\ & + 4 \cdot a \cdot \cos(\pi \cdot \xi_0^2 \cdot d/\lambda) \cdot \cos(2\pi \xi_0 x/\lambda) \\ & - \frac{2 \cdot J_1(2\pi \xi_0 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/\lambda)}{2\pi \xi_0 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/\lambda} \\ & + 2 \cdot a^2 \cdot \cos(4\pi \xi_0 x/\lambda) \frac{2 \cdot J_1(4\pi \xi_0 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/\lambda)}{4\pi \xi_0 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/\lambda} \end{aligned} \quad (6)$$

となり、円形光源照明において、0次光、 ± 1 次光による像強度分布が求まった。ここで J_1 は1次のBessel関数である。この式は定数項、0次光と ± 1 次光との干渉による物体基本周波数の項および ± 1 次光間の干渉による倍周波数の項よりなる。よって、像のラインとスペースのそれぞれの中点の強度によるコントラスト C は

$$C = \frac{4a \cdot \cos(\pi \cdot \xi_0^2 \cdot d/\lambda) \frac{2J_1(2\pi \xi_0 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/\lambda)}{2\pi \xi_0 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/\lambda}}{1 + 2 \cdot a^2 + 2 \cdot a^2 \frac{2 \cdot J_1(4\pi \xi_0 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/\lambda)}{4\pi \xi_0 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/\lambda}} \quad (7)$$

と表される。ここで、ライン幅とスペース幅の等しい場合には、パターン幅を R として $\xi_0 = \lambda/(2R)$ 、 $a = 2/\pi$ となるので、コントラストは

$$C = \frac{\frac{8}{\pi} \cdot \cos\{\pi \cdot d \cdot \lambda/(4R^2)\} \frac{2J_1(\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R)}{\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R}}{1 + 8/\pi^2 + 8/\pi^2 \frac{2 \cdot J_1(2\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R)}{2\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R}} \quad (8)$$

となる。このように、コントラスト C 、デフォーカス d 、パターン線幅 R 、開口数 NA 、コヒーレンスファクター σ および露光波長 λ の間の解析的な関係式が求まった。例えば、コントラストを NA または σ の関数として計算すれば、 NA または σ の最適値を求めることができる。また、焦点深度をコントラストの関数として求めることも容易である。

以上の議論は、0次光と ± 1 次光のみを考えており、この議論が成立するためには、1次回折光がすべて入射し、高次回折光が入射しないことが必要である。ライン幅とスペース幅が等しいときには2次回折光がないので3次回折光を考えることとなり、次式が満足されなければならない。

$$\begin{aligned} \lambda/(2R) + \sigma \cdot NA &< NA \\ 3\lambda/(2R) - \sigma \cdot NA &> NA \end{aligned} \quad (9)$$

また、(8)式より、 $\sigma \cdot NA$ が同じ時は同じ結像状況となることがわかるが、これは回折光の様子より明らか

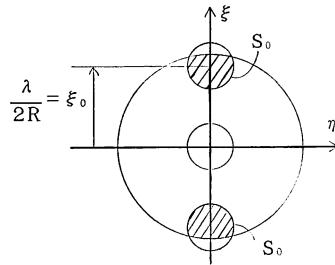


Fig. 3 In the case of conventional illumination, when pattern size is very small, a part of first order diffracted wave is partly cut by pupil aperture.

なことである。

ここまでは、デフォーカス状態における、0次光、 ± 1 次光による像コントラストを考えてきたが、パターンサイズが微小となると1次回折光が光学系を透過しなくなり、ガウス像面（ベストフォーカス）においても、コントラストが低下していく。1次回折光が瞳内に入る境界付近での、ガウス像面上コントラストを導く。Fig. 3 に示すように、 ± 1 次回折光が瞳の境界に作られる。このとき瞳外の回折光が少ないと、 ± 1 次回折光間の干渉が生じるが、瞳外の回折光が大きくなると、 ± 1 次回折光間の干渉は起きない。回折光の内、瞳内の割合を S_0 とすれば、(6)式において、 ± 1 次回折光による定数項は S_0 倍、0次光と ± 1 次回折光による干渉項も S_0 倍となり、 ± 1 次回折光間の干渉項は $S_0 - (1 - S_0) = 2S_0 - 1$ 倍となる。さらにデフォーカス量 $d = 0$ とすれば、コントラストは、(7)式を参考にして、

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

となる。しかし、実際に必要なコントラストから計算してみると、 ± 1 次回折光間の干渉が起きない場合を考えればよく、

$$C = \frac{4a \cdot S_0}{1 + 2a^2 \cdot S_0} \quad (10)$$

となる。(10)式より、必要なコントラストが与えられたときの S_0 が求まるので、そのときの回折光の回折角より、解像限界が求まる。ここで、 S_0 と回折角 ξ_0 との関係は部分的コヒーレンス OTF と空間周波数との関係と一致し²⁾、横軸を ξ_0/NA 、縦軸を S_0 として Fig. 4 に示す。Fig. 4 のグラフの傾斜部分を直線近似すると、およそ

$$S_0 - 0.45 = -\frac{\xi_0/NA - 1}{1.5\sigma} \quad (11)$$

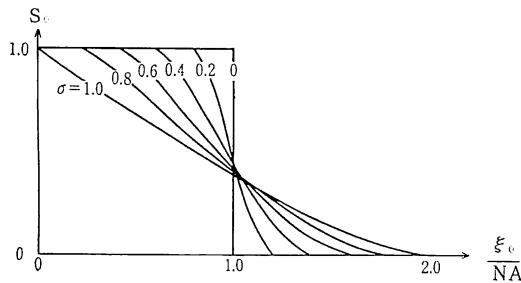


Fig. 4 Relation between ξ_0/NA and S_0 in the case of conventional illumination. ξ_0 and S_0 are defined in Fig. 3.

