

解説

マイクロフレネルレンズ

森 一 成

(株)東芝電子事業本部 〒210 川崎市幸区堀川町 72

(1986年11月11日受理)

Micro Fresnel Lens

Kazushige MORI

Electron Tube & Device Group, Toshiba Corporation,
72, Horikawa-cho, Saiwai-ku, Kawasaki 210

1. はじめに

近年、光ディスクなどの光学的情報機器や光ファイバー通信などの光応用システムが急速に実用化されるに伴って、種々のマイクロレンズの研究がますます活発になっている。とくにホログラフィックレンズやマイクロフレネルレンズは、従来の屈折型レンズと異なり光の回折を用いたレンズであるため、任意の波面変換作用をもたすことができる。その結果として、従来の光学システムの大幅な簡略化やまったく新たなシステムを構成することが可能である。

さて、ホログラフィーを用いて作製するホログラフィックレンズはかなり古くから研究されているが、その過程でいくつかの問題点が指摘されている。たとえば作製波長と使用波長との違いによる収差の発生が避けられないとか、作製時の光学系配置により in-line 型レンズの作製が難しいといった点があげられる。

一方、マイクロフレネルレンズはあらかじめ設計されたフリッジパターンを種々の微細加工技術により作製するレンズであるため上記の制約がなく、作製の自由度が高い。最近マイクロフレネルレンズのこのような利点が注目され、種々の手法を用いた試作例や光学機器への応用例が相次いで発表されている。本解説ではこれらの実用化の動きを中心に研究の現状を述べる。

2. マイクロフレネルレンズの特徴

1) マイクロフレネルレンズはホログラフィックレンズと同様に、平面上に形成された微細な溝による光の回

折を利用したレンズである。したがって非常に薄いレンズが作製可能であり、光学部品の集積化に適している。

2) 球面組合せレンズと異なり単一波長の光に対して原理的に無収差のレンズを容易に設計できる。

3) あらかじめ与えられた所定のパターンを種々の加工法により作製するため、作製の自由度が大きい。また、off-axis 型レンズ¹⁷⁾ や楕円型レンズ^{13), 18)} などの特殊なレンズや、多くの機能をあわせもつ複合レンズも同一手法にて作製可能である。

4) 屈折型レンズと異なり、表面の微細な凹凸のみを転写、形成すれば十分である。したがって IC 製造技術や印刷技術などを応用すれば、大量のレプリカ作製が可能と考えられる。

3. 原理と基本

3.1 輪帯半径の設計

まず、最も簡単な in-line 型でかつ無限共役型のレンズについて述べる。図 1 (a) に示すように入射平行光が輪帯により回折し焦点 F に集光する場合を考える。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整数倍であれば二つの光波は互いに強めあう。すなわち m 番目の輪帯半径 r_m は

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

で与えられる。ただし、 f はレンズの焦点距離、 λ は波長である。レンズの開口数 (NA) が小さい場合、 $f \gg r_m$ であるから上式は

$$r_m^2 = 2mf\lambda \quad (2)$$

と近似できる。

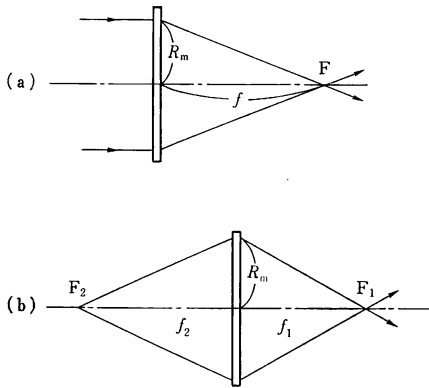


図 1 輪帯半径の設計
(a)無限共役型レンズの場合, (b)有限共役型レンズの場合

図 1 (b) のような有限共役型レンズの場合には, 前側, 後側焦点距離をそれぞれ f_1, f_2 とすると上で述べたのと同様な考え方により

$$\sqrt{r_m^2 + f_1^2} + \sqrt{r_m^2 + f_2^2} - (f_1 + f_2) = m\lambda \quad (3)$$

