

最近の回折光学素子

——回折光学から周期構造の光学へ——

小野 雄三

Recent Advances in Diffractive Optical Elements: From Diffractive Optics towards Periodic Structure Optics

Yuzo ONO

Recent developments in the applications of diffractive optical elements are reviewed focusing on the remarkable progressive areas such as optical disk pickups, white light imaging lenses and optical elements for display devices. As a recent research trend, it is pointed out that diffractive optics progresses towards micro periodic structure including resonance domain and subwavelength structure, and three-dimensional periodic structure, that is, photonic crystals. A method of recording four-wave interference fringe is introduced for generating arbitrary three-dimensional photonic crystals as an extension of the technique, which has been used for generating diffractive optical elements. It is described that the effective medium theory, which has been adopted in the analysis of optical properties of subwavelength structures, can be applied for analyzing the optical properties of three-dimensional photonic crystals. It is concluded that photonic crystals are under the category of extended diffractive optics.

Key words: diffractive optical element, diffractive optics, photonic crystals, subwavelength structure, effective medium theory

ちょうど10年前の光学誌に「ホログラム光学素子の最近の展望」と題する展望記事を、その後1995年に「回折光学を用いた光学系の機能設計と応用」と題する解説を書かせていただいた^{1,2)}。その中で、「DOE (diffractive optical element; 回折光学素子) がひとつの光学技術分野として再認識され、屈折型光学素子や反射型光学素子と同列に論じられるレベルにきた。しかし、DOEを従来のバルク光学素子と比較すると、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、従来素子の置き換えや複合化にとどまることなく、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」と論じた。これに対してその後数多くの応用が提案され、実用されてきている。また筆者が、ホログラフィックレンズを用いたスキャナーの収差を論じていたころ³⁾、某

光学メーカーの技術者から「ホログラムを結像素子として使うなどとゆめゆめ考えるな」と忠告をいただいたことがある。しかし現在、DOEはそれまで単色のレーザー光への応用であったものが、波長変動する半導体レーザー光への対応⁴⁾、さらには白色光への対応ができるようになり、結像レンズの主要な構成要素として実用されている^{5,6)}。また、回折光学を形成してきた3つの製作技術として、ホログラフィーの流れである干渉露光、IC産業の発展を背景とするリソグラフィー、非球面レンズ製作技術の流れであるダイヤモンドターニングの発展があることも述べた⁷⁾。

こうした製作技術の円熟および種々の応用への展開の一方で、「基礎理論や設計・最適化技術は完成域に近づいており、限られた材料を用いて作製技術の向上を目指している。研究の中心は応用分野の提案に関するものである⁸⁾、

さらには、「別の見方をすれば、(少なくとも光学・物理学の) 研究としての回折光学は終わったと感じた」⁹⁾とも論じられているのが現状であると認識する。筆者も2002年6月にOSA主催のDiffractive Optics and Micro-Opticsに出席して同様な印象を受けた¹⁰⁾。それでは、回折光学はどこへ行こうとしているのか、研究面では、周期と次元において展開していると筆者はみている。周期についてはresonance domainを含めて波長程度より小さい周期のsubwavelength structure (SWS)の研究^{11,12)}、次元に関しては三次元フォトニック結晶への展開である^{11,13)}。こうした観点から副題を「一回折光学から周期構造の光学へ」と付けさせていただいた。本特集号の巻頭言を野田進先生をお願いしているのは、担当編集委員もそう感じているからではないだろうか。本稿では、まず応用展開をいくつか分類して紹介した後、三次元フォトニック結晶とのかかわりについて、筆者らの最近の研究を含めて述べさせていただくことにする。

1. 応用の展開

回折光学素子のメーカーがすでに何社もある。日本のメーカーはプラスチック精密成形メーカー、光ディスクピックアップの光学素子メーカー、電子機器メーカー、光学メーカー等で、技術開発は民間主導でなされたものである。日本で回折光学素子をテーマとした国の研究開発投資は、1980年代前半の「光応用計測制御システムの研究開発」(通称光大プロ)と、昨年度終結したRWC (real world computing) プロジェクト関連があるが、これらはプロジェクト内のごく一部の活動に過ぎなかった。(財)大阪科学技術センターを中心に1997~2002年度に行われた大阪府地域結集型共同研究事業「テラ光情報基盤技術開発」では、回折光学素子・SWS素子の製作技術を中心とした研究開発を推進しており、成果の事業化が期待されている¹⁴⁾。米国では、防衛産業や国立研究所、大学等での研究がもとになり、何社かが起業している。Digital Optics, Hoetron, WaveFront Sciences, Corning Rochester Photonics等である。また、米国では研究開発の効率化を目的に、ARPA (Advanced Research Projects Agency, 米国防衛省の研究・開発部門) が率いるCO-OP (Consortium for Optical and Optoelectronic Technologies in Computing) とHoneywellが中心になって、回折光学素子のファウンドリーが1995~1996年に試行されたことがあり、日本にも声がかかったが、成果のほどは定かでない。欧州では、ユーレカプロジェクトやいくつかのEU内プロジェクトで回折光学の研究開発が推進され、大学からの起業を含めて多く

