

研究

回転非対称な誤差に対する同心円集光 グレーティングカプラーの収差解析

西脇 青児

松下電器産業(株)デバイス工法開発研究所 〒570 守口市八雲中町 3-15

(1991年2月15日受付, 1991年4月4日受理)

Analysis of Aberrations Caused by Rotatorily Asymmetric Errors in Concentric Focusing Grating Coupler

Seiji NISHIWAKI

Device Process Technology Research Laboratory,
Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.,
3-15, Yakumonakamachi, Moriguchi 570

(Received February 15, 1991; Accepted April 4, 1991)

This is to report on an aberration characteristics study made on the previously proposed concentric focusing grating coupler (CFG C) by employing general expressions of error factors such as the distortion of grating pattern, inhomogeneity of effective index, and the eccentricity between CGC and CFG C. The relationship between errors and aberration of radiated light from CFG C, and the effects of rotatorily asymmetric errors on the convergence characteristics of CFG C are analyzed thus, and the aberration functions are derived for several typical error cases, and the respective error margins are estimated based on these results.

1. はじめに

近年著者らは同心円形状グレーティングを有するグレーティングカプラー CFG C を提案し^{1,2)}, 波長誤差や回転対称な等価屈折率誤差に対する収差特性を明らかにしている³⁾. しかしグレーティングや等価屈折率の誤差は一般に回転非対称な形で存在し, CGC, CFG C 間の偏芯も回転非対称な誤差である. 本論ではこれらの回転非対称な誤差が CFG C の集光特性に与える影響を解析し, 誤差の許容値を明らかにする.

2. 放射光の波面収差

CFG C の伝搬ベクトルダイヤグラムを Fig. 1 に示す. CFG C は直交座標 (x, y, z) における xy 平面 (すなわち極座標 (r, ϕ) : $x = r \cos \phi$, $y = r \sin \phi$) 上にあり, その中心は原点 O に一致する. 導波光の涌き出入口 (すなわち CGC の中心) は (x_c, y_c) に偏心し, CGC,

CFG C は同一導波層上に形成されているものとする.

光の波数を $\kappa (=2\pi/\lambda, \lambda: \text{波長})$, 導波光, 放射光の Eikonal を ψ , Ψ とすると, それぞれの伝播ベクトルが $-\kappa \operatorname{grad} \psi$, $-\kappa \operatorname{grad} \Psi$ で表され, 格子ベクトルを \mathbf{K} として CFG C 上 ($z=0$) で次式が成り立つ.

$$\operatorname{grad} \Psi - (\mathbf{n} \cdot \operatorname{grad} \Psi) \mathbf{n} = \operatorname{grad} \psi - q \mathbf{K} / \kappa \quad (1)$$

ただし \mathbf{n} は単位法線ベクトル ($\mathbf{n}=(0, 0, 1)$) であり, 式(1)左辺は $\operatorname{grad} \Psi$ の xy 平面への投影ベクトルである. また q は結合次数であり, 2 ピーム結合の場合には $q=-1$ である (以下 $q=-1$ とする).

導波層の等価屈折率を N とすると, Eikonal equation により次式が成り立つ⁴⁾.

$$|\operatorname{grad} \psi| = N \quad (2)$$

N , \mathbf{K} は $a_{m,n}$, $b_{m,n}$, $c_{m,n}$ を誤差係数として, 一般に次の分布で表される (2 变数の Taylor 展開).

$$N = N_0 \left(1 + \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n a_{m,n} x^{n-m} y^m \right) \quad (3)$$

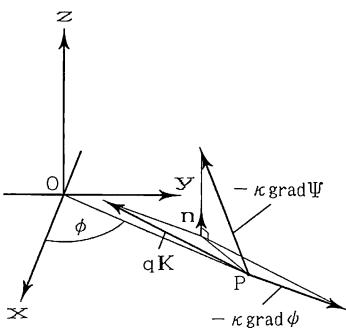


Fig. 1 Propagation vector diagram of CFGC.

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_0 + \kappa \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n (b_{m,n} x^{n-m} y^m, c_{m,n} x^{n-m} y^m, 0) \quad (4)$$

ただし N_0 , \mathbf{K}_0 は N , \mathbf{K} の設計値であり, N_0 は一定値, \mathbf{K}_0 は動径方向に chirping され焦点距離を f として次式を満たす (CFGCA の集光条件³⁾.

$$\mathbf{K}_0 = \kappa \{N_0 + r/(f^2 + r^2)^{1/2}\} (\cos \phi, \sin \phi, 0) \quad (5)$$

ψ , ϕ が連続な 2 次偏導関数を持つときは $(\psi - \phi)_{xy} = (\psi - \phi)_{yz}$ であるから, 式(1), (4)より $0 \leq m \leq n-1$, $n \geq 1$ として次式が成り立つ.

$$c_{m,n} = b_{m+1,n}(m+1)/(n-m) \quad (6)$$

したがって, Eikonal equation $|\operatorname{grad} \psi| = 1$ を考慮し, 式(1), (4), (5), (6)より次式が得られる.