となる。 $\xi_0 = \lambda/(2R)$ の関係と (10) 式、(11) 式より

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

となり、さらに $a = 2/\pi$ を代入して

$$\lambda/(2R) = \left[1 - 1.5 \left(\frac{C}{2.55 - 0.81C} - 0.45 \right) \cdot \sigma \right] \cdot NA \quad (12)$$

となる。ガウス像面においてパターン線幅が上式で与えられる値以上であれば、必要なコントラストが得られる。実用解像範囲は、必要なデフォーカスおよび必要なコントラストに対して条件 (8) 式と (12) 式がともに成立する範囲として与えられる。

2.2 輪帯光源

輪帯光源の輪帯幅が細いとして、幅がゼロとなる極限を考えると、(5)式の ρ の積分は省略され、輪帯の半径を $\sigma \cdot NA$ として計算を実行すると⁹⁾

$$\begin{aligned} I(x) = & 1 + 2 \cdot a^2 \\ & + 4 \cdot a \cdot \cos(\pi \cdot \xi_0^2 \cdot d/\lambda) \cdot \cos(2\pi \xi_0 x/\lambda) \\ & \cdot J_0(2\pi \xi_0 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/\lambda) \\ & + 2 \cdot a^2 \cdot \cos(4\pi \xi_0 x/\lambda) \cdot J_0(4\pi \xi_0 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/\lambda) \end{aligned} \quad (13)$$

となる。ここで J_0 は 0 次の Bessel 関数である。この式により、像のラインとスペースの中点の強度によるコントラスト C は

$$C = \frac{4a \cdot \cos(\pi \cdot \xi_0^2 \cdot d/\lambda) J_0(2\pi \xi_0 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/\lambda)}{1 + 2 \cdot a^2 + 2 \cdot a^2 \cdot J_0(4\pi \xi_0 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/\lambda)} \quad (14)$$

と表される。ライン幅とスペース幅の等しい場合には、 $\xi_0 = \lambda/(2R)$, $a = 2/\pi$ であり、コントラストは

$$C = \frac{8/\pi \cdot \cos\{\pi \cdot d \cdot \lambda/(4R^2)\} J_0(\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R)}{1 + 8/\pi^2 + 8/\pi^2 \cdot J_0(2\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R)} \quad (15)$$

となる。

輪帯光源の場合の以上の議論も 0 次光、±1 次光だけを考慮しており、これらの議論が成立するのは、円形光源の場合と同じく、(9) 式が満足するときである。

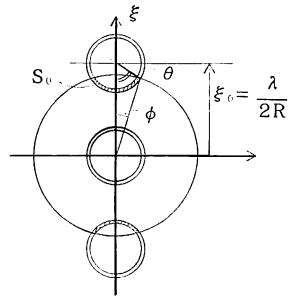


Fig. 5 In the case of annular illumination, when pattern size is very small, a part of first order diffracted wave is partly cut by pupil aperture.

円形光源の場合と同様に、線幅が微小となったときのガウス像面でのコントラストを考える。Fig. 5 に示すように円形光源と同様に、瞳外の回折光が少ないと ±1 次回折光間の干渉が生じるが、実際には干渉が起きない場合を考えればよく、1 次回折光の内、瞳内の割合を S_0 とすれば、コントラストは円形光源と同様に (10) 式で与えられる。(10) 式より必要なコントラストが与えられたときの S_0 が求まり、そのときの回折光の回折角より解像限界が求まる。ここで、回折角 ξ_0 と S_0 とは、Fig. 5 に示されるパラメータによって以下の式で結ばれる。

$$\theta = \pi \cdot S_0$$

$$\sigma \cdot NA \cdot \sin(\theta) = NA \cdot \sin(\phi) \quad (16)$$

$$\lambda/(2R) = \xi_0 = \sigma \cdot NA \cdot \cos(\theta) + NA \cdot \cos(\phi)$$

(10) 式と (16) 式より、

$$\begin{aligned} \frac{\lambda}{2R} = & \sigma \cdot NA \cdot \cos\left(\frac{\pi C}{4a - 2a^2 C}\right) \\ & + NA \cdot \cos\left[\sin^{-1}\left\{\sigma \sin\left(\frac{\pi C}{4a - 2a^2 C}\right)\right\}\right] \end{aligned} \quad (17)$$

