

# 解説

## 波長変動不感型グレーティングレンズ

山岸 文雄・稲垣 雄史

(株)富士通研究所厚木研究所 〒243-01 厚木市森の里若宮 10-1

(1989年9月7日受理)

### Wavelength Independent Grating Lenses

Fumio YAMAGISHI and Takefumi INAGAKI

Fujitsu Laboratories Ltd., Atsugi, 10-1, Morinosato-Wakamiya, Atsugi 243-01

#### 1. はじめに

カメラや望遠鏡に使用される凹凸面のガラスあるいはプラスチックレンズは光の屈折を利用しているのに対して、グレーティングレンズは、光の回折を利用した光学素子である。グレーティングレンズでは平面あるいは曲面上に2次元の格子縞を設け、面上の各点で光を所望の方向に回折させることにより、目的とするレンズ機能を得ることができる。縞を作成する方法としては、ホログラフィック干渉露光によるものと電子ビーム、機械加工などにより縞を直接形成するものがあるが<sup>1)</sup>、いずれも基本的には縞形状の制御により必要な波面を得ることになる。また、断面からみた縞の形状は、凹凸状のものや一定の膜厚の内部で屈折率が変調されたものがある。グレーティングレンズの特徴として次の点があげられる。

- 1) グレーティングは厚みが数  $\mu\text{m}$  以下の薄膜のため、機器の小型、軽量化および集積化が可能である。
- 2) 格子縞の設計により、無収差レンズをはじめとする任意の波面をもつレンズが得られる。
- 3) 回折の原理により光を大きく曲げられるため、NA の大きな明るいレンズあるいは偏向角度の大きな光走査器が容易に実現できる。
- 4) 光走査器に使用する場合、入射角と出射角を等しくすることにより回転系の機械精度を緩和できる。
- 5) 光の透過と回折を利用することによりハーフミラーのような光を分割する機能がある。
- 6) 凹凸レンズ、ハーフミラー、光フィルタなどの機

能複合あるいは多重露光による異種のレンズ複合が可能である。

7) 複製による量産に適している。

以上の特徴により、近年では POS スキャナ<sup>2-4)</sup>、レーザープリンタ用スキャナ<sup>5-8)</sup>、光ディスクメモリ用ヘッド<sup>7-14)</sup>などへのグレーティングレンズの応用が盛んに研究され、実用化が進められている。

一方、グレーティングレンズには回折原理により色収差が大きいという問題がある。屈折型レンズに比べると色収差は実に 20~30 倍の大きさをもつ。そのため、半導体レーザー、LED などのわずかな波長変動あるいは波長分散によってグレーティングレンズの光学性能が劣化する。グレーティングレンズの使用光源を拡大するためには色収差補正技術の開発が重要となっている。

本稿では、グレーティングレンズにおける色収差補正に関する最近の技術動向を解説する。

#### 2. 波長変動によるグレーティングレンズ性能の変化

##### 2.1 半導体レーザーにおける波長変動

現在、光ディスクなど多くの光応用機器の光源に半導体レーザーが使用されている。そこで、その波長変動について簡単に述べる。代表的な単一モードの半導体レーザーでは図1に示すように周囲温度の変化により波長が不連続的に変化する。これはモードホップと呼ばれる。レーザーにより異なるが、モードホップによる波長変化は 2 nm にも及ぶことがある。代表的なレーザーでは、50°C の温度変化に対して波長変化  $\Delta\lambda$  は 10 nm 程度で

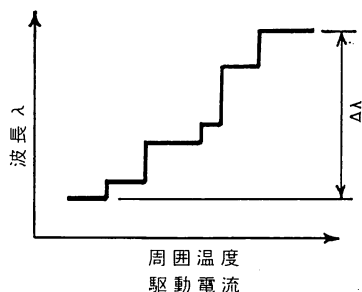


図 1 半導体レーザーの波長変化

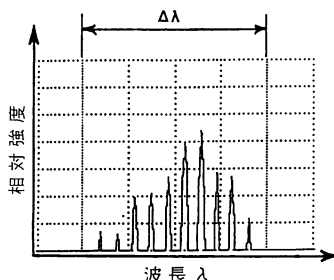


図 2 半導体レーザーの波長分散

ある。また波長はレーザーの駆動電流によっても不連続的に変化し、50 mA の駆動電流変化に対して波長が 5 nm 程度変化する。さらに、高周波駆動により図 2 に示したようなマルチモードが発生し、これにより 5 nm 程度の波長分散が生じる。以上を総合すると、半導体レーザーでは通常 20 nm 程度の波長変動が生じることになる。

