Liquid crystal active optics and its application to optical memory

橋本 信幸 (シチズンテクノロジーセンター株式会社 NXGセンター)

Nobuyuki Hashimoto (NXG center, Citizen Technology Center Co., Ltd.)

1. はじめに

液晶素子は表示素子として発展を遂げてきたが、その半波長電圧がわずか数Vであるということは光波面制御素子として本質的に優れた素子であることを示している。筆者らはこの性質に注目し 80 年代後半から液晶素子による収差補正やその光ピックアップへの応用を提案してきた¹⁾。そして 91 年には独自開発した高精細の液晶パネルを用い、最も複雑な波面変調といえる 3D ホログラフィーの電子的な動画再生を報告した²⁾。その後、液晶パネルは光コンピューターへの応用に向けて、セグメント化した液晶は位相変調や偏光変調を利用したアクティブ光学素子への応用に向けて研究を続けた。

一方で DVD の出現をきっかけに、より高度な収差補正が要求されるようになり、家電メーカーを中心に光ピックアップ用液晶収差補正素子とその応用の研究が始まった³⁾。我々は長年培った技術を元に 2000 年より DVD ピックアップ向けの液晶収差補正素子の量産を開始し性能や品質、コスト等で定評を得ている。ここでは次世代テラバイトメモリに向けた新機能デバイスとして可能性を秘める液晶波面 (位相) 変調素子の基礎と現在主流となっているコマ収差や球面収差補正への応用、並びに体積型メモリ等への応用も視野に入れた液晶 GRIN レンズなどの新たなアクティブ光学 (アクティブ波面変調) デバイスの開発について報告する。

2. 液晶素子による光波面変調⁴⁾

図 1 に平行配向液晶による光波面変調の原理を示す。表示素子にしばしば用いられる液晶分子が 90 度捻られた 90 度 TN モードと異なり、液晶分子は平行に配向されている。透明電極 (ITO) がコートされたガラス基板に更に配向膜がコートされ液晶分子が配向される。ITO が上下二分割されているとし上半分の ITO に電圧を加えれば液晶分子が z 方向に傾く。入射直線偏光に対する実効屈折率は上側で n_θ ($n_o < n_\theta < n_e$)、下側で n_o (分子短手方向) となり液晶層厚を d とすると $(n_\theta - n_o)d$ の位相変調を行える。電圧を変化させれば液晶分子の傾きも変化する連続的な位相変調が可能である。電圧分布をつくれれば原理的に任意の位相変調パターンをつくることができる。また基本的に液晶分子配向方向の直線偏光のみに対する作用のため、任意の偏光に作用させるためには直交した 2 素子を重ね合わせる等の工夫をする必要がある。

図1 平行(ホモジェニアス)配向液晶による位相変調

液晶の応答時間はセル厚 d の 2 乗に比例する。一例として単純な駆動の場合 $6.5 \mu m$ の液晶では $25^\circ C$ で $30 ms$ 、 $0^\circ C$ で $100 ms$ 程度である。これはフル変調の場合で中間状態の変調では逆に遅くなる。また $40^\circ C$ を過ぎるあたりから位相変調能力は低下しはじめる。

ITO、配向膜とも厚さは数十～数百 nm であり液晶素子は薄膜構造を持つ。更に液晶の実効屈折率は駆動により変動するためアクティブな干渉フィルターのよう機能し透過率が大きく変動する。これは薄膜構造を工夫することで 1～2% 程度以下に抑えることができる。

3. 液晶収差補正素子とその光ピックアップへの応用⁵⁾

光ディスクの対物レンズはディスク基板も考慮し幾何光学的オーダーでは無収差で設計される。したがって基板が傾くと基板内で非対称性であるコマ収差が発生する。このときレンズの入射瞳位置に液晶素子を配置し発生したコマ収差量に応じた逆の収差を与えれば相殺することができる。

図 2 に液晶素子を用いたコマ収差補正の原理を示す。(a) はコマ収差パターンを近似した ITO パターンで 3 分割され同じ番号が同電位となる。(b) はコマ収差とそれをデジタル的に近似補正する位相分布を X 断面で示し(c) はその結果の残存収差を示したもので 40% 程度に圧縮される。実際は(a) の様な ITO パターンを持った液晶素子を対物レンズの入射瞳位置に設置し発生コマ収差と逆の位相分布を与えて入射波

