

解説

ホログラム光学素子の最近の展望

小野 雄三

NEC 光エレクトロニクス研究所 〒216 川崎市宮前区宮崎 4-1-1

(1992年10月29日受理)

Recent Advances in Holographic Optical Elements

Yuzo ONO

Opto-Electronics Research Laboratories, NEC Corporation,
4-1-1, Miyazaki, Miyamae-ku, Kawasaki 216

1. はじめに

ホログラフィーにおける波面再生原理を、入射波面を特定の回折波面に変換する光学素子機能であると拡張したのがホログラフィック光学素子 (holographic optical element, 以下 HOE と略記する) である。HOE は製作方法の進展により、回折光学素子と総称されるに至り、屈折型光学素子や反射型光学素子と同列に論じられるレベルにきた。また、オプトエレクトロニクス装置の普及、小型、高機能化に伴う、光学素子の小型化、複合機能化、量産性の改善の要請から、マイクロプロセッサ素子としての進展も見せている。本稿ではこうした進展の背景にある、HOE の製作技術の進展、色収差の問題の克服、材料技術の進展等を概説し、併せて実用化された応用だけでなく、提案されている新しい機能や応用についても展望してみる。

2. 回折光学の位置づけ

計算機合成 HOE の製作手法としてリソグラフィ手法が一般化し、その手法で2値的に製作した光学素子という意味から、BOE (binary optical element)*1 あるいは、それをういた光学技術と言う意味で、binary optics という呼称も使われている¹⁾。これら両方の名称の素子を含む呼称として DOE (diffractive optical element)、さ

らにはそれに関連する光学技術という意味で diffractive optics という呼称も用いられている¹⁾。1992年2月に、この呼称で OSA の Topical Meeting が開催されたことは、一つの技術分野として確立されたと言える²⁾。

また、この DOE あるいは回折光学という呼称は、回折型の光学素子が従来の屈折型あるいは反射型光学素子と同列に論じられるレベルにきたことも意味している。1990年の Lens Design Conference で、DOE を取り込んだハイブリッドレンズの研究が多数発表されたことはこのことを物語っている³⁾。

3. 製作方法の進展

HOE の製作方法として、レーザー光の干渉縞を直接記録するのではなく、電子ビーム描画したフォトマスクを用いてフォトリソグラフィの手法で、表面レリーフ型の HOE を製作することが一般化して来ている。これは電子ビーム描画による CGH (computer generated hologram) 製作が技術的にも経済的にも可能になったことを意味し、シリコン IC 産業の隆盛とともに電子ビーム描画フォトマスク製造業が産業として成立したことを無縁ではない。後述する光ピックアップ用 HOE の製作プロセスを図 1 に示す^{4,5)}。拡大した干渉縞パターンを電子ビーム描画してレチクルとする。このレチクルをマスターとして、フォトリピーターを用いて繰り返し縮小露光することで、多数の HOE パターンを一枚のフォトマスク上に形成できる。このフォトマスクを用いることで一回のプロセスで多数の HOE を製作することに特徴がある。図には、射出成形によるプロセスを示した

*1 2値的手法で作ったということで、できたものが例えば、次節に示すようなマルチ位相レベルであっても BOE である。逆に、フレネルレンズのように表面形状が球面状のものは BOE とはいえない。

が、反射型素子同様、SiO₂のリフトオフ法でガラス基板の上に透過型 HOE を形成することも行われている⁹⁾。

表面リリーフ型 HOE の回折効率向上にはブレース格子化が必要であるが、フォトリソグラフィの手法を用いたマルチ位相レベルの HOE が開発された¹⁾。図 2 (d) に示す鋸歯状断面を図 2 (c) に示すように $M=2^N$ レベルの階段状の位相レベルでデジタルに近似したものである¹⁾。k 次回折光の回折効率の最大値 η_k は、

$$\eta_k = \sin^2(\pi k/M) / (\pi k/M)^2 \quad (1)$$

である。これは、言うなれば、デジタルブレースとでも言うべきもので、断面加工は N 枚のフォトマスクを用いて N 回エッチングまたはリフトオフをすることで実現できる。フォトマスク 3 枚を用いた 8 レベルの場合は 94.96%、フォトマスク 4 枚を用いた 16 レベルの場合は 98.72% の回折効率を得られる。ただしフォトマスクの目合わせ精度から、1 位相レベルの幅としては 2 μ m 以上が妥当であるから比較的低空間周波数での適用技術と言える。この手法でフレネルレンズをマルチ位相レベルでデジタル的に形成することが、光インターコネク

