

# 研究

## プラスチックグレーティングコリメータレンズ

後藤 顕也\*・森 一成\*\*・樋口 義則\*・上田 勝宣\*\*\*

\* (株)東芝総合研究所 〒210 川崎市幸区小向東芝町 1

\*\* (株)東芝電子技術研究所, \*\*\* 同生産技術研究所 〒235 横浜市磯子区新杉田町 8

(1989年3月16日受理)

### Plastic Grating Collimating Lens

Kenya Goto,\* Kazushige Mori,\*\* Yoshinori Higuchi\* and Katsunobu Ueda\*\*\*

\* Research and Development Center, Toshiba Corporation,  
1, Komukai Toshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki 210

\*\* Electronic Device Engineering Laboratory, \*\*\* Manufacturing Engineering Laboratory,  
Toshiba Corporation, 8, Shinsugita-cho, Isogo-ku, Yokohama 235

A plastic lens, which is thicker in the center than in the outer edges, usually can not be used as a collimating lens in an optical disc head without any auto-focus function. This is because plastic has one-order larger thermal expansion coefficient and two-order larger refractive index change than glass, and because they cause large focal distance shift with temperature change. A 1.5 mm thick plane parallel plastic plate of a  $1.5 \mu\text{m}$  engraved surface with chirped blazed circular gratings has been developed as the first plastic grating collimating lens (GCL) with much less temperature change and mass-produced for a Toshiba optical disc head, TOPH 7820. The diffraction efficiency of the GCL is 82% close to a theoretical one that is 85% derived from electro-magnetic wave equations. This high efficiency was obtained by a precision molding die processed with a diamond turning lathe and by plastic replication techniques.

#### 1. ま え が き

集積光学化ヘッドは平面光導波路の基板やクラッド層に形成した chirped curved grating から LD 光を導波路外の空間の一点に焦点を結ばせる技術が一つのポイントである。1983年に光ヘッド用 LD を用いた waveguide grating coupler out of plane を初めて発表<sup>1,2)</sup>したが、光ディスク上での  $1.6 \mu\text{m}$  のスポットサイズ実現の困難性と LD パワー結合損失の問題、全体のサイズと量産性・経済性の問題がある。1985年に集積光学ヘッド<sup>3)</sup>の実験が報告されたが、光導波路応用集積光ヘッドは現在の技術では実用化困難である。したがってそれにかわって個々部品の高性能・低コストプラスチック(プラ)化の研究が行なわれている。

プラ材料の線膨張係数と屈折率の温度変化はガラス材

料と比較するとそれぞれ10倍と100倍である。それゆえ中心部が厚肉で周辺部が薄い形状のプラレンズは温度が変わると焦点距離が変化し波面収差も劣化する。オートフォーカス機能のあるアクチュエータ(ACT)と一体で使用される対物レンズに(OL)は非球面プラ OL<sup>4)</sup>が使用できる。しかし、それ以外では精度の高い光学系にプラレンズは使用されない。コリメータレンズ(CL)にはオートフォーカス用 ACT が付いていないので、非球面プラレンズは使えない。そこで屈折型レンズに代わって平板形状でもレンズ作用のある回折型のプラレンズを開発した。グレーティング・コリメータレンズ(GCL)と称し、量産と実用化に成功したので設計と特性の概要を報告する。

## 2. ホロレンズや電子ビーム描画レンズの問題点

回折型レンズは大阪<sup>5)</sup> やソニー<sup>6)</sup> の He-Ne レーザ一光用ホロレンズの研究が著名である。再生用の LD 波長とホログラム記録用の波長が異なれば波面収差が著しく劣化するので 780 nm の LD 波長で記録可能な感度と分解能のあるホログラム材料が開発されるまで光ヘッドへは実用できない。そこで、縮小露光や電子ビーム (EB) 描画によるグレーティングレンズ (GL) が大阪<sup>7)</sup> をはじめとして多くの研究機関で開発されてきた。筆者らも光ヘッド用を目的として、電子ビーム法による 780 nm の波長で使用可能な高 NA グレーティング OL<sup>8,9)</sup> を試作した。ビーム中心強度の  $e^{-2}$  の直径で測定し 1.3  $\mu\text{m}$  のスポットサイズが得られ、三菱電機の縮小露光法による試作<sup>10)</sup> とともに EB 法の最初の高 NA (=0.5) GL であった。しかし縮小露光法ではステップ状のレリーフしか得られず、EB 法でも現実には得られる GL は回折効率がせいぜい 50% であった。また、レンズの有効面積が  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  程度と狭すぎ、斜め入射許容角度も狭いなど実用化には問題がある。もし、高回折効率化と有効口径 5 mm 以上の大面積化が実現できれば、斜め入射許容角度が狭くても CL には適用できる。

## 3. グレーティングの回折効率理論計算

ブレード高  $h_m$  で、Fig. 1 に示すようなレリーフ断面形状の回折格子を考える。領域 I を屈折率  $n_0$  の空気、領域 II をピッチ  $A$  の回折格子、領域 III を屈折率  $n_s$  のプラスチック基板とし、波長  $\lambda$  の TE 波と TM 波のレーザー光を  $\theta$  の角で入射させる。それぞれの波動方程式を立て、境界条件を与えてグレーティングによる入射光の透過回折効率と反射回折効率とを数値計算により求めた。

TE 波に対する波動方程式は (1) 式で、各領域の屈折率と電界分布はそれぞれ (2) 式と (3) 式で与えられる。

$$\nabla^2 E + k_0^2 n^2(x, z) E = 0 \quad (1)$$

$$n^2(x, z) = \begin{cases} n_0^2 & z \geq h_m \\ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \tilde{a}_m(z) \exp(imKx) & 0 \leq z \leq h_m \\ n_s^2 & z \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$E(x, z) = \begin{cases} \exp[-i\{\kappa_0 x - \beta_{10}(z-t)\}] + \sum_{m=-\infty}^{\infty} \tilde{R}_m \exp[-i\{\kappa_m x + \beta_{1m}(z-t)\}] & z \geq h_m \end{cases}$$

$$E(x, z) = \begin{cases} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \tilde{A}_m(z) \exp(-i\kappa_m x) & 0 \leq z \leq h_m \\ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \tilde{T}_m \exp\{-i(\kappa_m x - \beta_{3m}z)\} & z \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