から r_m が求められる。ただし実際のレンズ設計にあたっては, レンズ基板の厚みによる屈折を考慮する必要がある。

off-axis 型レンズの場合にはレンズ上の一点 $P(x, y)$ を通過する光線の光路長を計算し, 基準光線との光路差が $m\lambda$ となるような (x, y) の値を求めればよい。ただしこの場合には上記 2 例と異なり同心円状の輪帯とはならず, より複雑な形状になる¹⁷⁾。

3.2 回折効率

ここでは一様周期 T をもつ直線状回折格子を例にとり, 格子の断面形状と回折効率について簡単に解説する。

一般に, 回折格子の厚さは次式で表わされるパラメーター Q の大小により区別される。

$$Q = 2\pi\lambda d/n_0 T^2 \quad (4)$$

ただし, d, n_0 はそれぞれ媒質の厚さと屈折率である。

$Q < 1$ であるような薄いグレーティングの場合, 平面波が垂直入射したときの m 次回折光の回折効率 η_m は

$$\eta_m = \left| \frac{1}{T} \int_0^T A(x) \exp\{i\varphi(x)\} \exp\left(-i\frac{2\pi mx}{T}\right) dx \right|^2 \quad (5)$$

で与えられる¹⁾。ただし, $A(x)$ は透過率, $\varphi(x)$ は位相変化量である。

最も簡単な例として, 図 2 (a) のような振幅変調型グレーティングを考える。 $m=1, \varphi(x)=0, A(x)=1 (0 \leq x \leq \alpha T), 0 (\alpha T \leq x \leq T)$ とおくと上式より $\eta_1 =$

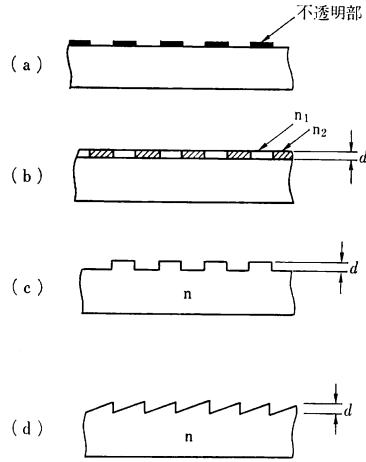


図 2 種々のグレーティング
(a)振幅変調型グレーティング, (b)ステップ型グレーティング(屈折率変調型), (c)ステップ型グレーティング(形態変調型), (d)ブレードグレーティング

$\{\sin(\pi\alpha)/\pi\}^2$ が得られる。 $\alpha=1/2$ のとき最大となり, $\eta_1=1/\pi^2 \sim 10\%$ である。

次に図 2 (b), (c) のようなステップ型の位相変調格子を考えよう。 屈折率変調型, 形態変調型いずれの場合でも

$$\eta_1 = \left| \frac{2}{\pi} \sin\left(\frac{\pi d \Delta n}{\lambda}\right) \sin(\pi d) \right|^2 \quad (6)$$

となる。したがって $d = \lambda/(2\Delta n)$ かつ $\alpha=1/2$ のとき η_1 は最大値 $4/\pi^2 \sim 40\%$ をとる。

1 次回折効率が最も大きいのは図 2 (d) のような鋸歯状の断面形状をもつ, いわゆるブレードグレーティングである。この場合(5)式から

$$\eta_1 = \text{sinc}^2 \pi \{(n-1)d - \lambda\} \quad (7)$$

が得られ, $d = \lambda/(n-1)$ のとき $\eta_1=1$ となることがわかる。

以上, 薄いグレーティングについて述べてきたが, ここで $Q > 1$ であるような厚いグレーティングの回折効率について述べておく。たとえば波長と同程度の細かな周期をもつグレーティングの回折効率は(5)式のような簡単な形では与えられず, Vincent²⁾ が行なったように波動方程式を数値的に解くことが必要となってくる。榎本ら³⁾ の計算によれば, 回折格子の周期 T が 4λ 以下となると 1 次回折効率は急激に低下し, たとえば $T=3\lambda$ のときブレードグレーティングでもその効率は 50~60% である。格子ピッチがさらに細かくなると, ステップ型グレーティングであってもある特定のレリーフ高さに対しては 85% 以上の回折効率が得られたという報告