ションへの応用の見地から試みられている^{1,7)}。本技術による回折効率の向上で、HOE をインラインで用いることも可能となってきた。また、各回折次数への回折光の分配比を変えることにも、マルチ位相が用いられている⁸⁾。アナログ的なブレース手法としては、イオンビームエッチングによる方法が適用されている⁹⁾。

4. 色収差の克服

HOE を実際に用いる上で色収差は大きな問題である。特にオプトエレクトロニクス装置の光源が He-Ne レーザーから半導体レーザーに置き変わったことから、光源波長の変動が避けられなくなり、この問題は深刻さを増した。原理的には、2 または 3 枚の HOE で補償することが知られており¹⁰⁾、そうした試みもあるが、応用する光学系の特性を波長不感に工夫して実用化が図られている。光ディスク用ピックアップの対物レンズを HOE 化した例では、ピックアップのオートフォーカス機能によって、波長変動に起因する焦点距離変動を自動補正している¹¹⁾。また、ピックアップの誤差検出光学系を HOE 化した例では、HOE にフォーカルパワーを実質的に持たせないことで、縦色収差の発生を防ぎ、横色収差 (回折光の回折方向の変動) に対しては、横色収差でビームが変動しても光検出器の入射光強度が変化しないような光学配置をとっている⁴⁾。ホログラムスケールに用いられた補償法では、HOE に対して対称に構成されたビーム光路を経てきた二つのビームを互いに干渉させることにより、波長変動に起因する干渉縞の変動を相殺している^{12,13)}。

HOE の色収差を積極的に使って、回折型光学素子を通常の屈折型のレンズと同様に光学系の中に使用してレンズ設計をすることが活発化している³⁾。これは、回折素子では非球面に相当する波面変換を容易に実現できる上に、波長に対するレンズのフォーカルパワーの変化率が屈折素子に比較して約 1 桁大きく、しかもその符号が逆であることから、屈折素子と回折素子を組み合わせることで色収差補正が容易になることによる。屈折率の分散率のアナロジーから回折素子に対する分散率 ν_d を

