



## フレッシュマンのための現代光学—V

## 回折を利用した光学素子 (2)

後藤 顕也

東海大学開発工学部情報通信工学科 〒410-03 沼津市西野 317

(1993年7月21日受理)

## Modern Optics for Freshmen—V

## New Optical Elements Using Diffraction (2)

Kenya Goro

Department of Information and Communication Technology, School of  
High-Technology for Human Welfare, Tokai University,  
317, Nishino, Numazu 410-03

## 7. 回折型光学素子原盤の作製

7.1 フォトエッチング (光食刻) 法<sup>1,2)</sup>

現在、半導体産業が超 LSI 製造用に採用している最もポピュラーな方法である。すなわち、実際の描画サイズよりも 10 倍に拡大したグレーティングパターンのフォトマスクを作製する。一方、回折素子を刻むべき銅原版や Si 基板の表面に PMMA で代表されるフォトレジスト (露光材) をスピコートやノズル塗布などの方法で薄く塗布する。この薄膜面に、前述したフォトマスクをいわゆるステッパーといわれる装置 (写真の引き伸し機と同じような原理で例えば 1/10 に縮小し、面積が小さくなった分だけ次々と数多くの同じ画を繰り返し露光するのでこの名がある) により縮小露光する。光の照射された箇所と照射されない箇所との間には写真技術の定着工程の際の物理・化学的な差異を生じることを利用する。例えば光を照射されて水溶性の物質になったり、逆に非水溶性になったりする性質を応用する。こうして、図 4 (a) や図 5 のようにフォトレジストに覆われた部分とフォトレジストに覆われない部分とができる。これ自身ですでに回折光学素子が形成されていることになるが、フォトエッチング法というのは半導体産業で行っていると同じようにフォトレジストに覆われていない部分に、気相にしる液相にしる、酸などの基板を侵すエッチャントを用いて基板そのものの表面にグレーティングパ

ターンを刻む方法である。

7.2 ホログラフィック法<sup>18)</sup>

レーザー光の干渉縞を応用する方法である。すなわちフォトエッチング法で用いられているフォトマスクの代わりに、レーザービームの干渉により得られるレーザー光の強弱変化によって作られるグレーティングパターンや回折格子パターンをフォトレジストをコートした半導体基板や銅基板上に直接露光する方法である。図 16 に一例としてグレーティングレンズ作成の場合の光学系を示す。また、フォトレジストの代わりに、フォトポリマリゼーション<sup>11)</sup> 応用のグレーティングパターン形成法もある。すなわち、図 17 の模式図に示すように、グレーティングパターンを刻むべき基板表面にモノマー液で構成された薄膜をコートしておき、紫外線レーザー光の干渉縞がこのモノマー薄膜上にできるようにしておく。紫外線レーザー光の強いところはレーザー光のエネルギー ( $h\nu$ ) によってモノマーが架橋され、ポリマーになって硬化する。一方、紫外線レーザー光の弱いところはモノマーのままであり硬化しないので水洗により除去される。

7.3 電子ビーム直接描画法<sup>3, 10, 14, 20, 21, 23, 25)</sup>

フォトエッチング法における『フォトマスク + 露光』の代わりに、フォトレジスト上に直接電子線でグレーティングパターンを描画する方法である。テレビのブラウン管における電子銃と同じように、電子ビームは偏向コ