となる。実用解像範囲は (17) 式と (15) 式がともに成立する範囲である。

2.3 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て、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 $\lambda/2$ の位相差をもうけすると、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. 6 に示すように ±1 次回折光だけを考えればよいことになる。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。二つの回折光の大きさは等しく、像空間での ±1 次回折光の波数ベクトルを k_1, k_{-1} とすると、デフォーカス d の像面上の点 $B(x, 0, d)$

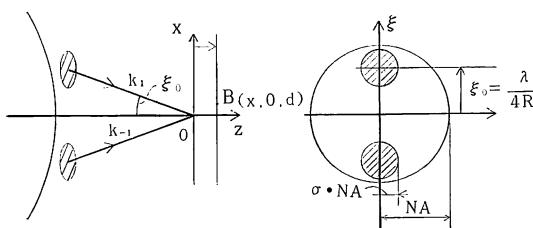


Fig. 6 In the case of phase shift method, diffracted light waves in image space are shown in left figure and those on exit pupil are shown in right figure.

における干渉縞強度は比例定数を除いて以下のように表される。

$$I(B) = 1 + \text{REAL} \frac{\int ds I(s) \exp[-i(k_1 - k_{-1})r]}{\int ds I(s)}$$

ここで r は点 B の位置ベクトルである。回折光の射出瞳での座標を、方向余弦 ξ, η で表し、 ξ_0 を光源の中心からの照明光の1次回折光の x 方向余弦とする。上式に

$$r = (x, 0, d)$$

$$\begin{aligned} k_1 &= 2\pi/\lambda \cdot (\xi + \xi_0, \eta, \sqrt{1 - (\xi + \xi_0)^2 - \eta^2}) \\ &= 2\pi/\lambda \cdot (\xi + \xi_0, \eta, 1 - \xi^2/2 - \xi_0^2/2 - \xi\xi_0 - \eta^2/2) \end{aligned}$$

などを代入し、光源を半径 $\sigma \cdot NA$ の円形とすると

$$I(x) =$$

$$1 + \cos(4\pi \cdot \xi_0 \cdot x / \lambda) \frac{2 \cdot J_1(4\pi \xi_0 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA / \lambda)}{4\pi \xi_0 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA / \lambda} \quad (18)$$

となる。コントラスト C は

$$C = \frac{2 \cdot J_1(4\pi \xi_0 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA / \lambda)}{4\pi \xi_0 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA / \lambda} \quad (19)$$

と表される。位相シフトの場合には、パターンピッチを $2R$ とすると $2\xi_0 = \lambda/(2R)$ のなので、これを用いると

$$C = \frac{2 \cdot J_1(\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA / R)}{\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA / R} \quad (20)$$

となる。このように、位相シフトの場合にはこれらのパラメーター間の関係式がたいへん簡明に表される。例えば所望のコントラストにおける、他のパラメーター間の関係は、適当な比例定数 α を用いて

$$R \geq \alpha \cdot \pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA \quad (21)$$

と表される。

位相シフト法では0次回折光だけでなく2次回折光も基本的ないので、以上の議論は、1次回折光すべてが光学系を透過し、3次回折光が透過しないことが前提となっている。すなわち、

$$\begin{aligned} \lambda/(4R) + \sigma \cdot NA &< NA \\ 3\lambda/(4R) - \sigma \cdot NA &> NA \end{aligned} \quad (22)$$

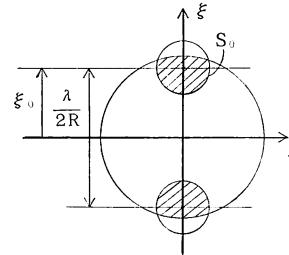


Fig. 7 In the case of phase shift method, when pattern size is very small, a part of first order diffracted wave is partly cut by pupil aperture.

が満たされる範囲で適用できる。

線幅が微小となったときのガウス像面でのコントラストを考える。位相シフトの場合は Fig. 7 を参照して、±1 次回折光の内、瞳内の割合を S_0 とすれば、コントラストは、

$$C = \frac{2S_0 - 1}{S_0} \quad (23)$$

となる。この式より必要なコントラストが与えられたときの S_0 が求まり、そのときの回折光の回折角より解像限界が求まる。従来照明法と同様に、 S_0 と ξ_0/NA との関係が部分的ヒューレン OTF と空間周波数との関係に一致し、(11)式、(23)式より

$$\xi_0 = \lambda/(4R) = \left[1 - 1.5 \left(\frac{1}{2-C} - 0.45 \right) \cdot \sigma \right] \cdot NA \quad (24)$$

となる。必要なコントラストを与える範囲は、(21)式と(24)式をともに満足する範囲である。

2.4 SHRINC 照明法

SHRINC 照明法⁸⁾では、0次回折光と+1次回折光により像が作られる。Fig. 8 に投影光学系の瞳に対する光源形状を示す。円形光源が四つ対称に配置されている。いまそれらの内の一つの光源（小光源と呼ぶことに）に着目すると、Fig. 9 に示すように射出瞳上に

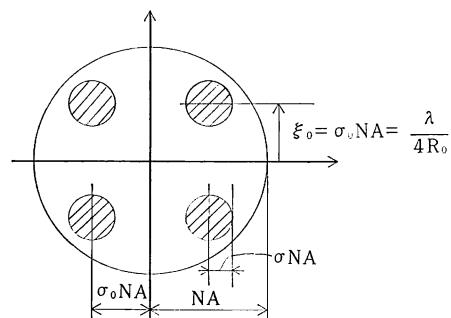


Fig. 8 Configuration of effective source of SHRINC.