### 2.2 グレーティングレンズの回折法則

図 3 に示すようにピッチ  $d$  をもつグレーティングに波長  $\lambda_0$  の光が角度  $\theta_1$  で入射し、角度  $\theta_2$  で出射する場合、よく知られた次の回折法則が成立する。

$$\sin \theta_1 + \sin \theta_2 = \lambda_0 / d \quad (1)$$

いま、波長が  $\Delta\lambda_0$  だけ微小変化すると、必然的に出射角  $\theta_2$  は次式により  $\Delta\theta_2$  変化する。

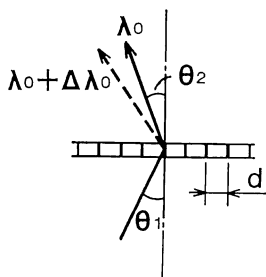


図 3 グレーティングの回折法則

$$\Delta\theta_2 = \Delta\lambda_0 / (d \cdot \cos \theta_2) \quad (2)$$

したがって出射角変化は、波長変化に比例し格子ピッチに逆比例する。また出射角の大きいほど変化が大きい。一例として入射角、出射角ともに 30° のグレーティングでは、波長が 830 nm から 835 nm に変化すると、出射角は 0.40° 変化する。なお同様な光偏向角をもつ屈折プリズムでは、出射角変化は逆方向であり、大きさがその 20 分の 1 の 0.02° 程度である。

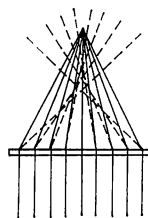
グレーティングレンズは、図 4 (a) に示したように入射光軸が一致するインライン型と図 4 (b) に示した光軸が異なるオフアキス型の 2 種類に大別できる。それぞれのレンズにおいて、光源の波長が変化すると図 4 の破線に示したように光が一点に集束しなくなり、また焦点距離も変化する。とくに、オフアキス型レンズの場合は出射光軸も変化する。以上のように、グレーティングレンズでは波長変動による光学性能劣化 (色収差) が次の三つの形態で発生する。

- (1) ビームのぼけ
- (2) 焦点距離の変化
- (3) 光軸の変化

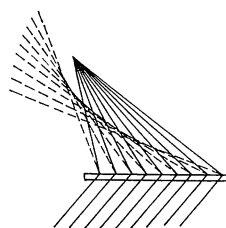
インライン型ホログラムの近軸領域の焦点距離を  $f$  とすると、波長変化  $\Delta\lambda$  による焦点距離の増加量  $\Delta f$  は次式で表わされる。

$$\Delta f / f = - \Delta\lambda / \lambda \quad (3)$$

これは、波長 830 nm の半導体レーザーが +5 nm の波長変化をすると、焦点距離 4 mm のレンズは、24  $\mu\text{m}$  も焦点位置が短くなることに相当する。この値は光



(a) インライン型グレーティングレンズ



(b) オフアキス型グレーティングレンズ

図 4 2 種類のグレーティングレンズ

ディスクメモリ用ヘッドの対物レンズとしては致命的である<sup>15)</sup>。

### 2.3 グレーティングレンズにおける波長変動対応

光デバイスにグレーティングレンズを使用する際に、光源の波長変動に対応するためのいくつかの方法が提案されている。

#### 2.3.1 波長変動が影響しない使用方法

光ヘッドの検知系にグレーティングを使用し、ハーフミラーと信号光集光の機能を複合化し、光ヘッドの簡素化を図る方法が報告されている<sup>9,11,13)</sup>。この場合オフアキス型のレンズであるため、波長変動により光の偏向方向に光軸が移動するが、移動方向に沿った光分割検知を行なうことにより、検知出力変動が起こらないようにしている。