$$\begin{aligned} \psi - \phi &= N_0 r + \{(f - z)^2 + r^2\}^{1/2} \\ &+ \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \sum_{m=0}^n b_{m,n} x^{n-m+1} y^m / (n-m+1) \right. \\ &\quad \left. + c_{n,n} y^{n+1} / (n+1) \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

係数 $a_{m,n}$ が十分小さく ($|a_{m,n} x^{n-m} y^m| \ll 1$), CGC の偏心量 x_c , y_c も CFGCA の大きさに比べ十分小さいとすると, 式(2), (3)より ψ が次式に近似できる.

$$\begin{aligned} \psi - \phi &= \{r - x_c \cos \phi - y_c \sin \phi - \delta(\phi)\} \\ &+ N_0 \left\{ 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n a_{m,n} x^{n-m} y^m / (n+1) \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

上式右辺前半は点 (x_c, y_c) と点 $(r \cos \phi, r \sin \phi)$ との距離を近似して, 後半 (N_0 以降) は線積分で求められており, δ は涌き出し口における光路で, CGC による光入力が回転対称であればゼロ, 非対称であれば方位 ϕ に依存する値をとる (言いかえれば非対称入力の場合, 涌き出し口は点ではなく極座標方程式 $r = \delta(\phi)$ を満たす閉曲線になる). 以下の議論では $\delta(\phi) = 0$ とする. したがって, 式(7)より CFGCA 上 ($z=0$) での放射光

Eikonal ψ が次式に近似できる.

$$\begin{aligned} \psi(x, y, 0) &= (f^2 + r^2)^{1/2} + N_0(x_c \cos \phi + y_c \sin \phi) \\ &+ \sum_{n=0}^{\infty} \left[\sum_{m=0}^n \{b_{m,n} x^{n-m+1} y^m / (n-m+1) \right. \\ &- r N_0 a_{m,n} x^{n-m} y^m / (n+1) \\ &\quad \left. + c_{n,n} y^{n+1} / (n+1)\} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

光軸 (z 軸) と放射光線とのなす角 (開口角) を θ とすると, 焦点から光軸の正方向 (CFGCA から離れる方向) に x_R , x 軸方向に x_R , y 軸方向に y_R だけ移動した点 R を中心とする参照球面に対する放射光の波面収差 ϕ は次式で表される⁵⁾.

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= -\psi(x, y, 0) + f/\cos \theta + z_R \cos \theta \\ &- x_R \cos \phi \sin \theta - y_R \sin \phi \sin \theta \end{aligned} \quad (10)$$

近似的に $\cos \theta = f/(f^2 + x^2 + y^2)^{1/2}$ であるので, 式(9), (10)から次式が得られる.

$$\begin{aligned} \phi(x, y) &= z_R \cos \theta - x_R \cos \phi \sin \theta - y_R \sin \phi \sin \theta \\ &- N_0(x_c \cos \phi + y_c \sin \phi) \\ &- \sum_{n=0}^{\infty} (f \tan \theta)^{n+1} \\ &\cdot \left[\sum_{m=0}^n \{b_{m,n} \tan^m \phi \cos^{n+1} \phi / (n-m+1) \right. \\ &- N_0 a_{m,n} \tan^m \phi \cos^n \phi / (n+1) \} \\ &\quad \left. + c_{n,n} \sin^{n+1} \phi / (n+1)\} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

3. 波面収差の標準偏差と計算例

CFGCA を焦点から見て角 α から β の間の輪帶開口とし, 開口面での光振幅分布を $v(r, \phi)$ として, 波面収差 ϕ の標準偏差 ϕ_{SD} を次式で定義する.

$$\phi_{SD}^2 = \frac{\int_0^{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} v \phi^2 \tan \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} v \tan \theta d\theta d\phi} - \left[\frac{\int_0^{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} v \phi \tan \theta d\theta d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} v \tan \theta d\theta d\phi} \right]^2 \quad (12)$$

上式は従来の定義^{5,6)}を拡張するもので, 開口面上での光分布に対する限定がなく (従来では参照球面上で一様強度, すなわち $v(r, \phi) = \cos^2 \theta$ に限定されていた), 従来と同様にして点 R における回折像の光強度が次式で表される.

$$I(x_R, y_R, z_R) = \left[\frac{f}{\lambda} \int_0^{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} v \tan \theta d\theta d\phi \right]^2 \cdot (1 - \kappa^2 \phi_{SD}^2) \quad (13)$$

すなわち、放射光の最良像点位置は波面収差 ϕ の標準偏差 ϕ_{SD} を最小にする x_R, y_R, z_R の値で決まり、そのときの Strehl 強度は無収差 ($\phi_{SD}=0$) に比べ $(1 - \kappa^2 \phi_{SD}^2)$ 倍の大きさとなる。

