

解説

回折光学を用いた光学系の機能設計と応用

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

(1995年8月17日受理)

Efficient Design and Applications in Diffractive Optics

Yuzo ONO

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

1. 回折光学の位置づけと名称

回折光学 (diffractive optics) は光波の回折現象を利用した光学を指す広い意味の言葉であり、回折格子やフレネルゾーンプレートをその範疇に含み、古くから存在している。回折光学がひとつの技術分野として再認識されるようになったのは、ここ数年のことである。特に明確になったのは、1992年2月に diffractive optics の Topical Meeting が開催された頃からである¹⁾。

回折光学の再認識は、2つの技術の流れからきているように思われる。1つはホログラフィー技術であり、他方はバイナリーオプティクス (binary optics, BO, この手法でできた素子は binary optical element, BOE) と呼ばれるリソグラフィー手法による光学素子形成技術である²⁾。ホログラフィーは、物体波面を基準となる参照波面と干渉させて干渉縞として記録する前段階と、記録したホログラムに共役参照波を照射することで物体波を再生する後段との二段階からなる光学技術である。ホログラフィーにおけるこの波面再生原理を、入射波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, HOE) である。一方、BO はリソグラフィー手法で形成する、2値の位相パターンで形成した光学素子技術であり、変換波面はやはり回折波面である。しかしながら HOE においても、製作方法が従来のレーザー光による干渉縞記録から、電子計算機上で計算した干渉縞を電子ビーム描画装置等で描き出す CGH (computer generated hologram) に移行し、BO の手法と変わらなくなっている。

こうした回折光学素子 (diffractive optical element, DOE) が再認識されたのは、光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への小型化、複合機能化、量産性の改善の要請からである。興味あることは、HOE が主に日本でコンシューマー機器への応用を目的に、BOE が主に米国で防衛・宇宙産業への利用を目的に開発されたことである。

回折光学の定義は明確なものではないので、回折光を生じない、格子ピッチが波長の 1/2 以下の周期構造の光学現象も含んで語られる場合もある。これは周期構造の光学とでもいうべきものであるが、量子効果が出現するほど小さい周期構造は含まないのが普通である。

上述した技術分野相互の包含関係を図示すると、図1のように表すことができる。

2. DOE の光学設計

2.1 回折光学における光線追跡の基本関係式

屈折における光の進行方向の変換はスネルの法則で、反射におけるそれは鏡面对称の関係で表され、各々方向余弦を用いて記述される³⁾。同様に、回折における関係式は波数整合から次式で表される⁴⁾。ここで、 l , m , n は方向余弦を、下添字 in および out は入射光と出射光を各々表す。 N は回折次数を、 λ は波長を、複号は + が透過回折波を、- が反射回折光を表す。また、 $\nu_x(x, y)$, $\nu_y(x, y)$ は入射位置での x 方向 y 方向の空間周波数を表し、DOE の位相の 1 次微分で求められる。

$$\begin{aligned}
 l_{\text{out}}(x, y) &= l_{\text{in}}(x, y) + N\lambda\nu_x(x, y) \\
 m_{\text{out}}(x, y) &= m_{\text{in}}(x, y) + N\lambda\nu_y(x, y) \quad (1) \\
 n_{\text{out}}(x, y) &= \pm[1 - l_{\text{out}}(x, y)^2 - m_{\text{out}}(x, y)^2]^{1/2}
 \end{aligned}$$

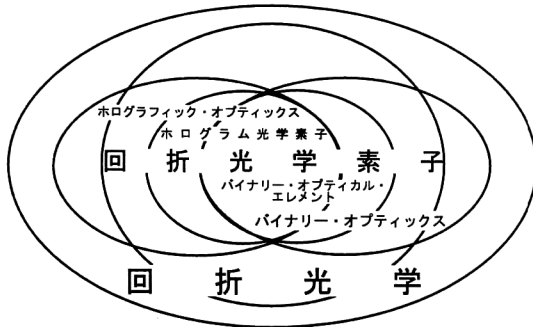


図1 回折光学の技術分野を構成する技術および素子の名称の関係

本関係式を用いることで、光線追跡による回折素子の設計が可能である。他の方法として Sweatt の提案した等価屈折素子法がある⁵⁾。この方法では、波長 λ における位相を屈折率と屈折素子の厚さで等価的に表すので、屈折素子の光線追跡プログラムが適用できる。