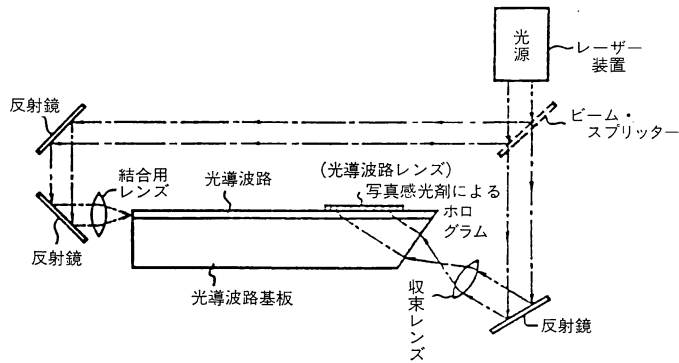


図 16 レーザー光の干渉によって作成する導波路グレーティングレンズ作成法

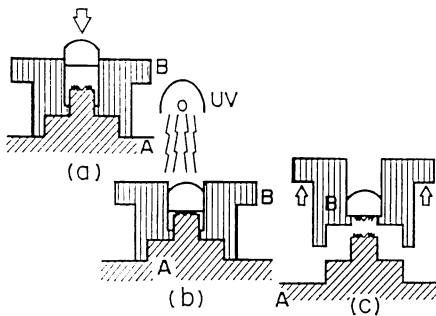


図 17 フォトポリメリゼーション法による球面ガラス基板の平面部に紫外線硬化樹脂をコートし、そこへグレーティングパターン金型を密着させた後に紫外線を照射させる。樹脂が硬化してから金型を引き離すと球面ガラス基板にグレーティング薄膜がコートされている<sup>11,17)</sup>。

イルで成る偏向ヨークと高電界が印加できる偏向板に外部信号が印加されれば、平面上を自由自在に動かせる微細ビームになるので電子線で感光するフォトレジストであればフォトマスクなしで直接描画できる。

7.4 超精密旋盤法<sup>5,6,12,15,27)</sup>

電子線直接描画法の長所は自由自在にパターンを描画できることであるが、問題点は①微細点を多数集めて特定面を塗り潰す方法を探っているので複雑な微細パターンを描画するに要する時間が、場合によっては10時間のオーダーという長時間になること、②電子線応用に共通な問題である2次電子の影響による超微細描画ができない(微細画像がボケる)などである。とくに、回折効率を上げるためにブレードグレーティングにする必要のあるときに、サブミクロンオーダーのパターン断面形状が鋸歯状の尖鋭なパターンにならないという大きな欠点がある。

二次元的に複雑なパターンでなく、円対称なパターンであれば比較的簡単にブレードグレーティングを刻むことができる方法が超精密旋盤法である。これはダイヤモンドとレーザー精密測長技術とを用いた超精密旋盤 (diamond turning lathe)<sup>30)</sup>を使って0.01 μmの精度で精密切削加工を行うものである。このような超精密旋盤のメーカーは米国のPneumo社やMoore Special Tool社をはじめ欧州や日本にも数社存在している。超精密旋盤メーカーでなくとも日本の電機メーカーや光学メーカーでも自作の装置を持っているところが多い。非球面レンズ原盤を作れるところではいつでも超精密旋盤法による回転対称の回折型ブレード光学素子原盤が作製できる。

8. 回折型光学素子のレプリカ作製

上で述べた回折型光学素子原盤作成方法のいずれかを用いて原盤ができた後で、この回折型光学素子の大量複製(レプリカ)が必要な場合の複製方法はいくつか実用化されているが、これらはホログラムの複製法とほぼ同じである。列挙すれば：

- (1) プラスチックレプリカ(射出成形, モールド, 注形など)法<sup>12,29)</sup>
- (2) 写真印刷法<sup>22)</sup>, 転写印刷法<sup>41)</sup>
- (3) フォトポリマー(2p)法<sup>11)</sup>

である。(1)は光ディスク基板やCDやレーザーディスクの量産技術と同じである。また、(3)は7.2のホログラフィック法で述べたと同様な方法である。

ホログラムを金、銀、アルミ等の箔に印刷する転写法と呼ばれている印刷技術をエンボス・ホログラムに適應させ(図18<sup>41)</sup>のエンボス・ホログラム作成工程参照)、紙やプラスチックの表面に貼りつける大量生産に適した方法が開発されている。転写印刷法のうちで、ホット