面を変調する。各画素に異なった電圧を与えるためには画素毎に電極を引き出せばよい。しかし各画素を ITO 細線による電気抵抗で内部接続し外部入力電圧を内部で抵抗分割することで理論上、画素数にかかわらず引き出し線を 3 本にできる。

図2 3次コマ収差とその補正

ここで用いた3次コマ収差は Zernike の収差で任意の収差波面を直交展開した基本要素の一つである。これはよく知られる像座標も含め収差を級数展開したザイデル収差とは異なる⁶⁾。Zernike 収差の直交性より液晶素子の片側 ITO をコマ収差形状、他方の ITO を球面収差形状にすれば互いに独立に補正が可能で、このような素子はすでに量産化されている。近年の回折素子が付加された対物レンズや、作動距離の短い BD-DVD 互換レンズでは一般にレンズの面倒れに関して制約が多い。このとき液晶によるコマ補正は対物レンズをチルトさせる必要がなく都合が良い。

3 次収差補正素子では対物レンズとの軸ずれにより新たな収差が発生し問題となる。そのため補正電極を用いる方法や、軸ずれに不感な収差パターンが考案されている⁵⁾。

4. 液晶量子化 GRIN レンズ⁷⁾

ディスクの多層記録や体積型メモリ等の次世代テラバイトメモリを考えた場合、直接パワー補正すなわち焦点可変レンズによる深層レイヤーへのアクセスとその収差補正は重要な課題である。液晶レンズに関しては様々な方式が考案されてきたが、ここでは正負可変が可能でかつ従来の量産プロセスが使用可能な液晶量子化 GRIN レンズについて報告する。

GRIN レンズは分布屈折率型レンズとして良く知られる導波路型レンズで、図3に示す光軸から半径 r 方向に 2 乗の屈折率分布 $n(r)$ を持つ。ここで n_s は基準 (光軸) 屈折率、 a は定数である。一次近似において係数 a は $1/2fd$ (f は焦点距離、 d は導波路長) となる。例として d を $20 \mu m$ 、 n_s が 1.7、

外周部の屈折率を 1.5、 r を $1.25 mm$ とすると f は $195 mm$ の凸レンズとなる。この状態で中心と外周の屈折率を逆転させれば f は $-195 mm$ で凹レンズになる。

図3に液晶量子化 GRIN レンズの ITO 形状を示す。ゾーンプレート状に分割パターニングされ各ゾーンは同値の高抵抗 ITO で接続さる。中心と外周の 2 端子間に電位差を与えれば量子化された電位分布を与えることができる。液晶が電圧に線形応答する範囲とし L 番目のゾーン半径 r_L を $R \cdot \sqrt{L/M}$ (R は有効半径、 M はゾーン分割数) とすれば屈折率分布を量子化近似した GRIN レンズを実現でき、その位相変調量を電氣的に制御することで可変焦点レンズとなる。

例として直径 $3 mm$ 、 d が $22 \mu m$ 、 Δn が 0.2、分割数 20 では液晶線形応答範囲で約 $\pm 450 mm \sim \infty$ までの可変焦点が得られる。また焦点距離がおおよそ $600 mm$ になるように電圧設定し、波長 $650 nm$ 、ビーム直径 $2.7 mm$ の平行光を入射するとスポット直径は $155 \mu m$ (半値幅) で回折限界を満たす結像性能が得られる。応答性と大パワー化が今後の課題である。

図3 液晶量子化 GRIN レンズとその ITO 形状

5. まとめ

液晶素子は原理的に任意の波面を作成可能でその特性を利用し偏向素子や回折素子等の開発も行っている⁸⁾。また偏光依存や応答特性、位相変調特性等の問題を解決するため微細光学構造による新たな機能付加や新材料などが今後の開発課題である。

参考文献

- 1) 橋本信幸：特開昭 63-249125 号
- 2) N. Hashimoto, et. al., *Proc. SPIE* 1461(1991) 291-302
- 3) S. Ohtaki et. al.; *JJAP*, 38 (1999) 1744-1749
- 4) 橋本信幸：光学, Vol. 36, No.3 (2007) 149-153
- 5) 橋本信幸：O plus E, Vol. 29, No.11(2007) 1125-1129
- 6) 橋本信幸：光学実務資料集, 情報機構(2006) 159-171
- 7) 橋本信幸：光学シンポジウム講演予稿集(2006) 53-54
- 8) 栗原 誠：光学シンポジウム講演予稿集(2007) 69-70