

## 研究

## 同心円集光グレーティングカプラの集光特性解析

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

(1990年2月2日受付, 1990年7月23日受理)

Analysis of Convergence Characteristics  
of Concentric Focusing Grating Coupler

Seiji NISHIWAKI

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

(Received February 2, 1990; Accepted July 23, 1990)

This is to report on the convergence characteristics of previously proposed concentric focusing grating coupler (CFGC). The scalar theory is modified for dealing with the polarization, and a new approximation method of the diffraction formula by coordinate conversion is employed. The analysis shows that the polarization of radiated light from CFGC is such that its diagonal electric vectors about the central point are in mutually opposite directions, and thus the focus intensity along the central ray is nullified. Therefore, the radiated light has to be converted into either linear or circular polarization in order to realize effective convergence. It is also found that the degrading of Strehl intensity, due to the error factors such as wavelength error and deviation of effective index, can be relieved by optimizing the zone construction of aperture shape.

## 1. はじめに

近年, 光を集光する新しい素子として FGC (focusing grating coupler, 集光グレーティングカプラ) が提案され, 集光特性の解析や試作, 評価が行われている<sup>1)</sup>. また従来レンズ, プリズム等の光学素子の組合せであった光ヘッドを FGC を用いた光集積回路に置き換える提案がなされ, 基本的な集光, 受光の特性評価が行われている<sup>2,3)</sup>. しかし FGC はその放射光の回折角が光源の波長と導波層の等価屈折率に依存するので, これらの誤差に伴う収差 (おもに非点収差やコマ収差) の発生が指摘されており<sup>4)</sup>, とくに, 大開口が要求される光集積ピックアップとしての FGC は誤差に対する許容度が狭く, その実用化を困難にしていた.

このような背景のもとに, 著者らは FGC の一方式としてグレーティングを同心円形状にしたカプラ CFGC (concentric focusing grating coupler, 同心円集光グレーティングカプラ) を提案した<sup>5,6)</sup>. Fig. 1 は CFGC を

用いた光ヘッドの外観構成を示し, その原理は次のとおりである. 半導体レーザーから出射した直線偏光の光は液晶を用いた偏光変換素子 (付録A参照) によって同心円偏光 (または放射偏光) と呼ばれる偏光状態に変換され, 同心円状グレーティングの円形カプラ CGC (concentric grating coupler, 同心円グレーティングカプラ) に入力し, 導波層内を中心Oから径方向に沿って伝播する TE モード (TM モード) 導波光を励起する. この導波光は CGC に同心して形成された, 同心円状グレーティングの輪帯カプラ CFGC より放射され, 中心Oを通る導波層法線上の点 (光ディスク反射面) に集光する. CFGC からの放射光は同心円偏光 (放射偏光) であり, その集光性は直線偏光等の空間的に均質な偏光に比べ劣るので, 偏光変換素子で直線偏光に変換する. 光ディスクからの反射光は偏光変換素子により再び放射時の偏光状態に戻されて CFGC に入力し, 導波層内を中心Oに向かう TE モード (TM モード) 導波光を励起する. この帰還導波光は CGC, CFGC 間の輪帯領域に

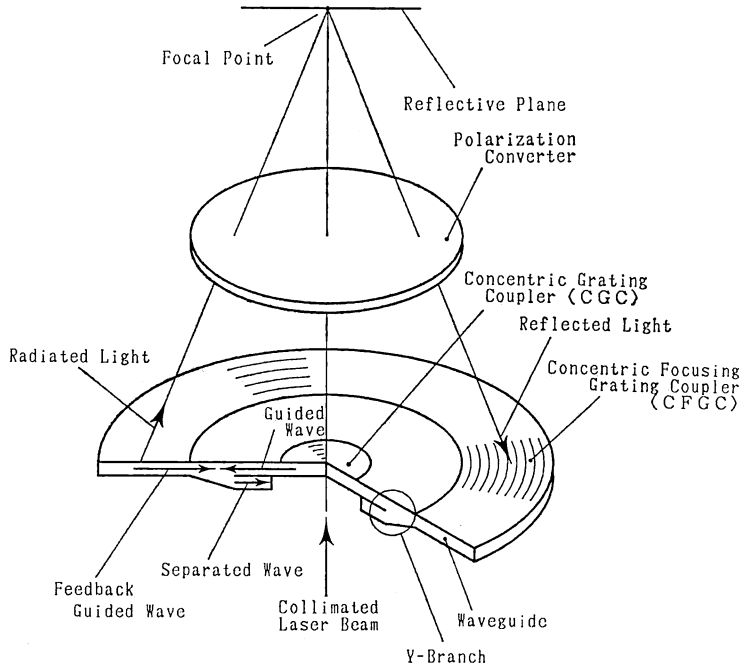


Fig. 1 Schematic diagram of an optical device employing CFGC.