以下6つの代表的な誤差形態に分類し、それぞれの標準偏差 ϕ_{SD} および $\phi_{SD} \leq \lambda/14$ の条件を計算してみる。ただし以下の記述で開口面上での光分布は $v(r, \phi) = \cos^n \theta$ であり、 I_n, J_n は次式で定義されている（いずれも解析的な積分値である）。

$$I_n = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{\sin \theta}{\cos^n \theta} d\theta \quad (14)$$

$$J_n = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{\cos^n \theta} d\theta \quad (15)$$

3.1 $a_{0,0}$ のみ $\neq 0$ の場合

$x_C = y_C = 0$ かつ $a_{0,0}$ 以外の誤差係数が全てゼロの場合であり、等価屈折率のオフセット誤差に相当する。この誤差に対する収差特性はすでに著者により明らかにされているが（後述の s_1, h_1 はそれぞれ既論文³⁾ の K_2, H_N に対応）、他との比較もあるのであらためて説明しておく。式(11)より ϕ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \phi &= z_R \cos \theta - x_R \cos \phi \sin \theta - y_R \sin \phi \sin \theta \\ &+ f N_0 a_{0,0} \tan \theta \end{aligned} \quad (16)$$

したがって標準偏差 ϕ_{SD} が次式で表される。

$$\begin{aligned} \phi_{SD}^2 &= (z_R - f N_0 a_{0,0} s_1)^2 (I_{1-n} I_{-1-n} - I_{-n}^2) / I_{1-n}^2 \\ &+ (x_R^2 + y_R^2) (I_{1-n} - I_{-1-n}) / 2 I_{1-n} \\ &+ f^2 N_0^2 a_{0,0}^2 h_1 \end{aligned} \quad (17)$$

ただし、

$$s_1 = \frac{(I_{-n}(J_{2-n} - J_{-n}) - I_{1-n}(J_{1-n} - J_{-1-n}))}{(I_{1-n} I_{-1-n} - I_{-n}^2)} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} h_1 &= (I_{3-n} - I_{1-n}) / I_{1-n} - (J_{2-n} - J_{-n})^2 / I_{1-n}^2 \\ &- s_1^2 (I_{1-n} I_{-1-n} - I_{-n}^2) / I_{1-n}^2 \end{aligned} \quad (19)$$

したがって $z_R = f N_0 a_{0,0} s_1$, $x_R = y_R = 0$ のとき ϕ_{SD}^2 は最小 ($f^2 N_0^2 a_{0,0}^2 h_1$) となり、 $\phi_{SD} \leq \lambda/14$ の条件は次式で表される。

$$|a_{0,0}| \leq \lambda/14 f N_0 h_1^{1/2} \quad (20)$$

$S = \pi(\tan^2 \beta - \tan^2 \alpha)$ をパラメーターにして、 $\sin \alpha$ に対する s_1, h_1 の特性曲線（ただし $n=2$ ）をそれぞれ

Fig. 2, 3 に示す。Fig. 3 曲線(c)より $\sin \alpha = 0.46$ で $h_1 = 4.76 \times 10^{-7}$ であるから、 $f = 2 \text{ mm}$, $\lambda = 780 \text{ nm}$ として $|a_{0,0}| \leq 2.4 \times 10^{-2}$ の誤差が許容できる。

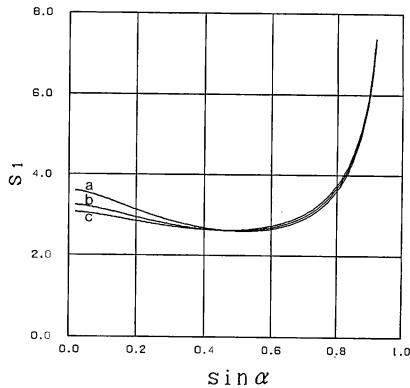


Fig. 2 Characteristic curves of displacement factor s_1 vs. aperture shape factor $\sin \alpha$: $n=2$;
(a) $S=1.0$, (b) $S=1.5$, (c) $S=2.0$.

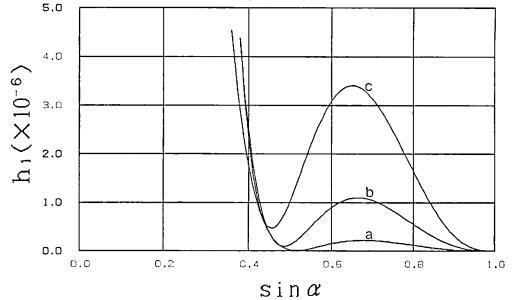


Fig. 3 Characteristic curves of degrading factor h_1 vs. aperture shape factor $\sin \alpha$: $n=2$;
(a) $S=1.0$, (b) $S=1.5$, (c) $S=2.0$.