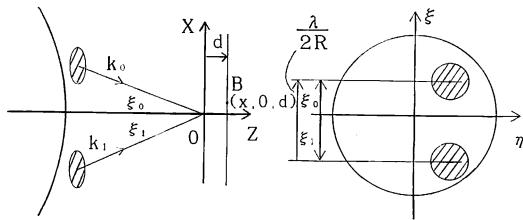


Fig. 9 In the case of SHRINC, diffracted light waves in image space are shown in left figure and those on exit pupil are shown in right figure.

0次回折光と+1次回折光が作られる。0次回折光が瞳の周辺にあるので、1次回折光との干渉で従来法より微細なパターンがつくられることが予想される。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 とし、Fig. 8において紙面内で対称の位置にある別の小光源からの照明も考慮し、それらの波数ベクトルを、 k_0', k_{-1}' とすると、デフォーカス d の像面上の点 B における干渉縞強度は比例定数を除いて以下のように表される。

$$I(B) = 1 + \alpha^2$$

$$+ \alpha \cdot \text{REAL} \left\{ \frac{\int ds l(s) \exp[-i(k_1 - k_0)r]}{\int ds l(s)} \right\}$$

$$+ \alpha \cdot \text{REAL} \left\{ \frac{\int ds l(s) \exp[-i(k_{-1}' - k_0')r]}{\int ds l(s)} \right\}$$

ここで、 r は点 B の位置ベクトルである。回折光の射出瞳での座標を、 x, y 方向余弦 ξ, η で表し、 ξ_0 を光源中心からの照明光の0次回折光の x 方向余弦、 ξ_1 を1次回折光の x 方向余弦とする。上式に

$$r = (x, 0, d)$$

$$\begin{aligned} k_0 &= 2\pi/\lambda \cdot (\xi + \xi_0, \eta, \sqrt{1 - (\xi + \xi_0)^2 - \eta^2}) \\ &= 2\pi/\lambda \cdot (\xi + \xi_0, \eta, 1 - \xi^2/2 - \xi_0^2/2 - \xi\xi_0 - \eta^2/2) \\ k_1 &= 2\pi/\lambda \cdot (\xi + \xi_1, \eta, \sqrt{1 - (\xi + \xi_1)^2 - \eta^2}) \\ &= 2\pi/\lambda \cdot (\xi + \xi_1, \eta, 1 - \xi^2/2 - \xi_1^2/2 - \xi\xi_1 - \eta^2/2) \end{aligned}$$

などを代入し、小光源の半径を $\sigma \cdot NA$ とすると、比例定数を除いて強度が次式で表される。

$$I(x) = 1 + \alpha^2$$

$$+ 2 \cdot \alpha \cdot \cos[\pi(\xi_0^2 - \xi_1^2)d/\lambda]$$

$$\cdot \cos[2\pi(\xi_0 - \xi_1)x/\lambda]$$

$$\cdot \frac{2 \cdot J_1[2\pi(\xi_0 - \xi_1)d \cdot \sigma \cdot NA/\lambda]}{2\pi(\xi_0 - \xi_1) \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/\lambda} \quad (25)$$

となる。コントラスト C は

$$C = \frac{2 \cdot \alpha \cdot \cos[\pi(\xi_0^2 - \xi_1^2)d/\lambda]}{1 + \alpha^2}$$

$$\cdot \frac{2 \cdot J_1[2\pi(\xi_0 - \xi_1)d \cdot \sigma \cdot NA/\lambda]}{2\pi(\xi_0 - \xi_1) \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/\lambda} \quad (26)$$

となる。ここで、パターンピッチを $2R$ とすると

$$\xi_0 - \xi_1 = \lambda/(2R)$$

であり、また1次回折光が0次回折光にたいして対称に像面に入射するときのパターンピッチを $2R_0$ とすれば

$$2\xi_0 = \lambda/(2R_0)$$

である。この R_0 はデフォーカスに対して最適なパターン寸法と考えられる。さらに $\alpha = 2/\pi$ とすると、(26)式は

$$C = \frac{4/\pi \cdot \cos[\pi(1/R_0 - 1/R)\lambda \cdot d/(4R)]}{1 + 4/\pi^2}$$

$$\cdot \frac{2 \cdot J_1(\pi d \cdot \sigma \cdot NA/R)}{\pi d \cdot \sigma \cdot NA/R} \quad (27)$$