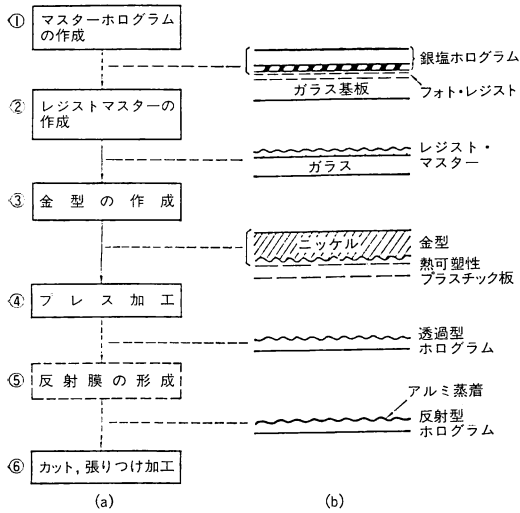


図 18 (a) エンボス・ホログラムの作成工程, (b) 各工程で作成されるホログラム概略

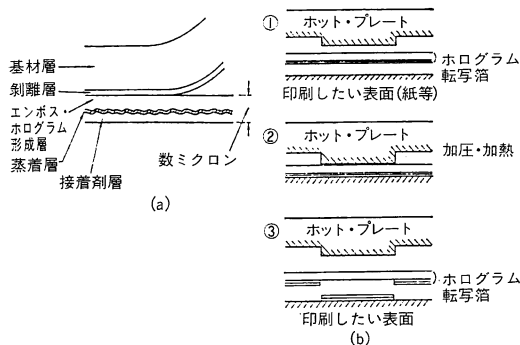


図 19 (a) ホログラム転写箔の構成, (b) 転写の工程

スタンプ法または箔押し法とよばれる方式がよく使われる。図 19<sup>41)</sup>を用いて説明する。まず図 18 で述べたホログラムを薄い樹脂層に反射タイプとして作成し、図 19 に示す転写箔にする。この箔を印刷したい表面に 100~200°C に加熱したホットプレートで加圧・加熱し、その後転写箔を剥がすと、ホットプレートの部分のホログラム層がその表面に接着されて残る。

### 9. 球面基板グレーティング対物レンズ

再生専用光ヘッド用コリメータの NA は 0.13 前後であり、第 6 節で述べた GCL は半導体レーザーと一体になって固定光学系を形成している。装着時に一度だけ焦点調整しておけばその後の環境変化で問題を起こすことはない。しかし、①記録用(WORM)や書き替え可能(rewritable)用光ディスクのコリメータレンズと対物

レンズ<sup>45)</sup>はもっと高 NA にする必要がある。②対物レンズは光軸方向とラジアル方向の 2 軸方向に駆動され、光ディスクから反射回折された光を受ける。この駆動時に対物レンズが傾くことが多い。NA ≥ 0.3 程度以上の平面グレーティングレンズでは第 4 節にて述べたように、広い傾斜角特性を持たせることが困難である。また、③回折効率も著しく劣化する。したがって再生用光ヘッドのコリメータレンズ以外の用途では応用上の制約が発生する。これを克服するための研究が球面基板グレーティングレンズ SGL (図 8) である<sup>17)</sup>。

SGL では①高 NA でも回折効率が低下せず、②耐傾斜角特性の向上を図ることができ、③コマ収差や複屈折性が全くないので高 NA コリメータレンズや高 NA 対物レンズが可能である。レンズに必要な開口数を屈折による球面基板ガラスと回折によるグレーティング膜とで折半している点がポイントである。NA が 0.45 の対物レンズはグレーティング膜の NA を半分の 0.225 で済ませられる。NA がこの程度なら最小輪帯ピッチも 3~4 μm と広くなり、図 7 (b) からわかるように回折効率の低下という問題が起こらない。また球面基板を用いているために耐入射傾き角も平板の場合の 2 倍の ±0.5° まで向上させることができる。さらに量産レプリカを製造する際の紫外線硬化樹脂成形中に圧力がかからず、温度サイクルにも溶されないのが金型原盤寿命が射出成形の場合より 10 倍も長い。

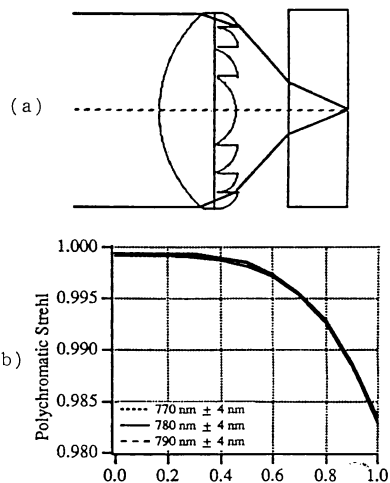


図 20 (a) 屈折レンズとグレーティングとを複合させた光ディスク用ハイブリッド対物レンズ, (b) ハイブリッドレンズの視野角特性 (波長を 770~790 nm と 20 nm も変化させても Strehl 値 (波面収差)<sup>44)</sup>が波長の違いでは変わらない)

SGLの唯一の課題は設計波長の±5nmの範囲で、かつ、戻り光雑音対策のために幅の広い±1nm程度のスペクトル幅のレーザーを使用しなければならず、そのために chromatic aberration (色収差) を避けるための工夫が必要であることである。しかし最近、この色収差を屈折素子と回折素子の複合レンズによって色収差を補正する方法が提案され、光線追跡法によって計算され、図20に一例を示すような研究例<sup>43)</sup>が報告されるようになった。