3.2 $a_{0,1}$ のみ $\neq 0$ の場合

$x_C = y_C = 0$ かつ $a_{0,1}$ 以外の誤差係数が全てゼロの場合であり、等価屈折率のテーパ誤差に相当する。式(11)より ϕ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \phi &= z_R \cos \theta - x_R \cos \phi \sin \theta - y_R \sin \phi \sin \theta \\ &+ f^2 N_0 a_{0,1} \cos \phi \{(\tan^2 \theta)/2\} \end{aligned} \quad (21)$$

この波面収差はコマ収差に類似しており、標準偏差 ϕ_{SD} が次式で表される。

$$\begin{aligned} \phi_{SD}^2 &= z_R^2 (I_{1-n} I_{-1-n} - I_{-n}^2) / I_{1-n}^2 \\ &+ y_R^2 (I_{1-n} - I_{-1-n}) / 2 I_{1-n} \\ &+ (x_R - f^2 N_0 a_{0,1} s_2)^2 (I_{1-n} - I_{-1-n}) / 2 I_{1-n} \\ &+ f^4 N_0^2 a_{0,1}^2 h_2 \end{aligned} \quad (22)$$

ただし、

$$s_2 = (J_{3-n} - 2J_{1-n} + J_{-1-n}) / 2(I_{1-n} - I_{-1-n}) \quad (23)$$

$$\begin{aligned} h_2 &= (I_{5-n} - 2I_{3-n} + I_{1-n}) / 8 I_{1-n} \\ &- s_2^2 (I_{1-n} - I_{-1-n}) / 2 I_{1-n} \end{aligned} \quad (24)$$

したがって $x_R = f^2 N_0 a_{0,1} s_2$, $y_R = z_R = 0$ のとき ϕ_{SD}^2 は最小 ($f^2 N_0^2 a_{0,1}^2 h_2$) となり、 $\phi_{SD} \leq \lambda/14$ の条件は次式

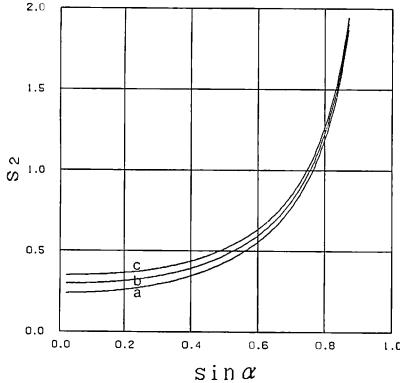


Fig. 4 Characteristic curves of displacement factor s_2 vs. aperture shape factor $\sin \alpha$: $n=2$; (a) $S=1.0$, (b) $S=1.5$, (c) $S=2.0$.

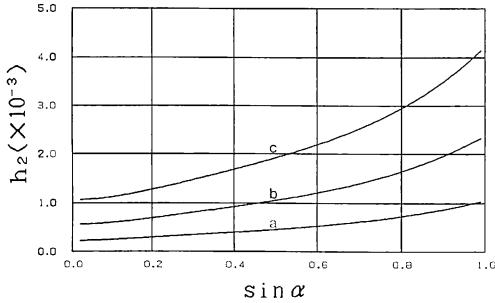


Fig. 5 Characteristic curves of degrading factor h_2 vs. aperture shape factor $\sin \alpha$: $n=2$; (a) $S=1.0$, (b) $S=1.5$, (c) $S=2.0$.

で表される。

$$|\alpha_{0,1}| \leq \lambda/14f^2N_0h_2^{1/2} \quad (25)$$

$S=\pi(\tan^2 \beta - \tan^2 \alpha)$ をパラメーターにして、 $\sin \alpha$ に対する s_2 , h_2 の特性曲線 (ただし $n=2$) をそれぞれ

Fig. 4, 5 に示す。Fig. 5 曲線(c)より $\sin \alpha=0.46$ で $h_2=1.82 \times 10^{-3}$ であるから、 $N_0=1.7$, $f=2\text{ mm}$, $\lambda=780\text{ nm}$ として $|\alpha_{0,1}| \leq 1.9 \times 10^{-4}(1/\text{mm})$ の誤差が許容できる。

3.3 $\alpha_{0,2}$ のみ $\neq 0$ の場合

$x_c=y_c=0$ かつ $\alpha_{0,2}$ 以外の誤差係数が全てゼロの場合であり、等価屈折率が放物線を導線とする柱面状の分布に沿って増減する誤差である。式(11)より ϕ は次式で表される。

$$\begin{aligned} \phi = & z_R \cos \theta - x_R \cos \phi \sin \theta - y_R \sin \phi \sin \theta \\ & + f^3 N_0 \alpha_{0,2} \cos^2 \phi \{(\tan^3 \theta)/3\} \end{aligned} \quad (26)$$

この波面収差は非点収差に類似しており、標準偏差 ϕ_{SD} が次式で表される。

$$\phi_{SD}^2 = (z_R - f^3 N_0 \alpha_{0,2} s_3)^2 (I_{1-n} I_{-1-n} - I_n^{-2}) / I_{1-n}^{-2}$$

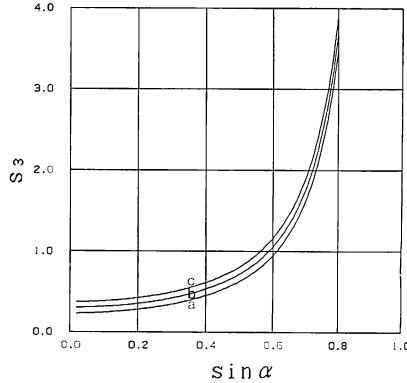


Fig. 6 Characteristic curves of displacement factor s_3 vs. aperture shape factor $\sin \alpha$: $n=2$; (a) $S=1.0$, (b) $S=1.5$, (c) $S=2.0$.