となる。なお、Fig. 8 に示すように小光源の中心座標を $\sigma_0 \cdot NA$ とすると、 σ_0 と R_0 とは次のような関係にある。

$$\xi_0 = \lambda/(4R_0) = \sigma_0 \cdot NA$$

(27)式より、 NA 、 σ や σ_0 の最適化を検討することができる。

以上の議論が成立するのは、1次回折光が光学系を透過し、高次回折光が透過しないときであり、ラインとスペースの幅が等しいときは2次回折光がないので、3次回折光を考えよう。

$$\lambda/(2R) < \{\sqrt{(1-\sigma)^2 - \sigma_0^2} + \sigma_0\} NA$$

$$3\lambda/(2R) > \{\sqrt{(1+\sigma)^2 - \sigma_0^2} + \sigma_0\} NA \quad (28)$$

を満足するときである。

線幅が微小となったときのガウス像面でのコントラストを考える。SHRINC 照明の場合は Fig. 10 を参照して、±1次回折光の内、瞳内の割合を S_0 とすれば、コントラストは、

$$C = \frac{2\alpha \cdot S_0}{1 + \alpha^2 \cdot S_0} \quad (29)$$

となる。

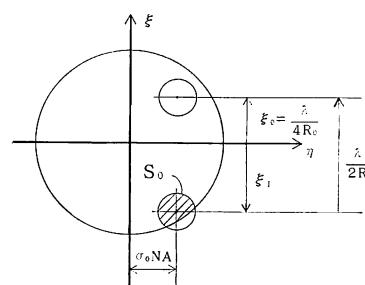


Fig. 10 In the case of SHRINC, when pattern size is very small, a part of first order diffracted wave is partly cut by pupil aperture.

Fig. 10 より, $\sqrt{\xi_1^2 + (\sigma_0 \cdot NA)^2}$ が小光源中心の瞳中心からの距離であり, すなわち, $\sqrt{\xi_1^2 + (\sigma_0 \cdot NA)^2} / NA$ と S_0 との関係が部分的コヒーレント OTF の公式と一致する. よって, (11)式および(29)式より, 必要なコントラストが与えられたときの解像限界が次式のように求まる.

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

この式を変形して, さらに $a = 2/\pi$ を入れると

$$R = \frac{\lambda/(2NA)}{\sqrt{\left\{ 1 - 1.5 \left(\frac{C}{1.27 - 0.405C} - 0.45 \right) \cdot \sigma \right\}^2 - \sigma_0^2 + \sigma_0^2}} \quad (30)$$

となる. 必要なコントラストを満たす条件は, (27)式と(30)式をともに満足する範囲として与えられる.

0次回折光にたいして1次回折光が対称でない場合にはデフォーカスに対して不利であると考えられるが, パターン寸法に対して常に0次回折光と1次回折光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ついて議論する. この議論により SHRINC 照明の基本的な効果がより明白になると思われる. すなわち, Fig. 11 に示すように, 四つの小光源が配置される. この場合, (25)式において

$$\xi_0 = -\xi_1 = \lambda/(4R)$$

と置けば良いので, 像強度分布は

$$I(x) = 1 + a^2 + 2 \cdot a \cdot \cos[\pi x/R] \frac{2 \cdot J_1[\pi d \cdot \sigma \cdot NA/R]}{\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R}$$

となる. コントラスト C は

$$C = \frac{2 \cdot a}{1 + a^2} \frac{2 \cdot J_1[\pi d \cdot \sigma \cdot NA/R]}{\pi \cdot d \cdot \sigma \cdot NA/R} \quad (31)$$

となる. $a = 1$ であれば, すなわち 0 次光と 1 次光の強さが等しければ, 位相シフトのコントラスト (20)式に一

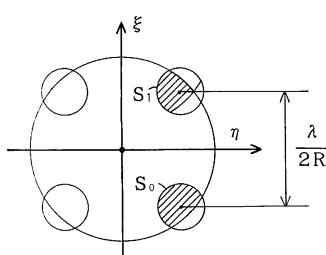


Fig. 11 In the case of SHRINC, positions of 0th order and 1st order diffraction waves are symmetric.

致する. 開口部と遮光部の幅が等しいときには $a = 2/\pi$ であり, a を 1 に近づけるために開口部を小さくすることが考えられる.

線幅が微小となったときのガウス像面でのコントラストを考える. Fig. 11 を参照して, 0次光, および1次回折光のうち, 瞳内の割合が S_0 であり, 0次光と1次光がともに瞳内となる割合が S_1 である. よってコントラストは,

$$C = \frac{2a \cdot S_1}{(1 + a^2) \cdot S_0} \quad (32)$$

となる. ここで, $\lambda/2\sqrt{2}R$ が小光源中心の瞳中心からの距離であり, すなわち, $\lambda/2\sqrt{2}R \cdot NA$ と S_0 との関係が部分的コヒーレント OTF の公式と一致する. また, $\lambda/2\sqrt{2}R \cdot NA$ と S_1 との関係を数値計算してみると, およそ

$$S_1 = 0.18 - \frac{0.82}{\sigma} \left(\frac{\lambda}{2\sqrt{2}R \cdot NA} - 1 \right) \quad (33)$$

となるので, (11)式, (32)式および(33)式より, 必要なコントラストが与えられたときの解像限界が次式のように求まる.

$$\frac{\lambda}{2\sqrt{2}R \cdot NA} = 1 + \frac{0.36a - 0.45C(1 + a^2)}{1.64a - C(1 + a^2)/1.5} \cdot \sigma \quad (34)$$

(31)式と(34)式をともに満足する範囲が, 小光源位置を最適化した場合に所望のコントラストを与える.