10. 光線追跡による球面基板グレーティングレンズ設計

図21にグレーティングレンズの輪帯ピッチ計算に用いた光線追跡の手法を示す<sup>17)</sup>。ここでは  $P_1(x_1, z_1)$ ,  $P_3(x_3, z_3)$  が屈折点であり、 $P_4(x_4, z_4)$  が回折点である。これらの各点を結ぶ3本の線:  $L_1, L_2, L_3$  で成る光波ベクトルを  $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$  で表す。ディスク基板、空間、球面基板のそれぞれの屈折率を  $n_1, n_2, n_3$  で表せば、 $\vec{a}_1=(L_1, n_1)$ ,  $\vec{a}_2=(L_2, n_2)$ ,  $\vec{a}_3=(L_3, n_3)$  となる。

SGLの中心を通る光線と中心から離れたところを通る光線との光路差 OPD ( $=dL_i$ ) が波長の整数倍であれば、各輪帯からの回折光の位相が重なる。したがって、次の式(2)が成り立つ。

$$dL_i = n_s \cdot \overline{P_i R_i} + \overline{R_i F} - (\overline{O F} + m\lambda) \quad (2)$$

$$dW = \{ \langle dL_i^2 \rangle - \langle dL_i \rangle^2 \}^{1/2} \quad (3)$$

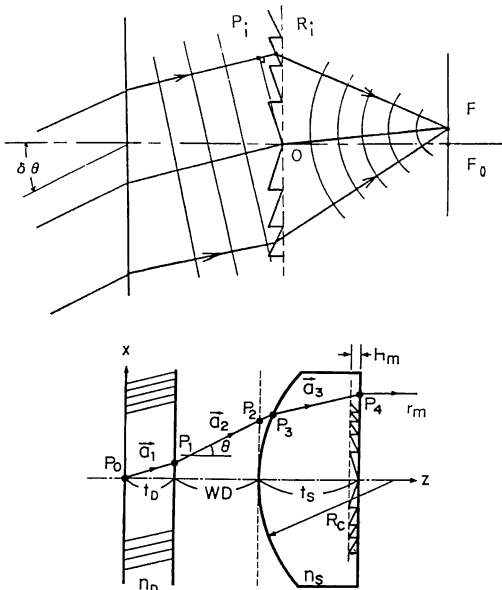


図21 球面グレーティングレンズの輪帯ピッチの計算

ここで式(3)はグレーティングレンズの焦点を定義している。このレンズの焦点は光路差 OPD の標準偏差が最小となる点、すなわち波面収差が最小となる点で与えられる。式(2)を図21に適用させると式(4)となる。

$$P_0 P_4 - (n_d t_d + W D + n_s t_s) = m\lambda, \quad (4)$$

ここで光線  $P_0 P_4$  は  $L_1, L_2$ , および  $L_3$  の和であるので、

$$P_0 P_4 = L_1 + L_2 + L_3. \quad (5)$$

となる。コンピュータによってこれを計算した結果<sup>17)</sup>の一部を図22, 23, 24, 25に示す。また、表1には計算の結果得られたグレーティングレンズのピッチの一例を示す。ガラス球面基板において実行される屈折による球面