$$\nu_d = \lambda / \Delta \lambda \quad (2)$$

と定義すると、焦点距離 f_d の回折型レンズと焦点距離 f_r の屈折型レンズを組み合わせた時、アクロマートになる条件は次のとおりである¹⁴⁾。

$$f_d = f(\nu_d - \nu_r) / \nu_d \quad (3)$$

$$f_r = f(\nu_r - \nu_d) / \nu_r \quad (4)$$

ここで f は合成焦点距離、 ν_r は屈折型レンズの分散率

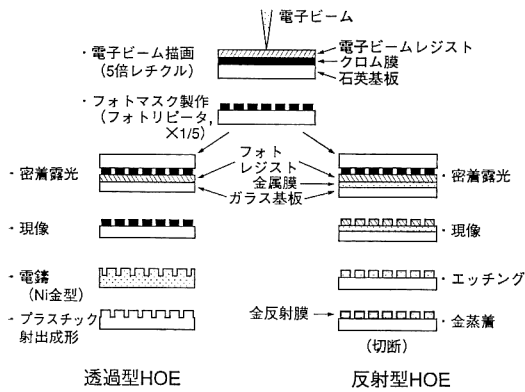


図 1 フォトリソグラフィ手法による HOE の製作プロセス

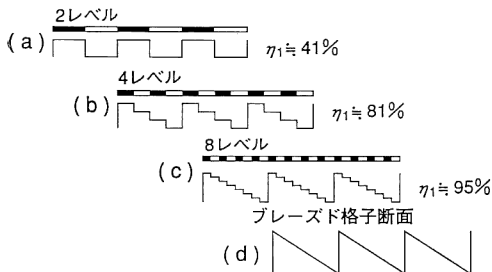


図 2 マルチ位相レベル HOE の製作法の模式図 (a), (b), (c) の順にフォトマスクを用いてエッチングする。(d) は本来のブレース格子の断面。

である。屈折型レンズ同士の場合は n_r が正のため、凸レンズと凹レンズの組合せでなければアクロマートにならないが、回折型と屈折型の組合せの場合は n_r が正で n_o が負であるから、 f_d も f_r も正である点が屈折型と異なる。したがって、合成系のパワーは屈折型レンズ同士の場合は減少するが、屈折型と回折型の組合せでは増加し、合成系としてはサイズと重量で大きなメリットがあることになる。特に、適当な分散を持つガラス材料がない deep-UV 領域のリソグラフィ用光学系などには有効な手段と言える¹⁾。光導波路カップラーの HOE の色収差についても、同様な手法でのアクロマート化が示されている¹⁵⁾。

5. 材料技術の進展

フォトリソグラフィ手法での HOE の製作が一般化したもう一つの背景として、複製用材料技術の進展があげられる。材料技術の大きな進展は、EB 描画のフォトマスクを用いて体積位相型のホログラムが複製できるようになったことである¹⁶⁾。Photo-lithographic imaging technique と呼ばれる方法の複製プロセスを図 3 に示す。材料はフォトポリマー層がポリエステルシートでサンドイッチされた形のものである。マスターとなるクロムフォトマスクにフォトポリマー層をラミネートした状態で、フォトマスク側から UV 光で露光することで体積位相型 HOE が得られる。後処理として、ベースフィルム側から UV 光を均一照射して定着した後、フォトマスクから剥離しフォトポリマー層を基板でサンドイッチしている。厚さ 40 μm のフォトポリマーを用いて 93~98% の回折効率 ($\Delta n=0.008\sim 0.015$) が得られている。計算機合成 HOE を高回折効率の体積位相型ホログラムとして量産することを可能にした技術と言える。

フォトポリマー技術のもう一つの進展は、dry photo-

polymer embossing という、液状樹脂を用いない 2P 法 (photopolymerization) である¹⁷⁾。4~25 μm 厚さのフォトポリマー層がポリエステルシートでサンドイッチされた形の材料である。図 4 に示すように、まず一方のシートを剥して所望の透明基板にラミネーターで熱圧着する。その後、もう一方のシートを剥してホログラムの金型を圧着する。この状態で基板側から UV 光を照射し樹脂を硬化させる。最後に金型から離型する。幅 0.1 μm で深さ 2 μm の格子溝を複製できたことが報告されており、熱プレス法では従来複製困難であったブレード格子や高密度で深い溝の高回折効率の格子に対応できる新しい技術として注目される。

体積位相型ホログラムと表面レリーフ型ホログラムは回折効率の入射角依存性や波長依存性に相違があり、応用によって両方のホログラムを使い分ける必要性からも、上記二つの材料開発は実用上意味深いことである。

6. 新機能

HOE の新しい機能として、偏光性の HOE をあげることができる。回折格子自体、格子周期や断面プロファイルによって、回折効率に大きな偏光依存性を示す¹⁸⁾。この特性を、偏光ビームスプリッターや検光子として用いることが提案されている¹⁹⁻²¹⁾。しかし、この方法では、十分な消光比特性を得ることは難しいことから、複屈折性結晶に HOE をイオン交換で形成することが開発された²²⁾。図 5 に、格子断面構造と位相分布を示す。ニオブ酸リチウム結晶の表面に、まず HOE パターンに相当する金属薄膜パターンをフォトリソグラフィ手法で形成した後、加熱溶融した安息香酸中に試料を浸漬することでイオン交換がなされる。イオン交換により、ニオブ酸リチウム表面に位相格子が形成されるが、異常光屈折率は約 0.1 増加するのに対して、常光屈折率は約 0.03 減