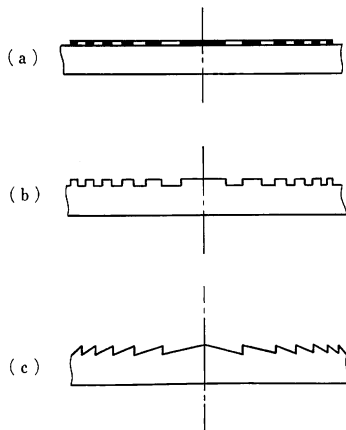


図3 種々のマイクロフレネルレンズ
(a)フレネルゾーンプレート, (b)ステップ型マイクロフレネルレンズ, (c)ブレードマイクロフレネルレンズ

もある⁴⁾。このように厚いグレーティングの回折効率についてはまだ未解決の問題が多い。

3.3 種々のマイクロフレネルレンズ

マイクロフレネルレンズの一種として古くから知られているのはフレネルゾーンプレート (FZP) であり, 図3 (a) のような断面形状を有する。これは一つの輪帯内において逆位相 (たとえば $-\pi \sim 0$) となる光を遮断すれば, 焦点Fでは互いに強め合う光のみとなることを利用したものである。しかし FZP は光の利用効率が高く, 2.2項で述べたように入射光の10%程度しか集光しない。

回折効率を上げる簡単な方法は, FZP の遮蔽部分を $\pm\pi$ の位相差を与えるような透明部とすることである。実際には図3 (b) のような凹凸形状を作製するのが簡単であり, ステップ型マイクロフレネルレンズと呼ばれる。この種のレンズの試作例として, EB (electron beam) 描画によるもの⁹⁾ や縮小露光法によるもの⁶⁾ などが報告されている。しかし前節で述べたように, その回折効率は40%が最大であり光学素子としての実用化はかなり特殊な用途に限られよう。

このように回折型レンズの最大の欠点は1次回折効率が低いことであり, 屈折型レンズと並ぶ光学素子として実用化するためには高回折効率化が必須条件となる。そのためには図3 (c) に示すようなブレード化が必要である。前節で述べたようにその回折効率は理論的には100%近くなると期待できる。

ブレード化されたマイクロフレネルレンズを作製する手法として, いくつかの方法が試みられている。たとえ

ば EB 描画法では各点での露光量を制御し, 露光量の多少によるレジストのエッチング速度の差を利用する⁷⁾。またイオンビームを斜めから照射しエッチングを行なう方法も発表されている⁸⁾。筆者らは精密 CNC 旋盤による機械加工という手法を用いた⁹⁾。

これらの加工法や試作例については後で詳しく述べるが, いずれにせよサブミクロンオーダーの微細加工技術が必要とされる。

4. 諸特性の検討

4.1 波長依存性

マイクロフレネルレンズの特徴の一つとして, その性能の波長依存性が大きいことが挙げられる⁹⁾。とくに焦点距離 f は(2)式から容易にわかるように波長 λ に反比例して変化する。このことはすでに藤田ら⁵⁾ が実験的にも確認している。その量は, たとえば筆者らの試作したレンズ ($f=20$ mm, $\lambda=780$ nm) では, ± 10 nm の波長変化に対して ∓ 260 μ m という大きなものである。

大きな NA のレンズでは, 焦点距離の変化だけでなく収差も生じる。それは NA が大きい場合にはより厳密な(1)式に従って設計する必要があり, 輪帯半径 r_m の波長依存性が複雑となるためである。その量は 10 nm 程度の波長変化に対しては無視できるが, 半導体レーザーを設計波長とするレンズを He-Ne レーザーで評価するような場合には注意が必要である。