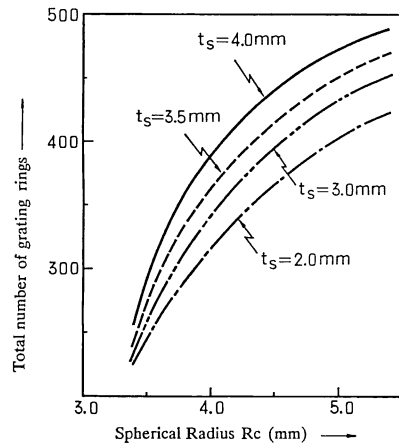


図22 球面基板の曲率半径  $R_c$  対グレーティング輪帯総数

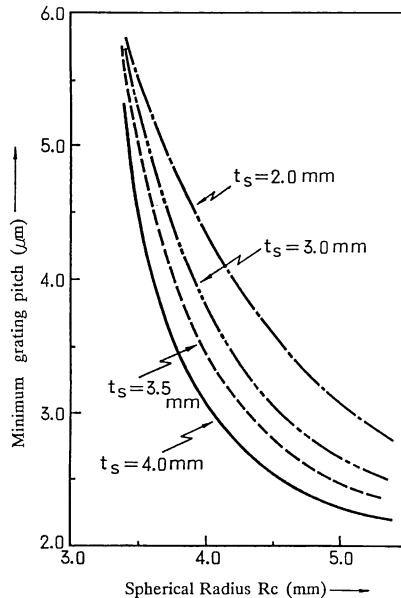


図23 球面基板の曲率半径  $R_c$  対最小グレーティングピッチ

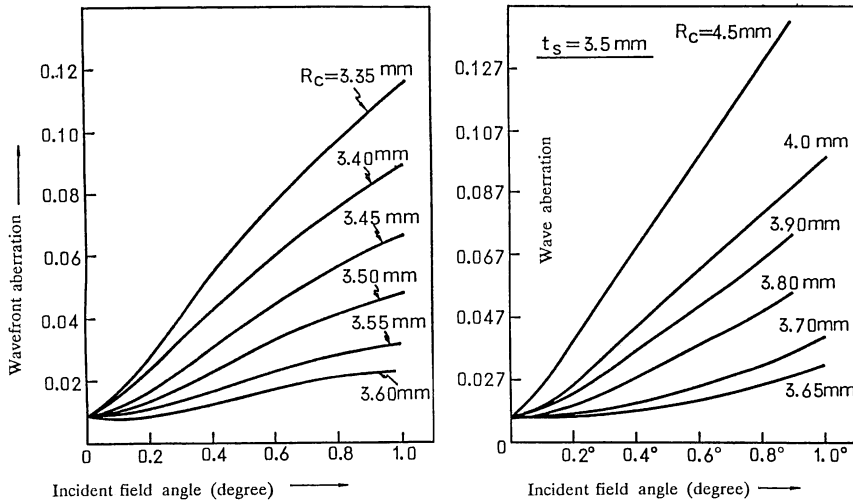


図 24 球面基板厚 ( $t_s$ ) を 3.5 mm 一定にした場合の曲率半径  $R_c$  に対する SGL グレーティングレンズの波面収差特性

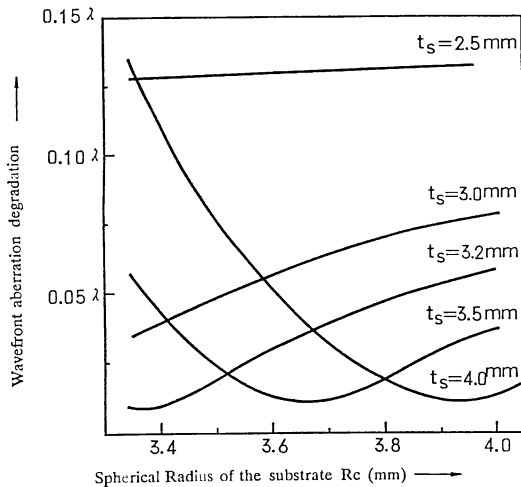


図 25 球面基板厚 ( $t_s$ ) をパラメータにして曲率半径 ( $R_c$ ) を変えた場合の SGL グレーティングレンズの波面収差特性

表 1 球面基板をもつグレーティングレンズのピッチによって球面収差を補正している一例

グレーティング 輪 帯 番 号 $m$	グレーティング ピ ッ チ $\Lambda_m$ ( $\mu\text{m}$ )	ブレードグレー ティ ン グ 高 $H_m$ ( $\mu\text{m}$ )
1	103.03	1.60
2	42.70	1.60
5	24.37	1.60
10	16.80	1.60
20	11.78	1.60
50	7.52	1.61
100	5.49	1.62
150	4.67	1.63
200	4.28	1.63
250	4.16	1.64
260	4.17	1.63
280	4.24	1.63
300	4.38	1.63
313	4.58	1.63

収差を補正するためにグレーティングのピッチが中心から単調に狭くなっているのではなく、周辺部のところで逆に増加していることがわかる。これらの計算結果から CD 用の光ヘッドの対物レンズに対応する球面ガラス基板グレーティングレンズを設計・試作し、従来の非球面ガラスレンズや 3 枚組合せの球面ガラスレンズの代替となることが確かめられている。