ここで、 $\kappa_m = \kappa_0 + mK$ 、 $\kappa_0 = k_0 n_0 \sin \theta$  であり、 $k_0 (= 2\pi/\lambda)$  は光の伝播定数を、 $K (= 2\pi/A)$  はグレーティングベクトルの大きさを表わす。 $\tilde{R}_m$ 、 $\tilde{A}_m$ 、 $\tilde{T}_m$  はそれぞれの領域の  $m$  次回折波電界の、 $\tilde{a}_m$  は誘電率の各展開係数である。 $\beta_{1m}$  は Fig. 1 の領域 I における  $m$  次回折波の伝播定数の  $z$  方向成分、 $\beta_{3m}$  は領域 III における  $m$  次回折波の伝播定数の  $z$  方向成分を表わす。 $\beta_{10}$  は領域 I における入射波の伝播定数の  $z$  方向成分である。

GL の回折効率の理論的限界値を知るために、これらの結果のうち、透過光の一次回折効率のみについてグラフに表示したのが Fig. 2 である。ただし、計算では空気の屈折率  $n_0$  を 1、基板の屈折率  $n_s$  を 1.5 とした。

図は格子面ならびに平面に反射防止膜コーティングのない場合で、横軸に波長で規格化した格子ピッチ ( $A/\lambda$ ) を縦軸に透過回折効率を % で表示している。この結果、 $A/\lambda$  のサイズが回折効率に強く影響していること、波長  $\lambda$  に比較してピッチ  $A$  が十分に広い場合には回折効率

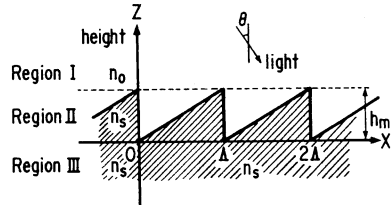


Fig. 1 Relief grating model with grating period  $A$  and grating height  $h_m$ .

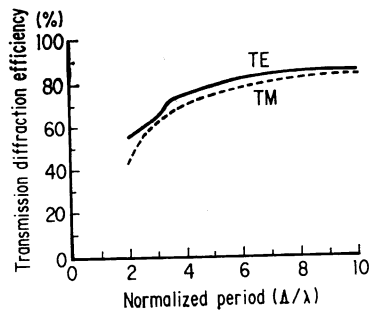


Fig. 2 Transmission diffraction efficiencies of fundamental diffracted waves vs normalized grating period ( $A/\lambda$ ).

の理論的限界値は TE 波のほうが若干高く約 87% で TM 波は約 85% であることなどが明らかになった。ピッチ  $A$  がレーザー波長  $\lambda$  程度にまで狭くなると一次回折光はほとんど得られない。  $A$  が波長の 2 倍のときは約 50% であり、高い回折効率を得るには、少なくとも 5 倍以上のピッチによる 80% 以上の効率を旨とするのが望ましい。

#### 4. GCL 設計値と目標波面収差

光ヘッドは LD 光の中心強度の  $e^{-2}$  に低下する強度の直径で測定して約  $1.6 \mu\text{m}$  以下に絞り込む必要がある。そして回転している光ディスクが上下方向に 2 mm, 左右方向に 0.8 mm も揺動して絞り込まれたビームウエストを常に正確にトレースするために、それぞれ  $\pm 1, \pm 0.1 \mu\text{m}$  の精度で焦点誤差検出信号とトラッキング誤差検出信号とを出力する。これらの信号は外部電子回路で増幅されて再び光ヘッドに入力され、OL アクチュエータにより光ディスク情報記録面上で焦点位置とラジアル位置制御が行なわれる<sup>11)</sup>。レーザー光を回折によって制限されるまで細く絞るためには LD, 回折格子, CL, ビームスプリッター (BS), OL の全光学部品波面収差を Maréché Criterion 基準値の  $0.07\lambda$  以下にキープしておく必要がある。これを次のように七つに分けて考える。LD と回折格子にそれぞれ  $0.013\lambda, 0.015\lambda$ , BS に  $0.015\lambda$ , CL に  $0.025\lambda$ , OL に  $0.03\lambda$ , OL のコマ収差補正用角度調整に  $0.025\lambda$ , 光ディスク自身に  $0.05\lambda$  を与えた場合の全体の根自乗平均値が  $0.072\lambda$  となり、目標に近くなる。OL の波面収差を  $0.03\lambda$  に抑えたとしても CL を  $0.025\lambda$  以下にしなければ基準値をオーバーし、ディスク面上でビームウエストが大となり、エラー発生頻度が高くなる。そこで CL の波面収差を  $0.025\lambda$  以下にするために従来は 1 群 2 枚構成の球面ガラス組合せレンズ (ダブルレット) が使われていた。なぜならプラ非球面レンズは温度変化による焦点距離変動が大きすぎ、ガラス非球面レンズは高価すぎたからである。本研究では軽量・低コストにするために上記ダブルレットに代えプラ GCL の開発と光ヘッドへの搭載実用化が目標である。

OL の有効口径は  $4.1 \text{ mm}$  である。OL はピット列を追従するためにディスクのラジアル方向に  $\pm 0.4 \text{ mm}$  もシフトされるので CL からの平行ビーム径は少なくとも  $4.1 \text{ mm} + 0.8 \text{ mm}$  が必要である。ビームの中心と OL の ACT 中心とがずれる場合を考慮して CL 平行ビーム径を  $5.2 \text{ mm}$  にする。また CL は光ヘッド内で

LD からの送光ビームとフォトダイオードへの受光ビームの折り返し 2 回使われる<sup>11)</sup>ので、低効率ではパワー損失が大きい。そこで理論的な回折効率の限界値 85% のせいぜい 10% down の 75% が得られる GCL プレーズ化形状加工精度がポイントとなる。

#### 5. プレーズ化輪帯半径 $r_m$ と高さ $h_m$ の設計

一次回折光の透過回折効率の理論限界が明らかになったので実用化を目的とした GCL の具体的設計を行なう。

Fig. 3 に模式図を示す。GCL は LD からの球面波を平面波に変換する。設計においては図の左から平面波が入射して球面波に変換される場合を考える。入射平行光がプレーズ化輪帯群で回折し焦点  $F$  に集光する。  $m$  番目の輪帯を出た光線と中心を通る基準光線との光路差が波長の  $m$  倍であることから、(4) 式が成り立つ。これから  $m$  番目の鋸歯状輪帯半径  $r_m$  とその高さ  $h_m$  は

$$(r_m^2 + f^2)^{1/2} - f = m\lambda \quad (4)$$

$$\therefore r_m = (2mf\lambda + m^2\lambda^2)^{1/2} \quad (5)$$

$$h_m = \lambda / \{n_s - f / (r_m^2 + f^2)^{1/2}\} \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 $f$  はレンズの焦点距離である。