3. 数 值 計 算

コントラストをフーリエ結像論による厳密な回折計算で求め, 本報告で導いた公式による結果と比較する.

3.1 位相シフト

コントラスト $C = 0.7$ を満足するような線幅の開口数依存性を考えると, (20)式, (24)式より

$$R > 1.92 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA \quad (35)$$

$$R > \frac{\lambda}{4(1 - 0.48\sigma)NA} \quad (36)$$

となる.

波長 $\lambda = 0.4358 \mu\text{m}$ (g-line) および $0.193 \mu\text{m}$ (ArF エキシマレーザー), デフォーカス $d = 0.75 \mu\text{m}$ としたときの, 厳密な回折計算結果を黒丸および白丸で, (35)式を右上がりの直線で, (36)式を右下がりの直線で Fig. 12 に示す. 本報告で導いた解析的手法で十分に投影光学系の評価ができることがわかる. なお, 厳密な回折計算においてデフォーカス収差は開口数の 2 乗に比例するとして扱った.

(35), (36)式より NA を消去すると

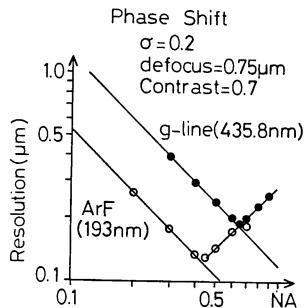


Fig. 12 Relation between numerical aperture (NA) and resolution in the case of phase shift method. Conditions are $\sigma=0.2$, defocus=0.75 μm , contrast=0.7. Solid lines are calculated by analytical method. ● and ○ are calculated strictly by Fourier imaging theory for $\lambda=0.4358 \mu\text{m}$ and 0.193 μm respectively.

$$4R^2 = \frac{1.92\lambda \cdot d \cdot \sigma}{1 - 0.48\sigma} \quad (37)$$

となり、開口数 NA を最適にしたときの解像限界が波長 λ の平方根に比例することがわかる。また、解像限界がデフォーカス d の平方根に比例することもわかる。これらのことは(1)式、(2)式から形式的に NA を消去しても得られるが、そのばあいには明白な意味がないのに対し、(37)式は明確な意味をもつ。また、 σ が小さい方が解像力が良くなることもすぐにわかる。さらに(35)式、(36)式より R を消去すると

$$NA^2 = \frac{\lambda}{7.68(1 - 0.48\sigma) \cdot \sigma \cdot d}$$

となり、コントラスト=0.7において、 σ, d が与えられたときの、最適 NA を求めることができる。最適 NA は波長 λ の平方根に比例することになる。

3.2 従来照明法（円形光源）

Fig. 13 にはデフォーカス $d=0.75 \mu\text{m}$, $\sigma=0.2$, 波長 $\lambda=0.4358 \mu\text{m}$ の場合にコントラストが 0.7 を満足する線幅の開口数依存性を示してある。厳密な回折計算結果を黒丸で、(9)式を満足する範囲についての(8)式の数値解をほぼ直線である水平な実線で、(12)式を右下がりの直線で示してある。この場合(12)式は

$$R > \frac{\lambda}{2(1 + 0.14\sigma)NA} \quad (38)$$

となる。Fig. 13 より、厳密な回折計算と解析的な近似公式とがよく一致していることがわかる。(8)式の解はほぼ水平な直線となっているが、これは(8)式の分母の \cos の項が支配的そのためである。この水平な直線は

$$C = \frac{8/\pi \cdot \cos\{\pi \cdot d \cdot \lambda/(4R^2)\}}{1 + 8/\pi^2 + 8/\pi^2} \quad (39)$$

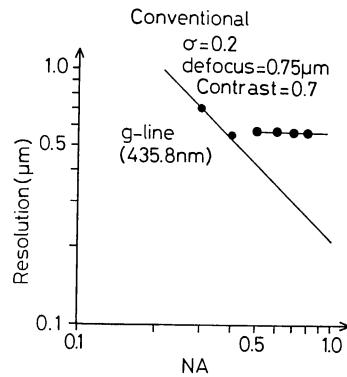


Fig. 13 Relation between numerical aperture (NA) and resolution in the case of conventional illumination. Conditions are $\sigma=0.2$, defocus=0.75 μm , contrast=0.7 and $\lambda=0.4358 \mu\text{m}$. Solid lines are calculated by analytical method. ● are calculated strictly by Fourier imaging theory.