### 11. 回折型レンズの応用

冒頭の回折型レンズの特徴の項で述べたように回折型レンズは軽く、薄く、量産に適しており、複合機能を持

たせることも可能なので、レーザー光などを代表とするスペクトル幅の狭い光源を用い、かつ、ビームの入射角があまり変動しない用途であれば限りなく応用が広がるものと思われる。従来の屈折型レンズが光学メーカー向きとすれば、この回折型レンズは半導体集積回路を得意とする電気機器メーカー向き<sup>38,39)</sup>ということができる。応用の一例を列挙すると;

- (1) レーザースキャナー用レンズ<sup>26)</sup>
- (2) レーザーポインタ等のコリメータレンズ<sup>33)</sup>
- (3) CD ピックアップ用コリメータレンズ<sup>12,15)</sup>

- (4) 光路変換と集光とを同時に行う複合機能レンズ
- (5) LCD (液晶) ディスプレーデバイスのバック照明用集光レンズ
- (6) LCD (液晶) ディスプレーデバイスの大面積化のためのアレイルレンズ
- (7) 光ディスクヘッドの対物レンズ<sup>16-18,21,22)</sup>
- (8) 光導波路レンズ<sup>23-25)</sup>
- (9) 光ディスクヘッド光学系の集積化用多機能回折型レンズ (図 26, 27, 28, 29)<sup>1-4,31,32,35-37)</sup>

などがある。また、屈折型レンズでは全反射を利用する方法以外にほとんど達成できない光学素子としてX線用光学部品があり、昔からフレネルゾーンプレートとして回折現象を利用したX線用レンズ<sup>34)</sup>が使われている。半導体の分野では今後ますます集積度が上がり、X線描画法が普通に使われる時代が間もなくやってくると思われるが、そのときの光学部品はここで述べた回折型光学素子が主役となろう。

以上、グレーティングレンズの基本、原理、特徴の

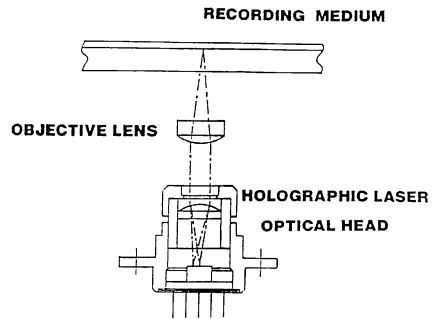


図 28 文献 32) に示されている HOE の例

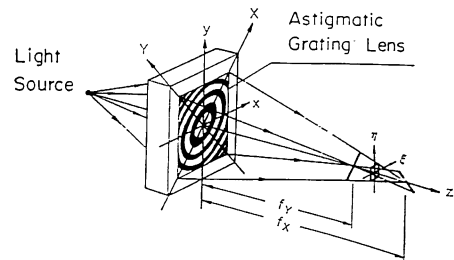
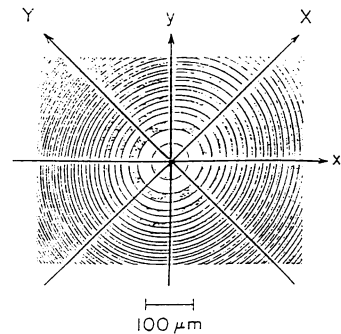


図 29 文献 3) に示されている HOE の例

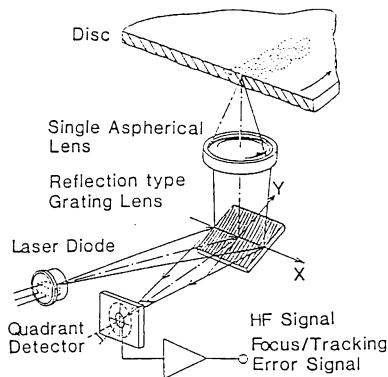


図 26 文献 1) に示されている HOE の例

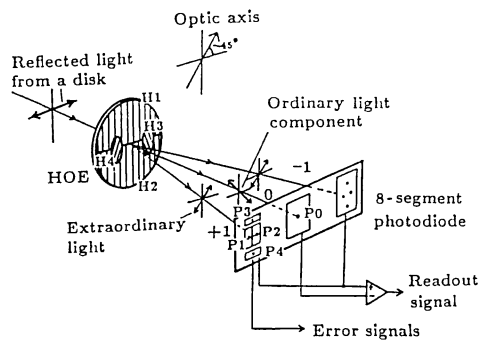
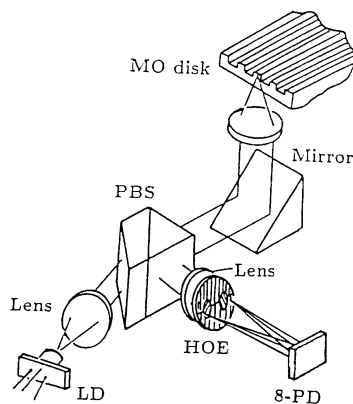