また、インライン型グレーティングレンズを光ヘッドのコリメータレンズに適用した例<sup>16)</sup>およびガラスレンズとグレーティングレンズの複合レンズの開発例<sup>10)</sup>があるが、いずれもグレーティングレンズとしては NA が小さいため実用上問題が少ないようである。以上の方法ではグレーティングレンズの使用条件あるいは NA などの使用範囲を制限するため課題を残している。

#### 2.3.2 2枚のレンズにより波長変動を補償する方法

比較的 NA の小さいオフアキス型ホログラムレンズの光軸変化を2枚のレンズにより補償する方法がある。レーザープリンタ用ホログラムスキャナにおいてその具体例をみる事ができる。すなわち、ホログラムディスクとホログラムレンズの2枚を組み合わせることにより、波長変化に起因するビーム偏向角度変化を打ち消すことができる<sup>6-8)</sup>。他の例としては、オフアキス型ホログラムレンズを2枚組み合わせることにより色収差の小さいレンズ系を得る方法<sup>17)</sup>などが報告されている。これらの方法では波長変化による焦点位置移動およびビームぼけは原理的に除去されないが、レンズの NA が小さいため大きな問題とはならない。

#### 2.3.3 色収差を完全に打ち消す方法

Weingärtner は、インライン型ホログラムの色収差を完全に打ち消す方法を提案し<sup>18)</sup>、図5(a)、(b)に示す2枚構造のグレーティングレンズ系を考案した。この構造では、色収差の三つの形態である焦点位置移動、ビームぼけおよび光軸変化のすべてを除去することができる。しかし図5でわかるように、光線束がレンズの一部分だけしか通らない構造のため、NA を大きくできない問題がある。

筆者らはこれまで実現されていない高 NA グレーテ

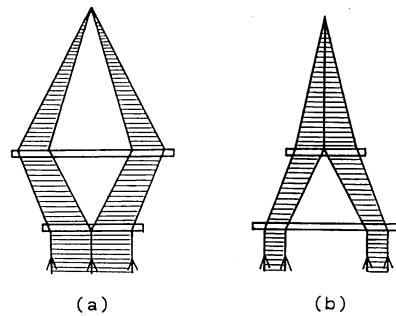


図5 色収差補正型グレーティングレンズ系<sup>18)</sup>

ィングレンズの色収差補正を目的とし、別途検討を進めてきた。その結果、NA 0.5 で許容波長変動 30 nm を有する軸交差構造のグレーティングレンズ系を新たに考案した<sup>19,20)</sup>。筆者らの方法と Weingärtner の方法とでは色収差補正の原理は基本的には同じであるが、レンズ構造がまったく異なる。

本解説では高 NA の波長変動不感型グレーティングレンズに焦点を置き、その設計、試作結果を詳述する。

### 3. 波長変動不感型高 NA グレーティングレンズの原理と構造

(1)式からわかるように、1枚のグレーティングレンズを用いる場合、波長変動により必然的に光線の方向が変化する。しかし図6に示すように、2枚のグレーティングレンズを用いると波長変動が生じて光線の位置が変わらない条件がある。第一のグレーティングレンズで回折される光は、波長変動により第二のグレーティングの異なる位置に異なる角度で入射するが、光線の到達する位置が波長変動によっても変わらないように格子ピッチを決めることにより、波長変動に影響されないグレーティングレンズ系が得られる。

この原理に着眼し、考案した軸交差構造のグレーティ

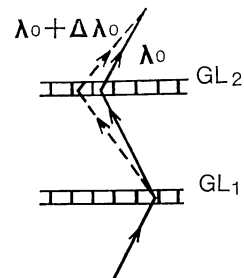


図6 波長変動不感型グレーティングレンズ系の原理

ングレンズ系を図7に示す。点光源Pで出射された光線は第一レンズの片側で回折され、いったん光軸と交差した後に第二のレンズの反対側に到達する。ここで回折された光線が点P'に集束する。本構造は、発散球面波を集束球面波に変換する有限共役型のレンズ系であるが、点Pあるいは点P'を無限遠とすれば無限共役型レンズ系に拡張できる。