形成された平面 Y 分岐で分離され、受光素子で検出される。

本論では CFGC の集光特性を明らかにし、波長誤差や等価屈折率誤差に対する収差特性をグレーティングレンズの色収差 (波長誤差による収差) と比較する形で述べる。

## 2. 偏光と回折式

Fig. 2 は CFGC の集光の様子を示している。座標  $(x, y)$  上の導波層内を中心  $O$  から外周に向かって伝播する導波光は CFGC 上の点  $P(x, y)$  から放射され、アポロニウスの球面 (焦点  $F$  を中心とし点  $O$  で開口面と接する球面) を経て焦平面から  $z$  離れた像平面 (座標  $(\xi, \eta)$ ,  $z < 0$  が CFGC 側に対応) 上に集光する。座標  $(X, Y)$  は光線とアポロニウスの球面との交点群の、光軸  $OF$  に沿った開口面への投影として定義される。

CFGC を焦点  $F$  から見て角  $\alpha$  から  $\beta$  の間の輪帯開口とし、放射光の振幅、位相分布を  $v(x, y)$ ,  $\Psi_0(x, y)$  とすると、瞳関数  $P(x, y)$ , 放射直後の複素振幅分布  $w(x, y)$  が次式で表される。

$$P(x, y) = \begin{cases} 1 & f \tan \alpha \leq (x^2 + y^2)^{1/2} \leq f \tan \beta \\ 0 & \text{上記以外} \end{cases} \quad (1)$$

$$w(x, y) = P(x, y)v(x, y) \exp\{-ik\Psi_0(x, y)\} \quad (2)$$

ただし、

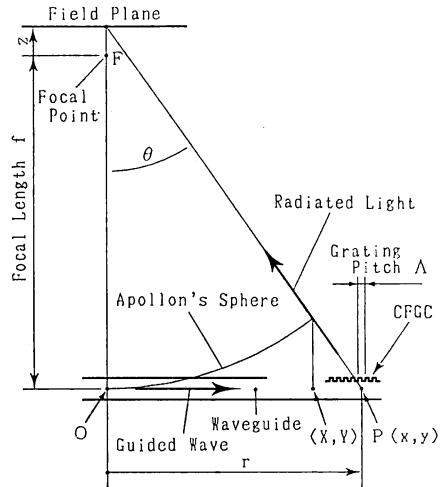


Fig. 2 Geometric relationship showing convergence by CFGC.

$f$ : 焦点距離 (=  $OF$ ),  $\kappa$ : 波数 ( $= 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$ : 波長)  
円偏光や直線偏光の光はスカラーとして扱うことができたが、CFGC から放射される光は空間的に不均一な偏光状態にあり、ベクトルとして表現する必要がある。すなわち複素振幅  $w(x, y)$  の光を互いに直交する 2 方向 ( $x, y$  方向) の振動成分  $w_x(x, y)$ ,  $w_y(x, y)$  で表し、それぞれの位相遅れを  $\phi_x(x, y)$ ,  $\phi_y(x, y)$  とすれば、次のベクトル式が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} w_x \\ w_y \end{bmatrix} = w(x, y) \begin{bmatrix} A_x \exp(-i\phi_x) \\ A_y \exp(-i\phi_y) \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで,  $A_x(x, y), A_y(x, y)$  は単位電界ベクトルに対する振動成分の振幅であり, 次式を満たす.

$$A_x^2 + A_y^2 = 1 \quad (4)$$

互いに直交する振動成分は干渉しないので,  $x, y$  方向振動成分のそれぞれに独立した回折式が成り立つ. すなわち座標変換近似<sup>7)</sup>より, 像平面上の光の  $x, y$  方向振動成分は, 光軸と光線とのなす角を  $\theta$  として, それぞれ次式で表される.

$$\begin{aligned} u_x(\xi, \eta, z) &= (1/i\lambda f) \iint_{-f}^f w_x(x, y) / \cos^2 \theta \\ &\quad \times \exp\{ik(f \cos \theta + z \cos \theta)\} \\ &\quad \times \exp\{-ik(X\xi + Y\eta)/f\} dXdY \quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_y(\xi, \eta, z) &= (1/i\lambda f) \iint_{-f}^f w_y(x, y) / \cos^2 \theta \\ &\quad \times \exp\{ik(f \cos \theta + z \cos \theta)\} \\ &\quad \times \exp\{-ik(X\xi + Y\eta)/f\} dXdY \quad (6) \end{aligned}$$

また振動成分の直交性により像平面上光強度分布は次式で表される.

$$I(\xi, \eta, z) = |u_x(\xi, \eta, z)|^2 + |u_y(\xi, \eta, z)|^2 \quad (7)$$

振幅  $A_x$  および  $A_y$ , 位相遅れ  $\phi_x$  および  $\phi_y$  が極座標の動径  $r(=(x^2 + y^2)^{1/2})$  に依存せず偏角  $\phi((x/r, y/r) = (\cos \phi, \sin \phi))$  のみに依存することを共軸偏光と呼ぶ. 放射光が共軸偏光でその複素振幅  $w(x, y)$  が回転対称であれば,  $w(x, y)$  を  $w(\theta) = P(\theta)v(\theta)\exp\{-ik\Psi_0(\theta)\}$  に置き換え, 変数変換を行うことで, (5), (6)式より軸上の振幅に関する次式が得られる.