光ヘッドへ実装するためのレプリカ GCL の具体的な数値設計をする。従来のガラス球面研磨の 1 群 2 枚構成レンズを代替可能とするために GCL とダブルレットとの仕様を同一とした。焦点距離  $f$  は  $20.3 \text{ mm}$ , 最外輪帯直径  $2r_{\text{max}}$  (=有効口径  $D$ ) を  $5.2 \text{ mm}$  とする。

$$\lambda^2 m^2 + 2f\lambda m - r_{\text{max}}^2 = 0 \quad (7)$$

を解き GCL の総輪帯数  $m = 215$  を得る。この  $m$  値を用いて最小ピッチ  $A_{\text{min}} (=6.11 \mu\text{m})$  が求まる。つづいて  $\text{NA} = 0.127$ ,  $h_{215} = 1.58 \mu\text{m}$ ,  $h_1 = 1.6 \mu\text{m}$ ,  $A_{\text{max}} =$

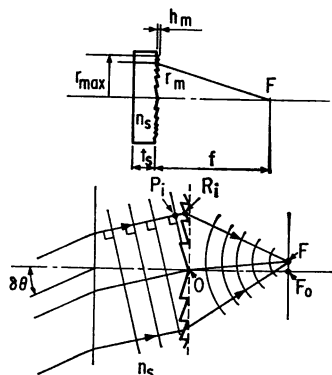


Fig. 3 Conceptual illustration for a GCL and symbols used in GCL ray tracing designing.

$r_1=178 \mu\text{m}$  が得られる. ここで仮に  $\text{NA}=0.47$  の OL を考えると,  $A_{\text{min}}$  は  $1.66 \mu\text{m}$  となり, 量産の加工精度の点でもかなり厳しくなるし,  $(A/\lambda)$  値も最外周で 2.12 となり Fig. 2 から回折効率もかなり低下すると考えられる. しかし,  $\text{NA}=0.127$  の CL ならば  $A_{\text{min}}$  は  $6.11 \mu\text{m}$  であり, 加工精度の点でも問題ない. また  $(A/\lambda)$  の最小の値も 7.87 倍となり理論上十分な回折率が得られるはずである.

### 6. GCL 諸性能・諸特性考察

GCL の温度変化や加工誤差等の影響を検討するため, 光線追跡法を用いたシミュレーションを行なった. その方法を Fig. 3 で説明する. まず, 設計上の焦点  $F_0$  の近くに任意に点 F を設定する.  $m$  番目の GCL レリーフ表面上の点  $R_i$  を出て点 F に進む波の光路長は  $n_i \cdot \overline{P_i R_i} + \overline{R_i F}$  であるから, 基準光線との光路差  $\delta L_i$  は

$$\delta L_i = n_i \cdot \overline{P_i R_i} + \overline{R_i F} - (\overline{O F} + m\lambda) \quad (8)$$

となる. ここでは GCL 中心を通る光線を基準線にとつてある. この光路差の 2 乗平均値を計算することにより, レンズのもつ波面収差 (RMS 値)  $\delta w$  が求まる.

$$\delta w = \{ \langle \delta L_i^2 \rangle - \langle \delta L_i \rangle^2 \}^{1/2} \quad (9)$$

数多くの点について上の波面収差を求め, それらの点のうち  $\delta w$  が最小となる点として焦点 F を決定する. GCL の波長依存性, 温度変化に対する焦点距離変動特性, 有効視野角特性をそれぞれ波面収差の増加量で比較する.

#### 6.1 波長依存性の検討

波長変動に対する焦点距離の変動 ( $\delta f/\delta \lambda$ ) を計算する. グレーティングレンズの基本の (4) 式の両辺を偏微分し,  $(f+m\lambda)\delta \lambda = -\lambda \delta f$  を得る.  $\text{NA}=0.127$  と小さいため  $f \gg m\lambda$  であり, 左辺の式は  $f\delta \lambda$  となる.

$$\delta f = -f \cdot \delta \lambda / \lambda \quad (10)$$

$\delta \lambda$  を 1 nm 変化させたとき  $\delta f$  は  $0.026 \text{ mm}$  となる. 次に上式で無視した第 2 項を正確に考慮することにより, コンピュータによる光線追跡を行ない, 波長の変化  $\delta \lambda$  による波面収差  $\delta w$  を計算すると, Fig. 4 に示すように,  $\delta \lambda = \pm 10 \text{ nm}$  で  $\delta w \leq \lambda/100$  であり LD の波長設定にバラツキがあっても本ピッチ構成の GCL は光ヘッドの CL として組立て時に一度調整しておくだけで問題なく使用できる.

#### 6.2 温度変化による焦点距離変動の検討

温度変化の影響は GCL 光学材料の熱膨張と屈折率の変化, LD の波長変化となって現われる.  $f \gg m\lambda$  であるから, 再び (7) 式の両辺を温度  $T$  で微分する.

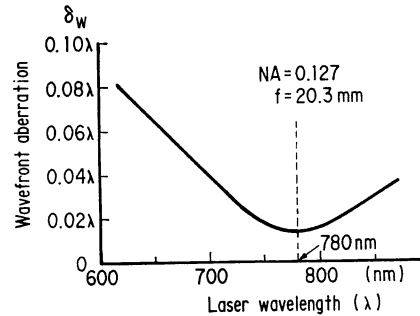


Fig. 4 Wave-front aberration degradation vs wavelength shift.

$$\frac{1}{f} \cdot \frac{\delta f}{\delta T} = 2\alpha - \gamma \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{1}{R_m} \cdot \frac{\delta R_m}{\delta T} = \text{線膨張係数} \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\delta \lambda}{\delta T} = \text{LD 波長の温度変化係数} \quad (13)$$

屈折率の温度変化は PMMA, poly carbonate (PC), polystyrene (PS), BK-7 ガラスでそれぞれ  $-1.2, -1.4, -1.5, 0.01$  (各  $\times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ ) であり, 線膨張係数は PMMA と PC で 70, PS で 80, BK-7 ガラスで  $9(\times 10^{-6}/^\circ\text{C})$  である. ガラスに比較してプラスチックは屈折率が百倍, 線膨張係数が 10 倍程度も温度変化率大きい. ところが, GCL では屈折率の温度変化は回折効率の低下となるだけで収差としてはあらわれない. さらに (11) 式からわかるように, レンズの熱膨張と発振波長の温度変化の二つの効果が互いに打ち消し合うように働き, その結果, 温度変化により生じる焦点距離変動は屈折型のプラレンズよりも大幅に小さくなる. (11) 式から温度変化による GCL の焦点距離変動  $\delta f/\delta T$  を求めた. 結果を Fig. 5 に示す.  $-5 \sim 55^\circ\text{C}$  の通常の光ヘッド使用温度範囲つまり常温  $25^\circ\text{C}$  を中心とした温度変化  $\delta T = \pm 30^\circ\text{C}$  で  $\delta f = \mp 60 \mu\text{m}$  のみの変化となり, 通常の使用温度範囲では全く問題がない.