4.2 温度特性

上で述べたように, マイクロフレネルレンズの光学的性能は輪帯半径と入射光の波長に大きく依存する。したがってマイクロフレネルレンズの温度特性としては, 光源(とくに半導体レーザー使用時)の波長変化と熱膨張による輪帯半径の変化が支配的である⁹⁾。NA の小さなレンズの場合, 温度変化を ΔT とすると焦点距離の変化は $\Delta f/f = (2\alpha - \gamma) \Delta T$ で与えられる。ただし, α は線膨張係数であり, γ は波長の温度変化係数である。これからわかるように, 熱膨張と温度による波長変化(半導体レーザーでは正)とが互いに打ち消し合う効果をもっており, レンズ材料の選択等により焦点距離変動の小さいレンズを作製することも可能である。

4.3 斜入射特性

マイクロフレネルレンズを含め回折型レンズに共通する欠点として, 有効視野角が狭いことが挙げられる。ここでは, ブレードマイクロフレネルレンズを例に, 斜入射時の点像分布関数 (PSF) の計算結果について述べる。

図4に示すように平行光が θ だけ傾いて入射し, 輪帯

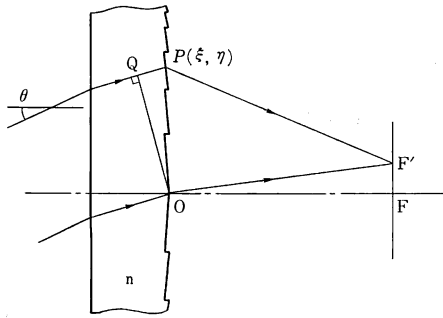


図 4 斜入射時の光線追跡法

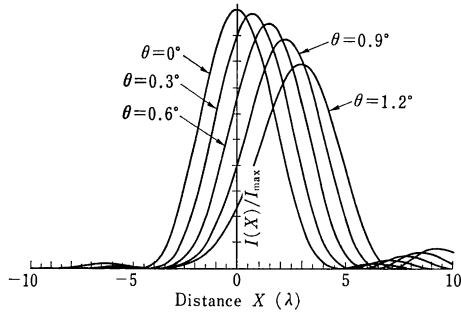


図 5 斜入射時の点像分布関数の計算例
開口数 0.13, 入射角は 0°~1.2°である。

により回折をおこし焦点 F から x だけ離れた点 F' に集光するものとしよう。 m 番目の輪帯内の点 $P(\xi, \eta)$ を通る光線と原点を通る基準光線との光路差 $\Delta L(\xi, \eta)$ は

$$\Delta L(\xi, \eta) = n \cdot \sqrt{QP + PF'} - OF' - m\lambda \quad (8)$$

で与えられる。したがって点 F' での PSF は

$$I(x) = \left| \frac{1}{f} \int \exp[2\pi i \Delta L(\xi, \eta)/\lambda] d\xi d\eta \right|^2 \quad (9)$$

により求められる。図 5 に $NA=0.13$ のときの計算例を示す。これから明らかなように、 $\theta=1.2^\circ$ で大きなコマ収差が発生しスポット中心強度は 80% に低下する。Strehl definition に従えば、これは $\lambda/14$ (RMS 値) の波面収差があることを意味している。

種々の開口数をもつレンズに対して同様な計算を行えば Maréchal criterion を満たす入射角を求められる。著者の計算例では、 $NA=0.2$ で 0.45° , $NA=0.45$ で 0.15° 程度である。このように開口数が大きくなるほど有効視野角は極端に狭くなり実用化が困難となることがわかる。

5. 作製方法

5.1 縮小露光法

現在最も一般的な微細加工技術は IC 製造技術として

急速に発展した縮小露光法である。これは必要とされる何倍かのサイズの原因を描画し、フォトリピータにより縮小を繰り返して必要な大きさのマスクを作製する方法である。たとえば辰巳ら⁶⁾は図 6 に示すような手順を用いて、光ピックアップヘッド (PUH) の対物レンズとして用いるマイクロフレネルレンズを試作した。口径 2 mm, F 数 1 ($NA \sim 0.45$) であり、輪帯数は 599 本、最小ピッチは $1.7 \mu\text{m}$ である。試作レンズの性能として、スポット径 ($1/e^2$) $1.4 \mu\text{m}$, 回折効率 38% であると報告されているが、これらは理論的限界値に近い。