$$u_x(0, 0, z) = (fh_x/i\lambda)u_0 \quad (8)$$

$$u_y(0, 0, z) = (fh_y/i\lambda)u_0 \quad (9)$$

ただし,

$$u_0 = \int_{\alpha}^{\beta} v(\theta) \tan \theta \exp\{ik(f \cos \theta + z \cos \theta - \Psi_0)\} d\theta \quad (10)$$

$$h_x = \int_0^{2\pi} A_x(\phi) \exp\{-i\phi_x(\phi)\} d\phi \quad (11)$$

$$h_y = \int_0^{2\pi} A_y(\phi) \exp\{-i\phi_y(\phi)\} d\phi \quad (12)$$

### 3. 同心円偏光および放射偏光の集光性と偏光変換

Fig. 2 において, CFGC 上の点 P から導波層外に放射される光の偏光状態は, 導波光が TE モードであれば電界ベクトルが O を中心とし位置 P を通る開口面上の円の接線方向にあり, TM モードであれば OPF を含

む面内において放射光線に直交する方向にある. これらの偏光状態をそれぞれ同心円偏光, 放射偏光と呼び, 次式で表現されるように局所的には直線偏光であるが, 偏光の振動面方位が位置によって連続的に異なる(放射偏光の表現は振動面が開口面上にあるとした近似表現である).

$$\text{(同心円偏光)} \quad \begin{cases} A_x(x, y) = -\sin \phi \\ A_y(x, y) = \cos \phi \\ \phi_x(x, y) = \phi_y(x, y) = \text{一定} \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{(放射偏光)} \quad \begin{cases} A_x(x, y) = \cos \phi \\ A_y(x, y) = \sin \phi \\ \phi_x(x, y) = \phi_y(x, y) = \text{一定} \end{cases} \quad (14)$$

同心円偏光, 放射偏光とも共軸偏光の条件を満たすので, (13)または(14)式を(11), (12)式に代入して次式が得られる.

$$h_x = h_y = 0 \quad (15)$$

すなわち, 同心円または放射偏光の光は中心に対する対向位置の電界ベクトルが互いに逆ベクトルであるため, 集束光の軸上光強度は互いに打ち消し合ってゼロとなる. したがって高い集光性を得るにはこれらの偏光を他の状態に変換する必要がある, このような背景から著者らは液晶を用いた構成の, 次のジョーンズマトリックスをもつ偏光変換素子を提案した<sup>8,9)</sup> (付録A参照).

$$M = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (16)$$

この偏光変換素子によって放射光は直線偏光に変換され, (11), (12)式より次式が得られる.

$$|h_x|^2 + |h_y|^2 = 4\pi^2 \quad (17)$$

したがって, (7)式から軸上強度が次式で与えられる.

$$I(0, 0, z) = 4\pi^2 (f u_0 / \lambda)^2 \quad (18)$$

一方, Fig. 3 に示す位相差板による変換も考えられる. この位相差板の位置  $(r \cos \phi, r \sin \phi)$  を透過する光の位相遅れは偏角  $\phi$  に等しく, そのジョーンズマトリ

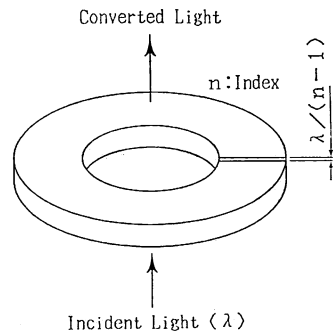
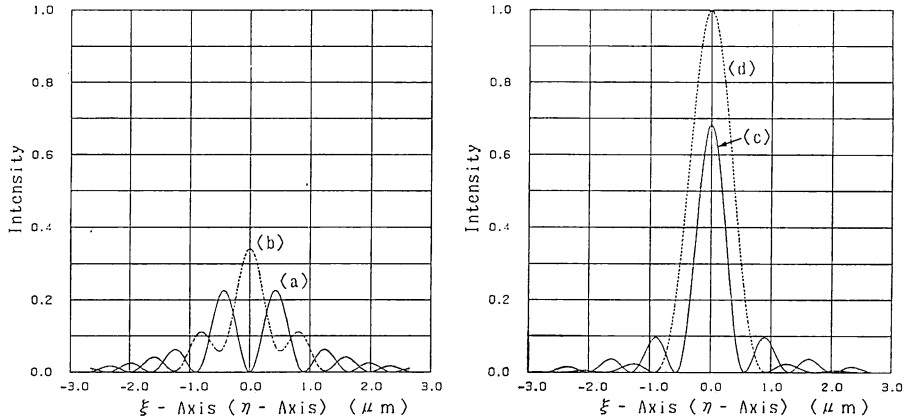


Fig. 3 Phase plate for conversion of polarization.



**Fig. 4** Intensity distribution  $I(\xi, \eta, 0)$ :  $v(\theta)=1$ ;  $\Psi_0=f/\cos\theta+z\cos\theta$ ;  $\lambda=780\text{ nm}$ . (a) Circumferential or radial polarization;  $\sin\alpha=0.44$ ;  $\sin\beta=0.60$ . (b) Converted polarization by phase plate;  $\sin\alpha=0.44$ ;  $\sin\beta=0.60$ . (c) Linear or circular polarization;  $\sin\alpha=0.44$ ;  $\sin\beta=0.60$ . (d) Linear or circular polarization;  $\sin\alpha=0.00$ ;  $\sin\beta=0.50$ .