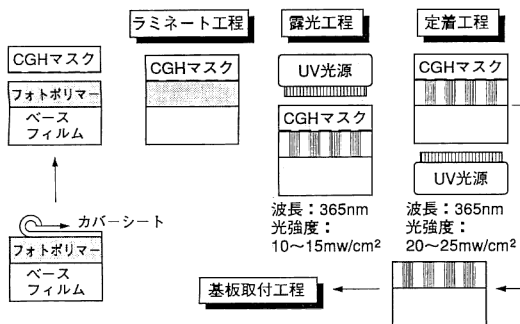


図 3 Photo-lithographic imaging 法による体積位相 HOE の製作法

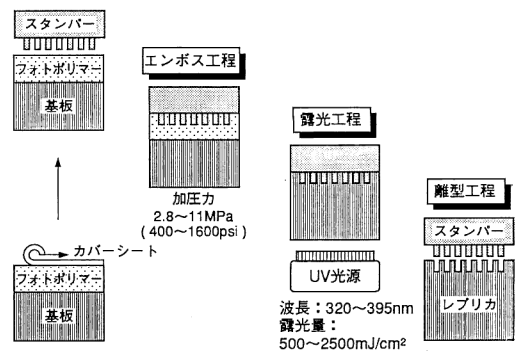


図 4 Dry photopolymer embossing による表面レリーフ HOE の複製法

少する。そこで、イオン交換部上部に、誘電体で位相補償用の格子を形成し、イオン交換深さと誘電体膜厚を選ぶことで、異常光に対しては位相差 π の、常光に対しては位相差ゼロの格子にすることができる。つまり、常光ではこの格子は見えないわけで、常光は HOE を透過し、回折光は生じない。一方、異常光はすべて回折し透過光を生じない。したがって、透過光と回折光の間で、偏光ビームスプリッターとして機能する。消光比が 20 dB 以上のものが容易に形成できるので、光磁気ディスクの光ヘッド用の検光子機能と焦点誤差信号検出機能等を複合した素子として開発されている²³⁾。構造複屈折を用いた同じ原理の偏光素子も提案されている²⁴⁾。

これまでの HOE の設計は、従来ある光学系を代替する光学素子としてなされるが多かった。これに対して HOE でなければできない設計も徐々になされている。著者らが行ったのは、光ディスクの誤差検出光学系において、対物レンズが移動した時にトラッキング誤差信号にオフセットが生じるという問題に対して、対物レンズの移動を考慮して、トラッキング誤差検出専用のホログラムを HOE 上に新しく導入することで解決した⁹⁾。同様な問題に対して、HOE の位相伝達関数を最適化することで解決した例もある²⁵⁾。前者は、HOE が任意形状の複数のホログラム領域に分割できることを、後者は、HOE に任意の波面変換機能を持たせられるという特徴を利用して新しい機能を作り出したといえる。HOE のこのような本来の特徴を活かした素子開発が必要である。