このように縮小露光法によって大きな NA をもつステップ型レンズを作製することは可能であるが、この方法ではブレイズ化を実現することは難しい。Jordan ら¹⁰⁾は濃淡をつけた原因からフォトリソグラフィによりブレイズ化されたレンズを作製したが、その F 数は 10 以上という大きなものであった。

5.2 EB 描画法

マイクロフレネルレンズを作製するもう一つの有力な手法として、EB 描画法がある。これは計算機制御された電子ビームによって実寸大の微細なレンズパターンを直接描くことにより、レンズ自身やマスクを作製する方法である。たとえば藤田ら⁵⁾は図 7 に模式的に示すような方法で直径 $0.4 \sim 1.0$, F 数 $0.65 \sim 5$ の種々のステップ型レンズを試作した。その結果、 F 数が 1 以上であれば入射平面波を約 30% の効率でほぼ回折限界まで絞れることがわかった。また小館ら¹¹⁾は EB 描画により作製した Cr マスクをもちいて、deep UV 露光によりパターンを転写するという方法で種々のレンズを試作している。

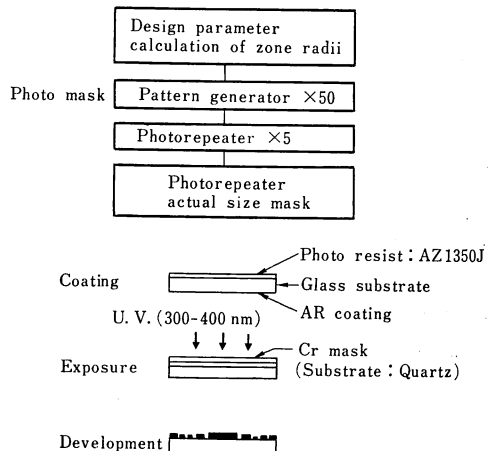
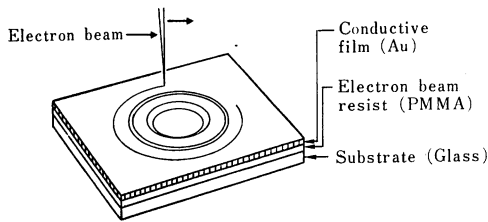


図 6 縮小露光法によるマイクロフレネルレンズの作製手順⁶⁾

図7 EB 描画法による作製例⁵⁾

これらの例が示すように、EB 描画法によりステップ型レンズを作製する研究は大いに進展し、現在ではそれほど困難な技術ではない。しかしすでに述べたように、高回折効率化をはかるためには格子のブレース化が必要である。

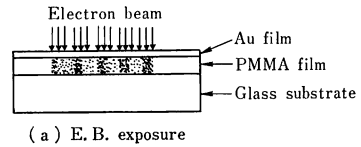
藤田ら⁷⁾は電子ビームの走査回数を変化させることにより露光量の制御を行ない、ブレース化マイクロフレネルレンズを試作した。その手法を図8に示す。試作レンズは $NA \sim 0.1$ であり、50% の回折効率を得られている。同様な手法をもちいて塩野ら¹²⁾は 2×4 個のレンズアレイを試作した。その効率は 62% と高く、またレンズ開口を矩形とする工夫により入射光の利用効率を上げている。彼らは、また、種々の楕円率をもつ楕円形マイクロフレネルレンズを試作した¹³⁾が、その集光効率は 72% であると報告されている。

以上の例は開口数の小さな ($NA \sim 0.1$) レンズであるが、末光ら¹⁴⁾は $NA = 0.45$ 、口径 4.0 mm という光 PUH の対物レンズを試作した。彼らは 10~20 層分割の多重描画によりブレース化を行ない、回折効率 51% という値を得ている。

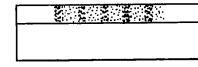
5.3 機械加工法

回転対称型レンズであれば旋盤にて機械加工することが可能である。著者らはこのことに注目して、精密 CNC 旋盤によりマイクロフレネルレンズを作製することを試みた⁹⁾。機械加工の特長として、ブレース化が容易であること、大口径レンズが作製できることなどが挙げられる。一方、楕円形レンズや off-axis 型レンズを加工できないという短所を指摘できよう。

