

## 研究

## 部分的コヒーレント結像におけるベクトル伝達関数

咩野 靖行

キャノン(株)ナノテク研究所 〒321-32 宇都宮市清原工業団地 20-2

(1995年4月10日受付, 1995年6月21日受理)

## Vector Transfer Functions in Partially Coherent Imaging

Yasuyuki UNNO

Nanotechnology Research Center, Canon Inc., 20-2, Kiyohara-Kogyo-Danchi, Utsunomiya 321-32

(Received April 10, 1995; Accepted June 21, 1995)

Optical transfer characteristics of high NA partially coherent imaging systems are analyzed by introducing a new concept of "vector transfer functions." Based on vector diffraction theory, transmission cross-coefficient (TCC) is defined for each vector component of the electric field in the focal region, and is calculated considering the asymmetry caused by the polarization state of illumination beams. Image formations of one-dimensional periodic patterns, for which TCCs are regarded as optical transfer functions, are also examined. It is found that the TCC obtained for the component parallel to the optical axis, which is neglected in the scalar theory, shows interesting behaviors, and in some cases gives significant influence to image qualities.

## 1. はじめに

部分的コヒーレント照明下の結像については、1950年代から精力的な研究が行われ、基礎的な理論体系はすでに完成されている<sup>1)</sup>。実用面では、光学顕微鏡、LSI回路パターン転写を行う投影露光装置(ステッパー)の照明が部分的コヒーレントとみなせるため、それらの分野の研究には上記の理論が積極的に適用されてきた。

ところで従来の扱いは、電磁波である光を1つの振幅成分で代表させたいわゆる“スカラー回折”近似に基づいているため、照明光の偏光状態が考慮できない、像側の開口数(NA)が大きな光学系に対して誤差が増大するといった問題がある。それに対して、物体空間から像空間に至る光束のエネルギー保存、像形成時の干渉を正確に扱った理論<sup>2,3)</sup>(本論文では、便宜上“ベクトル回折理論”と呼ぶ)を用いれば、より高精度な計算を行うことが可能になる。

実際に、高NAステッパー光学系の評価にベクトル回折理論を適用してみると、周期パターンの結像に顕著な偏光依存が現れることが示される<sup>4)</sup>。照明を直線偏光

と仮定して偏光の向きとパターンの繰返し方向の関係を調べると、両者が垂直の場合に最高の解像度が得られ、平行に近づくに従って像が劣化するという結果になる。

スカラー回折理論では、像の特性を理解するために一般に光学伝達関数(OTF)が用いられるが、部分的コヒーレント照明下では結像が非線形となるため、厳密な意味でのOTFを定義することはできない<sup>5)</sup>。しかし物体を周期パターンに限定すれば、OTFの代りに相互透過係数(TCC)を用いて結像の周波数特性を議論することが可能になる<sup>6,7)</sup>。

ベクトル回折理論による扱いは、従来、光学系の周波数伝達特性に着目した結像の解析は十分には行われていなかった。本研究では、ベクトル回折理論に対して、“部分的コヒーレント結像におけるベクトル伝達関数”という新たな概念を導入する。すなわち、ベクトル回折理論から求まる光学系焦点近傍の電場分布について、直交する電場成分それぞれにTCCを定義する。そしてそのTCCを用いることにより、部分的コヒーレント照明下の周期パターン像の偏光依存性を伝達関数の観点から解析する。

## 2. 理論的基礎

### 2.1 スカラー的扱い

まず比較のため、従来のスカラー回折理論で導入される TCC について説明を行う。振幅透過率  $a(x_0)$  の物体がコヒーレント光で照明されると、投影光学系の像面上には

$$I(x) = \left\{ \int \bar{a}(s-u) P(s) \exp(-i 2\pi s \cdot x) ds \right\}^2 \quad (1)$$

の光強度分布が形成される。ここで  $\bar{a}(s-u)$  は  $a(x_0)$  のフーリエ変換、 $P(s)$  は瞳関数を表し、座標  $s$  は瞳半径が  $NA/\lambda$  ( $\lambda$ : 波長) となるように規格化して定める。また、全体に掛かる重要でない係数は省略している。照明が部分的コヒーレントの場合には、式(1)を光源座標  $u$  に関して積分することにより、光強度分布は

$$I(x) = \int g(u) \left\{ \int \bar{a}(s-u) P(s) \exp(-i 2\pi s \cdot x) ds \right\}^2 du \quad (2)$$