このように、設計上は、屈折素子、反射素子、回折素子は同等に扱うことができる。

2.2 位相(空間周波数)分布の設計法

リソグラフィ手法以前に、レーザービームの干渉によって素子を製作した時期には、HOEを参照波面で無収差再生する系を用いたり、通常の光学系の範囲で干渉波面を最適化したり、あるいは通常光学系の波面とCGH再生波面との干渉で位相関数を最適化することが行われた。Leeらは、最適化のためのCGH再生波面を決定するのに、位相関数と収差関数を対応付けた⁶⁾。その他、Onoらはレンズ設計のアナロジーから複数の球面波の位相をホログラフィックな手法で合成することで、ゾーンプレート型素子の最適設計する方法を示した^{7,8)}。

電子ビーム露光でマスクパターンを描き出すBOの手法に移ってからは全く自由な干渉縞を描画できるようになったので、位相関数を位置座標の高次多項式で表し、その係数を最適化する手法が開発された。これには、いくつかの手法があり、基本的に最小自乗法を用いて平均自乗波面誤差を最小化する方法には Fienup らの解析的手法⁹⁾、Ono らの準解析的手法¹⁰⁾がある。Goto らは、これらと同じ高次多項式で表された位相関数から収差関数を導き、光線の収差が小さく保たれるように位相関数を解析的に決定する方法を提案している^{11,12)}。Herzig らの提案した微分手法もある¹³⁾。このほか位相関数の最適化において、評価関数の構成要素間の拮抗関係も明ら

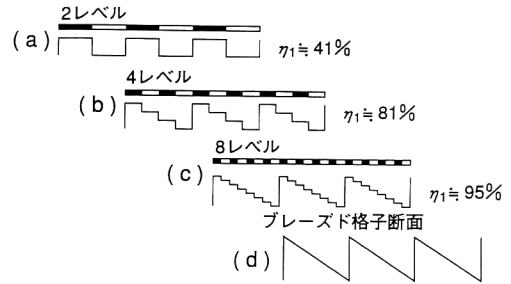


図2 マルチ位相レベル DOE の製作法の模式図²⁾
(a), (b), (c)の順にフォトマスクを用いてエッチングする。(d)は本来のブレード格子の断面。

かにされている¹⁴⁾。

2.3 回折効率の設計

DOEを用いる上での問題点としては、回折効率の低さをあげなければならない。これの解決法としては、体積位相型の材料を用いることと、マルチ位相レベルでブレード化する2つの選択肢がある。体積位相型材料では、フォトポリマーにフォトマスクを密着して回折素子を形成する方法および材料が開発されている¹⁵⁾。体積位相型材料では、入射光の角度選択性および波長選択性がきわめて強く、この点に応用上留意する必要がある。しかし、この選択性を特徴として利用することもできる。

マルチ位相レベルのブレード格子は、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²⁾。 k 次回折光の回折効率の最大値 η_k は、

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

である。これはいうなれば、デジタルブレードでもいうべきもので、断面加工は N 枚のフォトマスクを用い N 回エッチングまたはリフトオフをすることで図中に示す回折効率を実現できる。ただしフォトマスクの目合せ精度を考えると比較的低空間周波数での適用技術といえる。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もできる。本技術による回折効率の向上で、回折素子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¹⁶⁾。最近では、回折角が大きい部分では、深い溝は必要であるがピッチを小さくせずすむ、高次の回折光を使うことも提案されている¹⁷⁾。また、構造複屈折を用いることで、格子部分の実効屈折率を格子周期方向に周期的に単調増加させることでブレード格子を形成することも提案されている¹⁸⁾。