図8は、点光源Pを集束点P'に変換するグレーティングレンズ系を設計する手順を示したものである。第一レンズおよび第二レンズの半径方向の座標をそれぞれ $r$ および $r'$ とする。実線は波長が $\lambda_0$ のときの光線を示したもので、点Pを出発した光線は点 $r_1$ および点 $r_1'$ で回折され、点P'に到達する。いま波長が $\lambda_0 + \Delta\lambda_0$ に変化すると、図の点線のように光線が変化し、第二のレンズに対する入射位置が $r_2'$ となる。この光線は点P'に到達しなければならぬから入射位置 $r_2'$ における格子ピッチ $d_2'$ が定まる。ここで、再び波長を $\lambda_0$ にした場合を考えると、点 $r_2'$ を通り点P'に向かう光線が第一のレンズを通過する位置 $r_2$ は既知の格子ピッチ $d_2'$ に

より計算される。さらに、光線が点Pより出射されることを考慮すると位置 $r_2$ における格子ピッチ $d_2$ が計算される。以上の手順を繰り返すことにより、グレーティングレンズ上のすべての位置における格子ピッチが与えられることになる。

#### 4. 設 計 例

一例として、図9に示すように第一レンズ側のNAを0.3、第二レンズ側のNAを0.5とするグレーティングレンズ系を設計した。厚さ1mmの2枚のガラス円板のそれぞれ上面と下面にグレーティングを形成し、第一および第二レンズの焦点距離はそれぞれ3.75mmおよび1.7mmとし、円板の直径はそれぞれ2.4mmと2.0mmとした。なお、設計にあたっては $\lambda_0$ を830nm、 $\Delta\lambda_0$ を0.3nmとした。

図10に、本設計によるグレーティングレンズの空間周波数分布を実線で示す。ここで、図8に示した設計手順によると、空間周波数の値がレンズ半径に対して離散的に与えられるが、それらを放物線近似により連続曲線とした。同図には、参考のために同じNAをもつ1枚のグレーティングレンズの空間周波数分布を点線で示した。これより、従来のグレーティングレンズではレンズの中心で空間周波数がゼロであるのに対して、軸交差レンズ系では有限の値をもつことがわかる。空間周波数の変化がなだらかであるため、高い光使用効率を得やすい