図 27 文献 31) に示されている HOE の例

概要を述べた。今後の応用技術の発展が楽しみな分野である。

### 文 献

- 1) K. Tatsumi, T. Matsushita and S. Ito: "Multifunctional reflectional type grating lens for the CD optical head," Jpn. J. Appl. Phys., **26**, Suppl. 26-4 (1987) 127-130.
- 2) 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) 131-134.
- 3) G. Hatakoshi and K. Goto: "Grating lenses for the semiconductor laser wave-length," Appl. Opt., **24** (1985) 4304-4310.
- 4) 塩野照弘, 渡垣謙太郎, 山崎 攻, 和佐清孝: "電子ビーム描画作製によるマイクロフレネルレンズ", Microoptics News, **3** (1985) 285-291; 光学, **15** (1986) 324.
- 5) 後藤頭也, 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, No. 76 (1986) 75-83.
- 6) 久米雅弘, 大越誠一, 後藤頭也: "コンパクトディスク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) 555-558.
- 7) R. Magnusson and T. R. Gaylord: "Diffraction efficiencies of thin phase gratings with arbitrary grating shape," J. Opt. Soc. Am., **68** (1978) 806-809.
- 8) 森 一成: "第6章7節, 回折型レンズ", 応用光エレクトロニクスハンドブック, 野田健一, 大越孝敬監修 (昭晃堂, 1988) pp. 474-480.
- 9) R. C. Enger and S. K. Case: "Optical elements with ultrahigh spatial frequency surface corrugations," Appl. Opt., **22** (1983) 3220-3228.
- 10) 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製", 光学, **14** (1985) 296-300.
- 11) K. Goto, K. Mori, G. Hatakoshi and S. Takahashi: "Spherical grating objective lenses for optical disk pick-ups," Jpn. J. Appl. Phys., **26**, Suppl. 26-4 (1987) 135-140.
- 12) 後藤頭也, 森 一成, 樋口義則, 上田勝宣: "プラスチックグレーティングコリメータレンズ", 光学, **18** (1989) 358-367.
- 13) 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", 電子通信学会技術研究報告, **OQE 83-89** (1983) 15-22.
- 14) T. Shiono, K. Setsune and O. Yamazaki: "Rectangular-aperitive micro-Fresnel lens arrays fabricated by electron-beam lithography," Appl. Opt., **26** (1987) 587-591; Tech. Digest of Micro Optics Conference, MOC '87 Tokyo, Soc. Jpn. Appl. Phys., Tokyo, **F5** (1987) pp. 150-153.
- 15) K. Goto, Y. Higuchi and K. Mori: "Plastic grating collimating lens," Proceedings on Optical Storage and Scanning Technology, Proc. SPIE, **1139** (1989) 169-176.
- 16) K. Goto and K. Mori: "Ray tracing results of combined micro-objectives between a glass substrate and a thin plastic film," Tech. Digest of Micro Opt. Conf., MOC '91, Yokohama, Soc. Jpn. Appl. Phys., Tokyo, **C3** (1991) pp. 28-31.
- 17) K. Goto and K. Mori: "Design of an aberration-free spherical micro lens with a diffractive relief grating film on a refractive spherical glass substrate," Jpn. J. Appl. Phys., **31** (1992) 1586-1590.
- 18) C. Kojima, K. Miyahara, K. Hasegawa, T. Otake and H. Ooki: "In-line holographic lens of high numerical aperture," Jpn. J. Appl. Phys., **20**, Suppl. 20-1 (1981) 199-205.
- 19) 桑山哲郎, 谷口尚郷, 須田繁幸, 中村保夫: "LD用ホログラムレンズの収差補正", Microoptics News, **3** (1985) 10-14.
- 20) 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), **J66-C** (1983) 85-91.
- 21) 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, IOOC '83, paper 29A2-2 (1983) pp. 76-77.
- 22) K. Tatsumi, T. Saheki, T. Takei and K. Nukui: "High-performance micro-Fresnel lens fabricated by UV lithography," Appl. Opt., **23** (1984) 1742-1744.
- 23) G. Hatakoshi, H. Fujima and K. Goto: "Waveguide grating lenses for optical couplers," Appl. Opt., **23** (1984) 1749-753.
- 24) 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.
- 25) S. Ura, T. Suhara, H. Nishihara and J. Koyama: "An integrated-optic disc pick-up device," IEEE J. Lightwave Technol., **LT-4** (1986) 913-918.
- 26) 稲垣雄史, 池田弘之: "ホログラム・スキャナーを使ったバーコードリーダー", 日経エレクトロニクス, No. 254 (1980) 138-162.
- 27) 後藤頭也: "グレーティングレンズ", 応用物理, **57** (1988) 759-761.
- 28) W. B. Veldkamp: "Binary optics; The optics technology of the coming decade," Tech. Digest G1 of 3rd Microoptics Conference, MOC '91 Yokohama (1991) pp. 102-105.
- 29) J. J. M. Braat, A. Smid and M. M. B. Wijnakker: "Design and production technology of replicated aspheric objective lenses for optical disk systems," Appl. Opt., **24** (1985) 1853-1855.
- 30) "Turning to millionths of an inch," *American Machinist* (McGraw-Hill, Inc., 1984).
- 31) A. Ohba, Y. Kimura, S. Sugama and Y. Ono: "Reflection polarizing holographic optical element with sinusoidal surface-relief for magneto optical disk head," Tech. Digest of MOC/GRIN '89 Tokyo, H 4 (1989) pp. 224-227.
- 32) W.-H. Lee: "Holographic optical head for CD applications," Microoptics News, **6** (1988) 210-215.
- 33) 井上十九男, 青山 茂, 緒方司郎, 山下 牧, 志村幹彦: "高NAフレネルレンズ一体型コリメート半導体レーザ", Microoptics News, **5** (1987) 310-315.
- 34) W. von Hanes: "Spiegel Systeme streifenden Einfalls als abbildende Optiken für Röntgenstrahlen," Ann. Phys., **10** (1952) 94-114.
- 35) J. C. Leheureau, J. Y. Beguin and J. Colineau: "Polarizing grating beamsplitter," Technical Digest on International Symposium on Optical Memory 1989 27D-18, Kobe, Japan (1989).
- 36) J. C. Leheureau, J. Y. Beguin and J. Colineau: "Po-