また, 光線追跡法によって求めた  $\delta T = \pm 30^\circ\text{C}$  の温度変化による波面収差の増加量  $\delta w$  は  $\lambda/100$  以下である.

#### 6.3 GCL 有効視野角の検討 (波面収差の入射角依存)

球面単レンズに平行光束を入射させると一般にレンズで屈折して透過した光線は一点には集まらない. それに対して GCL ではレンズに垂直に入射した光に対して無収差で焦点に収束させるように設計することができる.

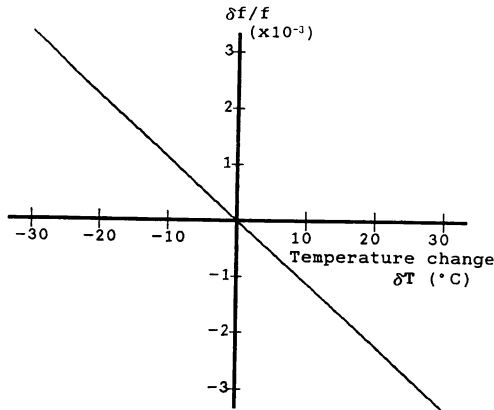


Fig. 5 Focal distance shift against wavelength change. Laser diode and GCL should be adjusted when it is settled in an optical disc head, but once adjusted its temperature shift is very small shown as in Eq. (11).

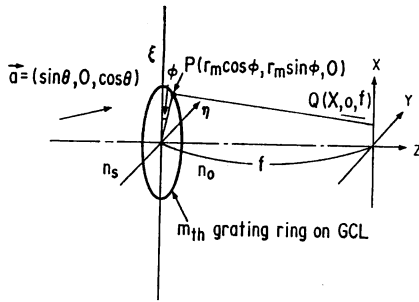


Fig. 6 PQ is an optical path difference between point P represented by  $\xi$ - $\eta$  coordinate on a  $m$ th grating ring on GCL and point Q on image plane.

しかしながら、光軸に対して  $\theta$  の角度をなして入射する光に対してはもはや無収差ではなくなり、コマ収差が発生する。

### 6.3.1 GCL のコマ収差係数

GCL に斜めに光が入射した場合にコマ収差が発生し、性能が劣化する。そこで Fig. 6 のような座標系を用いて斜入射によって発生する収差量を求める。ただし入射光線は  $z$  軸と角度  $\theta$  をなし、 $\eta$  軸には垂直である。また、像点は  $x$  軸方向に  $X$  だけ移動すると仮定し、後に波面収差の RMS 値が最小になる点を最良像点とし  $X$  を決定する。 $m$  番目の輪帯上の点  $P(r_m \cos \phi, r_m \sin \phi, 0)$  を出て、像面上の点  $Q(X, 0, f)$  に集まる光線のレンズ中心を通る光線との光路差  $OPD(r_m, \phi)$  は(14)式で与えられる。

$$OPD(r_m, \phi) = \sqrt{f^2 + r_m^2 - 2r_m X \cos \phi + X^2} + n_s r_m \cos \phi \sin \theta - \sqrt{f^2 + X^2} - m\lambda \quad (14)$$

第2項は斜入射の光がすでにもっている光路差である。 $X \ll f$  であるから、 $X/f$  の一次まで近似的に展開すれば

$$OPD(r_m, \phi) = \sqrt{f^2 + r_m^2} \left( 1 - \frac{r_m X \cos \phi}{f^2 + r_m^2} \right) + n_s r_m \cos \phi \sin \theta - (f + m\lambda) \quad (15)$$

となるが、ここで(4)式の関係を用いてさらに  $r_m \ll f$  であるので次の式に簡略化される。

$$OPD(r_m, \phi) = r_m \cos \phi (n_s \sin \theta - X/f) + (1/2)(r_m^3/f^3)X \cos \phi \quad (16)$$

ここで  $r_m$  を連続変数  $r$  と見なせば次式のように書ける。

$$OPD(r, \phi) = W_{11}r \cos \phi + W_{31}r^3 \cos \phi \quad (17)$$

$W_{11}$  は1次の像点移動で、 $W_{31}$  は3次のコマ収差係数であり、 $W_{11} = n_s \sin \theta - (X/f)$ 、 $W_{31} = (1/2) \cdot (X/f^3)$  である。このようにコマ収差係数が与えられると波面収差の RMS 値の  $W_{RMS}$  値、PV 値の  $W_{PV}$ 、最良像面位置の  $X_0$  が計算できる。

$$W_{RMS} = (1/12\sqrt{2}) \{ a^3 n_s \sin \theta / (f^2 - a^2/3) \} \quad (18)$$

$$W_{PV} = (32/9) W_{RMS} \quad (19)$$

$$X_0 = (f \cdot n_s \sin \theta) / (1 - a^2/3f^2) \quad (20)$$

$2a (= D = 2r_{max})$  は有効口径である。 $\theta$  はグレーティング面への入射角である。斜入射により発生する波面収差は傾き角  $\theta$  にほぼ比例する。(21)式に  $f=20.3$ 、 $a=2.6$  mm を入れ  $0.03 \lambda / 0.5^\circ$  を得る。GCL 波面収差の RMS 値劣化を  $0.03 \lambda$  以内に抑える傾斜許容角度は  $\pm 0.5^\circ$  である。

### 6.3.2 平板の傾きによる収差

GCL の傾きにより発生する収差を前項では簡単なモデルを用いて解析した。実際の光ヘッドでは GCL の裏面反射の影響をなくすために、グレーティング形成面を平行光束側とする用い方を採用している。