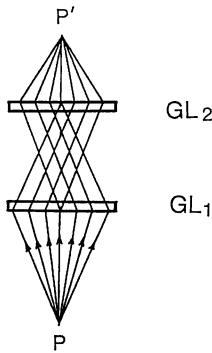


図7 軸交差構造高NAグレーティングレンズ系

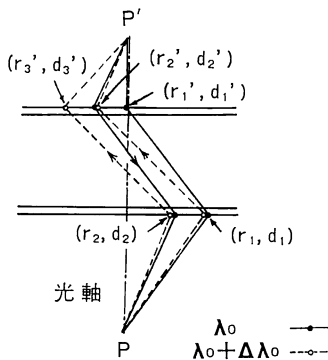


図8 設計手順

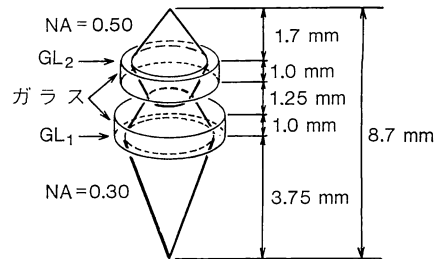


図9 設計例

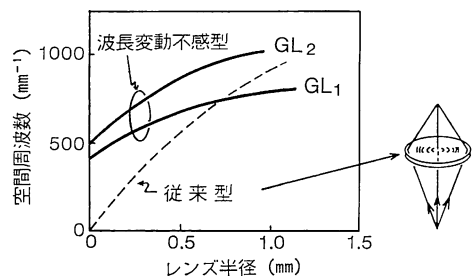


図10 グレーティングレンズの空間周波数分布

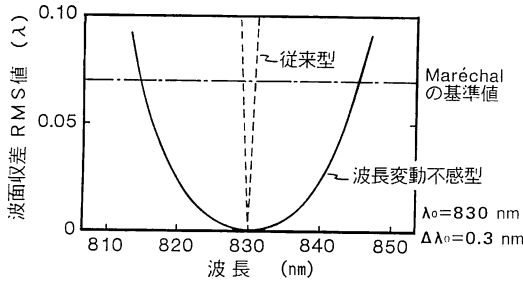


図 11 波面収差の波長依存性

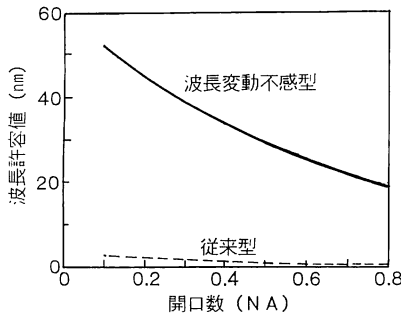


図 12 許容波長変動と NA の関係

という利点を有している。

本設計によるレンズの RMS 波面収差の波長依存性を図 11 に実線で示した。RMS 波面収差は設計波長 830.0 nm と 830.3 nm に最小値をもち、波長に対して放物線に近い変化をする。同図中の点線は、比較のために同一の NA をもつ 1 枚のグレーティングレンズにおける RMS 波面収差を示したものである。軸交差レンズ系では色収差が飛躍的に改善されていることがわかる。許容波長変動を Meréchal の RMS 波面収差基準 (0.07λ) にとると、軸交差レンズ系の許容波長変動は 30 nm となる。図 12 は、入射側の NA を一定 (0.3) とし、出射側の NA を変化させた場合の許容波長変動を示したものである。半導体レーザーを使用する場合の許容波長変動を 20 nm とすると、NA が 0.7 の波長変動不感型グレーティングレンズが実現できることがわかる。

5. 試作・評価結果

軸交差レンズ系は微妙な空間周波数分布をもつため、ホログラフィック干渉露光では作成が難しい。そこで、電子ビーム直接描画法を用い、電子レジストに所望のパターン形成を行なった。計算された空間周波数分布 (あるいは格子ピッチ分布) を実際の格子パターンに変換するにあたっては、位相のずれを極力小さくなるようにし

た。具体的には、 $i$  番目の格子ピッチを  $d_i$ 、レンズ半径方向の位置を  $r$ 、レンズ外径を  $R$ 、格子縞の本数を  $N$  としたとき、次式に基づいて量子化を行なった。

$$\sum_{i=1}^N d_i^2 = \int_0^R d(r) d r \quad (4)$$

図 13 に試作したグレーティングレンズの SEM 写真を示す。光ディスクのプリグループに似た同心円状のパターンである。格子断面が矩形のため回折効率が最大の条件とはならないが、ビーム集束性能の評価はできる。

試作した 2 枚のレンズを所定の位置に配置し、波長変動によるビーム径の変化を図 14 に示したビーム観測系により測定した。この観測系では、波長 830 nm 帯の単一縦モード半導体レーザーを用い、ペルチエ素子でレーザーのケース温度を制御することにより波長を変えた。レーザーの発散光を対物レンズによりいったん平面波に変え、ハーフミラーで一部の光は光スペクトラムアナライザに導き、大部分の光は対物レンズにより回折限界まで集束させ点光源とした。マイクロステージ系により 2 枚のグレーティングレンズ系を所定の位置に配置し、顕微鏡とテレビカメラにより集束ビームを観測した。