ックスは次式で与えられる.

$$M = \begin{pmatrix} \exp(i\phi) & 0 \\ 0 & \exp(i\phi) \end{pmatrix} \quad (19)$$

この位相差板によって同心円偏光 ( $w_x(x, y), w_y(x, y)$ ) は次の偏光 ( $w_x'(x, y), w_y'(x, y)$ ) に変換される (付録 B 参照).

$$\begin{bmatrix} w_x'(x, y) \\ w_y'(x, y) \end{bmatrix} = w(x, y) \exp(i\phi) \begin{bmatrix} -\sin\phi \\ \cos\phi \end{bmatrix} \quad (20)$$

この偏光も共軸偏光の条件を満たしており, 軸上強度は (18) 式で示したものの 1/2 である.

**Fig. 4** は一様強度分布で無収差 ( $v(\theta)=1$ ,  $\Psi_0=f/\cos\theta+z\cos\theta$ ) の場合の焦平面上光強度分布  $I(\xi, \eta, 0)$  を示す. 図中, 曲線 (a) は同心円偏光 (または放射偏光), 曲線 (b) は位相差板で変換された偏光, 曲線 (c) は直線偏光 (または円偏光) の場合であり, それぞれ開口形状を  $\sin\alpha=0.44$ ,  $\sin\beta=0.60$  の輪帯とした. 参考として曲線 (d) に直線偏光 (または円偏光) で前述の輪帯と同一面積の円形開口 ( $\sin\alpha=0.0$ ,  $\sin\beta=0.50$ ) の場合を示す. 曲線 (c) は (d) に比べメインローブ径が小さくなるが, これは外径が大きい上に輪帯開口による効果<sup>10)</sup> が加わるためである.

#### 4. 波長誤差, 等価屈折率誤差における収差特性

著者はすでに非正弦条件下の結像系における球面収差の最良像点条件 (最良像点位置に関する条件) を求め報告している<sup>7)</sup>. すなわち球面収差 (回転対称な収差) の場合, 開口面上の点  $(x, y)$  から出射する光の縦収差を  $\Delta(x, y)$  とすると開口面出射直後の位相  $\Psi_0(\theta)$  は次式で

表される.

$$\Psi_0(\theta) = -f \int \frac{\Delta \cdot r dr}{(f^2 + r^2)^{3/2}} + f/\cos\theta \quad (21)$$

$\Psi_0(\theta)$  には一般に常数項が含まれており, 計算に都合がよいように次式を満たすように決めておく.

$$\int_{\alpha}^{\beta} v(\theta) \tan\theta \{f/\cos\theta + z\cos\theta - \Psi_0(\theta)\} d\theta = 0 \quad (22)$$

$|f/\cos\theta + z\cos\theta - \Psi_0| < 1/\kappa$  として, 最良像点位置  $z$  (焦点と最良像点の距離) は次式の解として与えられる.

$$\int_{\alpha}^{\beta} v(\theta) \sin\theta \{f/\cos\theta + z\cos\theta - \Psi_0(\theta)\} d\theta = 0 \quad (23)$$

この最良像点条件を用いて波長誤差, 等価屈折率誤差に対する CFGC の収差特性を述べる. なお CFGC からの放射光は前述の偏光変換素子により直線偏光に変換されるものとして議論を進める.

**Fig. 2** に示すように, 半径  $r$  の位置でのグレーティング (ピッチ  $A$ ) により導波光が放射されれば, 結合次数  $q=-1$  (2 ビーム結合) として, 回折角  $\theta$  が次式で与えられる.

$$\sin\theta = \lambda/A - N \quad (24)$$

ここで  $N$  は導波層の等価屈折率である.

この放射光が点 F に集光すれば次式が成り立つ.

$$\tan\theta = r/f \quad (25)$$

すなわち (24), (25) 式よりピッチ  $A$  が次式を満たすことが集光の条件である.

$$A = \lambda / \{N + r/(f^2 + r^2)^{1/2}\} \quad (26)$$

(24), (25) 式より  $d\lambda$  の波長誤差,  $dN$  の等価屈折率誤差に伴う縦収差量  $\Delta$  (すなわち焦点距離の偏差量) と回折角  $\theta$  (すなわち開口角) との関係が次式で表され

る。

$$\Delta = f \{ dN - (d\lambda/\lambda)(N + \sin \theta - \lambda \partial N / \partial \lambda) \} / (\sin \theta \cos^2 \theta) \quad (27)$$

等価屈折率の分散曲線によれば<sup>11)</sup>,  $|\partial N / \partial \lambda|$  の大きさは大きくとも  $N/\lambda$  の 1/10 程度で無視でき, (27)式は次式で書き換えられる。

$$\Delta = f \{ dN - (d\lambda/\lambda)(N + \sin \theta) \} / (\sin \theta \cos^2 \theta) \quad (28)$$

Fig. 5 は  $\Delta$  の  $\sin \theta$  に対する特性曲線を示しており, 曲線(b)は  $dN=0, N=1.70$  の場合, 曲線(c)は  $d\lambda=0$  の場合である。曲線(b)は  $\sin \theta=0.50$  と  $\sin \theta=3^{-1/2}$  の間で, 曲線(c)は  $\sin \theta=3^{-1/2}$  で極小値をなす。なおグレーティングレンズの波長誤差に対する特性曲線は  $\Delta \cdot \lambda / f d \lambda = -1/\cos^2 \theta$  で与えられ<sup>7)</sup>, 参考として曲線(a)に示しておく。