の企業が活動している。Colibrys, CSEM, Heptagon, Leister Process Technology, Nanocomp, Optics.org, Light Trans等の企業である。これら欧米ベンチャーのDOMO2002での発表はことごとく商標付で、商用化に躍起である。それに比べれば、日本では民間主導で着実に応用を商用化してきたといえよう。

とりあげるべき応用は多岐にわたるが、ひとつの流れを形成していると思われる光ディスク用光ピックアップ・光ヘッド、結像レンズ、ディスプレイ用素子のほか、能動型DOE, その他の5項目に分類してみる。

1.1 光ディスク用光ピックアップ・光ヘッド

最も広く応用されている分野だといえる。1986年の学会発表と展示会デモ後¹⁵⁾、数多くのアイデアが出され商用化されている。当時はまだホログラムあるいはホログラム光学素子とよばれていた時代である。回折光学素子とよばれるのは1990年代になってからであるが、筆者にとってはこの呼称の変化は大きな意味がある。光ピックアップよりさらに遡ると、筆者らは干涉露光で原盤を製作するホログラム光学素子であるホログラムスキャナーを商用化した¹⁶⁾。ホログラムディスクの生産は原盤の濃淡干涉縞パターンを転写したフォトレジストのレリーフ格子から電鍍した金型を用いて、プラスチック成形で容易に行われたが、生産設備として干涉記録装置を現場で維持管理することは困難な問題であった。この問題に対する解が、電子ビーム描画による光ピックアップ用ホログラムの製作手法であった。その後、米国のHoetron (当時はPnecom International)¹⁷⁾を含め国内各社から類似ピックアップの発表が相次ぎ、CD用として商用化され、現在ではCD, DVD用の業界標準のようにになっている。当時の発表は参考文献18)の文献欄にみられる。その後CD用だけでなく、光磁気ディスクへ対応できる偏光性ホログラムに発展した¹⁹⁾。この偏光性ホログラムはニオブ酸リチウム結晶を材料とするもので、光磁気信号読み取りに必要とされる高い消光比が得られる。最近は有機材料を用いた偏光性回折光学素子もあり、偏光ビームスプリッターを目的としている^{20,21)}。これら光ピックアップにおいては従来の光学系を回折光学素子に置き換えたものが多いが、CGH (computer generated hologram)の手法を用いて、従来方式の問題点を克服した回折光学素子ならではの新しい方式を試みたものもいくつかある^{22,23)}。

上述の素子は、誤差信号検出機能やビームスプリッター機能、偏光素子機能に関するものであるが、対物レンズに関するものも提案され商用化されている。これはCDの製品化とともに、対物レンズのプラスチック化、すなわち金

型による量産が始まり、ダイヤモンドターニング技術が進展したことによるものといえる。丸山らは書き込み型光ディスクにおいて、書き込み時の半導体レーザーキャビティの瞬間的な温度上昇により波長変動が生じ、これに起因する対物レンズの色収差により焦点ずれが起こる問題に対して、回折素子を用いて色収差補正を行った²⁴⁾。その後、この素子是对物レンズの非球面に回折面を重畳した対物レンズ一体型に発展し、その後の回折型対物レンズ発展の礎となった。またプラスチック化に伴い、温度変化により生じる球面収差の色収差も回折面で補正するように発展した^{25,26)}。DVD/CD 互換対物レンズでも回折レンズが用いられている^{26,27)}。格子の位相差を選択することで、特定の波長では回折せず透過し、他の特定の波長では回折素子として機能させることができ、波長選択性素子が形成できる。これを用いて球面収差の補正と NA の切り替えをする DVD/CD 互換光ヘッドもある²⁸⁾。さらに、球面収差補正の偏光性ホログラムを用いて Blue-NA 0.85/DVD 互換および CD を含めた 3 ディスク互換の光ヘッドも提案されている^{29,30)}。高 NA の光ディスクヘッドでは、ディスクの基板厚誤差に起因する球面収差やディスク傾きに起因するコマ収差を補正する必要があり、これらの収差を検出する手段が回折素子を使って提案されている。焦点誤差検出用の波面を中心部と外周部にホログラムで分割することで球面収差を³¹⁾、メインビームのほかに NA の小さいサブビームを回折素子で生成してコマ収差を検出している³²⁾。

光ディスクではないが、フロプロティカルディスク（磁気記録の大容量フロッピーディスク）にも回折素子を用いた光トラッキング用センサーが開発された^{33,34)}。

このように、光ピックアップ・光ヘッド関係で、回折光学素子が多用され、多くのアイデア提案があり実用されていったのは、ひとつには解決すべき課題が誰にもはっきりしていたこと、また対物レンズや偏光性を含めた素子の製作技術が確立していたことが背景としてあげられる。

1.2 結像レンズ

光ディスク用は前節で述べた。ここでは白色光ないしは広波長域のレンズへの応用をみる。非球面レンズと回折レンズを一体化して設計し、可視全域において色消し機能を有する $f=5\text{ mm}$, $F/2.8$ の回折素子付 1 枚レンズが、監視やデジタルカメラの撮像レンズ用に開発された⁶⁾。ただし、中心波長から外れると回折効率の低下と他次数回折光の影響がある。回折レンズのみで色収差の補正されたレンズを構成するため、中心波長において高次の回折光を用いることで、その前後の複数の回折次数で可視域をカバーする、いわゆる harmonic Fresnel lens も提案され試作され