3. DOE の機能と応用

3.1 DOE の機能分類と機能設計

DOE の機能は、レンズ機能素子、分岐/合波機能素子、光強度分布変換素子、波長フィルター機能素子の 4 つに大別できる。回折素子を用いたレンズ機能の特徴は、屈折材料に比べ、分散の符号が逆でしかも絶対値が 2 桁近く大きい点である。これは、単一素子として使うときは、色収差という形で欠点となるが、屈折素子と組み合わせる際には、屈折素子の色収差補正素子として長所となる。また、色分散を積極的に波長フィルター素子機能として用いることもできる。

DOE として、その特徴が発揮されるのは、分岐・合波素子として機能させたときである。すなわち、複数の回折光を用いる場合で、これは屈折・反射素子では実現できない機能である。また、複数の回折光を用いたり、回折効率の分布を制御することで光の強度分布変換素子ができるのも特徴のひとつである。

これまでの DOE 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 DOE でなければできない設計も徐々になされている。DOE が任意形状の複数の素子領域に分割できることを利用して、光ディスクの誤差検出光学系において、トラッキング誤差検出専用の DOE を導入することで、対物レンズが移動したとき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が解決されている¹⁹⁾。同様な問題に対して、DOE の任意の波面変換機能をもたせられるという特徴を利用して、DOE の位相伝達関数を最適化することで解決した例もある²⁰⁾。DOE 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。

DOE の新しい機能として、偏光性の DOE をあげることができる。複屈折性結晶に DOE をイオン交換で形成する方法が開発された²¹⁾。図 3 に格子断面構造と位相分布を示す。イオン交換によりニオブ酸リチウム表面層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 0 の格子にすることができる。つまり、常光ではこの格子はみえないわけで、常光は DOE 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実用化されている²²⁾。

3.2 機能応用例

DOE の複合機能性と複製による量産性を特徴として、バーコード読取り装置用ホログラムスキャナーで始まった実用化は、マイクロオプティックスとしての DOE の応用に变化していった。CD プレイヤー用の光ヘッドを代表とする初期の応用例はすでに別報で報告した²³⁾。

最近の例では、図 4 にフロプロティカルディスクのトラック誤差検出に実用されている光学系を示す²⁴⁾。一對のホログラムレンズで回折した光をディスク面で互いに干渉させる。この結果、ディスクのトラックピッチと同じピッチの投影格子ができたことになる。この格子とディスクトラックのモアレ縞の強度を観測することでトラックずれが検出できる。トラックずれの方向は、位相が 90° ずれた干渉縞をもう 1 つ発生させ、2 つのモアレ縞の変化から検出できる。この方法の特長は焦点深度が深いこと、複数トラックの溝の平均をみていることになるので、ゴミや欠陥によるノイズに強いことである。

記録型の光ディスクでは、対物レンズが軸上色収差をもっていると、記録と読出しの動作の切替え時に半導体レーザーの波長変化によって、フォーカサーボがはずれる。これを補正するために、非球面グブレットの一面(平行光入射側)を回折レンズ化した対物レンズが開発された²⁵⁾。図 5 に示すように、回折面は回転対称連続非球面を輪帯状に分割し、基準波長の入射光の場合に透過光の波面が接続するよう、分割線で外側の輪帯を光路長 1λ フレズ厚さが厚くなる方向にシフトさせた形状で