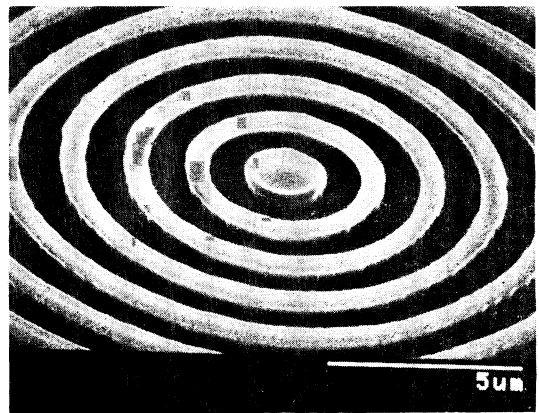


図 13 試作グレーティングレンズの SEM 写真

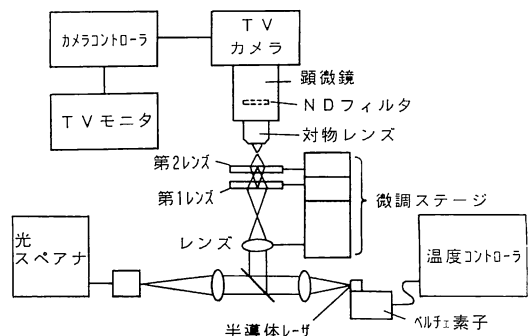


図 14 ビーム観測系

まず、軸交差グレーティングレンズ系を用い、波長を 830.5 nm としたときのビームスポットを観測した。図 15(a) に示すように半導体レーザービーム形状の縦横比に対応し、縦横の  $1/e^2$  スポット径としてそれぞれ 1.6  $\mu\text{m}$  および 1.9  $\mu\text{m}$  の値を得た。なお、比較のために NA 0.5 の従来の光学ガラス対物レンズを用いた場合のビームスポット径 ( $1/e^2$ ) を測定したところ、図 15(a) に示すようにビーム形状の縦横比に対応した理論的回折限界値である 1.3  $\mu\text{m}$  および 1.5  $\mu\text{m}$  を得た。軸交差構造でビーム径が多少大きい理由は、2枚のレンズ間で光が交差するために光強度分布が反転することによるものである。光の強度分布を考慮したビームスポット径を計算すると、実測されたビーム径は設計値と一致する<sup>20)</sup>。

次に、半導体レーザーのケース温度を変えることにより波長を変化させ、直流駆動と高周波駆動の両方の場合について、観測面を固定した状態でビームスポットの変化を測定した。図 16 は高周波駆動した場合の波長スペクトラムとビームプロファイルを示したものである。実験での波長変化範囲 (5 nm の波長分散を含め 14 nm) においてはビームプロファイルが変化しないことが確認された。図 17 に半導体レーザー波長変化とビーム径 ( $1/e^2$ ) の測定結果を示した。同図破線で示した従来の 1枚グレーティングレンズに比べ、格段に広い範囲で波長変動不感性が確認された。なお、低温実験に対する装置の制約上、今回の実験では半導体レーザーの波長を 14 nm しか変化できなかったが、今後の実験検討により計算上の波長変動許容量 (30 nm) が期待できる。

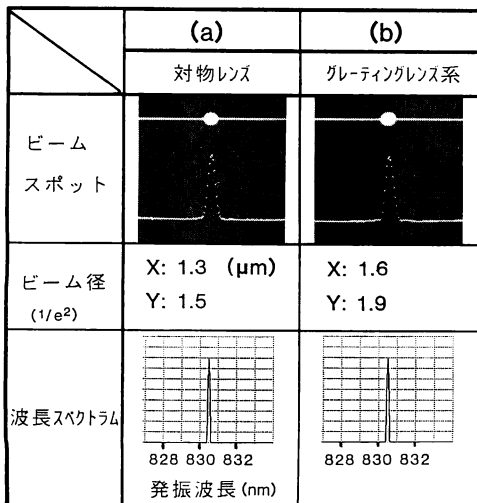


図 15 測定ビームスポット

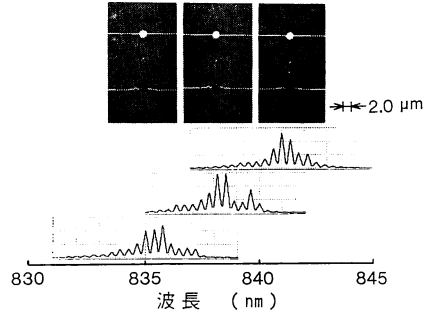


図 16 半導体レーザー波長変化とビームスポット

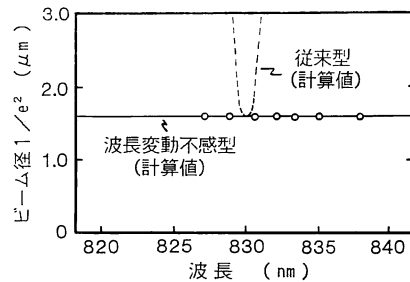


図 17 ビーム径の波長依存性

## 6. ま と め

グレーティングレンズは波長の変化しない光源に対してはきわめて有力であるが、波長変動あるいは分散のある光源に対しては、色収差の影響を十分考慮したうえでデバイス応用を考えなければならない。対応方法の一つは、色収差を許容したうえでグレーティングレンズのデバイス適用条件を工夫することである。しかし、光学ガラスレンズに匹敵するグレーティングレンズを得るためには、色収差の発生しない高 NA のグレーティングレンズ構造の開発が重要である。ここで報告した波長変動不感型グレーティングレンズ系は、原理的に色収差のないレンズ系であるため、半導体レーザー、LED さらには蛍光表示管などの光源に応用できる可能性がある。