となる。 $g(u)$  は投影光学系の瞳上に形成される光源の像であり、有効光源と呼ばれる。光学系の周波数伝達特性を議論する際には、式(2)はさらに

$$I(x) = \iint \bar{a}(s_1) \bar{a}^*(s_2) T(s_1, s_2) \exp\{-i 2\pi (s_1 - s_2) \cdot x\} ds_1 ds_2 \quad (3)$$

と変形される。ここで  $T(s_1, s_2)$  が TCC と呼ばれる量であり、瞳関数と有効光源を用いて

$$T(s_1, s_2) = \int g(u) P(u+s_1) P^*(u+s_2) du \quad (4)$$

で与えられる。TCC は物体とは独立に定義され、部分的コヒーレント結像における周波数伝達特性を表す。

式(4)で示すように、TCC は 2 つの周波数  $s_1$  と  $s_2$  の組に対して与えられる。そのため、連続スペクトルを有する任意物体の結像には無数の TCC を考える必要があり、像の特性と結び付けるのは困難である。しかし、ステッパー光学系の一般的な評価に用いられる周期パターンに対しては、そのスペクトルは離散的となり、像形成に寄与する 2 つの回折光成分間で与えられる TCC を用いて像の特性を議論することが可能になる<sup>6,7)</sup>。

### 2.2 ベクトルの扱い

ベクトル回折理論に基づく光強度分布の計算に対して、前節と同様な TCC の導入を試みる。

まず最初に、光学系の配置を Fig. 1 として、像点 G 近傍に形成される電場分布を表す式を示す。図中、ベクトル  $t_0, r_0$  はそれぞれ物体面に入射する照明光、物体面から射出する回折光の向き、さらに  $u_0, s_0$  はそれらの像

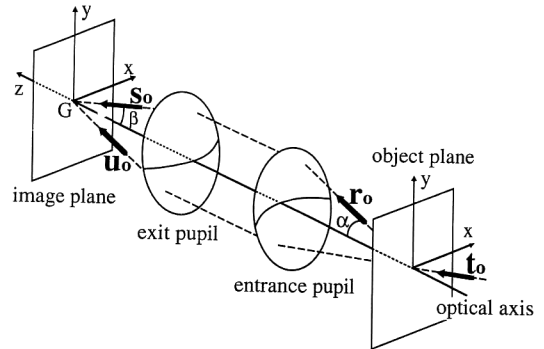


Fig. 1 Coordinate system and optical configurations.

空間での向きを表し、大きさはいずれも  $1/\lambda$  とする。また  $\alpha, \beta$  はそれぞれ  $r_0, s_0$  が光軸となす角度であり、

$$\cos \alpha / \lambda = r_{0z}, \quad \cos \beta / \lambda = s_{0z} \quad (5)$$

の関係が成り立つ。次に、 $t_0, r_0, u_0, s_0$  を光軸と垂直な面に射影した二次元ベクトルを、それぞれ  $t, r, u, s$  で定義する。すなわち  $t = (t_x, t_y)$ ,  $r = (r_x, r_y)$ ,  $u = (u_x, u_y)$ ,  $s = (s_x, s_y)$  とし、さらに  $m$  を結像倍率として Abbe の正弦条件を仮定すると、

$$t = -mu, \quad r = -ms \quad (6)$$

が成立する。そしてそのとき、像点 G 近傍での電場分布は

$$E(x) = \int \sqrt{\frac{\cos \beta}{\cos \alpha}} \bar{b}(r-t) F(s, t) \exp[-i 2\pi (\Phi(s) + s \cdot x)] \frac{ds}{\cos \beta} \quad (7)$$

で与えられることが知られている<sup>2,3)</sup>。ここで  $\Phi(s)$  は波面収差、 $F(s, t)$  は像空間での偏光分布を表す関数であり、全体に掛かる係数は省略してある。 $\bar{b}(r-t)$  は物体からの回折光によって入射瞳上にできる振幅分布を表すが、通常は式(1)と同様フーリエ変換で近似できる。式(7)中の変数は式(5)および式(6)の関係によって結ばれ、積分は光学系の射出側の変数  $s$  に対して  $|s| \leq NA/\lambda$  の範囲で行う。

式(7)中  $\sqrt{\cos \beta / \cos \alpha}$  は、物点から等方的に射出されると仮定した光束が、光学系の入射瞳から射出瞳に伝達される際に満たすべきエネルギー保存の関係から決まる補正項で、積分を射出側で行うことから必要になる。一方  $ds$  に掛かる  $1/\cos \beta$  は、像点から射出瞳(射出側参照球面)に張る立体角に対して行うべき回折積分を、 $ds (= ds_x, ds_y)$  という二次元積分に置き換えるために必要な補正である。