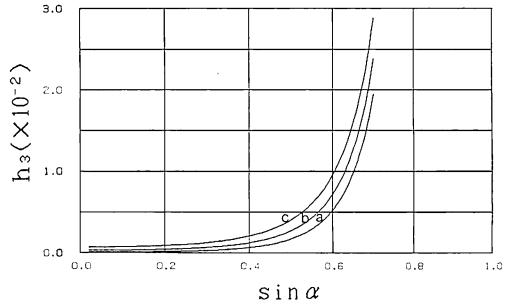


Fig. 7 Characteristic curves of degrading factor h_3 vs. aperture shape factor $\sin \alpha$: $n=2$; (a) $S=1.0$, (b) $S=1.5$, (c) $S=2.0$.

$$\begin{aligned} & + (x_R^2 + y_R^2)(I_{1-n} - I_{-1-n})/2I_{1-n} \\ & + f^6 N_0^2 \alpha_{0,2}^2 h_3 \end{aligned} \quad (27)$$

ただし、

$$\begin{aligned} s_3 = & \{I_{-n}(J_{4-n} - 2J_{2-n} + J_{-n}) \\ & - I_{1-n}(J_{3-n} - 2J_{1-n} + J_{-1-n})\} / 6(I_{1-n} I_{-1-n} - I_n^{-2}) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} h_3 = & (I_{7-n} - 3I_{5-n} + 3I_{3-n} - I_{1-n})/24I_{1-n} \\ & - (J_{4-n} - 2J_{2-n} + J_{-n})^2 / 36I_{1-n}^{-2} \\ & - s_3^2 (I_{1-n} I_{-1-n} - I_n^{-2}) / I_{1-n}^{-2} \end{aligned} \quad (29)$$

したがって $z_R = f^3 N_0 \alpha_{0,2} s_3$, $x_R = y_R = 0$ のとき ϕ_{SD}^2 は最小 ($f^6 N_0^2 \alpha_{0,2}^2 h_3$) となり、 $\phi_{SD} \leq \lambda/14$ の条件は次式で表される。

$$|\alpha_{0,2}| \leq \lambda/14f^3 N_0 h_3^{1/2} \quad (30)$$

$S=\pi(\tan^2 \beta - \tan^2 \alpha)$ をパラメーターにして、 $\sin \alpha$ に対する s_3 , h_3 の特性曲線 (ただし $n=2$) をそれぞれ

Fig. 6, 7 に示す。Fig. 7 曲線(c)より $\sin \alpha=0.46$ で $h_3=3.03 \times 10^{-3}$ であるから、 $N_0=1.7$, $f=2\text{ mm}$, $\lambda=780\text{ nm}$ として $|\alpha_{0,2}| \leq 7.4 \times 10^{-5}(1/\text{mm}^2)$ の誤差が許

容できる。

3.4 $b_{0,0}$ のみ $\neq 0$ の場合

$x_C = y_C = 0$ かつ $b_{0,0}$ 以外の誤差係数が全てゼロの場合であり、円形のグレーティングを片側で引き延ばし反対側で押しつぶしたパターン誤差の一つである(付録参照)。式(11)より Φ は次式で表される。

$$\begin{aligned}\Phi &= z_R \cos \theta - x_R \cos \phi \sin \theta - y_R \sin \phi \sin \theta \\ &- f b_{0,0} \cos \phi \tan \theta\end{aligned}\quad (31)$$

この波面収差はコマ収差に類似しており、標準偏差 Φ_{SD} が次式で表される。

$$\begin{aligned}\Phi_{SD}^2 &= z_R^2 (I_{1-n} I_{-1-n} - I_n^2) / I_{1-n}^2 \\ &+ y_R^2 (I_{1-n} - I_{-1-n}) / 2 I_{1-n} \\ &+ (x_R + f b_{0,0} s_4)^2 (I_{1-n} - I_{-1-n}) / 2 I_{1-n} \\ &+ f^2 b_{0,0}^2 h_4\end{aligned}\quad (32)$$

ただし、

$$s_4 = (I_{2-n} - I_n) / (I_{1-n} - I_{-1-n}) \quad (33)$$

$$h_4 = (I_{3-n} - I_{1-n}) / 2 I_{1-n} - s_4^2 (I_{1-n} - I_{-1-n}) / 2 I_{1-n} \quad (34)$$

したがって $x_R = -f b_{0,0} s_4$, $y_R = z_R = 0$ のとき Φ_{SD}^2 は

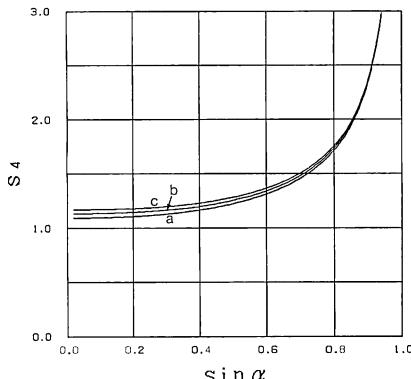


Fig. 8 Characteristic curves of displacement factor s_4 vs. aperture shape factor $\sin \alpha$: $n=2$; (a) $S=1.0$, (b) $S=1.5$, (c) $S=2.0$.