今後、普通光も利用できるグレーティングレンズの研究がさらに進むことにより、その応用分野がますます拡大することが期待される。

## 文 献

- 1) 森 一成: “マイクロフレネルレンズ”, 光学, 16 (1987) 52-57.
- 2) H. Ikeda, M. Ando and T. Inagaki: “Bar code reader using optically generated hologram,” Jpn. J. Appl. Phys., 15 (1976) 2467.
- 3) H. Ikeda, K. Yamazaki, F. Yamagishi, I. Sebata

- and T. Inagaki: "Shallow-type truncated symbol-reading point-of sale hologram scanner," *Appl. Opt.*, **23** (1985) 1366.
- 4) K. Yamazaki, T. Ichikawa, H. Aritake, F. Yamagishi, H. Ikeda and T. Inagaki: "Compact POS scanner using new holographic technology," *Proc. SPIE*, **883** (1988) 207.
  - 5) S. Hasegawa, F. Yamagishi, H. Ikeda and T. Inagaki: "Holographic line scanner using different wavelength method," *Conf. Digest of 13th Int. Commis. for Optics* (1984) B8-8.
  - 6) F. Yamagishi, S. Hasegawa, H. Ikeda and T. Inagaki: "Lensless holographic line scanner," *Proc. SPIE* (1986) 615.
  - 7) S. Hasegawa, F. Yamagishi, H. Ikeda and T. Inagaki: "High resolution holographic line scanner for use in diode laser printers," *Proc. SPIE* (1987) 747.
  - 8) S. Hasegawa, S. Iwata, F. Yamagishi, H. Ikeda and T. Inagaki: "Compact holographic disk in all holographic line scanner for diode laser printers," *Proc. SPIE* (1989) 1047.
  - 9) Y. Kimura, S. Sugama and Y. Ono: "High performance optical head using optimized holographic optical element," *Proc. Int. Symp. on Optical Memory* (1987) pp. 131-134.
  - 10) K. Goto, K. Mori, G. Hatakoshi and S. Takahashi: "Spherical grating objective lenses of optical disk pick-ups," *Proc. Int. Symp. on Optical Memory* (1987) pp. 135-140.
  - 11) K. Tatsumi, T. Matsushita and S. Ito: "A multi-function reflection type grating lens for the CD optical head," *Proc. Int. Symp. on Optical Memory* (1987) pp. 135-140.
  - 12) 末光尚志, 二里木孝, 田草川幸次, 西尾 隆: "マイクロフレネルレンズによる CD 用対物レンズの製作", *光学*, **15** (1986) 325.
  - 13) M. Kato, T. Saimi, S. Kadowaki and Y. Komma: "Holographic servo-signal detection stabilized to the wavelength fluctuation and the mechanical misalignment in the optical heads," *Topical Meeting (OSA/SPIE)*, Los Angeles (1989).
  - 14) 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", *電子通信学会論文誌*, **J69-C** (1986) 609-615.
  - 15) 田中康弘: "光ディスク非球面プレスガラスレンズ", *Microworld News*, **6**, 3 (1988) 48-53.
  - 16) 後藤 顕也, 森 一成, 樋口義則, 高橋 俊介, 上田勝宣: "新しい光学素子を使った光ピックアップ", *O plus E*, **76** (1986) 75-83.
  - 17) 劉 中本, 久保田敏弘, 小瀬輝次: "高効率インラインホログラムレンズの作成", *応用物理学会講演集* (1983) p. 52.
  - 18) I. Weingärtner: "Real and achromatic imaging with two planar holographic optical elements," *Opt. Commun.*, **58** (1986) 385-388.
  - 19) F. Yamagishi, M. Kato, S. Maeda, H. Ikeda and T. Inagaki: "Chromatic aberration-free grating-lens pair," *Proc. SPIE*, **965** (1988) 52-56.
  - 20) M. Kato, S. Maeda, F. Yamagishi, H. Ikeda and T. Inagaki: "Wavelength independent grating lens system," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 682-686.