この場合、GCL が傾くと発散光中に平行平板がおかれることになるため、上で述べたコマ収差以外の収差が発生する。このような平行平板による収差に関してはすでに報告がある<sup>12)</sup>。ここではその結果のみを示す。まず、コマ収差係数  $W_{31}$ 、非点収差係数  $W_{22}$  は

$$W_{31} \approx -t(n_s^2 - 1) / (2n_s^3) \sin^3 \Psi \sin \theta \quad (21)$$

$$W_{22} \approx -t(n_s^2 - 1) / (2n_s^3) \sin^2 \Psi \sin^2 \theta \quad (22)$$

で与えられる。 $t$  は平板厚、 $\sin \Psi = NA$  である。GCL の  $t=1.5$  mm、 $n_s=1.49$ 、 $NA=0.127$  の場合の  $W_{31}$  と  $W_{22}$  の波面収差の RMS 値を求めると、 $\theta=1^\circ$  でそれぞ

れ,  $0.0016\lambda$ ,  $0.0004\lambda$  ときわめて小さな値となる。それゆえ GCL の傾きによる収差としては, 6.3.1 項のグレーティング形成面が傾いているために発生するコマ収差のみを考慮すればよいことがわかる。

6.3.3 光線追跡法によるシミュレーションの結果

(16)式で与えられる光路差  $OPD(r_m, \phi)$  を GCL 輪帯上の各点において計算し, その 2 乗平均をとり波面収差の RMS 値が計算できる。輪帯を円周方向に細かく分割し, 点  $P(r_m, \phi_i)$  を通る光線の光路差を  $OPD(r_m, \phi_i)$  とすれば波面収差は

$$W_{RMS} = \sqrt{\langle OPD(r_m, \phi_i)^2 \rangle - \langle OPD(r_m, \phi_i) \rangle^2} \quad (23)$$

で与えられる。ただし,  $\langle A(r_m, \phi_i) \rangle$  は平均を表わし,

$$\langle A(r_m, \phi_i) \rangle = \frac{\sum_{i,m} A(r_m, \phi_i) \delta S(r_m, \phi_i)}{\sum_{i,m} \delta S(r_m, \phi_i)} \quad (24)$$

$$\delta S(r_m, \phi_i) = (1/2)(r_m^2 - r_{m-1}^2)(\phi_i - \phi_{i-1}) \quad (25)$$

である。この波面収差の RMS 値が最小となる点を最良像点とした。結果を Fig. 7 に示す。6.3.1 項の近似展開により求めた結果も合わせて示してある。これからわかるように, 角度が大きくなるにつれ, 3 次以上の高次のコマ収差がでてくるためシミュレーション値のほうが若干大きくなるが, 両方の結果はかなりよく一致している。

つぎに  $OPD(r_m, \phi_i)$  を計算したのち, 最良像点近傍におけるスポット像強度分布  $I(x)$  を求めた。  $I(x)$  は

$$I(x) = \left| \frac{A}{i\lambda} \int_{\Sigma} \frac{\exp\{(2\pi/\lambda)OPD\}}{l} dS \right|^2 \quad (26)$$

で与えられる。  $A$  は入射波の振幅,  $l$  は光学的距離であ

り,  $\int_{\Sigma} dS$  は GCL の有効面についての積分を意味する。上式の積分を上と同様な方法で細かく分割した領域での和に置き換え,  $I(x)$  を計算した。結果を Fig. 8 に示す。

これからわかるように, スポットの中心強度が 80% となるのは傾き角  $\theta$  が  $1.2^\circ$  のときである。これは Strehl definition による  $\lambda/14$  RMS の波面収差に対応する。一方, Fig. 7 から  $\theta=1.2^\circ$  のとき  $0.07\lambda$  程度の収差が生じることがわかる。このように二つの結果は非常によく一致している。開口数 NA をパラメータにして GCL に入射する光ビームの入射角が光軸から角度  $\theta$  だけズレた場合について計算で求めた焦点近傍の波面収差の変化の様子を Fig. 9 に示す。

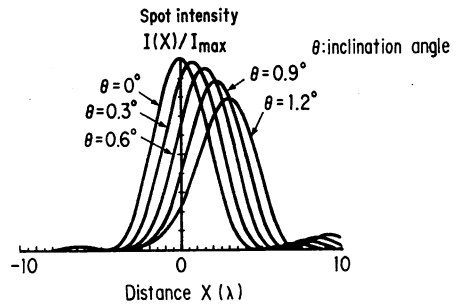


Fig. 8 Theoretical spot pattern intensity distribution with incident beam angle variation.

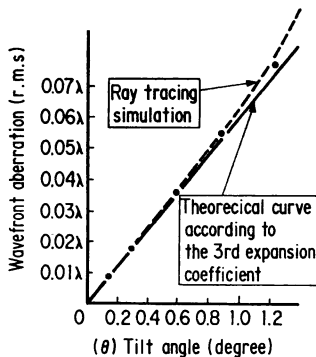


Fig. 7 Theoretical comparison of wave-front aberration degradation for inclined beam angle to the GCL between coma aberration increment by Eq. (18) and ray tracing simulation by Eq. (23).

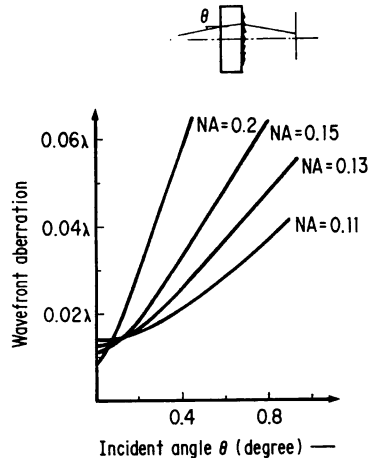


Fig. 9 Wave-front aberration degradation vs incident angle increment in GCLs for various NA.

## 7. グレーティングコリメーターレンズの製作

① 直径 2mm $\phi$  よりも大形の原盤加工が可能で、  
② 確実なブレース化加工が可能、かつ③ 原盤加工時間が短い、という条件を備えた回転対称で超精密な原盤加工方法を検討した。その結果ダイヤモンドターニングマシンすなわち超精密 CNC 旋盤による方法がいまのところベストであると判断した。結果的にわかったことであるが、金型材料選定の面、加工精度の面、加工工程数の面とともに非球面レンズ金型よりも GCL 金型のほうが優れている。そして、金型寿命もきわめて長い。

### 7.1 ダイヤモンドターニングマシンによる原盤製作

① 原盤加工用 CNC 数値制御装置、② レーザーによる精密位置決め装置、③ 空気軸受・防振台・防振基礎の新設、④ 精度の高い二重温度制御、などの導入や開発により超精密 CNC 旋盤の構築を行なった。GCL 各数値の設計データからテープを作成し、超精密 CNC 旋盤に入力し、GCL 形状を反転させた原盤を切削した。レンズが回転対称であり、かつ、鋸歯状断面形状であるので、理論計算結果の Fig. 2 からも規格化した回折格子ピッチ ( $A/\lambda$ ) が 3 以下に小さくならないかぎり断面形状が多少不完全でも回折効率は低下しない。