電場を表す式(7)を直交する3成分に分解したものは互いに干渉しないので、コヒーレント照明下の像の強度分布は、

$$|E(x)|^2 = \sum_{\gamma=x,y,z} \{E_{\gamma}(x)\}^2 \quad (8)$$

で与えられる。

なお、像空間での偏光分布  $F(s, t)$  は、式の汎用性を考慮して通常以下の(a)~(c)の手順で求められる<sup>2)</sup>。

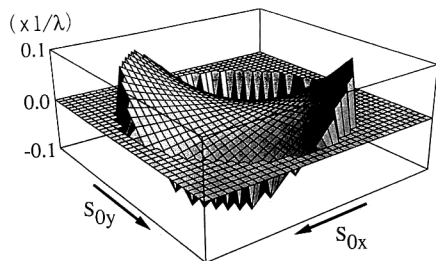
- (a) 照明を直線偏光として、物体面と光軸の交点にその偏光と同様の振動軸を有する電気双極子を仮定する。
- (b) 物体から様々な方向に回折される光束の偏光方向は、電気双極子輻射の式に従って計算する。その際光束の振幅は、回折光の方向によらずに一定とする。
- (c) (b)で求めた物体空間での偏光分布に対して、
  - (c-1) 偏光方向とそれぞれの回折光に対して定義されるメリディオナル面との成す角度は、光学系を通して像空間に至るまで不変に保たれる、
  - (c-2) 偏光方向と回折光の進行方向は直交する、
 として、像空間での偏光分布を計算する。

像側 NA=0.6, 照明光は物体面に垂直入射という条件で、偏光ベクトルの直交3成分を、式(7)の積分が実行される面、すなわち  $(s_{0x}, s_{0y})$  座標上で描いたのが Fig. 2 である。ただし照明は  $y$  方向の直線偏光、結像倍率  $m=0.2$  としている。

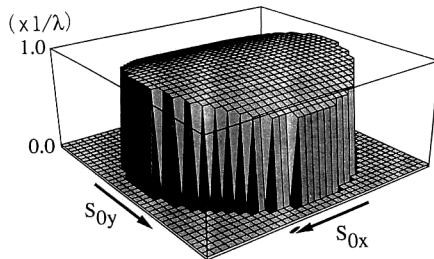
次に式(8)を部分的コヒーレント系へ拡張する。通常は式(8)を照明光の向きに関して積分して、

$$I(x) = \sum_{\gamma=x,y,z} \int f(t) \{E_{\gamma}(x)\}^2 dt \quad (9)$$

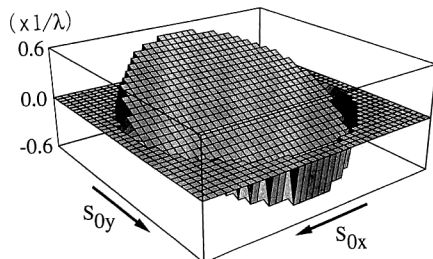
として光強度分布を計算する。式(9)は前述の式(2)に対応するもので、 $f(t)$  は有効光源とみなせる。計算に TCC を導入するには、式(9)の  $x, y, z$  各項に対して、式(2)から式(3)と同様の変形を行う必要がある。式(7)の電場は光の振幅と同等なので、スカラー回折理論から得られる振幅、すなわち式(1)の中括弧の内部と対応づけることができる。そして、もし  $\sqrt{\cos \beta / \cos \alpha} \times F(s, t) \exp\{-i 2\pi \Phi(s)\} / \cos \beta$  の部分を瞳関数と考えることができれば、上述の変形が可能なのがある。ここで  $\cos \alpha, \cos \beta, \Phi(s)$  はいずれも瞳座標  $s$  のみの関数であるが、 $F(s, t)$  は照明光の向き  $t$  にも依存している。そこで実際の光学系で  $t$  の存在範囲を調べてみる。像側 NA=0.6,  $m=0.2$ , コヒーレンス度  $\sigma=0.6$  の代表的なステッパー光学系では、物体側 NA=0.12, その



(a) x-component



(b) y-component



(c) z-component

Fig. 2 Polarization distribution in the image space calculated for the illumination linearly polarized in  $y$ -direction, where (a), (b), and (c) represent  $x$ -,  $y$ -, and  $z$ -component, respectively.

