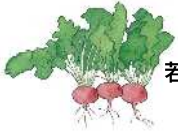


液晶材料で作るホログラフィック光学素子



若 者

吉 田 浩 之*

Solution-processable holographic optical elements
using liquid crystalline materials

Key Words : Liquid Crystal, Photoalignment, Holographic Optical Element

はじめに

筆者は2001年4月に大阪大学工学部電子情報エネルギー工学科に入学し、2009年3月に大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻博士後期課程を修了した。2009年4月より同専攻で助教として採用され、主に液晶物質の光学応用を目指した研究を行っている。今年が勤続10年目となり、あっという間に過ぎたと感じるが、振り返るといろいろなテーマに取り組んでおり、また、時には科学技術振興機構のさきがけ研究者を兼務させていただき、多くの経験をさせていただいた。

本稿では、著者が最近取り組んでいる、液晶を用いた塗布製膜型ホログラフィック光学素子の研究について紹介する。「液晶」(liquid crystal)ということばを聞くと、多くの方は真っ先に情報ディスプレイ(テレビ)を思い浮かべるのではないかと予想する。情報ディスプレイが生活の隅々に浸透しコモディティ化した今、有機ELなどのより最近の技術と比べて液晶は「古い技術」であるイメージを持つ方もいらっしゃると思う。しかし、実際には液晶とは物質の状態(相)であり、またそのような状態をとる物質を指す。新物質の発見はしばしば新しい応用を切り拓くが、液晶物質も新しい材料が発見されることで、新たな応用が提案・開拓されている。液晶が拓くかもしれない未来技術の可能性を少しでもお

伝えできれば幸いである。

ホログラフィック光学素子

光学機器においては従来、レンズやミラーなどの比較的大きい素子を用いて光波が制御されてきた。しかしながら、近年のウェアブルデバイスの台頭ともなあって、薄型・小型でありながら光波を制御できる素子が求められている。特にシースルー型の拡張現実(AR)スマートグラスでは、投影する情報を着用者の通常の視野に重ねて表示するため、高い透明性が求められることに加え、眼鏡型であるために高いファッション性が求められるなど、その要求は高い。ARスマートグラスの一番簡単な光学系は着用者の目の前にハーフミラーを置くことであるが、これはデバイスの大型化を招き、また、ファッション性も下がることから、薄い透明な板の中に映像情報を伝搬させる導波路型のディスプレイの研究が盛んである。

導波路に光を効率的に結合させ、また着用者の眼前で光を出力するためには、光を偏向する結合器が必要である。これを実現可能とする小型光学部材として回折光学素子(diffractive optical element, DOE)の利用が検討されている。これは屈折率を微細に変化させることによって光波の干渉を生じさせ、光の偏向や集光機能を生ずる素子である。特に、屈折率を素子の奥行方向にも変調させたホログラフィック光学素子(holographic optical element, HOE, または体積ホログラム, volume hologramとも呼ばれる)は特定の波長のみを選択的に回折するため、高い透明性を実現できる。導波路の入力・出力端にHOEを取り付けたシースルー型ディスプレイが、様々な大学・企業で研究されている[1]。

このようにHOEは次世代の情報端末を実現する光学部材であるが、HOEは光の波長程度の周期で



* Hiroyuki YOSHIDA

1983年10月生まれ
大阪大学大学院 工学研究科 電気電子
情報工学専攻 博士後期課程(2009年)
現在、大阪大学大学院 工学研究科 電
気電子情報工学専攻 助教
科学技術振興機構さきがけ 兼任研究者
博士(工学) ソフトマター物理、光学
TEL: 06-6879-7759
FAX: 06-6879-4838
E-mail: yoshida@eei.eng.osaka-u.ac.jp

3次元的な屈折率分布をもつため、作製が難しい。一般的な作製手法は感光性のポリマー材料中でレーザービームを重ね合わせ、形成される干渉縞をポリマー膜に転写するレーザー干渉法である。この方法は50年以上前から知られている歴史ある方法であるが、波長や強度揺らぎのない高性能レーザーが必要、精密な位置合わせと除振が必要、原理的に大面積素子の作製が難しいなど、課題がある。HOEはARスマートグラスのほかに、フィルターなしで3次元画像の見えるホログラムディスプレイの光学系に使えることが示されているが[2]、最先端の研究でも作製されているHOEの大きさはA4サイズ程度である。HOEが社会実装されるためには、素子作製方法のイノベーションが必要であると筆者は考えている。