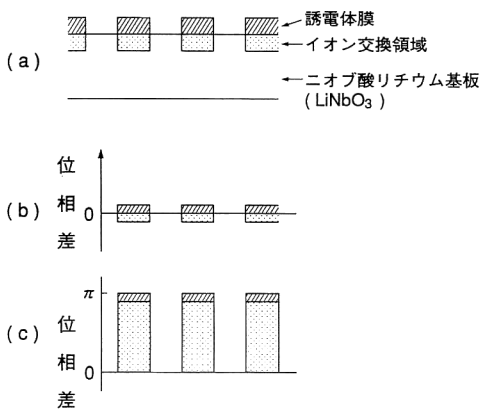


図 3 偏光性 HOE の断面構造と位相分布²²⁾

(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。

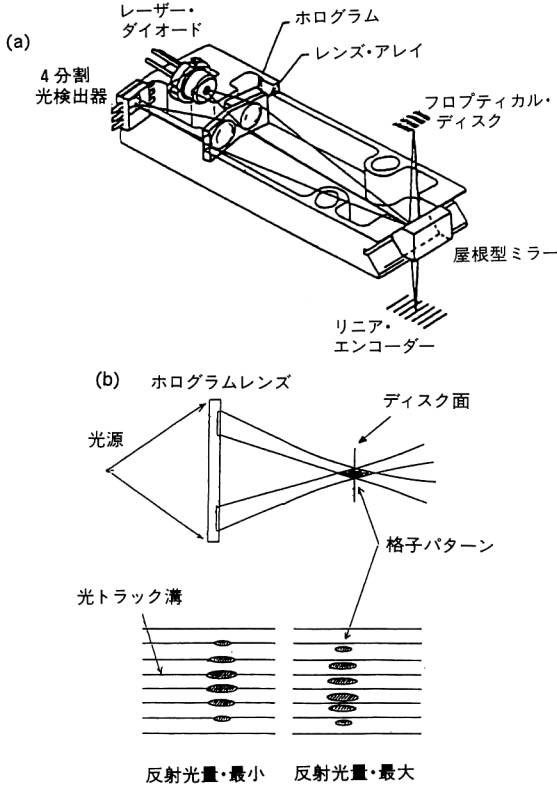


図4 フロプティカルディスクの光ヘッド²⁴⁾
(a)光学構成, (b)モアレ検出法の原理説明図。

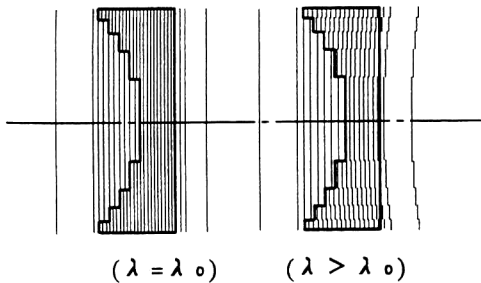


図5 色収差補正対物レンズの回折面での波面変換²⁵⁾
(模式図, 実際は凸面)

ある。この構成により、基準波長以外の光に対しては収束、発散波面を生成し、レンズの分散による色収差と打ち消し合う。

厚さ1.2 mmと0.6 mmのいずれの光ディスク基盤からも情報読取りができるように、複数の回折光を利用した二焦点レンズが開発された²⁶⁾。図6の光ヘッド構成に示されるように、0.6 mm厚のディスクは0次回折光で読み、1.2 mm厚のディスクはインラインの1次回折

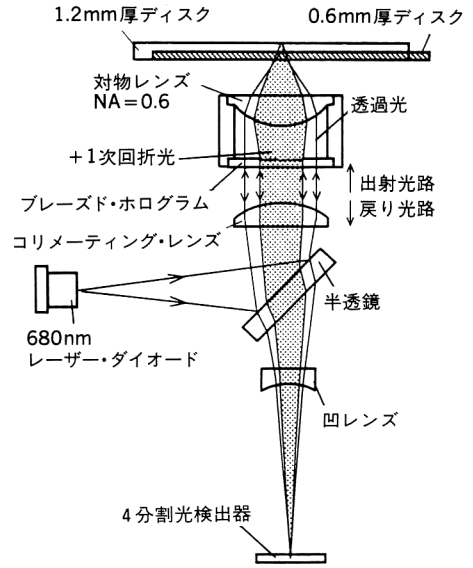


図6 回折型二焦点対物レンズを用いた光ヘッド²⁶⁾

光で読む。DOEには1.2 mm厚の基盤で生じる球面収差を補正するレンズ作用をもたせている。さらに、DOEの外周部分の回折効率を小さくすることで、1.2 mm厚基盤に対する対物レンズへの実効入射光束径を小さくし、対物レンズの実効NAも変化させている。当初対物レンズに組み合わせるDOEとして開発されたが、前述の色収差補正対物レンズと同様対物レンズの非球面上に一体で形成されるようになった。

4. ま と め

DOEがひとつの光学技術分野として再認識され、屈折型光学素子と反射型光学素子と同列に論じられるレベルにきた。これにはリソグラフィ技術の一般化や、フォトマスクの電子ビーム描画が産業として成立してきたという背景もある。しかし、DOEを従来のバルク屈折素子と比較すると、単機能の性能においては、まだまだ従来素子を凌駕できない。したがってDOEの応用としては、従来素子の置換えや複合化に留まることなく、DOEの独自性を用いた機能を実現してゆくことが最も肝要である。