うち照明光の向きの範囲に対応する NA は 0.072 となる。通常このような低 NA 領域では、光束の開き角をゼロとする近似が精度良く成り立ち、 $t$  を  $t=0$  で代表させても問題はない。実際に前述の(a)~(c)の方法で像空間の偏光分布を計算する際に、NA=0.072 の範囲で  $t$  を変化させても結果はほとんど変わらないことが確かめられる。したがって、 $F(s, t)$  を  $F(s, 0)$  で代表させて改めて  $F(s)$  と書き直し、

$$P(s) = \sqrt{\frac{1}{\cos \alpha \cos \beta}} F(s) \exp\{-i 2\pi \Phi(s)\} \quad (10)$$

を新たな瞳関数として定義する。ただし  $P(s)$  は  $x, y, z$  のベクトル成分を有する。式(7)および式(9)には、投影光学系の入射側の変数  $t, r$  と射出側の変数  $u, s$  が混在しているので、式(6)の関係によりすべて射出側の変

数で表し、

$$\tilde{b}(\mathbf{r}-\mathbf{t}) = \tilde{b}(-m\mathbf{s} + m\mathbf{u}) \equiv \tilde{a}(\mathbf{s}-\mathbf{u}) \quad (11)$$

$$f(\mathbf{t}) = f(-m\mathbf{u}) \equiv g(\mathbf{u}) \quad (12)$$

とおけば、ベクトル回折理論から得られる光強度分布は最終的に

$$I(\mathbf{x}) = \sum_{\gamma=x,y,z} \iint \tilde{a}(\mathbf{s}_1) \tilde{a}^*(\mathbf{s}_2) T_\gamma(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2) \exp\{-i2\pi(\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_2) \cdot \mathbf{x}\} d\mathbf{s}_1 d\mathbf{s}_2 \quad (13)$$

ただし

$$T_\gamma(\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2) = \int g(\mathbf{u}) P_\gamma(\mathbf{u} + \mathbf{s}_1) P_\gamma^*(\mathbf{u} + \mathbf{s}_2) d\mathbf{u} \quad (14)$$

と表せる。これで式の形の上では式(3)、(4)と同じものが得られた。ただし TCC は、電場の  $x, y, z$  成分それぞれについて考える必要がある。

### 3. TCC の計算

瞳関数式(10)の各成分は、光学系が無収差であっても光軸に関して非対称となり、そこから計算される TCC は周波数軸の方向によって異なった値をもつ。そのため、偏光に対するパターンの向きによって結像特性に差異が現れることになる。ここでは、非回折光と回折光の干渉の度合いを表す  $T_\gamma(\mathbf{0}, \mathbf{f})$ 、回折光間の干渉の度合いを表す  $T_\gamma(-\mathbf{f}, \mathbf{f})$  を計算する。後述するように、単純な周期パターンの像強度分布は、解像限界近傍でこれらの TCC を係数にもつ有限個の項の和の形に展開できるからである。また、 $\mathbf{f} = \mathbf{f}_x (=f, 0)$  は  $x$  方向、 $\mathbf{f} = \mathbf{f}_y (=0, f)$  は  $y$  方向の繰返しパターンに対応した周波数座標を表すとする。計算は Fig. 3 に示すように、 $\mathbf{f} = \mathbf{f}_x$  に対しては  $u_x$  軸上で、 $\mathbf{f} = \mathbf{f}_y$  に対しては  $u_y$  軸上で、瞳関数を有効光源に対して相対的に移動させ、重なった部分(図中斜線部分)でその積を積分すればよい。

照明を  $y$  方向の直線偏光、 $\sigma=0.4$  とし、 $NA/\lambda$  で規格化した周波数に対して  $T_\gamma$  の NA 依存を計算した結果を Fig. 4 および Fig. 5 に示す。ただし  $m=0.2$ 、 $\Phi(\mathbf{s})$

$=0$  とし、それぞれの値は  $\sum T_\gamma(\mathbf{0}, \mathbf{0})$  ( $\gamma=x, y, z$ ) で規格化してある。

照明光の偏光を  $y$  方向としているので、TCC は  $T_y$  が中心となる。NA $\rightarrow 0$ の極限で  $T_y$  は従来のスカラー回折理論から得られる形状<sup>9)</sup>に一致するが、NAの増加とともに周波数軸の方向による違いが大きくなっていく。なお、 $T_x$  は計算に用いる瞳関数の値自体が非常に小さく、任意の  $\mathbf{f}$  について

$$T_x(\mathbf{0}, \mathbf{f}) = T_x(-\mathbf{f}, \mathbf{f}) = 0 \quad (15)$$

とみなせるので、Fig. 4 および Fig. 5 では省略してある。また電場の光軸方向の成分に起因する  $T_z$  は、 $\mathbf{f} = \mathbf{f}_x$  と  $\mathbf{f} = \mathbf{f}_y$  で符号も含めて大きく異なった振舞いを示すことから、結像の偏光特性に対して中心的な影響を与