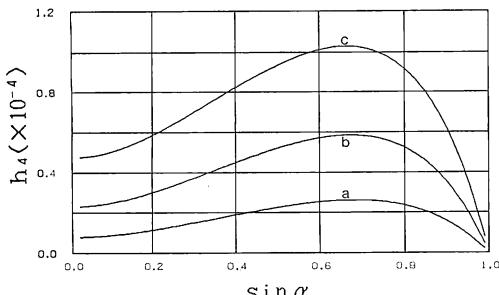


Fig. 9 Characteristic curves of degrading factor h_4 vs. aperture shape factor $\sin \alpha$: $n=2$; (a) $S=1.0$, (b) $S=1.5$, (c) $S=2.0$.

最小($f^2 b_{0,0}^2 h_4$)となり、 $\Phi_{SD} \leq \lambda/14$ の条件は次式で表される。

$$|b_{0,0}| \leq \lambda/14 f h_4^{1/2} \quad (35)$$

$S = \pi(\tan^2 \beta - \tan^2 \alpha)$ をパラメーターにして、 $\sin \alpha$ に対する s_4 , h_4 の特性曲線(ただし $n=2$)をそれぞれ Fig. 8, 9 に示す。Fig. 9 曲線(c)より $\sin \alpha = 0.46$ で $h_4 = 8.94 \times 10^{-4}$ であるから、 $f=2 \text{ mm}$, $\lambda=780 \text{ nm}$ として $|b_{0,0}| \leq 9.3 \times 10^{-4}$ の誤差が許容できる。

3.5 $b_{0,1}$ のみ $\neq 0$ の場合

$x_C = y_C = 0$ かつ $b_{0,1}$ 以外の誤差係数が全てゼロの場合であり、円形のグレーティングを中心を挟む両側で引き延ばした(押しつぶした)パターン誤差の一つである(付録参照)。式(11)より Φ は次式で表される。

$$\begin{aligned}\Phi &= z_R \cos \theta - x_R \cos \phi \sin \theta - y_R \sin \phi \sin \theta \\ &- f^2 b_{0,1} \cos^2 \phi \{(\tan^2 \theta)/2\}\end{aligned}\quad (36)$$

この波面収差は非点収差に類似しており、標準偏差 Φ_{SD} が次式で表される。

$$\Phi_{SD}^2 = (z_R + f^2 b_{0,1} s_5)^2 (I_{1-n} I_{-1-n} - I_n^2) / I_{1-n}^2$$

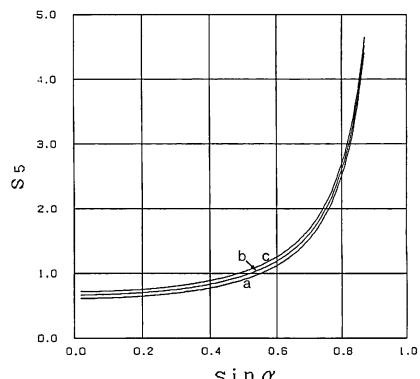


Fig. 10 Characteristic curves of displacement factor s_5 vs. aperture shape factor $\sin \alpha$: $n=2$; (a) $S=1.0$, (b) $S=1.5$, (c) $S=2.0$.

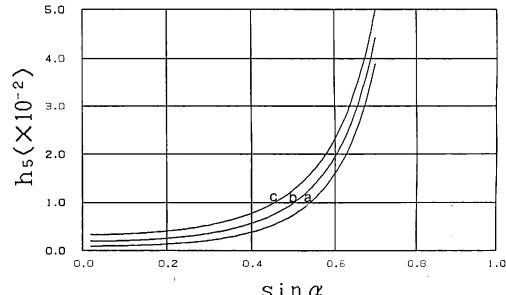


Fig. 11 Characteristic curves of degrading factor h_5 vs. aperture shape factor $\sin \alpha$: $n=2$; (a) $S=1.0$, (b) $S=1.5$, (c) $S=2.0$.

$$+ (x_R^2 + y_R^2)(I_{1-n} - I_{-1-n})/2I_{1-n} \\ + f^4 b_{0,1}^2 h_5 \quad (37)$$