(21), (28)式より開口面射出直後の位相  $\Psi_0(\theta)$  は  $A_1$  を常数項として次式で表される。

$$\begin{aligned} \Psi_0(\theta) = & A_1 + f/\cos \theta \\ & + (fd\lambda/\lambda)(N \tan \theta + 1/\cos \theta) - fdN \cdot \tan \theta \end{aligned} \quad (29)$$

CFGC から出射する光が  $v(\theta) = \cos^2 \theta$  の振幅分布のときには, (22)式より常数項  $A_1$  が次式で与えられる。

$$\begin{aligned} A_1 = & -fd\lambda/\lambda \cdot \{ N(J_{2-n} - J_{-n}) + I_{2-n} \} / I_{1-n} \\ & + fdN(J_{2-n} - J_{-n}) / I_{1-n} + zI_{-n} / I_{1-n} \end{aligned} \quad (30)$$

ここで  $I_n, J_n$  は次式で定義されている

$$I_n = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{\sin \theta}{\cos^2 \theta} d\theta \quad (31)$$

$$J_n = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{1}{\cos^2 \theta} d\theta \quad (32)$$

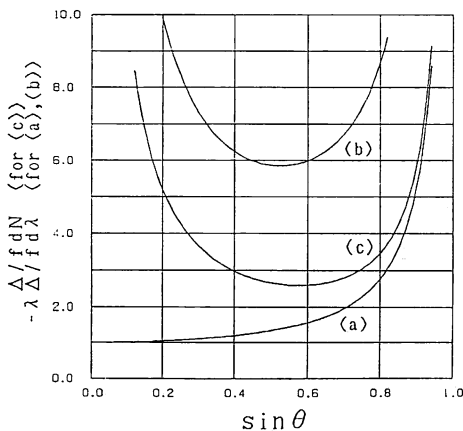


Fig. 5 Relationship between longitudinal aberration  $\Delta$  and diffraction angle  $\theta$ : (a) Grating lens (for wavelength error). (b) CFGC (for wavelength error,  $N=1.70$ ). (c) CFGC (for effective index deviation).

したがって, (23), (29), (30)式より最良像点位置  $z$  が次式で与えられる。

$$z = -(K_1 + NK_2) \cdot fd\lambda/\lambda + K_2 \cdot fdN \quad (33)$$

ただし,

$$K_1(n) = (I_{1-n}^2 - I_{-n}I_{2-n}) / (I_{-n}^2 - I_{1-n}I_{-1-n}) \quad (34)$$

$$\begin{aligned} K_2(n) = & \{ I_{1-n}(J_{1-n} - J_{-1-n}) - I_{-n}(J_{2-n} - J_{-n}) \} \\ & / (I_{-n}^2 - I_{1-n}I_{-1-n}) \end{aligned} \quad (35)$$

係数  $(K_1 + NK_2)$ ,  $K_2$  はそれぞれ波長誤差, 等価屈折率誤差に対する最良像点位置の変位のしやすさを示し,  $K_1, K_2$  を変位係数と呼ぶ。Fig. 6 に開口面積に関する値  $S = \pi(\tan^2 \beta - \tan^2 \alpha)$  をパラメーターにして,  $n=0$  の条件で  $\sin \alpha$  に対する  $K_1, K_2$  の特性曲線を示す。仮に  $f=3 \text{ mm}$ ,  $\lambda=780 \text{ nm}$ ,  $N=1.7$  とすると  $\sin \theta=0.44 \sim 0.60$  の輪帯開口で, 等価屈折率変化 0.01 に対し  $79 \mu\text{m}$ , 波長変化 1 nm に対し  $23 \mu\text{m}$  の変位幅が得られる。なおグレーティングレンズの変位係数は  $K_1$  に等しいので<sup>7)</sup>, CFGC はグレーティングレンズに比べて  $(1 + NK_2/K_1)$  倍, すなわち 4.2 倍の変位幅をもつ。

次に,  $|f/\cos \theta + z \cos \theta - \Psi_0| < 1/\kappa$  とすれば, (10)式積分内の指数関数を 2 次の項までのべき級数に近似できるので(このうち 1 次の項は条件式(22)より省略できる), 軸上の最良像点における光強度 (Strehl 強度) は(18)式に(33)式を代入して近似的に次式で与えられる (付録 C 参照)。

$$\begin{aligned} I(0, 0, z) = & 4\pi^2 (fI_{1-n}/\lambda)^2 [1 - \kappa^2 f^2 / 2 \cdot \{ H_L(d\lambda/\lambda)^2 \\ & - 2h_{LN}(H_L H_N)^{1/2} dNd\lambda/\lambda + H_{Nd}N^2 \}]^2 \end{aligned} \quad (36)$$