表面絞り形空気軸受スピンドルを搭載した CNC 旋盤の主軸端面に加工物を取り付け、 $x-z$  2軸制御により加工テーブル上の刃物台に固定したダイヤモンドバイトの刃先を、GCL の反転形状に沿って動作させ鋸歯状断面輪帯を切削した。バイトは天然単結晶ダイヤモンドで、先端に幅 0.4  $\mu\text{m}$  の面取りコーナーを設けたものを使用し、主切れ刃および 0.4  $\mu\text{m}$  幅の副切れ刃との二つの切れ刃を加工に利用する。バイトに送りを与えて主切れ刃で溝微細加工を行ない、副切れ刃によって鋸歯状の傾斜面を切削すると、0.025  $\mu\text{m}$  R の細かい凹凸を除去できる。微少な切削のために加工面の変形は少ない。主切れ刃のみでの加工では非球面レンズ原盤加工に見られるように 0.025  $\mu\text{m}$   $R_{\text{max}}$  の鏡面に仕上げるができるが、鋸歯状の加工斜面の変形を生じやすい。バイト送り速度を 0.1 mm/min 程度に遅くすると 0.01  $\mu\text{m}$   $R_{\text{max}}$  の表面粗さが得られる。

EB 法における従来のブレース化加工は電子線のドーズ量を変えていたが完全ではなかった。また EB 法では幅のある線の塗り潰し加工が不得意で台形処理や矩形処理による点群で埋め尽くす方法を取らざるをえなかった。これに対して本方法では  $z$  軸方向の刃先位置を制

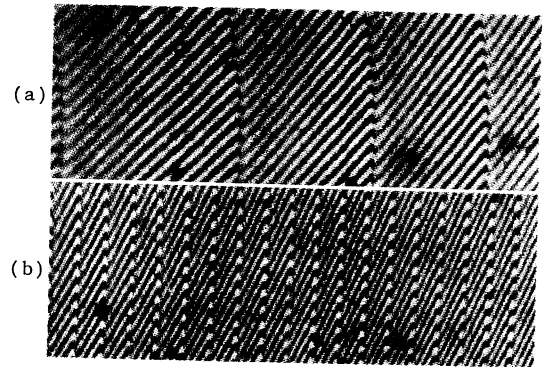


Fig. 10 Interferometric microscopic photographs of a GCL. (a) near the center, (b) near the outermost.

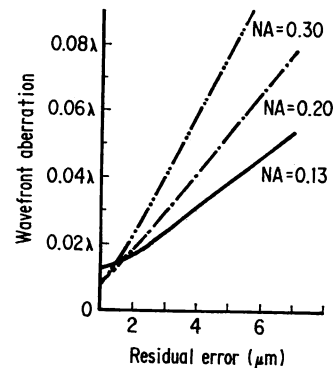


Fig. 11 Wave-front aberration degradation vs residual error between GCL center and spindle axis center.

御することによりブレース化格子の加工が正確にできる。

GCL の鋸歯状グレーティング高さが計算上では一定ではないが GCL 中心部と外周部の最大の高低差はわずか 0.02  $\mu\text{m}$  しかないので、加工精度から考え  $h_m = 1.5 \mu\text{m}$  一定とした。ブレース角は中心部で最小値 9 mrad、最外周部で最大値 260 mrad の傾斜をもっている。Fig. 10 に加工済みの GCL 表面の干渉顕微鏡写真を示す。

### 7.2 加工誤差要因

加工形状誤差による GCL の波面収差への影響は、

- ① GCL の中心と旋盤加工の際の回転中心との差、
- ② ブレードグレーティング面の階段状近似、
- ③ レリーフ形状誤差、
- ④ 射出成形法や 2p 法レプリカへの形状転写誤差がある。

① は回転中心とバイト刃先のズレにより生ずる、いわゆるヘソ残りである。すべての輪帯半径  $r_m$  が一樣に  $\partial r$  だけズレるモデルを考えればよい。このモデルを用

いて(11)(12)式による6章と同様なシミュレーションを行なった結果を Fig. 11 に示す. これによると NA が大きくなればそれだけ厳しくなることはわかるが, 本 GCL の場合には  $NA=0.127$  で, かつ波面収差値を  $0.02\lambda$  以下と設計してあるので, 図から回転中心のズレ  $\theta r$  の許容値は  $2.5\mu\text{m}$  以下となる. 本加工における回転中心誤差の実測値は  $2\mu\text{m}$  以下であり, 波面収差値も  $0.02\lambda$  が確保されていることがわかる. ②の階段状近似ではブレース化格子の傾斜面を  $N$  等分した階段状近似断面モデルを考え, 一様周期の回折格子における回折効率を計算した. その結果, 分割数  $N$  が 10 以上であれば回折効率は 97% 以上となることがわかった. また, レリーフ形状が必ずしも垂直な三角形断面でなくとも傾斜面が粗面でない限り回折効率にはほとんど影響しない.

### 7.3 GCL プラスチックレプリカ作製

これまでグレーティングレンズの研究発表は数多く成されているが, 量産実用化には至っていない. 前述した GCL 金型原盤を用いて, ① プラスチック射出成形法と ② フォトポリマー法とによるレプリカの量産を行なった.

#### 7.3.1 プラスチック射出成形法による量産レプリカ作製

プラスチックレプリカ部品の射出成形容易性・光学特性・量産性を考慮して, GCL レンズ材料として成形後の複屈折が比較的少ない PMMA を用いることとした. 光ヘッドに使用する 780 nm レーザー波長における PMMA の屈折率は 1.4857 である. PC は屈折率が 1.55 と高く硬度ならびに耐熱性にも優れている. しかし, PMMA に比較して射出成形品の複屈折が大きく, 光ヘッドに使用する精密光学部品としては除外した.