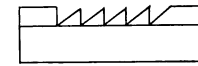
図9に示すように、無酸素銅をダイヤモンドバイトにて切削加工し、金属原版を作製した。この金属原版を Ni 電鍍したのち成形用金型とし、射出成形によりプラスチックレンズを複製した。このレンズは光 PUH のコリメータとして用いることを目的とし、有効口径 5.2 mm、 NA は 0.11~0.13 である。作製されたレンズの集光効率は 70% 以上 (良品では 80% を越える) であった。また、レーザー干渉計 ($\lambda = 633 \text{ nm}$) による透過



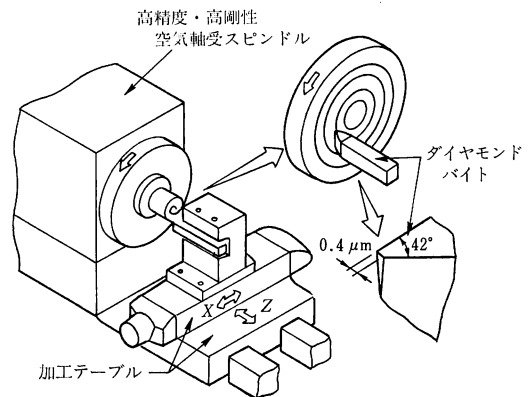
(a) E. B. exposure



(b) Au etching



(c) Development

図8 EB 描画法によるブレース化の方法⁷⁾図9 精密 CNC 旋盤による加工例⁹⁾

波面収差は 0.03λ (RMS) 以下であり、従来のガラス組合せレンズに近い光学的性能をもつといえる。

5.4 レプリカ作製法

最初に述べたように、マイクロフレネルレンズは表面に形成された微細な凹凸を転写することにより容易にレプリカを作製できる。ここではレプリカ作製技術のいくつかを紹介する。

ステップ型レンズの場合には半導体素子製造に用いられてきたリソグラフィ技術を応用できる。高解像度を得るため、近年では deep UV 光源を用いることが試みられている。このリソグラフィのプロセスや種々のレジスト材料の特性に関しては、小館¹⁵⁾による詳しい解説がある。

ブレースドマイクロフレネルレンズのレプリカ作製法としては、通常のプラスチックレンズと同様に射出成形法が考えられる。前述したように、筆者らもこの方法を用いてレプリカを作製した。しかし射出成形では樹脂の流れにより非点収差が発生しやすく、射出圧力や速度等

の条件を厳しく管理する必要がある。

マイクロフレネルレンズの特徴を生かしたレプリカ作製法として、光硬化性樹脂を用いる2P法 (photo polymerization) も考えられる。これは光ディスクの製造技術として発展してきたもの¹⁶⁾であるが、表面の微細な凹凸を転写するためにはかなり有力な方法であろう。

6. 光ピックアップヘッド (PUH)

への実装例

マイクロフレネルレンズが光学機器の一素子として実用化されたのは、筆者らの開発した光 PUH 用コーリメータが最初であると思われる。これは従来のガラス組合せレンズの代替を目的としたものである。種々の実装試験や環境試験の結果も良好であり⁹⁾、かなりの規模で量産されている。

一方、末光ら¹⁴⁾は光 PUH の対物レンズを試作し、既存の PUH で対物レンズのみを置き換え実装評価した。その結果、RF 変調度が低いことやトラッキング信号の変調度がさらに低いことなどの問題点が指摘されている。とくに後者は3.3項で述べた有効視野角の狭さと関係しており、マイクロフレネルレンズを用いる限りトラッキングエラー検出法として3ビーム法を採用することは難しいことを示している。これらの問題を解決するため、彼らは半導体レーザーを含むすべての光学素子を一体化した有限系の PUH を試作した。まだいくつかの問題点が残っているが、マイクロフレネルレンズを実用化するための一つの方向を示していると考えられる。