ている³⁵⁾。白色光用で特筆されるのは、中井らの積層型回折光学素子のカメラレンズへの応用である⁵⁾。発想は harmonic Fresnel lens に似ているようでもあるが、回折次数が 1 次だけ違う 2 枚の回折面を対向させて実質的に 1 次の回折面にしているところが類まれな構成である。可視域全体にわたり回折効率の低下がなく、不要次数の回折光の影響も低減させて色収差補正レンズとしてレンズ系に用いられている。詳細は本号で解説されているので、そちらを参照されたい³⁶⁾。眼視系への応用も検討されている。写真用のように可視光域で十分感度をもつフィルムやセンサーと組み合わせる場合は、波長帯域端での回折効率低下や不要次数回折光の影響が問題になるが、555 nm にピークをもち、可視域両端で極端に感度が低下する人間の比視感度特性と組み合わせるなら、影響は少ないというのが着眼である³⁷⁾。赤外撮像光学系では、屈折光学系の材料の種類が少ないことから、色収差補正を目的に、また、ナルシサス現象（赤外検知器がレンズ面で反射され、検知器自身に反射像として結像される現象）の低減にも効果があるので、回折光学素子が使われている^{38,39)}。

1.3 ディスプレイ用素子

大別してカラーフィルター系と照明系への応用である。カラーフィルター系へ回折素子を応用しようというアイディアは古くからある⁴⁰⁾。反射型単板液晶プロジェクター用にカラーフィルターと光利用率改善用のマイクロレンズアレイの両機能をもつ HOE (holographic optical element) が開発実用化されている。フォトポリマーに干渉露光で製作された体積位相型ホログラムで、その波長選択性を積極的に利用して、一方向から入射する s 偏光の白色光を R, G, B おのおの異なる方向に回折して液晶ライトバルブ上の R, G, B 用素子上に集光する。反射光は p 偏光のためほとんど回折せず、効率よく投射レンズに導かれる⁴¹⁾。光硬化性ポリマーと液晶材料を封入したセル内で二光束干渉により光硬化性ポリマーを格子状に硬化させ、液晶液滴層と光ポリマー層からなる体積位相ホログラムを形成し、セルに電圧無印加では入射光はブラッグ反射し、電圧印加時は格子の屈折率差がなくなり透過する素子が開発されている。これを 3 層構成として用いることで、カラーフィルターおよび偏光板が不要な高反射率の反射ディスプレイを構成できる^{42,43)}。これは回折/非回折を電圧印加で切り替えており、次節で述べる能動型 DOE でもある。液晶の常光屈折率と等しい屈折率のブレード格子を液晶で満たし、常光は非回折、異常光は回折させることで入射光を偏光分離した後、半波長板で回折波の偏光を直交偏光に変換して、液晶プロジェクターの照明光学系の明るさを高めた素子が

開発された。アレイレンズとアレイ化された半波長板を組み合わせている⁴⁴⁾。携帯電話の反射型液晶の反射板として、拡散板で拡散した光を物体光として記録したホログラフィックリフレクターが開発実用化された。白色光に対応でき、実用的な明るさと視野角を実現している⁴⁵⁾。暗い状況下での反射型液晶の照明用導光板に回折格子を用いることが検討されている⁴⁶⁾。一眼レフカメラの焦点板に回折光学素子を使うアイディアは古くからあったが⁴⁷⁾、CGHの手法で、ピクセルサイズ、サブセルサイズ、レベル数を最適化して、電子ビーム描画により明るく自然なポケ像を得ている⁴⁸⁾。ウェアラブルコンピューティングに向けたシースルーディスプレイの外界と表示のコンバイナーとして反射型 HOE が開発された。フォトポリマー製の体積位相型ホログラムの波長選択性でコンバイナー機能をもたせ、また接眼レンズとしての機能も複合して眼鏡に実装された⁴⁹⁾。

1.4 能動型 DOE

前述の光硬化性ポリマーと液晶材料からなる反射型ディスプレイ素子も、外部印加電圧による電気光学効果により回折/非回折を切り替える能動型 DOE である。最近では MEMS (micro electro mechanical systems) 技術による光 MEMS (optical MEMS または MOEMS; micro opto electro mechanical systems) に回折素子を用いたものもある。Si 基板上に SiO₂ のポストにより両端を支持された SiN_x からなる梁を格子状に複数並列し、梁表面および梁間の基板表面に Au 反射膜を成膜した反射型格子素子が、赤外用光チョッパーとして開発された⁵⁰⁾。上部反射膜と基板の間に電圧を印加していない状態では、上下反射膜で反射された光の位相差は 2π に設計されており、入射光は 0 次回折光となって反射される。一方、電圧印加時は静電力により梁は弾性変形をして基板に引き寄せられる。この状態では上下反射膜で反射される光の位相が π ずれ、0 次光が消滅して ± 1 次回折光を主とする回折光が発生する。0 次回折光を検知するようにすれば高い変調率が得られる。1 μm 程度の周期をもつ 2 枚の矩形格子を 1 μm 以下の間隔で対向させ、一方の格子を格子溝に垂直に半周期スライドさせることで、回折/非回折の切り替えを用いる光スイッチも提案されている⁵¹⁾。最近プロジェクションディスプレイに用いられているテキサスインスツルメンツの DMD (digital micromirror device) を空間変調器として用いてダイナミックに CGH を表示することが発表されている。DMD の高速・高分解能、毎秒 2000 フレームの高速ドライバーと組み合わせ、時間多重表示を用いることで 3D 像再生の可能性が示唆されている⁵²⁾。