プラレンズ成形品として, とくに問題となるのは成形後の残留コマ収差や複屈折の原因となるゲート(流入口)の影響である. これを緩和させるために射出成形 GCL レプリカでは鏡筒状外周を付加させたやや大きな構造にした. GCL に必要な有効口径  $5.2\text{mm}$  の外側に内径  $6\text{mm}$ , 外径  $7\text{mm}$ , 長さ  $2.5\text{mm}$  の円筒を付け加えたものである. 一般に, ゲートから注入された高温樹脂湯がゲートの反対側に衝突し圧縮冷却される際にコマ収差が集中的に発生する. したがって, 鏡筒構造が GCL 有効口径径部におけるコマ収差発生を緩和に役立つ. 射出成形時における充填度が少ない場合は 7.2 項④の加工誤差が発生する. そのモデルとしてレリーフ形状の変化を考え, 一様周期の回折格子における回折効率損失を計算す

ると, 充填度  $\alpha$  が 97% 以上であれば 5% 以下である.

#### 7.3.2 フォトポリマー法による量産レプリカ作製

紫外線フォトポリマー (2p) 法によるレプリカではこの射出成形によるコマ収差発生や複屈折の心配はない. なぜなら射出成形レプリカのようなゲートもなければ約  $300^\circ\text{C}$  の高温樹脂湯の流入・圧縮そして約  $100^\circ\text{C}$  への急速冷却の温度サイクルと急冷の際の樹脂の体積収縮(ヒケ)がないためである. 紫外線フォトポリマー法では基板となる平板プラスチックあるいはガラス板を通して紫外線を基板と GCL 金型原盤との間の紫外線硬化エポキシ樹脂に照射する. 温度サイクルのために一工程が 1 分以上を要する射出成形 GCL レプリカと違い, 紫外線照射時間はわずか数十秒である. 平行平板状基板が必要ではあるが, 光学的特性は射出成形 GCL レプリカに比較して非常に良い値である. 波面収差も常に  $0.02\lambda$  以下でバラツキも少なく歩留まりも高い. 紫外線照射前のエポキシの粘性が低く充填度  $\alpha$  が 100% に達しやすいので平行光線を入射して得られる集光スポット強度つまり一次回折効率は理論的に近い 82% が容易に達成できる (Fig. 12).

## 8. GCL の性能評価

2p 法によるレプリカは検査不要なくらいに品質がそろっている. しかし射出成形によるレプリカの場合は材料中に含有の水分や成形温度・圧力等で品質が左右される. したがって設計値通りの形状に成形されているかを機械的・光学的・電氣的に評価し, 最後に光ヘッドに実装評価する必要がある. 外見的機械的測定としては, ① 干渉顕微鏡, ② 走査電顕 (SEM), ③ 表面粗さ計に

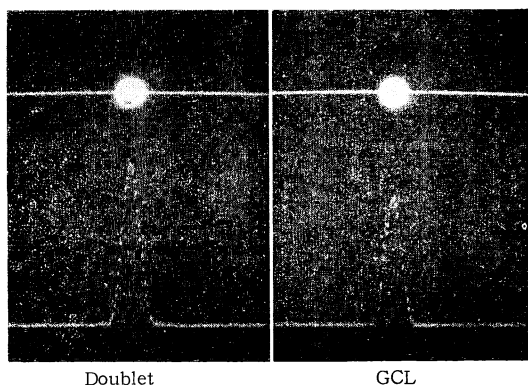


Fig. 12 Focused beam intensity comparison between through a GCL and through a glass doublet using the same collimated 780 nm laser light.



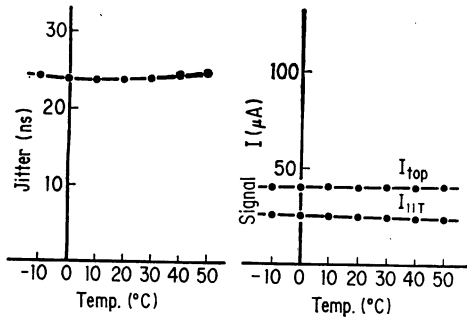


Fig. 13 Temperature characteristics of 3T signal jitter,  $I_{11T}$  signal level, and  $I_{top}$  signal level in a mass-produced optical disc head, TOPH 7820 in which GCL is mounted.

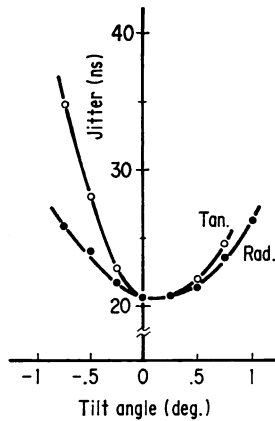


Fig. 14 3T jitter variation vs tilt angle characteristics in a TOPH 7820 optical head against the disc.

よる形状測定がある。光学的測定・評価としては、④ レーザ干渉計 ZYGO Mark-III による波面収差測定、⑤ スタートスターによる点像分布関数測定があり抜き取り検査により実施した。電気的測定としては、⑥ 光ヘッドへ実装しプレーヤから得られる標準ディスクからの EFM 再生信号のアイパターンによる MTF ( $I_{3T}/I_{top}$ ) および再生信号変調度 ( $I_{11T}/I_{top}$ ) 測定、⑦ ジッターメータによる CD デジタルパルス信号のうち  $J_{3T}$  (3T 信号のジッター) 測定がある。

Fig. 13~15 に測定データを Fig. 16 に実装された光ヘッドを示す。以上のように、本方法により開発された GCL は平行平面のプラスチック板の片側に同心円のブレード化されたチャートグレーティングが設計値通りに加工され、GL 特有の斜め入射角度は狭いものの CL としては十分な特性である。GCL はポータブル CD 用とラジカセ用の光ヘッド TOPH 7820 用に初めて量

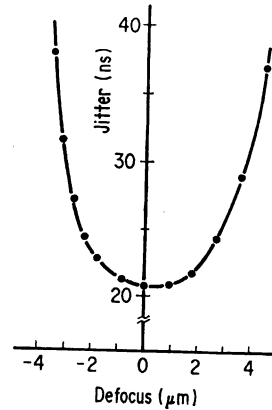


Fig. 15 3T jitter variation vs defocus (defect of focusing) characteristics in a TOPH 7820.

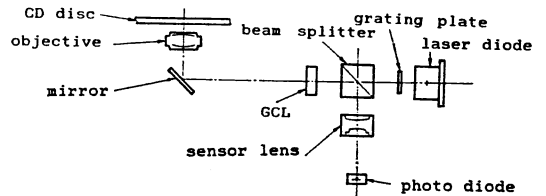
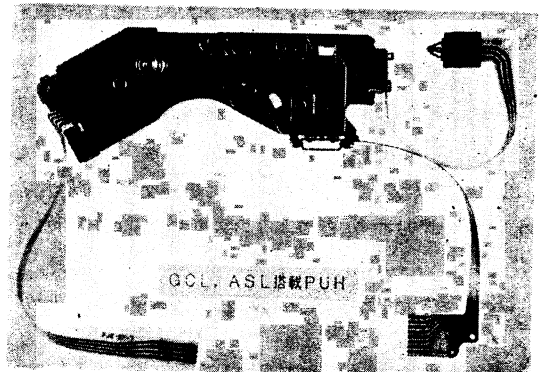


Fig. 16 An optical head, TOPH 7820, in which GCL is mounted and had been mass-produced.