液晶材料を用いたホログラフィック光学素子

筆者らは液晶の光学特性を研究する中で、これまでとは全く違う方法によってHOEを実現できることを見出した[3]。この技術では液晶材料の中でも、コレステリック相と呼ばれる材料を用いる。液晶は分子材料であるが、その構成分子のつくる秩序に応じて様々な相に分類されている¹。例えば、ディスプレイに用いられるネマティック相では、棒状分子が筆箱の中の鉛筆のように並んでいる。つまり、各分子の重心位置は液体のようにランダムであるが、その配向方位は結晶のように揃っている。コレステリック液晶では構成分子のキラルな相互作用のため、配向方向がある軸に沿って捻じれ、巨視的な螺旋秩序が形成される。螺旋秩序の周期は構成分子に依存し、光の波長程度の数百nmから数mmまで調整できる。

螺旋周期が数百nmのコレステリック液晶は光をブラッグ反射するために、反射鏡として機能することが古くから知られていた。我々は、コレステリック液晶の配向方向を基板上で局所的に変化させることによって、HOEとして機能することを見出した。

提案した素子の模式図を図1に示す。図1(a)に示す従来型のコレステリック液晶素子では、基板上

の分子配向方向は揃っている。それに対し、図1(b)は基板上で分子の配向方向が徐々に変化している。その結果、螺旋秩序の位相が徐々に変化し、等位相面が傾いていることが分かる。この構造では素子の奥行方向を含んだ三次元的な屈折率分布が形成されており、その結果、特定の波長においてブラッグ回折が引き起こされる。生じる光機能はパターンに依存するが、図1に示したような、配向方向が一方向に沿って変化するような素子では、光波の偏向が生じる。

少し専門的になるが、コレステリック液晶の配向の変化は反射される光の位相に反映される。コレステリック液晶を光学的に解析すると、反射光の位相は、コレステリック液晶の基板上での配向角の2倍に比例して変化することが分かる。つまり、配向パターンニングによって反射光の位相分布が制御できるため、回折光学素子としての設計・応用が可能になる。

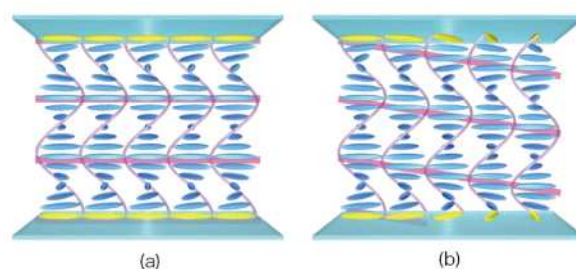


図1 (a) 従来型の一様配向した右巻きコレステリック液晶の模式図。
(b) 基板上の配向を徐々に変化させたコレステリック液晶。

提案した原理に基づいて素子の試作に取り組んだ。液晶の配向角によって反射光の位相が変化することは、設計によって任意の波面を作れることを意味する。つまり、上で述べた偏向機能以外にも、集光や散乱機能など、ニーズに応じて様々な機能を付与した素子を実現できる。任意の波面を形成するために必要な光の位相分布を得るアルゴリズムはコンピュータ生成ホログラム (computer generated hologram, CGH) の分野で広く研究されている。ここでは Gerchberg-Saxton アルゴリズムを採用し、光照射によって大阪大学ロゴと大阪大学公式マスコット「ワニ博士」が投影されるホログラムを試作した例を紹介する[4]。

図2(a)に作製した素子の動作概念図を示す。赤

¹ 「液晶」という名前は、それが液体と結晶の中間相であり、両者の性質を兼ね備えることに由来する。デバイス応用される液晶は一般的に特定の温度範囲で液晶相を発現する。

色のレーザー光が素子に入射すると、光のスポットが図2(b)に示す大阪大学ロゴと大阪大学公式マスコット「ワニ博士」に変換されて反射する。図2(c)に示しているのは、このような波面変換に必要な位相分布パターン（一部のみ表示）である。パターンは複雑だが、既知のアルゴリズムを使えば設計は数秒で完了する。作製した素子に光を照射し、スクリーンに投影した反射光を写した写真が図2(d)である。設計通りの像が得られていることから、コレステリック液晶がホログラム素子として機能することが確認された。