1.5 その他

熱放射面に光の波長程度の周期構造を形成することで放射スペクトルを制御できる。後述するフォトニック結晶の研究の範疇ともいえるが、白熱電球の高効率化や熱光起電力発電用の高効率選択放射・吸収材の開発を目的に研究されている^{53,54)}。画像の標準化においてはナイキスト周波数以上の空間周波数成分があると、折り返し歪みとよばれる偽信号が発生する。このため固体撮像デバイスの前面に光学的ローパスフィルターを置き、ナイキスト周波数以上の信号成分をカットすることが行われているが、光学的フィルターとして、回折光学素子の提案がある⁵⁵⁾。その他興味深い応用は数多いが、展開の方向ということで、この程度でとどめさせていただく。

2. 三次元フォトニック結晶への展開

2.1 回折光学素子からフォトニック結晶へ

フォトニック結晶は光波長程度の周期で屈折率の周期構造をもつ多次元構造体であるが、最近では多層膜や回折格子を一次元フォトニック結晶ともよび、広い意味でのブラッグ反射・回折構造を指す言葉として使われるようになってきている。フォトニック結晶では、その周期構造によりブラッグ回折を受け、回折した多光波の干渉の結果、光波が伝搬しえないフォトニックバンドギャップが存在する。いうなれば、フォトニック結晶における光波伝搬は原理が回折と干渉に基づいている。光の二重性(波動性と粒子性)のアナロジーから電子にも電子波(ド・ブロイ波)を考え、電子波の波動方程式であるシュレーディンガー方程式をもとに、電子結晶は半導体エレクトロニクスという一大技術・産業分野を形成してきた。フォトニック結晶は、ド・ブロイ波(電子波)を光波(電磁波)に、シュレーディンガー方程式をマクスウェルの波動方程式に、ポテンシャルの周期性を屈折率(誘電率)の周期性に対応させたものといえる。電子結晶からのアナロジーにみえるが、実はその基本は光学で培ってきた周期構造に対する波動の取り扱いの学問そのものである。回折光学素子では、積層型やマルチ位相レベルの特別な場合を除いて、光波の伝搬方向には周期性がないのが普通であるから、伝搬方向に周期構造があることを特徴とするフォトニック結晶の範疇に回折光学素子は包含されない。しかし、回折光学素子を多層に積層すれば三次元フォトニック結晶となる。

フォトニック結晶は半導体を材料とする導波路デバイスへの応用に主眼が置かれているが⁵⁶⁾、バルクの微小光学素子としての実用化が始まっている⁵⁷⁾。さらにバルク光学素子として興味ある現象の解明が「フォトニックバンドエン

「エンジニアリング」あるいは「フォトニック結晶光学」と名付けて展開されている^{58,59)}。また、結像も「フォトニック結晶における『屈折』現象」として解析されており、「強い変調のかかった、つまり屈折率差の大きい物質で構成されたフォトニック結晶のバンドギャップ付近の状態において、負の屈折率を含む人工的屈折率物質を実現することが可能」であることが示されている。これを用いてさまざまな光学部品が設計できるのではないかと指摘されている^{60,61)}。これはSWSにおいて、構造を構成する二物質の中間の実効屈折率が実現されることと類似しているが、フォトニック結晶では屈折率範囲が負を含み拡張されていることや分散、異方性がきわめて大きいことに特徴がある。

それでは、このような三次元フォトニック結晶を回折光学の延長上でどのように形成するか。フォトニック結晶の形成方法には種々の方法が提案されているが、三次元フォトニック結晶は特に形成が難しい。製作方法は浅川らによってよくまとめられており⁶²⁾、シリカ微小球の凝集、スパッタリングによるオートクローニング、エッチングと成膜を繰り返すことでのウッドパイル形成、多光束干渉縞記録がある。さらに付け加えると斜入射X線多方向露光⁶³⁾がある。このうち、多光束干渉縞記録による方法は、回折光学素子ときわめて関係が深く、二光束干渉で作製される回折光学素子であるホログラム光学素子の製作法の三次元周期構造への拡張である。