7. 応用の進展

HOE の複合機能性と複製による量産性を特徴として、

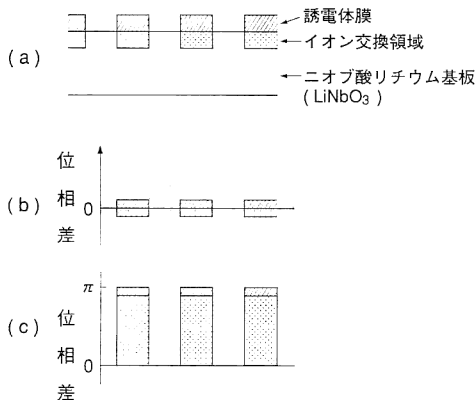


図 5 偏光性 HOE の断面構造と位相分布 (a) 断面構造, (b) 常光に対する位相分布, (c) 異常光に対する位相分布。

バーコード読み取り装置用ホログラムスキャナで始まった実用化は、マイクロオプティクスとしての HOE の応用に変化して行った。CD プレーヤー用の光ヘッドの、読み取り信号光を光軸外へ取り出すビームスプリッターと、焦点誤差信号検出光学系、トラック誤差信号検出光学系の三つの光学機能を 1 枚の HOE に集約した光ヘッドが提案され、この HOE に光路折まげ用のミラー機能をも複合化した反射型 HOE として実用化された⁹⁾。また、従来光ヘッドの組立においては、光検出器の位置調整に多大な工数を必要としていたが、光検出器を機械精度で固定して、HOE の回転調整だけで光ヘッドの組立調整ができることがわかり、組立を合理化する観点からも HOE の実用化が促進された²⁶⁾。HOE はいずれもフォトリソグラフィとエッチングを用いたプレーナバッチプロセスで量産されている。

POS スキャナでは、全方向のバーコードを読み取るために多方向の走査を行う必要があり、このために装置内に多数のミラーを配置していた。これが装置の薄型化の支障になっていた。この改善策として、体積位相型 HOE の回折効率の入射角依存性を巧みに応用した POS スキャナ用の HOE 窓が開発実用化された²⁷⁾。開発された HOE 窓では、装置の走査窓を体積位相型 HOE を複数枚重ねて構成している。各 HOE は装置から出射する走査光の方向を回折によって変換するとともに、被走査物体上に収束する。体積位相型 HOE の回折効率は極めて急峻な入射角依存性を持っているので、重なった他の HOE ではほとんど回折を生じず 0 次回折光として透過するので影響はない。

その他、HOE をスケールとして用いたリニアスケールシステム^{12,13)}、乗用車の運転者に外部視界に重ねて情報を表示するヘッドアップディスプレイ用の HOE²⁸⁾、コンタクトレンズの内面に HOE でレンズを形成したバイフォーカルコンタクトレンズ²⁹⁾、HOE を用いた斜入射干渉計³⁰⁾などいくつかの商用例がある。

また、興味ある応用の新提案としては、HOE の像再生原理を用いた広視野フォトリソグラフィ法³¹⁾、光接続用のプレーナーオプティクス⁷⁾、OA 機器のディスプレイ視野に原稿を重ねて表示する OA 用コンバイナ³²⁾などをあげることができる。