7. おわりに

本解説では、マイクロフレネルレンズの基本と最近の成果を中心に述べてきた。近年この分野の研究の進展はめざましいが、残念ながらマイクロフレネルレンズを含め回折型レンズが実用化された例は未だ少ない。その一因として、従来の屈折型レンズと同等の機能や性能を求めることに力点がつかれ、この種のレンズのもつ特性が十分に活用されていない点が指摘されよう。回折型レンズの特徴を生かす方法として、たとえば光路の変換と集光とを同時に行なうようなレンズの複合機能化がある。また種々の光学部品を集積化することも可能であり、これらの応用例として、光導波路レンズ¹⁹⁾や集積型光 PUH²⁰⁾などがあげられる。今後この方面の研究がますます活発になると予想される。本解説がその一助となれば幸いである。

文 献

- 1) R. Magnusson and T. K. Gaylord: "Diffraction efficiency of thin phase gratings with arbitrary grating shape," J. Opt. Soc. Am., **68** (1978) 806-809.
- 2) P. Vincent: "New improvement of differential formalism for high-modulated gratings," Proc. SPIE, **240** (1980) 147-152.
- 3) 榎本紳二, 西原 浩, 小山次郎: "電子ビーム描画マイクロフレネルレンズの回折効率", 電子通信学会技術報告, **OQE 83-89** (1983) 15-22.
- 4) R. C. Enger and S. K. Case: "Optical elements with ultrahigh spatial-frequency surface corrugations," Appl. Opt., **22** (1983) 3220-3228.
- 5) 藤田輝雄, 西原 浩, 小山次郎: "電子ビーム描画作製マイクロフレネルレンズ", 電子通信学会論文誌(C), **J 64-C** (1981) 652-657.
- 6) K. Tatsumi, T. Saheki, T. Takei and K. Nukui: "High-performance micro-Fresnel lens fabricated by UV lithography," Appl. Opt., **23** (1984) 1742-1744.
- 7) 藤田輝雄, 西原 浩, 小山次郎: "電子ビーム描画作製によるブレース化マイクロフレネルレンズ", 電子通信学会論文誌(C), **J 66-C** (1983) 85-91.
- 8) 小菅和弘, 須釜成人, 小野雄三, 西田信夫: "イオンエッチングによるホログラム格子の鋸歯状化", 光学, **13** (1984) 324.
- 9) 森 一成, 高橋俊介, 樋口義則, 後藤頭也: "高回折効率グレーティングレンズ", Microopt. News, **3** (1985) 293-298.
- 10) J. A. Jordan, Jr., P. M. Hirsch, L. B. Lesem and D. L. Van Rooy: "Kinoform lenses," Appl. Opt., **9** (1970) 1883-1887.
- 11) 小館香椎子, 岡田佳子, 神谷武志: "深紫外光を用いた高効率回折格子型微小光学素子の作成", 光学, **14** (1985) 296.
- 12) 塩野照弘, 渡恒謙太郎, 山崎 攻: "電子ビーム描画作製によるマイクロフレネルレンズ", Microopt. News, **3** (1985) 40-47.
- 13) 塩野照弘, 渡恒謙太郎, 山崎 攻, 和佐清孝: "楕円形マイクロフレネルレンズの集光特性", 光学, **15** (1986) 324.
- 14) 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.
- 15) 小館香椎子: "レジスト材料と光学素子への応用動向", 光学, **12** (1983) 100-108.
- 16) H. C. Haverkorn van Rijsemijk, P. E. J. Legierse and G. E. Thomas: "Manufacture of laser vision video discs by a photopolymerization process," Philips Tech. Rev., **40** (1982) 227-297.
- 17) G. Hatakoshi, M. Yoshimi and K. Goto: "Off-axis grating lenses fabricated by EB lithography," IOOC '83 Tech. Dig., (1983) pp. 76-77.
- 18) G. Hatakoshi and K. Goto: "Grating lens for the semiconductor laser wavelength," Appl. Opt., **24** (1985) 4307-4311.
- 19) G. Hatakoshi and K. Goto: "Waveguide grating lenses for optical couplers," Appl. Opt., **23** (1984) 1749-1753.
- 20) 裏 升吾, 梶原敏明, 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(C), **J 69-C** (1986), 609-615.