2.2 多光束干渉による三次元フォトニック結晶の形成

三光束干渉で一眼レフカメラの焦点板が作られたことは先に述べた⁴⁸⁾。この焦点板の基板に平行方向に光を伝搬させれば、二次元フォトニック結晶にほかならない。四平面波の干渉による光強度分布は、 $\mathbf{K}_m, \mathbf{K}_n$ を入射光の波数ベクトルとして次式で表される。

$$I = \frac{1}{2} \sum_{m=0}^3 \sum_{n=0}^3 \mathbf{i}_m \cdot \mathbf{i}_n U_m U_n \cos\{(\mathbf{K}_m - \mathbf{K}_n) \cdot \mathbf{r} + \Delta\phi_{mn}\} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{i}_m, \mathbf{i}_n$ は入射波の偏光方向を規定する単位ベクトル、 U_m, U_n は入射波の振幅、 \mathbf{r} は観測点すなわち干渉点を表す位置ベクトル、 $\Delta\phi_{mn}$ は2光波間の初期位相差をおのおの表す。簡単のため $\Delta\phi_{mn}$ を0と仮定すると、光強度が最大になる条件は式(1)においてすべての $(\mathbf{K}_m - \mathbf{K}_n) \cdot \mathbf{r}$ が 2π の整数倍になる場合で、 m_1, m_2, m_3 を整数として、次の3式が満たされる場合である。

$$\left. \begin{aligned} (\mathbf{K}_o - \mathbf{K}_p) \cdot \mathbf{r} &= 2\pi m_1 \\ (\mathbf{K}_q - \mathbf{K}_r) \cdot \mathbf{r} &= 2\pi m_2 \\ (\mathbf{K}_s - \mathbf{K}_t) \cdot \mathbf{r} &= 2\pi m_3 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、 $o \neq p, q \neq r, s \neq t$ で、かつ o, p, q, r, s, t は $0 \sim 3$ をすべて含まなければならない。一方、固体物理学では、格子空間における各格子点は基本並進ベクトル $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ を用いて次式で表される。

$$\mathbf{T} = n_1 \mathbf{a} + n_2 \mathbf{b} + n_3 \mathbf{c} \quad (3)$$

ここで、 n_1, n_2, n_3 は整数である。また固体物理学では、逆格子空間における基本並進ベクトル $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ は次式で定義される。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A} &= 2\pi \frac{\mathbf{b} \times \mathbf{c}}{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \times \mathbf{c}} \\ \mathbf{B} &= 2\pi \frac{\mathbf{c} \times \mathbf{a}}{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \times \mathbf{c}} \\ \mathbf{C} &= 2\pi \frac{\mathbf{a} \times \mathbf{b}}{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} \times \mathbf{c}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式(3)、(4)から、

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A} \cdot \mathbf{T} &= 2\pi n_1 \\ \mathbf{B} \cdot \mathbf{T} &= 2\pi n_2 \\ \mathbf{C} \cdot \mathbf{T} &= 2\pi n_3 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

なる関係があり、これらの式は式(2)と同じ形をしている。すなわち、入射波の波数ベクトルの差 $\mathbf{K}_o - \mathbf{K}_p, \mathbf{K}_q - \mathbf{K}_r, \mathbf{K}_s - \mathbf{K}_t$ が所望の結晶格子の逆格子ベクトル $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ と一致するように入射波の方向を決定すれば、光強度の最大となる点 \mathbf{r} は所望の結晶の格子点 \mathbf{T} となるので、この干渉縞を感光体に記録することで所望の三次元フォトニック結晶を作製できる⁶⁴⁻⁶⁶⁾。固体物理学でいうところのブレーベ格子14種類すべて⁶⁷⁾のほか、ダイヤモンド構造も形成できる^{66,68)}。この方法では三次元の各方向で周期を変えたり、欠陥つまり周期性の欠如する部分を導入したりもできる⁶⁹⁾、むしろ欠陥のない、ある程度大きさの様なフォトニック結晶を容易に形成できるので、上述した新しい光学材料としての応用が期待できる。

2.3 三次元フォトニック結晶の等価屈折率法による解析

一次元SWSにおいて、筆者らは格子をフィルファクターで決まる実効屈折率をもつ多層膜で近似して反射率を求め、SWS格子のantireflection特性を解析した⁷⁰⁾。この手法は、二次元の格子断面プロファイルを一次元の屈折率プロファイルをもつ多層膜にすることで、次元を落として計算していることになるが、マクスウェルの方程式を厳密解に対してよい近似であることが後に示されている⁷¹⁾。同様のことを三次元フォトニック結晶の解析においても試みた。計算を容易にするためにフォトニック原子の断面が四角形になるように、原子形状を八面体でモデル化してさらに多層膜に分割し、各層を実効屈折率で近似することで

透過スペクトルの計算を行い、ストップバンドの出現を確認した⁷²⁾。通常フォトニック結晶の透過スペクトルの計算は平面波展開法等で行われるが⁷³⁾、これに比べて実効屈折率近似による計算はきわめて簡単・高速である。このように、回折光学素子・SWS素子の次元拡張であるフォトニック結晶においては、少し工夫することでこれまで用いてきた計算手法が適用できるのである。これは上述したように、フォトニック結晶における光波伝搬は原理が回折と干渉に基づいているからといえる。つまりフォトニック結晶は拡張された回折光学の範疇である。