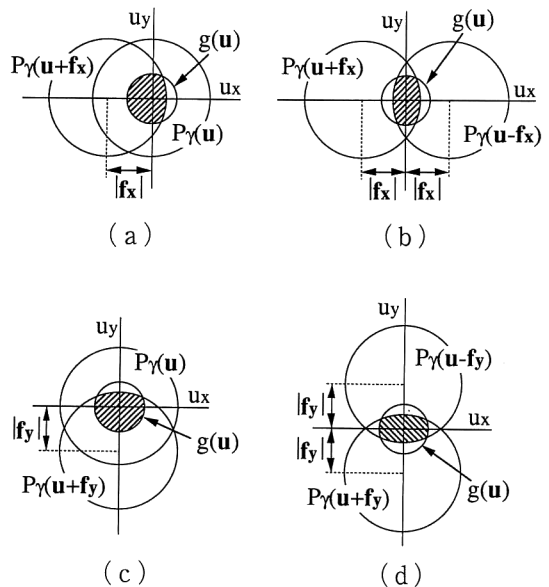


Fig. 3 Integration areas (shown by the hatching) for the calculation of (a)  $T_y(\mathbf{0}, \mathbf{f}_x)$ , (b)  $T_y(-\mathbf{f}_x, \mathbf{f}_x)$ , (c)  $T_y(\mathbf{0}, \mathbf{f}_y)$ , and (d)  $T_y(-\mathbf{f}_y, \mathbf{f}_y)$ .

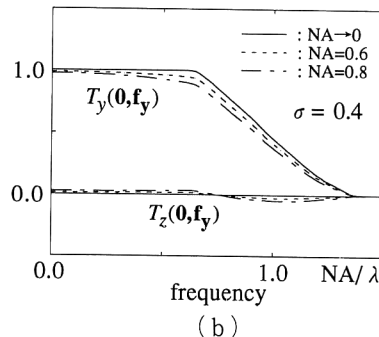
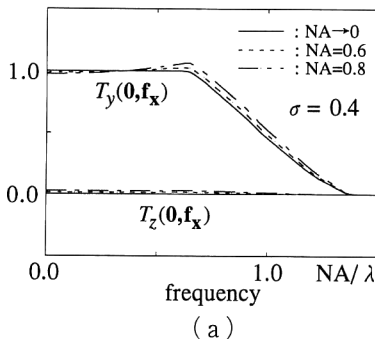


Fig. 4 NA dependence of (a)  $T_\gamma(\mathbf{0}, \mathbf{f}_x)$  and (b)  $T_\gamma(\mathbf{0}, \mathbf{f}_y)$  ( $\gamma=y, z$ ).

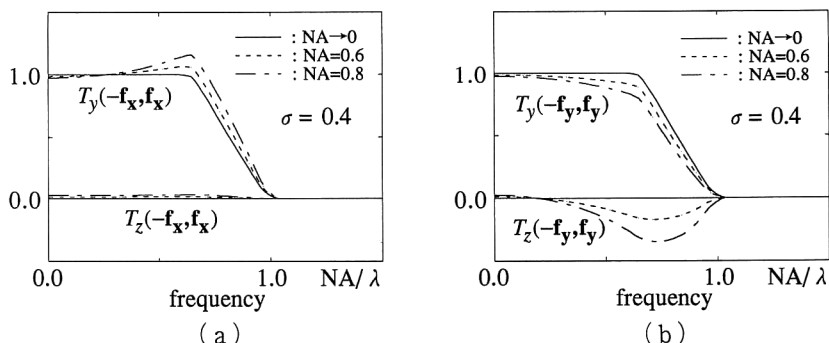


Fig. 5 NA dependence of (a)  $T_\gamma(-f_x, f_x)$  and (b)  $T_\gamma(-f_y, f_y)$  ( $\gamma=y, z$ ).

えていることが予想される。NA→0の極限で  $T_z$  はスカラー回折理論から得られる値、すなわちゼロに収束する。ただしNA≠0においても、 $T_z(-f_y, f_y)$  以外は  $T_y$  に比較して十分に小さいため、この後の検討では

$$\begin{aligned} T_z(0, f_x) &= T_z(-f_x, f_x) = 0 \\ T_z(0, f_y) &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

とする。

#### 4. 像の計算

ここでは、上で計算した TCC を実際の光学像に結び付けて議論する。その際、像に対する偏光の効き方が大きく異なる“3光束干渉”による結像と“2光束干渉”による結像に分けて考える。