ただし,

$$H_L(n) = [I_{1-n}K_1^2 + 2I_{1-n}K_1 + I_{3-n} - I_{1-n}k_1^2]$$

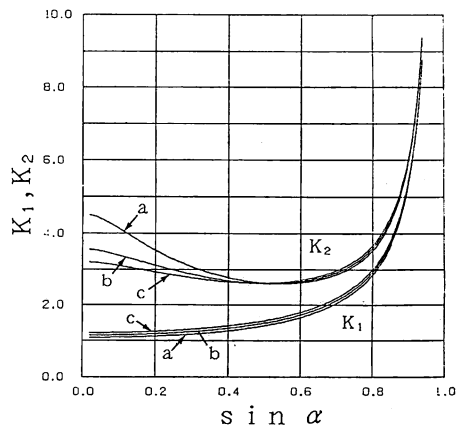


Fig. 6 Characteristic curves of displacement factors  $K_1$  and  $K_2$  vs. aperture shape factor  $\sin \alpha$ :  $n=0$ ; (a)  $S=0.5$ , (b)  $S=1.0$ , (c)  $S=1.5$ .

$$\begin{aligned}
 &+ 2N \{ I_{-1-n} K_1 K_2 + (J_{1-n} - J_{-1-n}) K_1 \\
 &+ I_{1-n} K_2 + J_{3-n} - J_{1-n} - I_{1-n} k_1 k_2 \} \\
 &+ N^2 \{ I_{-1-n} K_2^2 + 2(J_{1-n} - J_{-1-n}) K_2 \\
 &+ I_{3-n} - I_{1-n} - I_{1-n} k_2^2 \} / I_{1-n} \quad (37)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_N(n) = &\{ I_{-1-n} K_2^2 + 2(J_{1-n} - J_{-1-n}) K_2 \\
 &+ I_{3-n} - I_{1-n} - I_{1-n} k_2^2 \} / I_{1-n} \quad (38)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 h_{LN}(n) = &[ I_{1-n} (K_2 - k_1 k_2) + I_{-1-n} K_1 K_2 \\
 &+ (J_{1-n} - J_{-1-n}) K_1 + J_{3-n} - J_{1-n} \\
 &+ N \{ I_{3-n} - I_{1-n} (k_2^2 + 1) + I_{-1-n} K_2^2 \\
 &+ 2(J_{1-n} - J_{-1-n}) K_2 \} ] / I_{1-n} (H_L H_N)^{1/2} \quad (39)
 \end{aligned}$$

$$k_1(n) = (I_{2-n} + I_{-n} K_1) / I_{1-n} \quad (40)$$

$$k_2(n) = (J_{2-n} - J_{-n} + I_{-n} K_2) / I_{1-n} \quad (41)$$

係数  $H_L, H_N$  は Strehl 強度の劣化しやすさを示す定数であり、それぞれ波長誤差、等価屈折率誤差による強度劣化係数と呼ぶ。  $h_{LN}$  を含む項は二つの誤差の干渉項であり、  $h_{LN}$  を干渉係数と呼ぶ。

$S = \pi(\tan^2 \beta - \tan^2 \alpha)$  をパラメータにして、  $n=0$  の条件で  $\sin \alpha$  に対する  $H_L, H_N, h_{LN}$  の特性曲線をそれぞれ Fig. 7, 8, 9 に示す (Fig. 7, 9 は  $N=1.7$  の場合である)。

Fig. 7 より  $S=1$  (曲線 (b)) の  $H_L$  は  $\sin \alpha=0.44$  で極小となり、破線で示した  $H_G$  (同一開口条件でのグレーティングレンズの強度劣化係数<sup>7)</sup>) に比べ 1/9.3 の大きさである。すなわち輪帯開口の最適化により波長誤差による収差を縦の焦点移動収差で吸収でき、軸上光強度の劣化を著しく小さくすることができる。仮に軸上光強度の劣化が 5% まで許容できるものとすれば、  $f=3\text{ mm}$ ,  $\lambda=780\text{ nm}$ ,  $\sin \alpha=0.44$  (このとき  $H_L=1.4 \times 10^{-7}$ ) として、(36)式から  $\pm 2.5\%$  までの波長誤差が許

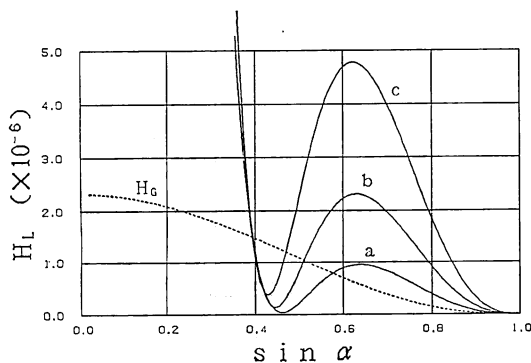


Fig. 7 Characteristic curves of degrading factor  $H_L$  vs. aperture shape factor  $\sin \alpha$ :  $N=1.70$ ,  $n=0$ ; (a)  $S=0.8$ , (b)  $S=1.0$ , (c)  $S=1.2$ . As a reference, the degrading factor  $H_G$  of a grating lens for  $n=0$ ,  $S=1.0$  is shown by a broken line.