周期構造の光学へ発展しつつある回折光学の現状を述べた。回折光学の応用への展開について、筆者は企業で長く研究開発に携わった経験から、次の2点を感じている。①成功例は発表されるが、失敗事例(課題)は発表されない。②問題点(課題)は克服されたとき明らかにされる。したがって非当事者は解決に至るであろうアイデアをもっているも課題を知る由がない。回折光学のようにユニバーサルな技術ではない、適用範囲がまだ限られる技術については、課題の発見が最も重要であり、「必要は発明の母」の言葉どおりである。フォトニック結晶光学ともいわれている周期構造の光学に、回折光学分野あるいは光学分野からもっと進出していくことが必要である。そこには新しい光学材料と新しい光学素子が創製されよう。

文献に関して、荒木敬介(キヤノン)、丸山晃一(ペンタックス)、宮前博(コニカ)の各氏にお世話になった。御礼申し上げます。

文 献

- 1) 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.
- 2) 小野雄三：“回折光学を用いた光学系の機能設計と応用”，光学，**24** (1995) 713-717.
- 3) 小野雄三：“一般化したゾーンプレートを用いたホログラフィックレーザスキャナ”，光学，**13** (1984) 374-382.
- 4) 木村靖夫，小野雄三，須釜成人，太田義徳：“複数機能ホログラムレンズを用いた小型光ヘッド”，1986年秋季第47回応用物理学学会学術講演会講演予稿集，No. 3, 30p-ZE-1 (1986) p. 227.
- 5) 中井武彦，小川秀樹：“積層型回折光学素子の研究とカメラレンズへの応用”，光技術コンタクト，**39** (2001) 540-545.
- 6) 朴 一武：“回折素子付プラスチックレンズ”，光学，**27** (1998) 520-521.
- 7) 小野雄三：“はじめに”，日本光学会光設計研究グループ監修，回折光学素子入門(オプトロニクス社，1997) pp. 1-4.
- 8) 市川裕之：“回折光学分野の研究動向と将来展望”，O plus E，**21** (1999) 511-519.
- 9) 市川裕之：“DO'99 会議報告”，O plus E，**21** (1999) 1382-1385.
- 10) *Technical Digest of Diffractive Optics and Micro-Optics* 2002. なお，Postconference Edition が，OSA から TOPS vol. 75 として発行されている.
- 11) 西原 浩ほか：特集“微細構造による光制御”，光学，**27** (1998) 1-32.
- 12) 菊田久雄：“サブ波長領域の回折格子”，O plus E，**21** (1999) 543-550.
- 13) 馬場俊彦ほか：特集“フォトニック結晶”，O plus E，**21** (1999) 1524-1582.
- 14) H. Kikuta, K. Takahara, H. Toyota, T. Hamamoto and Y. Wanji: “Diffractive optics and subwavelength structure in ‘Joint-Research Project for Regional Intensive in Osaka Prefecture’,” *Proceedings of 2nd International Conference on Optical Design and Fabrication (ODF2000)*, AP002138, TA04 (2000) pp. 101-103.
- 15) “CD プレーヤーにホログラムを応用”，日経産業新聞(1986年9月25日).
- 16) 西田信夫，小野雄三：“ホログラムスキャナを用いたバーコードリーダー”，O plus E, No. 17 (1981) 77-83.
- 17) W.-H. Lee: “Holographic optical head for compact disk applications,” *Opt. Eng.*, **28** (1989) 650-653.
- 18) 倉田幸夫，石川俊夫，P. Coops, A. Duijvestijn：“ホログラムを用いたCD用ピックアップ”，O plus E, No. 117 (1989) 80-86.
- 19) A. Ohba, S. Sugama, Y. Kimura, R. Katayama, Y. Urino and Y. Ono: “Compact magneto-optical disk head using holographic optical element with analyzer function,” *Proceedings of Topical Meeting on Optical Data Storage 1990*, Proc. SPIE, **1316** (1990) 159-166.
- 20) 佐藤弘昌，村田浩一，郡島友紀：“高分子液晶を用いた偏光性回折素子”，電子情報通信学会技術研究報告，CPM98-107 (1998) 7-14.
- 21) 林 賢一，小林一雄，福澤孝久：“ポリジアセチレンを用いた偏光性HOE”，Optics Design, No. 20 (2002) 50-55.
- 22) 本宮佳典，星野 功，村上照夫：“混合収差による焦点誤差検出用HOE素子の開発”，第38回応用物理学関係連合講演会講演予稿集，No. 3, 29p-C-2 (1991) p. 958.
- 23) 森 和思，松本光晴，富永浩司，田尻敦志，澤田 稔：“新機能HOEを用いた新焦点誤差検出方式の提案”，第62回応用物理学学会学術講演会講演予稿集，No. 3, 12p-B-3 (2001) p. 883.
- 24) 丸山晃一，岩城 真，若宮俊一郎，小川良太：“光記録用対物レンズの色収差補正”，Optics Design, No. 2 (1994) 7-10.
- 25) K. Maruyama and J. Kamikubo: “Diffractive-refractive achromats for semiconductor laser,” *Proceedings of International Optical Design Workshop (ODF'98)*, TuA3 (1998) pp. 45-48.
- 26) K. Maruyama and R. Ogawa: “Background of compensation of DVD/CD compatible diffractive lens,” *Proceedings of 2nd International Conference on Optical Design and Fabrication (ODF2000)*, TA02 (2000) pp. 93-96.
- 27) 田中康弘，山形道弘，金馬慶明，水野定夫，春原正明：“ホログラム一体型2焦点対物レンズ(1)レンズ設計”，第56回応用物理学学会学術講演会講演予稿集，No. 3, 29a-ZA-8 (1995) p. 956.
- 28) R. Katayama, Y. Komatsu and Y. Ono: “Dual wavelength optical head for 0.6 mm and 1.2 mm substrate thicknesses,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36** (1997) 460-466.
- 29) K. Park, T. Lee, J. Lee, J. Kim, M. Lee, G. Lee, S. Jeong and J. Kim: “HD/DVD compatible pick-up adapting single objective lens,” *Technical Digest of Joint International Symposium on Optical Memory and Optical Data Storage*