ただし、

$$s_5 = \{I_{-n}(I_{3-n} - I_{1-n}) \\ - I_{1-n}(I_{2-n} - I_{-n})\}/4(I_{1-n}I_{-1-n} - I_{-n}^2) \quad (38)$$

$$h_5 = 3(I_{5-n} - 2I_{3-n} + I_{1-n})/32I_{1-n} \\ - (I_{3-n} - I_{1-n})^2/16I_{1-n}^2 \\ - s_5^2(I_{1-n}I_{-1-n} - I_{-n}^2)/I_{1-n} \quad (39)$$

したがって $z_R = -f^2 b_{0,1} s_5$, $x_R = y_R = 0$ のとき ϕ_{SD}^2 は最小 ($f^4 b_{0,1}^2 h_5$) となり、 $\phi_{SD} \leq \lambda/14$ の条件は次式で表される。

$$|b_{0,1}| \leq \lambda/14 f^2 h_5^{1/2} \quad (40)$$

$S = \pi(\tan^2 \beta - \tan^2 \alpha)$ をパラメーターにして、 $\sin \alpha$ に対する s_5 , h_5 の特性曲線（ただし $n=2$ ）をそれぞれ

Fig. 10, 11 に示す。Fig. 11 曲線(c)より $\sin \alpha = 0.46$ で $h_5 = 1.03 \times 10^{-2}$ であるから、 $f=2 \text{ mm}$, $\lambda=780 \text{ nm}$ として $|b_{0,1}| \leq 1.4 \times 10^{-4} (1/\text{mm})$ の誤差が許容できる。

3.6 x_C のみ $\neq 0$ の場合

$x_C \neq 0$, $y_C = 0$ かつ全ての誤差係数がゼロの場合であり、CGC が CFGC に対し偏心する場合である。式(11)より ϕ は次式で表される。

$$\phi = z_R \cos \theta - x_R \cos \phi \sin \theta - y_R \sin \phi \sin \theta \\ - N_0 x_C \cos \phi \quad (41)$$

この波面収差はコマ収差に類似しており、標準偏差 ϕ_{SD} が次式で表される。

$$\phi_{SD}^2 = z_R^2(I_{1-n}I_{-1-n} - I_{-n}^2)/I_{1-n}^2 \\ + y_R^2(I_{1-n} - I_{-1-n})/2I_{1-n} \\ + (x_R + N_0 x_C s_6)^2(I_{1-n} - I_{-1-n})/2I_{1-n} \\ + N_0^2 x_C^2 h_6 \quad (42)$$

ただし、

$$s_6 = (J_{1-n} - J_{-1-n})/(I_{1-n} - I_{-1-n}) \quad (43)$$

$$h_6 = 1/2 - s_6^2(I_{1-n} - I_{-1-n})/2I_{1-n} \quad (44)$$

したがって $x_R = -N_0 x_C s_6$, $y_R = z_R = 0$ のとき ϕ_{SD}^2 は最小 ($N_0^2 x_C^2 h_6$) となり、 $\phi_{SD} \leq \lambda/14$ の条件は次式で表される。

$$|x_C| \leq \lambda/14 N_0 h_6^{1/2} \quad (45)$$

$S = \pi(\tan^2 \beta - \tan^2 \alpha)$ をパラメーターにして、 $\sin \alpha$ に対する s_6 , h_6 の特性曲線（ただし $n=2$ ）をそれぞれ Fig. 12, 13 に示す。Fig. 13 曲線(c)より $\sin \alpha = 0.46$ で $h_6 = 6.29 \times 10^{-3}$ となるから、 $N_0 = 1.7$, $\lambda = 780 \text{ nm}$ として $|x_C| \leq 4.1 \times 10^{-4} \text{ mm}$ の誤差が許容できる。

4. ま と め

グレーティングや等価屈折率の誤差の一般的な表現を

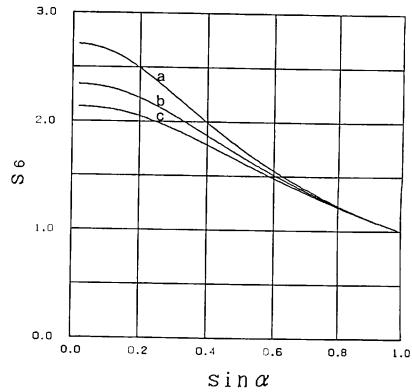


Fig. 12 Characteristic curves of displacement factor s_6 vs. aperture shape factor $\sin \alpha$: $n=2$; (a) $S=1.0$, (b) $S=1.5$, (c) $S=2.0$.

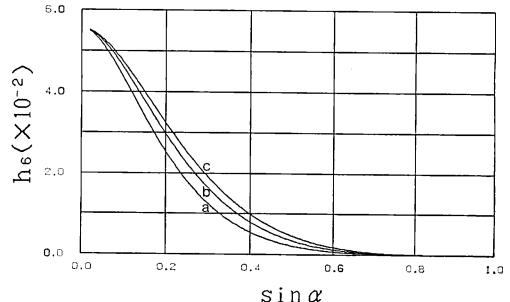


Fig. 13 Characteristic curves of degrading factor h_6 vs. aperture shape factor $\sin \alpha$: $n=2$; (a) $S=1.0$, (b) $S=1.5$, (c) $S=2.0$.