##### 4.1 3光束干渉による結像

周期  $\Delta$  で1:1の開口と遮光部が無限に繰り返すパターン (Fig. 6) の像を計算する。周期  $\Delta$  は、 $T_z(-f_y, f_y)$  の影響が顕著に現れる値として、像の基本周波数が  $f = 1/(m\Delta) = 0.76(\text{NA}/\lambda)$  となるように定める (Fig. 5 参照)。

まず、像側 NA=0.6,  $m=0.2$ ,  $\sigma=0.4$  の条件で式 (13) より計算した結果を Fig. 7 に示す。照明を  $y$  方向の直線偏光とし、パターンの繰返し方向として  $x, y$  の2方向を比較することで、結像の偏光依存性を示している。図はそれぞれ2周期分の強度分布であり、波線は電場の  $z$  成分から形成される光強度を表す。

この場合には、パターンからの回折光のうち高次の成分は光学系の瞳に入射できないので、像は0次および±1次の3つの成分で形成される、すなわち、3光束干渉による結像となっている。そのためパターンのフーリエ変換は、 $\delta$  をデルタ関数として

$$\tilde{a}(\mathbf{s}) = \left[ \frac{1}{2}\delta(s_x) + \frac{1}{\pi}\{\delta(s_x+f) + \delta(s_x-f)\} \right] \cdot \delta(s_y) \quad (17)$$

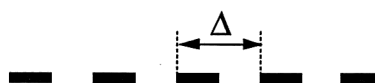


Fig. 6 Mask pattern used for 3-beam imaging calculation.

と近似できる。ただし式 (17) は  $x$  方向の周期パターンに対応し、 $y$  方向パターンに対しては  $s_x$  と  $s_y$  を入れ替える。それらを式 (13) に代入し、 $x$  方向、 $y$  方向パターンの像をそれぞれ  $I(x), I(y)$  とすると、

$$\begin{aligned} I(x) &= \sum_{\gamma=x,y,z} \left\{ \frac{1}{4} T_\gamma(0, 0) + \frac{2}{\pi^2} T_\gamma(f_x, f_x) \right\} \\ &\quad + \frac{2}{\pi} T_y(0, f_x) \cos(2\pi f_x) \\ &\quad + \frac{2}{\pi^2} T_y(-f_x, f_x) \cos(4\pi f_x) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} I(y) &= \sum_{\gamma=x,y,z} \left\{ \frac{1}{4} T_\gamma(0, 0) + \frac{2}{\pi^2} T_\gamma(f_y, f_y) \right\} \\ &\quad + \frac{2}{\pi} T_y(0, f_y) \cos(2\pi f_y) \\ &\quad + \frac{2}{\pi^2} \left\{ T_y(-f_y, f_y) + T_z(-f_y, f_y) \right\} \cos(4\pi f_y) \end{aligned} \quad (19)$$

となることがわかる。ただしここで、式 (15), (16) とともに、今回の計算条件で、有効光源および瞳関数の対称/反対称性から

$$\begin{aligned} T_\gamma(f, f) &= T_\gamma(-f, -f) \\ T_\gamma(0, f) &= T_\gamma(0, -f) = T_\gamma(f, 0) = T_\gamma(-f, 0) \\ T_\gamma(-f, f) &= T_\gamma(f, -f) \end{aligned} \quad (20)$$

の関係が成り立つことを用いている。

Fig. 7 に示した光強度分布は、式 (18), (19) で  $f = 0.76$  とすることにより高精度に再現される。そしてそれらは、TCC を係数とする有限項の和の形になっているので、Fig. 4, 5 に示した TCC の計算結果に対応付け

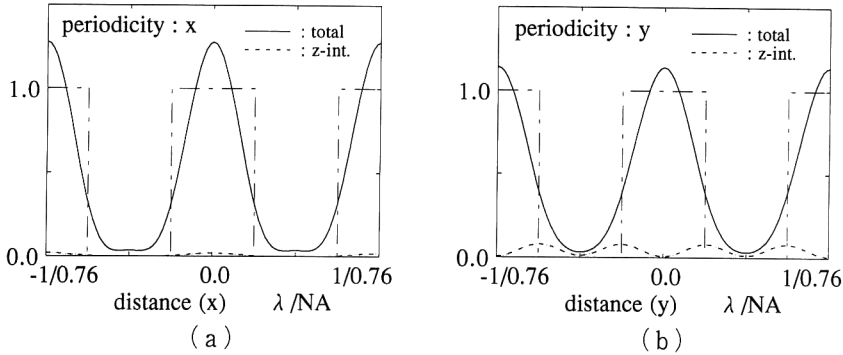


Fig. 7 Images of the pattern in Fig. 6 with the illumination linearly polarized in  $y$ -direction. In (a), the pattern has the periodicity in  $x$ -direction while it is periodic in  $y$ -direction in (b).