- 2002, TuC. 4 (2002) pp. 165-167.
- 30) 海保直樹, 竹谷智良, 新藤博之, 森下一郎, 伊湧 漢, 鄭 錦 燮: “Blu-ray Disc 用 Pick Up における DVD/CD 互換技術”, 第 63 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, No. 3, 27p-YD-5 (2002) p. 1008.
 - 31) 島野 健, 有吉哲夫, 木村茂治: “光ディスク基板厚ずれ球面取差のリアルタイム検出と自動補正”, *Optics Design*, No. 26 (2002) 4-9.
 - 32) R. Katayama, S. Meguro, Y. Komatsu and Y. Yamanaka: “Radial tilt detection using 3-beam optical head,” *Conference Digest of Optical Data Storage 2000*, WD4 (2000) pp. 203-205.
 - 33) 谷口幸夫: “ホログラムレンズ”, *HODIC Circular*, No. 3 (1998) 668-671.
 - 34) 河野裕之, 笹川智広, 西前順一, 佐藤行雄: “大容量 FDD 対応プレーナオプティクス型光トラッキングセンサーの開発”, 第 59 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, No. 3, 16p-ZA-1 (1998) p. 871.
 - 35) D. Sweeney and G. Sommargren: “Single element achromatic diffractive lens,” *Technical Digest of Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Applications 1994*, DMB2 (1994) pp. 26-29.
 - 36) 中井武彦: “白色用回折レンズ”, *光学*, 32 (2003) 476-482.
 - 37) 丸山晃一: “回折レンズの眼視系への応用”, *Optics Design*, No. 13 (1997) 24-29.
 - 38) 鈴木 等: “赤外光学系への応用”, *光技術コンタクト*, 37 (1999) 488-492.
 - 39) 鈴木二郎, 玉川恭久: “DOE 交換方式によるデュアルバンド撮像光学系の開発”, *Optics Japan '99 講演予稿集*, 23aA5 (1999) pp. 33-34.
 - 40) K. Knop: “Color pictures using the zero diffraction order of phase grating structures,” *Opt. Commun.*, 18 (1976) 298-303.
 - 41) 山崎哲広, 徳見正人, 鈴木鉄二, 中垣新太郎, 清水滋雄: “単板 D-ILA ホログラム素子”, *HODIC Circular*, 21, No. 1 (2001) 2-7.
 - 42) 伊達宗和: “ホログラフィック高分子分散液晶 (HPDLC)”, *HODIC Circular*, 21, No. 1 (2001) 17-22.
 - 43) 上原伸一, 斉藤悟郎, 村井秀哉, 五藤智久, 三村広二, 中田大作, 住吉 研, 葉山 浩: “3 層積層型ホログラフィック高分子分散液晶素子”, *Microoptics News*, 19, No. 3 (2001) 13-17.
 - 44) 石原 淳: “複屈折回折光学素子による偏光変換光学系”, *HODIC Circular*, 20, No. 4 (2000) 12-17.
 - 45) L. Murillo-Mora, A. Sato and F. Iwata: “Transmission type holographic reflector,” *HODIC Circular*, 22, No. 1 (2002) 13-18.
 - 46) 大森滋人, 豊田 宏, 岡野正登: “反射防止機能を持つサブ波長格子による照明”, 第 26 回光学シンポジウム講演予稿集 (2001) pp. 85-88.
 - 47) 鈴木隆史, 松村 進, 飯塚清志, 遠藤清伸: “微細光学素子の一眼レフカメラへの応用”, *光学*, 10 (1981) 372-382.
 - 48) 大森滋人, 高原浩滋, 余 万吉, 関原幹司: “計算機ホログラムのカメラ焦点板応用”, *HODIC Circular*, 20, No. 4 (2000) 8-11.
 - 49) I. Kasai, Y. Tanijiri, T. Endo and H. Ueda: “Actually wearable see-through display using HOE,” *Proceedings of 2nd International Conference on Optical Design and Fabrication (ODF2000)*, TA08 (2000) pp. 117-120.
 - 50) 塩野照弘, 上田路人, 伊藤達男, 横山和夫: “赤外用回折光学素子”, *Optics Design*, No. 9 (1996) 30-36.
 - 51) M. Motamedi: “Merging microoptics with micromechanics: Micro-opto-electro-mechanical (MOEM) devices,” *Diffractive and Miniaturized Optics*, ed. S. H. Lee (SPIE Press, Washington, 1993) CR-49, pp. 302-328.
 - 52) P. Ambs, L. Bigue and Y. Fainman: “Dynamic computer generated holograms displayed on a digital micromirror device,” *Technical Digest of Diffractive Optics and Micro-Optics 2002*, DtuD7 (2002) pp. 143-145.
 - 53) 楠 文経, 田島健史, 高原淳一, 小林哲郎: “マイクロキャビティ周期構造を用いた高融点金属の黒体輻射制御”, 第 62 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, No. 3, 14a-ZK-9 (2001) p. 791.