行い、CGC, CFGC 間の偏芯も含めた形で、誤差と波面収差の関係を求めた。その結果、回転非対称な誤差が CFGC の集光特性に与える影響を計算でき、いくつかの代表的な誤差形態について、収差関数と誤差の許容値を明らかにした。

CFG C を光ヘッドに応用する場合、その大きさは直徑 4~5 mm 程度と小さいので、導波層の関係する誤差は主にオフセット誤差とテーパ誤差が支配的と考えられる。オフセット誤差は主に成膜の再現性に伴う誤差であり、膜厚コントロールなどの採用で誤差係数 $|\alpha_{0,0}|$ を 2×10^{-2} 以下に抑えることが可能である。またテーパ誤差は成膜の不均一性（厚さ、屈折率の分布）に起因する。たとえばプラズマ CVD 法では膜厚の均一性が反応ガスの流れに依存し、スパッタ法ではターゲットとの位置関係に依存することが知られている。著者らの測定ではプラズマ CVD 法による SiN 導波層で $|\alpha_{0,0}| \leq 1 \times 10^{-4} (1/\text{mm})$ (TE₀ モード) の結果を得ている。このように、導波層が関係する誤差は今後さらなる最適化を

進めることで十分許容できるレベルにあると考えられる。

これに対し同心円のチャーブグレーティングパターンを形成する技術は精度的に十分なレベルにない。電子ビーム描画法は円形を含めた任意のパターンを形成できる利点があるが、周期精度とその均一性が十分でなく⁷⁾、 x , y 方向の相対的寸法に0.2%程度の誤差があるといわれる。偏向歪補正などの調整を加えても、 $|b_{0,1}| \leq 1.4 \times 10^{-4}$ (1/mm)といった許容限界(半径2mmの位置で 6×10^{-5} 程度の楕円度に相当(付録参照))を満足することは難しく、新たなコンセプトに基づく加工技術が必要である。

CGCとCFG Cとの偏心限界 $|xc| \leq 4.1 \times 10^{-4}$ mmは、半導体製造技術における位置合わせ精度が $0.1 \mu\text{m}$ 以下のレベルにあることを考えれば難しい条件でない。

以上の考察から、CFG Cの開発における最大の課題はグレーティングの加工技術にあるといってよく、今後はこの問題についての研究を進めていく。

なお蛇足であるが、節3.4, 3.5の結果はグレーティングレンズの場合にもそのまま適用できる。

本論文をまとめにあたり、成膜技術、加工技術について議論していただいた同研究所の内田真司氏、麻田潤一氏に感謝いたします。

文 献

- 1) 西脇青児、内田真司、麻田潤一、米澤武敏：“超解像導波路型光ヘッド(1)”，第50回応用物理学会学術講演会予稿集，30a-PB-4(1989) p. 972.
- 2) 西脇青児、内田真司、麻田潤一、米澤武敏：“超解像導波路型光ヘッドの開発(1)”，1989年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(1989) pp. 97-98.

- 3) 西脇青児：“同心円集光グレーティングカプラの集光特性解析”，光学，19(1990) 665-672.
- 4) M. Born and E. Wolf(草川徹、横田英嗣訳)：光学の原理(東海大学出版会、東京、1975) p. 157.
- 5) 西脇青児：“グレーティングレンズの収差解析”，光学，19(1990) 310-318.
- 6) M. Born and E. Wolf(草川徹、横田英嗣訳)：光学の原理(東海大学出版会、東京、1975) p. 691.
- 7) 西原浩、春名正光、栖原敏明：光集積回路(オーム社、東京、1985) p. 224.

付録 誤差係数とグレーティングパターン

格子ベクトルとの直交関係から、式(4), (5)よりグレーティングに沿った曲線に関して次式が成り立つ。

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{\{N_0 + r/(f^2 + r^2)^{1/2}\} \cos \phi + \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n b_{m,n} x^{n-m} y^m}{\{N_0 + r/(f^2 + r^2)^{1/2}\} \sin \phi + \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n c_{m,n} x^{n-m} y^m} \quad (a)$$

したがって、節3.4では

$$dy/dx = -[1 + b_{0,0}/x \{N_0/(x^2 + y^2)^{1/2} + 1/(f^2 + x^2 + y^2)^{1/2}\}]x/y \quad (b)$$

節3.5では

$$dy/dx = -[1 + b_{0,1}/\{N_0/(x^2 + y^2)^{1/2} + 1/(f^2 + x^2 + y^2)^{1/2}\}]x/y \quad (c)$$

となる。

楕円度 ε (=長軸長/短軸長-1)の楕円曲線が微分方程式 $dy/dx = -(1+\varepsilon)^2 x/y$ の解であるから、式(b)は x の正負で楕円度の極性が異なる曲線、式(c)は楕円に近い曲線であることがわかる。