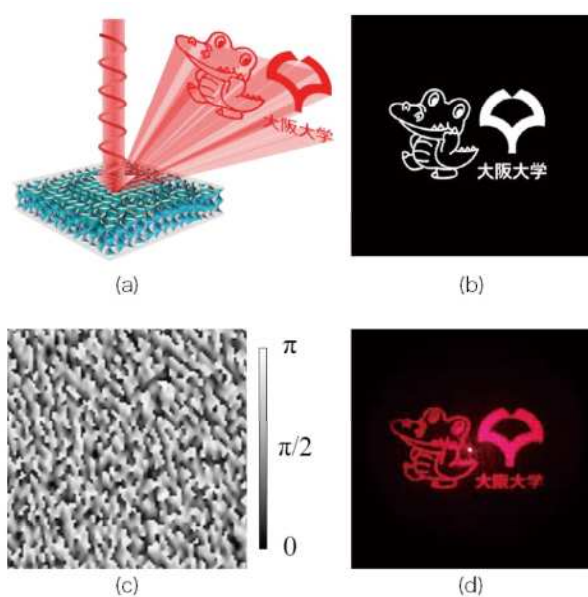


図2 (a) コレステリック液晶ホログラム素子の模式図。
 (b) ターゲット画像。
 (c) 必要な配向分布パターン（上面図）。基板上の各位置でコレステリック液晶が異なる位置に配向していることを意味する。
 (d) 試作素子からの反射光の投影像。
 ([4]より)

塗布製膜型素子の作製

「液晶」というとガラス基板に挟み込んだ素子を思い浮かべる方も多いと思うが、液晶は有機材料であるため、重合基を付与すれば固体のフィルムも作製可能である。液晶の分子配向を保持したフィルムは視野角改善フィルムとして、ディスプレイでも用いられている。我々の提案したHOEもフィルム型部材として応用すべく、重合性液晶を用いたフィルムの塗布製膜に取り組んでいる。

これまでに、HOEの塗布製膜の原理実証に成功している [5]。パターンニングを施した基板にコレ

ステリック液晶のモノマー溶液を塗布し、重合することで固体フィルムが得られる。光の偏向機能を付与するパターンニングを施した基板を用いた場合には、設計通りの偏向角が得られることを確認している。

この研究で作製した膜は数 mm と小さく、また、パターンニングも不均一な領域があり回折効率が低かった。そこで、現在は素子の高効率化と大型化に取り組んでいる。液晶は成熟した技術であるが、光の波長に迫る微細な配向パターンニングを行う技術は確立していない。現状はこれが最大の課題であるが、解決に向け様々なアイデアで取り組んでいる。

おわりに

筆者が最近取り組んでいる、液晶の配向パターンニングによって実現できるHOEについて紹介した。この技術が確立すれば、ロールツーロール製造方式により、ラップフィルムのような形で大面積のHOEが作製できるのではないかと期待している。将来的にはフィルムを切って貼るだけで、ARスマートグラスなどのデバイスが実現できるかもしれない。また、フロントガラス一面に広がるヘッドアップディスプレイや、ホログラムを用いた3Dのサインネージなど、大面積性を活かした全く新しいディスプレイシステムが登場するかもしれない。そのような将来を夢見ながら、研究に取り組んでいる。

本稿で紹介した成果の一部はJST さきがけ (JPMJPR151D)、科研費 (17H02766)、および大阪大学フォトンクスセンターの支援を受けたものです。また、本研究で用いた材料の一部はDIC株式会社およびBASF ジャパン株式会社に提供いただきました。本研究は大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻尾崎研究室にて実施したものです。共同研究者の尾崎雅則教授、および本研究に取り組んでくれた研究室メンバーにお礼申し上げます。

参考文献

- 1) C. Yu, Y. Peng, Q. Zhao, H. Li, and X. Liu, Appl. Opt. 56, 9390-9397 (2017)., 企業では TruLife Optics, DigiLens, Sony, MagicLeap などが取り組んでいる。
- 2) R. Häussler, Y. Gritsai, E. Zschau, R. Missbach, H. Sahm, M. Stock, and H. Stolle, Appl. Opt. 56, F45-F52 (2017).

- 3) J. Kobashi, H. Yoshida, and M. Ozaki, Nat. Photon. 10, 389-392 (2016).
4) J. Kobashi, H. Yoshida, and M. Ozaki, Sci. Rep. 7, 16470 (2017).
5) J. Kobashi, Y. Mohri, H. Yoshida, and M. Ozaki, Opt. Data Process. Storage 3, 61-66 (2017).