 - 54) 斎 均, 湯上浩雄, 金森義明, 羽根一博: “熱放射スペクトル制御を目指した W 微細周期構造の作製と評価”, 第 62 回応用物理学学会学術講演会講演予稿集, No. 3, 14a-ZK-10 (2001) p. 791.
 - 55) J. N. Mait, J. Gracht and G. Euliss: “A diffractive anti-aliasing filter designed using information density,” *Technical Digest of Diffractive Optics and Micro-Optics 2002*, Supplement for Post Deadline Papers, DP3 (2002).
 - 56) 例えば, 科学技術振興調整費「3次元フォトニック結晶の作製, 解析法, デバイス展開の総合研究」合同成果報告シンポジウム“フォトニック結晶と量子ドット”講演資料集 (2003).
 - 57) 川嶋貴之, 佐藤 尚, 石川 理, 川上彰二郎: “フォトニック結晶応用製品の開発状況”, 科学技術振興調整費「3次元フォトニック結晶の作製, 解析法, デバイス展開の総合研究」合同成果報告シンポジウム“フォトニック結晶と量子ドット”講演資料集 (2003) pp. 108-109.
 - 58) H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. Tamamura, T. Sato and S. Kawakami: “Superprism phenomena in photonic crystals,” *Phys. Rev.*, B58 (1998) R10096-R10099.
 - 59) 小坂英男: “フォトニック結晶による光学の進歩”, *日本物理学会誌*, 55 (2000) 172-179.
 - 60) M. Notomi: “Theory of light propagation in strongly modulated photonic crystals: Refraction-like behavior in the vicinity of the photonic bandgap,” *Phys. Rev.*, B62 (2000) 10696-10705.
 - 61) 納富雅也: “フォトニック結晶における「屈折」現象”, *O plus E*, 21 (1999) 1570-1577.
 - 62) 浅川 潔, 杉本喜正, 池田直樹, 井上久遠: “光半導体 2 次元フォトニック結晶の製作・評価と極微小・超高速光制御素子/回路への応用”, *Microoptics News*, 19, No. 4 (2001) 13-18.
 - 63) C. Cuisin, A. Chelnokov and J.-M. Lourtioz: “Submicrometer resolution Yablonovite templates fabricated by X-ray lithography,” *Appl. Phys. Lett.*, 77 (2000) 770-772.
 - 64) M. Campbell, D. Sharp, M. Harrison, R. Denning and A. Turberfield: “Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography,” *Nature*, 404 (2000) 53-56.
 - 65) 池本聖雄, 小野雄三: “多光束干渉による 3 次元フォトニック結晶形成の理論解析”, 第 48 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 3, 29p-ZH-5 (2001) p. 1056.
 - 66) Y. Ono and K. Ikemoto: “Fabrication of arbitrary three-dimensional photonic crystals by four plan-waves interference,” *Proc. SPIE*, 4984 (2003) 70-78.
 - 67) L. Cai, X. Yang and Y. Wang: “All fourteen Bravais lattices can be formed by interference of four noncoplanar beams,” *Opt. Lett.*, 27 (2002) 900-902.
 - 68) 池本聖雄, 小野雄三: “多光波干渉によるダイヤモンド構造を

- 有する3次元フォトニック結晶の形成”, 第49回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, No. 3, 27p-ZF-15 (2002) p. 1027.
- 69) 小野雄三, 高野信司, 水戸郁夫, 西田信夫: “ホログラム再生波面干渉露光法による分布帰還型半導体レーザー用位相シフト回折格子の形成”, 光学, **16** (1987) 18-21.
- 70) Y. Ono, Y. Kimura, Y. Ohta and N. Nishida: “Antireflection effect in ultrahigh spatial-frequency holographic relief gratings,” Appl. Opt., **26** (1987) 1142-1146.
- 71) D. Raguin and G. Morris: “Analysis of antireflection-structured surfaces with continuous one-dimensional surface profile,” Appl. Opt., **32** (1993) 2582-2598.
- 72) 新蔵正幸, 小野雄三: “実効屈折率法による3次元フォトニック結晶の透過率の解析”, Optics Japan 2002 予稿集, 3PA4 (2002) pp. 170-171.
- 73) K. Sakoda: “Numerical analysis of the interference patterns in the optical transmission spectra of a square photonic lattice,” J. Opt. Soc. Am. B, **14** (1997) 1961-1966.

(2003年3月28日受理)