文 献

- 1) Technical Digest of 1992 Topical Meeting on Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Applications (1992).
- 2) 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.
- 3) 久保田広: 光学 (岩波書店, 東京, 1964) pp. 2-4.
 - 4) H. W. Holloway and R. A. Ferrante: "Computer analysis of holographic systems by means of vector ray tracing," *Appl. Opt.*, **20** (1981) 2081-2084.
 - 5) W. C. Sweatt: "Describing holographic optical elements as lenses," *J. Opt. Soc. Am.*, **67** (1977) 803-808.
 - 6) W.-H. Lee: "Holographic grating scanner with aberration corrections," *Appl. Opt.*, **16** (1977) 1392-1399.
 - 7) Y. Ono and N. Nishida: "Holographic laser scanners using generalized zone plates," *Appl. Opt.*, **21** (1982) 4542-4548.
 - 8) Y. Ono and N. Nishida: "Systematic design method for holographic zone plates with aberration corrections," *Appl. Opt.*, **26** (1987) 1137-1141.
 - 9) K. A. Winick and J. R. Fienup: "Optimum holographic elements recorded with nonspherical wave fronts," *J. Opt. Soc. Am.*, **73** (1983) 208-217.
 - 10) Y. Ono and N. Nishida: "Holographic optical elements with optimized phase transfer functions," *J. Opt. Soc. Am. A*, **3** (1986) 139-142.
 - 11) K. Goto and Y. Wang: "Analytical design for holographic optical scanning elements," *光学*, **18** (1989) 489-494.
 - 12) K. Goto and A. Terasawa: "Analytical design of holographic optical elements for Fourier transform," *J. Opt. Soc. Am. A*, **7** (1990) 2109-2118.
 - 13) H. P. Herzig and R. Dandliker: "Holographic optical scanning elements: analytical method for determining the phase function," *J. Opt. Soc. Am. A*, **4** (1987) 1063-1070.
 - 14) 石井行弘: "ホログラムスキャナー素子の解析とLBPへの応用", *ホログラフィック・ディスプレイ研究会会報*, No. 3 (1992) 17-21.
 - 15) F. P. Shvartsman and M. Oren: "Photo-lithographic imaging of computer generated holographic optical elements," *Proc. SPIE*, **1555** (1991) 71-79.
 - 16) 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", *光メモリンポジウム '92 論文集* (1992) pp. 107-108.
 - 17) G. M. Morris and D. Faklis: "Achromatic and apochromatic diffractive singlets," *Tech. Digest of 1994 Diffractive Optics Top. Meeting, JMC4* (1994) pp. 53-56.
 - 18) M. W. Farn: "Binary grating with increased efficiency," *Appl. Opt.*, **31** (1992) 4453-4458.
 - 19) 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.* **26-4** (1987) 131-135.
 - 20) 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., Ser. 6* (1991) 168-171.
 - 21) Y. Urino, H. Nishimoto and Y. Ohta: "Birefringent grating polarizer," *Tech. Digest of Second Optoelectronics Conference* (1988) pp. 166-169.
 - 22) 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 Conf. '91* (1991) pp. 242-245.
 - 23) 小野雄三: "ホログラム光学素子の最近の展望", *光学*, **22** (1993) 126-130.
 - 24) 谷口幸夫: "ホログラムレンズ", *ホログラフィック・ディスプレイ研究会会報*, No. 3 (1993) 5-12.
 - 25) 丸山晃一, 岩城 真, 若宮俊一郎, 小川良太: "光磁気ディスク用回折色収差補正対物レンズ", *1994年春季第41回応用物理学関係連合講演会講演予稿集*, No. 3, 29 a-L-11 (1994) p. 1018.
 - 26) Y. Komma, S. Nishino and S. Mizuno: "Dual focus head for 0.6 mm and 1.2 mm disks," *Opt. Rev.*, **1** (1994) 27-29.