産された。

### 9. まとめ

平板状グレーティングコリメータレンズ GCL の開発・量産・光ヘッドへの搭載<sup>13)</sup>・出荷が実現できた。これは

- ① GCL 採用前の 1 群 2 枚の球面ガラス製ダブルレット単価の約 10 分の 1 の低コスト
- ② ガラスダブルレットレンズ重量の 20 分の 1 と軽量
- ③ レンズ設計・金型製作が容易で長寿命
- ④ 波面収差も十分に低い
- ⑤ 大サイズで回折効率も高いので光ヘッドに使用可

などの優れた理由で実用化された。

反射防止膜をコートしてない GCL でも一次回折効率が理論限界値の 85% に接近した 82% という高い効率に達することができたのは次の理由による。

- ① 量産 GCL 成形用の金型切削に超精密旋盤を用いて理想にほぼ近い形状加工に成功したこと
  - ② 開口数が比較的小さい CL であるために最小格子間隔でもレーザー波長の約 8 倍と広くできたこと
- 電子ビーム法による同心円状不等間隔輪帯群の微細加工に比較して、本加工方法には次のような特長がある。

- ① 広い面積が加工できるので大口径のレンズが可能
- ② 鋸歯状の断面形状加工が EB 法より精度良くできる
- ③ 同心円状の輪帯加工精度が滑らかで加工時間が短い

TOPH 7820 搭載プレーヤは海外のメーカーによる生産が多く、英国や米国で使用されている。従来の無限共役系 OL が最近の有限共役系 OL にとって代わられ CD 用としては CL を必要としなくなりつつある。せっかくの低波面収差、低価格性、薄形軽量、量産性のレンズであるのでこの特性を生かした新規な応用を新たに考えたいものである。回折型レンズの今後の使い方としてビームスプリッター (BS) 的機能をあげることができ<sup>14, 15)</sup>。

また、GCL のような平行平面形状のままでは NA の大きな光ヘッド用 OL に応用することは実現困難であるが、球面ガラスを基板に GCL のような平行平面形状のプラスチックグレーティング薄膜を接合し集光効率が<sup>16)</sup>高く (NA=0.45) 斜め入射許容角度も広い ( $\pm 0.7^\circ$ ) 対物レンズ<sup>16)</sup> (SGL) を構成することも可能である。

このような回折型レンズは GCL や RGL<sup>14)</sup> だけでなく今後もホログラフィック光学素子 (HOE)<sup>15)</sup> としても、研究開発が促進されることであろう。その際の際の原盤加工方法の一端を担えれば幸いである。

本研究を進めるに当たって、(株)東芝総合研究所電子部品研究所・波多腰玄一、(株)東芝電子事業本部要素部品事業部・高橋俊介、(株)東芝生産技術研究所・海陸嘉徳の各氏から適切なアドバイスをいただいたり、実験で多大のご協力をいただいた。これらの方々のご援助なしに本研究を完成することはできなかった。筆者らは心から御礼を申し述べたい。

文 献

- 1) G. Hatakoshi, H. Fujima and K. Goto: "Waveguide grating lenses for optical couplers," *Technical Digest, Topical Meeting on Gradient-Index Optical Imaging Systems*, paper F5 (JSAP, Kobe, 1983), 後藤頭也: 特開昭 57-27086, 特開昭 63-11903.
- 2) G. Hatakoshi, H. Fujima and K. Goto: "Waveguide grating lens for optical coupler," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 1749.
- 3) 裏 升吾, 栖原敏明, 西原 浩, 小山次郎: "光ディスクピックアップの光集積回路化", 電通学会論文誌(C), **J69-C** (1986) 609.
- 4) T. Kiriki, N. Izumiya, K. Sakurai and T. Kojima: "Plastic aspheric lens for the compact disk system," *Conf. Laser & Elect. Opt. '84*, (Cal. USA), *Conf. Digest WB 3*.
- 5) H. Nishihara, S. Inohara, T. Suhara and J. Koyama: "Holocoupler: A novel coupler for optical circuits," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-14** (1975) 794.
- 6) C. Kojima, K. Miyahara, K. Hasegawa, T. Otake and H. Ooki: "Inline holographic lenses of high numerical aperture," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **20**, Suppl. 20-1 (1981) 199.
- 7) T. Fujita, H. Nishihara and J. Koyama: "Fabrication of micro lenses using electron beam lithography," *Opt. Lett.*, **6** (1981) 613.
- 8) G. Hatakoshi, M. Yoshimi and K. Goto: "Off-axis grating lenses fabricated by EB lithography," *Technical Digest, Fourth International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication*, paper 29A2 (IECE, Tokyo, 1983).
- 9) G. Hatakoshi and K. Goto: "Grating lenses for semiconductor laser wavelength," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 4307.
- 10) K. Tatsumi, T. Saheki, T. Takei and K. Nukui: "High-performance micro-Fresnel lens fabricated by UV lithography," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 1742.
- 11) 後藤頭也: "光ディスク用ピックアップ", 光学, **13** (1984) 146. 後藤頭也, 栗原春樹, 高橋好一: "CD用半導体レーザーおよびピックアップヘッド", 東芝レビュー, **39** (1984) 699.
- 12) 久保田重夫: "光ディスクにおけるアイパターンのジッター解析", 光学, **12** (1983) 437.
- 13) 久米雅弘, 大越誠一, 後藤頭也: "コンパクトディスクプレーヤ用超薄形光ピックアップヘッド", 東芝レビュー, **41** (1986) 555.
- 14) K. Tatsumi, T. Matsushita and S. Ito: "Multifunctional reflection type grating lens for the CD optical head," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**, Suppl. 26-4 (1987) 127.
- 15) Y. Kimura, S. Sugama and Y. Ono: "High performance optical head using optimized holographic optical element," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**, Suppl. 26-4 (1987) 131.
- 16) K. Goto, K. Mori, G. Hatakoshi and S. Takahashi: "Spherical grating objective lenses for optical disk pickups," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26**, Suppl. 26-4 (1987) 135.