て像特性の考察を行うことが可能になる。

式(18), (19)において, 第1項の  $\Sigma$  は空間的な位置によって値が変化しない直流成分, 第2項はパターン周期の  $m$  倍の周期を有する像の基本周波数成分, 第3項はその半分の周期を有する2倍高調波成分を表す。直流成分に対する基本周波数成分, あるいは高調波成分の比を伝達関数として定義することもあるが<sup>8)</sup>, それとてインコヒーレント結像における OTF のような一義的な評価尺度とはならないので, ここでは, 式(18), (19)中の対応する TCC 成分を直接比較することにする。

式(18)と式(19)を比べると, 式(19)には2倍高調波成分として電場  $z$  成分の影響が含まれているのが特徴である。 $f=0.76$  の周波数に対して  $T_z(-f_y, f_y)$  が負の値となり,  $I(y)$  では電場  $z$  成分による2倍高調波像が本来の像に対して明暗が反転した位置 (Fig. 7(b)の波線に対応) に現れる。そしてその結果, 像の下部が太くなり解像度を劣化させる。 $I(x)$  ではこの項がゼロとなるため,  $T_z(-f_y, f_y)$  の存在が, 3光束干渉による結像の偏光依存性の大きな原因となっていることがわかる。

電場  $y$  成分の影響については,  $T_y(0, f_y) < T_y(0, f_x)$  のため  $I(y)$  の特性を相対的に劣化させる原因となるが, 像の直流成分もパターンの向きによって変動するため一概には結論できない。ただし, 結像の偏光特性に与える影響が電場の  $z$  成分より小さいのは確かである。

4.2 2光束干渉による結像

次に, 渋谷/レベンソン型として知られる位相シフト法<sup>9,10)</sup>を用いた際の像の計算を行う。そのパターンでは, Fig. 8に示すように開口部の1つおきに透過光の位相を反転させる位相シフターが入っているのが特徴である。4.1節と同様の系に対して, 位相も含めた周期  $\Delta$  が  $f=1/(m\Delta)=0.76(NA/\lambda)$  を満たす条件での結像を考える。

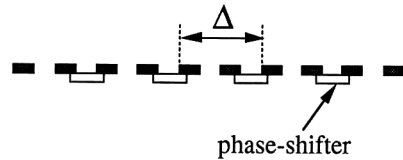


Fig. 8 Mask pattern used for 2-beam imaging calculation.

まず, 式(13)によって計算した像を Fig. 9に示す。位相シフト法では, パターン周期の  $m/2$  倍, すなわち通常の方法に比べて半分の周期をもつ像が形成され, ステッパーにおける解像度向上技術として注目されている。この場合には結像の偏光依存性がより顕著に現れ,  $y$  方向の繰返しパターンに対して像特性が大きく劣化している。

ここで4.1節と同様, 式(13)を和の形に展開する。パターンからの高次の回折光成分は無視できるので,  $x$  方向に繰り返すパターンのフーリエ変換は

$$\tilde{a}(\mathbf{s}) = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \{ \delta(s_x + f) + \delta(s_x - f) \} \cdot \delta(s_y) \quad (21)$$

と表せる。一方  $y$  方向のパターンについては, 式(21)で  $s_x$  と  $s_y$  を入れ替えればよい。式(21)を式(17)と比較すると0次の回折光成分が消滅しており, 像は  $\pm 1$  次の2つの回折光成分から形成される, すなわち2光束干渉による結像となっていることがわかる。フーリエ変換の結果を式(13)に代入することにより,  $x$  方向,  $y$  方向の繰返しパターンの像  $I(x), I(y)$  は, それぞれ

$$I(x) = \frac{4}{\pi^2} \sum_{\gamma=x,y,z} T_\gamma(\mathbf{f}_x, \mathbf{f}_x) + \frac{4}{\pi^2} T_y(-\mathbf{f}_x, \mathbf{f}_x) \cos(4\pi f x) \quad (22)$$