の解を R_0 とすると、およそ

$$R = R_0 \quad (40)$$

で与えられる。 σ と波長が与えられたときの最適な開口数は、(38)式と(39)式の交点と考えられる。この交点の開口数より大きな開口数としても実用解像力はほとんど変わらない。(39)式の \cos の中を考えると、コントラスト C 、デフォーカス d が与えられたときの、最適開口数における解像度 R は、波長 λ の平方根に比例することがわかる。このことと(38)式より、さらに σ を与えたときに最適開口数が波長の平方根に比例することがわかる。

Fig. 14 には、同様に、コントラスト 0.7, $\sigma=0.5$, 波長 $\lambda=0.4358 \mu\text{m}$ および $\lambda=0.193 \mu\text{m}$ の場合を示してある。厳密な回折計算の結果を黒丸および白丸で、(38)式を右下がりの直線で示す。 $\sigma=0.5$ では、1次回折光が瞳内にあり、3次回折光が瞳外にあるのは、特定の NA のみで成立しており、(8)式の解は1点しか求まらず、その点を▲および△で示した。▲および△を通る水平の直線と(38)式の右下がりの直線とで、ほぼ厳密な回折計算の結果を近似できるが、若干それより解像力は良くなっている。結果的には、(38)式で表される直線と、▲および△を通る傾き 1 の直線（点線で示す）に近くなっている。いずれにしても、実用解像度および最適開口数が波長の平方根に比例することがわかる。なお、▲と△とが同一の傾き 1 の直線上にあることは、(5)式と回折光条件より証明できる。

位相シフト法の結果と比較すると、位相シフト法の効果が大きいことがよくわかる。

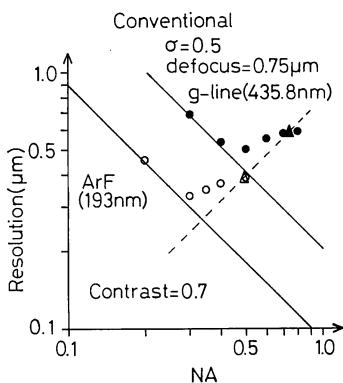


Fig. 14 Relation between numerical aperture (NA) and resolution in the case of conventional illumination. Conditions are $\sigma=0.5$, defocus=0.75 μm and contrast=0.7. Solid lines, \blacktriangle (0.4358 μm) and \triangle (0.193 μm) are calculated by analytical method. ● (0.4358 μm) and ○ (0.193 μm) are calculated strictly by Fourier imaging theory.

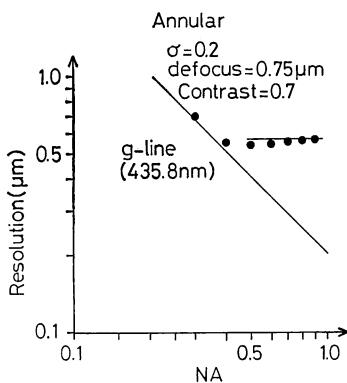


Fig. 15 Relation between numerical aperture (NA) and resolution in the case of annular illumination. Conditions are $\sigma=0.2$, defocus=0.75 μm , contrast=0.7 and $\lambda=0.4358 \mu\text{m}$. Solid lines are calculated by analytical method. ● are calculated strictly by Fourier imaging theory.

3.3 輪帯照明

輪帯照明の計算結果を **Fig. 15** に示す。コントラスト $C=0.7$, デフォーカス $d=0.75 \mu\text{m}$, $\sigma=0.2$, $\lambda=0.4358 \mu\text{m}$ である。厳密な回折計算結果が黒丸で、(9)式を満足する範囲における(15)式の数値解はほぼ横軸に平行な実線で、(17)式は右下がりの直線で示されている。回折計算結果と解析的な近似計算とが良く一致することがわかる。

Fig. 16 には $\sigma=0.5$ の場合を示す。コントラスト $C=0.7$, デフォーカス $d=0.75 \mu\text{m}$, $\lambda=0.4358 \mu\text{m}$ で

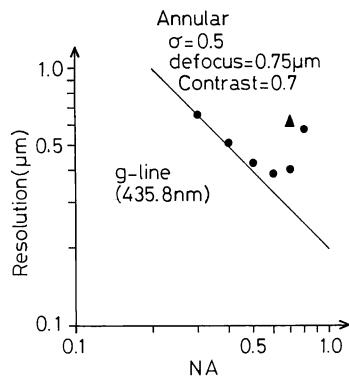


Fig. 16 Relation between numerical aperture (NA) and resolution in the case of annular illumination. Conditions are $\sigma=0.5$, defocus=0.75 μm , contrast=0.7 and $\lambda=0.4358 \mu\text{m}$. Solid lines are calculated by analytical method. ● are calculated strictly by Fourier imaging theory.

ある。厳密な回折計算結果を黒丸で、(17)式を右下がりの直線で示す。(15)式の解として、回折光の条件(9)式を満足するのは特定の NA だけであり、 \blacktriangle で示してある。回折計算結果と解析的な近似計算とがあまりよく一致しない。これは、本報告の方法は光線の開き角が大きくなっているとして近似計算しているが、 $\sigma=0.5$ の輪帯照明では開き角の大きい光線が支配的なので、近似からずれてくると思われる。

3.4 SHRINC 照明法

SHRINC 照明の計算結果を **Fig. 17** に示す。コントラスト $C=0.7$, デフォーカス $d=0.75 \mu\text{m}$, $\sigma=0.2$, $\sigma_0=0.3$, $\lambda=0.4358 \mu\text{m}$ である。厳密な回折計算結果が黒丸で、

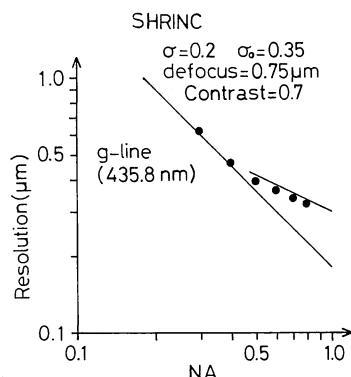


Fig. 17 Relation between numerical aperture (NA) and resolution in the case of SHRINC. Conditions are $\sigma=0.2$, $\sigma_0=0.35$, defocus=0.75 μm , contrast=0.7 and $\lambda=0.4358 \mu\text{m}$. Solid lines are calculated by analytical method. ● are calculated strictly by Fourier imaging theory.