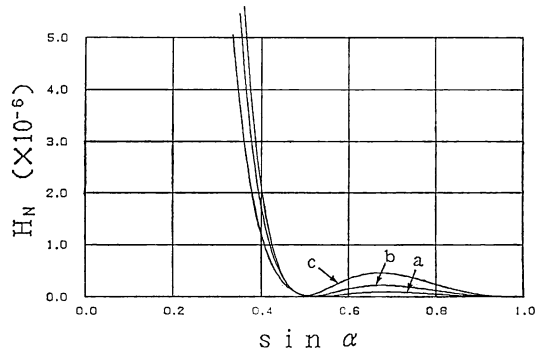


Fig. 8 Characteristic curves of degrading factor  $H_N$  vs. aperture shape factor  $\sin \alpha$ :  $n=0$ ; (a)  $S=0.8$ , (b)  $S=1.0$ , (c)  $S=1.2$ .

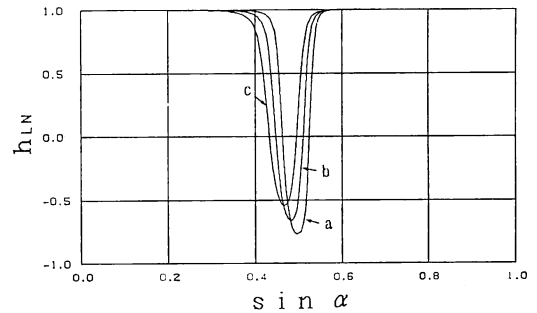


Fig. 9 Characteristic curves of interference factor  $h_{LN}$  vs. aperture shape factor  $\sin \alpha$ :  $N=1.70$ ,  $n=0$ ; (a)  $S=0.8$ , (b)  $S=1.0$ , (c)  $S=1.2$ .

容できる。

また、Fig. 8 より  $S=1$  (曲線 (b)) の  $H_N$  は  $\sin \alpha=0.51$  で極小となる。したがって波長誤差の場合と同様に、輪帯開口の最適化により誤差に伴う軸上光強度の劣化を著しく小さくすることができ、  $f=3\text{ mm}$ ,  $\lambda=780\text{ nm}$ ,  $N=1.7$ ,  $\sin \alpha=0.51$  (このとき  $H_N=1.0 \times 10^{-8}$ ) として、  $\pm 5.5\%$  までの誤差が許容できる。

一方、Fig. 9 より  $S=1$  (曲線 (b)) の  $h_{LN}$  は  $\sin \alpha < 0.38$ ,  $\sin \alpha > 0.55$  の範囲ではほぼ 1 に等しく (すなわち完全に干渉し)、  $\sin \alpha=0.44, 0.51$  ( $H_L, H_N$  の極値点) でゼロとなり (干渉がなく)、  $\sin \alpha=0.48$  で極小値 ( $-0.66$ ) をなす (逆極性での干渉が最も強い)。したがって同時に同程度 (%) の波長誤差、等価屈折率誤差が生じる場合、  $f=3\text{ mm}$ ,  $\lambda=780\text{ nm}$ ,  $N=1.7$ ,  $\sin \alpha=0.46$  として (このとき  $H_L=H_N=2.2 \times 10^{-7}$ ,  $h_{LN}=-0.46$ )、それぞれ  $\pm 1.3\%$ ,  $\mp 1.3\%$  までの誤差が許容できる。

## 5. ま と め

スカラー理論の拡張によって光の偏光を考慮した回折計算を可能にし、このベクトル化された回折式に基づき CFGC からの放射光の集光性を解析した結果、CFGC からの放射光は中心に対する対向位置の電界ベクトルが互いに逆ベクトルであるため、光軸上で打ち消し合って軸上光強度がゼロとなることを明らかにした。したがって、CFGC からの放射光を直線偏光等の均質な偏光に変換する必要があり、液晶を用いた偏光変換素子との組合せを提案した。

また球面収差の最良像点条件を用いて波長誤差および等価屈折率誤差に対する収差解析を行い、各誤差量と最良像点位置の変位幅や Strehl 強度の劣化度合との関係を求めた。その結果、誤差に伴う縦収差量  $\Delta$  が回折角(開口角)  $\theta$  に対してともに極小値を持つ特性を示し、開口形状を極値に挟む輪帯とすることで軸上光強度の劣化を小さく抑えられることが明らかになった。すなわち、CFGC は輪帯開口の最適化により誤差による収差を縦の焦点移動収差に吸収させる(集光性の劣化を焦点位置の移動に置き換える)ことができる。輪帯開口の最適化による効果は大きく、軸上光強度の劣化が5%まで許容できるものとすれば、 $\sin \theta = 0.46 \sim 0.61$  の輪帯開口で波長誤差、等価屈折率誤差とともに  $\pm 1.3\%$  まで許容できる。この特徴は波長誤差や等価屈折率誤差に弱かった従来の FGC に対し、大きな利点である。

なお本論では波長誤差、等価屈折率誤差などの軸対称な誤差を扱ったが、実際は CGC、CFGC 間の偏芯やグレーティングの精度誤差、不均一な等価屈折率誤差なども考えられ、CGC による導波光励起や液晶を用いた偏光変換などにも困難が予想される。今後はこのような課題の見極めを行い、CFGC を用いた光ヘッドの実用化へ向けて研究を進めてゆく。

## 文 献

- 1) D. Heitmann and C. Ortiz: "Calculation and experimental verification of two-dimensional focusing grating couplers," IEEE Quantum Electron., **QE-17** (1981) 1257-1263.
- 2) 裏 升吾, 栖原敏明, 西原 浩, 小山次郎: "光集積ディスクピックアップ用集光グレーティング", 電子通信学会論文誌, **J 68-C** (1985) 803-811.
- 3) S. Ura, T. Suhara, H. Nishihara and J. Koyama: "An integrated-optic disk pickup device," IEEE J. Lightwave Technol., **LT-4** (1986) 913.
- 4) S. Ura, T. Suhara and H. Nishihara: "Aberration characterizations of a focusing grating coupler in an integrated-optic disk pickup device," Appl. Opt.,

26 (1987) 4777-4782.

- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 麻田潤一, 西脇青児, 内田真司, 米澤武敏: "超解像導波路型光ヘッド(3)", 第50回応用物理学会学術講演会予稿集, 309-PB-6 (1989) p. 973.
- 9) 麻田潤一, 西脇青児, 内田真司, 米澤武敏: "超解像導波路型光ヘッドの開発(2)", 1989年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1989) pp. 99-100.
- 10) 久保田広: 波動光学 (岩波書店, 東京, 1971) pp. 278-280.
- 11) 西原 浩, 春名正光, 栖原敏明: 光集積回路 (オーム社, 東京, 1985) p. 16.

## 付 録

### A. 液晶を用いた偏光変換素子

著者らは液晶を用いることで、同心円偏光(放射偏光)と直線偏光との間の変換を実現する偏光変換素子を提案している。Fig. 10はその偏光変換素子の構成図であり、液晶偏光素子と位相差膜からなる。液晶偏光素子は表面をラビング処理した2枚のガラス基盤A, Bの間にネマティック液晶を充填することで形成されており、各ガラス基盤表面のポリミド膜のラビング処理(A側を回転方向, B側を一方向に処理)により、液晶層がA側で円接線方向に、B側で一方向に配向し、円周上で液晶ツイスト角の大きさが連続的に変化している。一般にTN構造液晶層に直線偏光の光が入射するとTN構造のねじれに沿って光の振動面が回転するので、A側から入射した同心円偏光(放射偏光)の光は各位置での液晶ツイスト角に等しい角度だけ振動面が回転し、B側液晶分子の配向方向に沿った振動面(偏光面)の直線偏光の光となる。なお液晶ツイスト方向は素子の中心から伸びた2本の半直線(disclination line)を境に反転するので、光の振動面の回転方向も反転する。すなわち、disclination lineを挟む一方の領域で変換された直線偏光の光は他方の直線偏光の光に対し逆ベクトルをなし、言い換えれば位相が $\pi$ だけ遅れる。この位相遅れを補正するために、ガラス基盤Bの表面に $\lambda/2$ 位相差膜を形成し、その境界線を液晶のdisclination lineに一致させることで、2領域での直線偏光の方位が揃い、完全な直線偏光への変換が実現できる。またこの変換は可逆的であり、位相差膜側から入射する直線偏光の光は同心円偏光(放射偏光)に変換される。

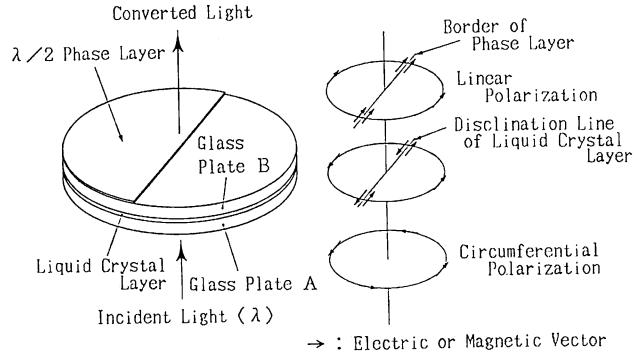


Fig. 10 Schematic diagram of polarization converter constructed by a liquid crystal and  $\lambda/2$  phase layer.

**B. 円偏光入力と放射光**

CGC への入力光が同心円偏光（放射偏光）の場合は励起される導波光の位相が伝播方位に依らず一様であるが、円偏光の場合は伝播方位に依存し、方位角（入力位置の偏角  $\phi$ ）に相当する位相遅れを伴う。したがって円偏光入力の場合、CFGC からの放射光は初めから(20)式で表され、Fig. 3 の位相差板による変換の必要がない。

**C. 近似の適応範囲**

最良像点位置を与える条件式(23)と同様、近似式(36)の前提条件は開口内のすべての領域（すなわち  $\alpha \leq \theta \leq \beta$ ）で  $|f/\cos\theta + z \cos\theta - \psi_0| < 1/\kappa$  を満たすことであ

る。言い換えれば、任意の実数  $n$  に対し次式が成り立つことが必要条件となる。

$$\int_{\alpha}^{\beta} \cos^n \theta \tan \theta \{f/\cos \theta + z \cos \theta - \psi_0(\theta)\}^2 d\theta \leq I_{1-n}/\kappa^2 \tag{a}$$

上式は次のように書き換えられる。

$$\kappa^2 f^2 \{H_L(d\lambda/\lambda)^2 - 2h_{LN}(H_L H_N)^{1/2} dNd\lambda/\lambda + H_N dN^2\} \leq 1 \tag{b}$$

すなわち軸上光強度の劣化が 75% 以下であれば(36)式が成り立つと考えてよく、劣化の度合いが小さいほどその精度は高い。