- larizing grating beamsplitter using a liquid crystal cell," Jpn. J. Appl. Phys., **28**, Suppl. 28-3 (1989) 201-203.
- 37) R. Linnebach, K. Gillessen, R. Germann, A. Forchel, M. Korn, M. H. Pilkuhn, J. Fröhlich and S. Grenard: "Application of holographic optical elements in optical memory devices," Jpn. J. Appl. Phys., **28**, Suppl. 28-3 (1989) 209-211.
- 38) 永田美佐子, 増山富男, 佐藤道章, 池田憲治, 吉房幸治: "MO用ホログラムレーザーユニットのサーボ信号特性", 平成4年秋季第53回応用物理学会学術講演会予稿集 3, 18a-T-5 (1992) p. 949.
- 39) 長野 強, 上田映一, 小名山秀一, 片山龍一, 浜田 博, 小野雄三: "フリップチップ実装による CD-ROM用薄型光ヘッド", 平成5年春季第40回応用物理関係連合講演会予稿集 3, 30a-B-9 (1993) p. 1048.
- 40) 後藤顕也: オプトエレクトロニクス入門(改訂2版)(オーム社, 1991) p. 212.
- 41) 本田捷夫: ホログラフィのはなし(日刊工業新聞社, 1987) pp. 128-131.
- 42) 後藤顕也: "プラスチックグレーティングコリメータレンズ", 光学, **18** (1989) 358-367.
- 43) D. A. Kubalak, G. M. Morris and D. Kay: "Hybrid achromatic objective lens design for optical data storage," Conference Digest, Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage 1993, F3.5, Maui, Hawaii (1993).
- 44) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 4th ed. (Pergamon Press, 1970) pp. 461-470.
- 45) 後藤顕也: オプトエレクトロニクス入門(改訂2版)(オーム社, 1991) p. 214.