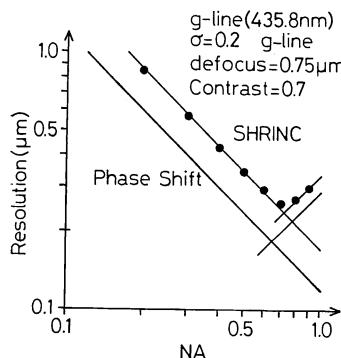


Fig. 18 Relation between numerical aperture (*NA*) and resolution in the case of SHRINC. Positions of 0th order and 1st order diffraction light are symmetry as shown in Fig. 11. Conditions are $\sigma = 0.2$, defocus = $0.75 \mu\text{m}$, contrast = 0.7 and $\lambda = 0.4358 \mu\text{m}$. Solid lines are calculated by analytical method. ● are calculated strictly by Fourier imaging theory. Analytical calculations for phase-shift are also plotted by solid lines.

丸で、(28)式を満足する範囲での(27)式の数値解は傾きの緩い右下がりの直線に近い実線で、(30)式は右下がりの直線で示されている。回折計算結果と解析的な近似計算とが良く一致することがわかる。従来法に比べて解像度が良くなっていることがわかる。さらに本方法を用いて最適な σ, σ_0 を求めることができる。

0次光と1次光とが対称となるようにしたときを考える。(31)式に $C = 0.7$, $a = 2/\pi$ を代入すると,

$$R > 2.235 \cdot d \cdot \sigma \cdot NA \quad (41)$$

が得られ、また、(34)式に $C = 0.7$, $a = 2/\pi$ を代入すると,

$$R > \frac{\lambda}{2\sqrt{2}(1 - 0.55\sigma) \cdot NA} \quad (42)$$

が得られる。コントラスト $C = 0.7$, デフォーカス $d = 0.75 \mu\text{m}$, $\sigma = 0.2$, $\lambda = 0.4358 \mu\text{m}$ の場合の結果を Fig. 18 に示してある。(41) および (42)式が二つの直線で、厳密な回折計算結果が黒丸で示してある。比較のため、同条件での位相シフトの解析的結果 (Fig. 12 と同一) を一緒に示してある。

SHRINC 照明は、位相シフト法に比べて若干解像力が劣ることがわかるが、右上がりの直線のずれは(31)式で説明したように1次回折光が弱いことに起因し、右下がりの直線のずれはさらに *NA* を十分使わないことが

起因している。1次回折光を強くすればできれば、高 *NA* での解像力を上げることができる。位相シフト法に比べ解像力が劣るとはいえ、Fig. 13, Fig. 14 と比べるとわかるように、従来法よりは格段によい解像力が得られ、また、位相シフト法のようにマスクの製造の困難さが避けられるので、実用上大きな期待が持たれる。

4. 結論

2光束干渉縞コントラストの式を応用することにより、投影光学系リソグラフィーの評価をするための解析的方法を導いた。本方法による計算結果は、厳密な回折計算結果と、 $\sigma \cdot NA$ の大きな輪帯照明の場合をのぞいて良く一致した。それゆえ、従来の計算に比べて容易に投影光学系リソグラフィーの評価が行えることがわかった。

投影光学系のパラメーターの関係が解析的に表現されているため、システム評価の見通しがよくなった。本方法の、投影光学系リソグラフィーシステム評価への具体的応用は、いろいろあると思われる。

また、本方法では近似的不十分な場合もあるが、それらの解析的方法の検討は今後の課題である。

文 献

- 1) 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 Devices, **38** (1991) 67-75.
- 2) 鶴田匡夫: 応用光学I (培風館, 1990) pp. 279-292.
- 3) 山本公明, 一岡芳樹, 鈴木達郎: “部分的コヒーレント照明下における Defocus 光学系の結像特性”, 応用物理, **44** (1975) 1266-1277.
- 4) 鶴田匡夫: 応用光学II (培風館, 1990) p. 7.
- 5) 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).
- 6) M. D. Lenvenson, N. S. Viswanathan and R. A. Simpson: "Improving resolution in photolithography with a phase-shifting mask," IEEE Trans. Electron Devices, **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," Proceedings of SPIE's 1992 Symposium on Micro-lithography, Vol. 1674 (San Jose, California, 1992) pp. 741-752).
- 9) M. Born and E. Wolf: 光学の原理 (第2巻) (草川, 横田訳, 東海大学出版会, 1975) p. 601.