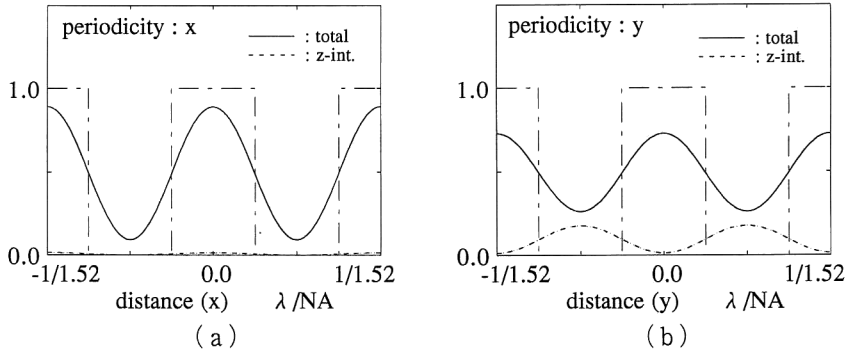


Fig. 9 Images of the pattern in Fig. 8 with the illumination linearly polarized in  $y$ -direction. In (a), the pattern has the periodicity in  $x$ -direction while it is periodic in  $y$ -direction in (b). Note that the scale of distance is half of that of Fig. 7.

$$I(y) = \frac{4}{\pi^2} \sum_{\gamma=x,y,z} T_{\gamma}(f_y, f_y) + \frac{4}{\pi^2} \{T_y(-f_y, f_y) + T_z(-f_y, f_y)\} \cos(4\pi f_y) \quad (23)$$

と計算される。ただしここでも、式(16)、(20)の關係を用いている。式(22)、(23)で $f=0.76$ とすることにより、Fig. 9の光強度分布とTCCの計算結果を結び付けることが可能になる。

式(22)、(23)それぞれにおいて、第1項の $\sum$ は直流成分、第2項は像の基本周波数成分を表す。この場合には $T_y(0, f)$ の項は存在しないので、 $x$ 方向パターンに対しては $T_y(-f_x, f_x)$ が、 $y$ 方向パターンに対しては $T_y(-f_y, f_y)$ および $T_z(-f_y, f_y)$ が像の特性を決定する。

$I(y)$ を表す式(23)において、 $T_z(-f_y, f_y) < 0$ であるために $\cos(4\pi f_y)$ の振幅が減少し、結果的に像の特性を著しく劣化させていることがわかる。また言い方を換えれば、電場の $z$ 成分による結像は負の伝達関数をもつので、パターンに対する像の明暗が反転し、像全体のコントラストを大きく低下させる、となる。一方 $I(x)$ では、対応する項はゼロとなっている。

以上をまとめると、2光束干渉による結像においては $T_y(-f, f)$ によって像の基本周波数成分が形成され、その際 $T_z(-f, f)$ の振舞いがパターンの繰返し方向によって大きく異なることが、像に顕著な偏光依存性が現れることの原因になっているといえる。

## 5. ま と め

ベクトル回折理論に基づいた結像式に従来の部分的コヒーレント結像理論の考え方を適用し、“部分的コヒーレント結像におけるベクトル伝達関数”(電場の成分ご

とのTCC)という新たな概念を導入した。そして、そこで定義されたTCCを用いて、周期パターンの結像における偏光依存性を解析した。結果として、電場の光軸方向の振動成分から決まる $T_z(-f, f)$ がパターンの向きと照明光の偏光の關係で大きく変動し、結像に偏光依存性が現れる大きな原因となっていることがわかった。

また、ここで導入したベクトル伝達関数の概念は、ステッパー光学系に限らず、高NA光学系の一般的な解析に有効であると考えられる。

## 文 献

- 1) M. Born and E. Wolf: 光学の原理 (東海大学出版会, 1975) 第X章.
- 2) B. Richards and E. Wolf: "Electromagnetic diffraction in optical systems II. Structure of the image field in an aplanatic system," Proc. R. Soc. London A, **253** (1959) 358-379.
- 3) M. S. Yeung: "Modeling high numerical aperture optical lithography," Proc. SPIE, **922**, Optical/Laser Microlithography (1988) 149-164.
- 4) Y. Unno: "Polarization effect of illumination light," Proc. SPIE, **1927**, Optical/Laser Microlithography VI (1993) 879-891.
- 5) R. E. Swing and J. R. Glay: "Ambiguity of the transfer function with partially coherent illumination," J. Opt. Soc. Am., **57** (1967) 1180-1189.
- 6) 山本公明: "部分的コヒーレント照明下の結像(1)", 光学, **15** (1986) 64-71.
- 7) 田辺容由: "ステッパー光学系における超解像技術の比較", 光学, **21** (1992) 415-423.
- 8) R. J. Becherer and G. B. Parrent, Jr.: "Nonlinearity in optical imaging systems," J. Opt. Soc. Am., **57** (1967) 1479-1486.
- 9) 渋谷真人: "透過照明用被投影原板", 特公昭 62-50811.
- 10) M. D. Levenson, 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.