8. む す び

HOE が回折光学素子という名称に拡大されて、屈折型光学素子や反射型光学素子と同列に論じられるレベルにきたことを述べたが、応用としては従来の光学素子の

置き換えや複合化に留まることなく、HOE でなければ実現できない機能を実現していくことが最も肝要である。

文 献

- 1) J.R. Leger, M. Holz, G.J. Swanson and W.B. Veldkamp: "Coherent laser beam addition: An application of binary-optics technology," *Lincoln Lab. J.*, **1** (1988) 225-246.
- 2) *Technical Digest of 1992 Topical Meeting on Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Applications* (Optical Society of America, Washington, D. C., 1992) Vol. 9.
- 3) *Proc. Int. Lens Design Conf., Monterey, 1990*, Proc. SPIE, **1354** (1990).
- 4) Y. Kimura, S. Sugama and Y. Ono: "Compact optical head using a holographic optical element for CD players," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 668-671.
- 5) Y. Ono: "Use of holographic optical elements in optical storage," *LEOS '90 Conference Proceedings* (1990) pp. 75-78.
- 6) 長野 強, 片山龍一, 須釜成人, 小野雄三: "チップ素子実装による CD-ROM 用小型光ヘッド", 光メモリシンポジウム '92 論文集 (1992) pp. 113-114.
- 7) J. Jahns and S. J. Walker: "Two-dimensional array of diffractive microlenses fabricated by thin film deposition," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 931-936.
- 8) 金馬慶明, 門脇慎一, 山本博昭, 西野清治, 堀 義和, 加藤 誠: "光ヘッド用ブレース化ホログラム素子", 光メモリシンポジウム '92 論文集 (1992) pp. 107-108.
- 9) Y. Kimura, S. Sugama and Y. Ono: "High performance optical head using optimized holographic optical element," *Proc. Int. Symp. on Optical Memory 1987*, *Jpn. J. Appl. Phys. Suppl.*, **26** (1987) pp. 131-135.
- 10) J.N. Latta: "Analysis of multiple hologram optical elements with low dispersion and low aberrations," *Appl. Opt.*, **11** (1972) 1686-1696.
- 11) 森 一成: "マイクロフレネルレンズ", 光学, **16** (1987) 52-57.
- 12) 谷口佳代子: "レーザスケール", 計量管理, **38** (1989) 771-778.
- 13) 市川宗次: "最近のレーザ応用スケール", 光アライアンス, No. 2 (1991) 26-29.
- 14) A. D. Kathman and S. K. Pitalo: "Binary optics in lens design," *Proc. Int. Lens Design Conf., Monterey, 1990*, Proc. SPIE, **1354** (1990) pp. 297-306.
- 15) K. E. Spaulding and G. M. Morris: "Achromatic wave guide input/output coupler design," *Appl. Opt.*, **30** (1991) 1096-1112.
- 16) F. P. Shvartsman and M. Oren: "Photo-lithographic imaging of computer generated holographic optical elements," Proc. SPIE, **1555** (1991) 71-79.
- 17) F. P. Shvartsman: "Dry photopolymer embossing," Proc. SPIE, **1507** (1991) 383-391.
- 18) K. Yokomori: "Dielectric surface-relief gratings with high diffraction efficiency," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 2303-2310.
- 19) Y. Kimura and Y. Ono: "Polarizing holographic optical element for magneto-optical disk heads," *Tech. Digest of MICROOPTICS Conference '87* (1987) pp. 162-165.
- 20) A. Ohba, Y. Kimura, S. Sugama, R. Katayama, M. Okada, Y. Ono and N. Nishida: "Compact magneto-optical disk head using reflection polarizing holographic optical element," Proc. SPIE, **1078** (1989) 127-130.
- 21) 前田英男, 大内田茂, 北林淳一, 井口敏之: "光磁気ヘッド用高密度デュアルグレーティング", 光学, **20** (1991) 500-506.
- 22) Y. Urino, H. Nishimoto and Y. Ohta: "Birefringent grating polarizer," *Tech. Digest of Second Optoelectronics Conference* (1988) pp. 166-169.
- 23) A. Ohba, R. Katayama and Y. Ono: "Polarizing holographic optical element with low loss and high extinction ratio for magneto-optical disk heads," *Tech. Digest of MICROOPTICS Conference '91* (1991) pp. 242-245.
- 24) A. Sutcliffe, Y. Kimura and Y. Ono: "Grating polarizer using form birefringence," *Tech. Digest of MICROOPTICS Conference '89* (1989) pp. 164-167.
- 25) Y. Honguh and I. Hoshino: "Focusing-error detection using a mixed-aberration-generating holographic optical element," *Proc. Int. Symp. on Optical Memory, 1991*, *Jpn. J. Appl. Phys., Series 6* (1991) pp. 168-171.
- 26) Y. Yoshida, T. Miyake, Y. Kurata and T. Ishikawa: "Three beam CD optical pickup using a holographic optical element," Proc. SPIE, **1401** (1990) 58-65.
- 27) K. Yamazaki, T. Ichikawa, H. Aritake, F. Yamagishi, H. Ikeda and T. Inagaki: "New holographic technology for a compact POS scanner," *Appl. Opt.*, **29** (1990) 1666-1670.
- 28) 水野 透: "ヘッドアップディスプレイ用ホログラム光学素子", HODIC Circular, No. 3 (1992) 2-7.
- 29) Pilkington 社カタログ, DiffraX—The world's first diffractive contact lens.
- 30) 鈴木正根: "ホログラフィック・オプティカル・エレメントを用いた斜入射干渉計", 光技術コンタクト, **25** (1987) 709-715.
- 31) J. Brook and R. Dandliker: "Submicrometer holographic photolithography," *Solid State Technology*, November (1989) 91-94.
- 32) M. Kato, H. Aritake, F. Yamagishi and M. Nakashima: "Holographic see-through display for image combination," *Tech. Digest of Optical Society of America 1991 Annual Meeting* (1991) pp. 105-106.