

研究速報

TN 液晶パネルの円偏光位相変調特性

今井 浩・山口 雅浩・本田 捷夫・大山 永昭

東京工業大学像情報工学研究施設 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1992年3月30日受付, 1992年6月5日受理)

Phase Modulation Characteristics of Twisted Nematic Liquid Crystal Panel with Circularly Polarized Light

Hiroshi IMAI, Masahiro YAMAGUCHI, Toshio HONDA and Nagaaki OHYAMA

Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology,
4259, Nagatsuda, Midori-ku, Yokohama 227

(Received March 30, 1992; Accepted June 5, 1992)

In this paper, we investigated phase modulation characteristics of a twisted nematic liquid crystal panel in circularly polarized light incidence. As a result, the phase modulation equivalent to homogenous panel is possible with little amplitude modulation.

1. ま え が き

近年, 光情報処理の研究において, アクティブな光学素子として空間光変調素子 (SLM) の研究が盛んに行われている。そのなかで TN (twisted nematic) 液晶パネルは, 液晶 TV など広く用いられているため, 生産コストが低く比較的入手が容易である。また TV のビデオ信号で制御できるため, 取り扱いが容易で画素数も多く, 光の空間強度変調素子として用いられている。一方, 液晶パネルが, コヒーレント光の波面制御のための空間位相変調素子として利用できることがわかってきており, 三次元動画像表示などへの応用が期待されている¹⁾。

TN 液晶パネルを用いた研究では, 入射光に直線偏光を用い, 射出光の振動面を検光子で限定した場合の位相変調特性について検討されてきた。この場合, クロスニコルおよび平行ニコルでは, 液晶印加電圧に対する著しい透過光強度変化が現れてしまい, 位相変調素子として利用することは困難である。また, この透過光強度変化を抑えるために, 入射偏光面に対して検光子の角度を 45 度としたものもあるが, 最大位相変化量は同一液晶のホモジニアス配向のそれに比べて小さい²⁾。またクロスニコルにして, 透過光強度変化が急激に低下する閾値電圧

の直前の小さな領域 (0.5 V 程度) で大きな位相変化が起きるといふ報告があるが, 位相変調のかかる電圧領域が狭く電圧制御の面で利用しにくい³⁾。

このように, これまでの報告では, TN 液晶パネルに直線偏光を入射した場合, 実用的な位相変調特性はまだ得られていない。そこで本研究では, 入射光に任意の偏光状態のコヒーレント光を入射させた場合の射出光の偏光, 位相状態を表す一般式を導出し, その中で右回りおよび左回り円偏光それぞれについて位相変調特性を明らかにし, TN 液晶の位相変調素子としての利用の可能性について検討する。

2. 液晶パネルの光波変調特性

一般的な TN 液晶パネルは, Fig. 1 (a) に示すように液晶分子が 2 枚のガラス面に平行でガラス間で 90 度ねじれた配向が施されている。2 枚のガラス間に電界を加えると, 液晶分子は電界に従って配向を変える。各液晶分子は一軸性結晶であり, 光の振動成分によって屈折率が異なるいわゆる複屈折性を示す。通常市販されている TN 液晶パネルは, 入射側の液晶の長軸方向に平行または垂直な直線偏光を入射すると, 印加電圧 0 V のとき, 複屈折の影響で 90 度偏光面が回転した直線偏光が射出し, また十分高い電圧を加えると (数 V 程度) 液晶

分子は Fig. 1 (b)のようにガラス面にほぼ垂直に配向し、複屈折の影響をほとんど受けなくなるように作られている。ここで出射側に入射光の振動面と垂直または水平に検光子を入れると、印加電圧に応じた透過光強度変調が実現される。複屈折により位相変調されるが、同時に透過光強度も変調されるため、TN 液晶パネルを位相変調素子として利用することは困難であった。

一方 TN 液晶パネルの入射側に偏光板を付けず、円偏光を入射した場合、Fig. 2 に示すように印加電圧に応じて液晶分子の配向方向が変化しても、射出光は一般には円偏光に近い楕円偏光になり、 x, y 両方の成分を含んでいるので、射出光の振動面を検光子で限定しても消光しない。したがって、印加電圧 0V から位相変化が飽和する電圧まで位相変調素子として利用できる可能性がある。

Fig. 3 にツイストと同じ回転方向の円偏光 (Fig. 2 で示してある円偏光、右回り円偏光) およびツイストと逆の回転方向の円偏光を入射した場合の、射出光の偏光状態の測定例を示す。印加電圧 0V では複屈折の影響で射出光は楕円偏光となる。また印加電圧 4V では、複屈折の影響をあまり受けず、入射光の偏光状態に近いこと

がわかる。

以上は定性的説明であるが、以下に定量的に扱う。液晶に与えられた電圧に対する位相変調特性は、一般に液晶を層状に分割して、各層の入射光と射出光の関係をジョーンズマトリックス⁴⁾で表し、これらのマトリックスの積を各電圧について求めることによって計算される⁵⁾。

ここで、ジョーンズマトリックスの各成分は、振幅透過率と位相で表されるが、これらは印加電圧に依存する。入射光の複素振幅の x 方向の成分、 y 方向の成分をそれぞれ E_{in-x}, E_{in-y} とすると、射出光の複素振幅の x 方向、 y 方向それぞれの成分 E_{out-x}, E_{out-y} は式(1)のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} E_{out-x}(V) \\ E_{out-y}(V) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(V)\exp\{j\delta_a(V)\} \\ C(V)\exp\{j\delta_c(V)\} \end{bmatrix}^* \begin{bmatrix} B(V)\exp\{j\delta_b(V)\} \\ D(V)\exp\{j\delta_d(V)\} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in-x} \\ E_{in-y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

円偏光を入射した場合、入射光のジョーンズベクトルは式(2)のようになる。ただし、符号は円偏光の回転方向を示す (+は右回り、-は左回り)。

$$\begin{bmatrix} E_{in-x} \\ E_{in-y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \exp\left(\pm j\frac{\pi}{2}\right) \end{bmatrix} \quad (2)$$

このとき、例えば、 E_{out-x} の位相変化量 ϕ_x ⁵⁾は、式(3)で表せる。

$$\phi_x(V) = \arg\{E_{out-x}(V)\} - \arg\{E_{out-x}(V_{sat})\} \quad (3)$$

ただし、式(3)での $E_{out-x}(V)$ は、次式で与えられる。

$$E_{out-x}(V) = \frac{\sqrt{2}}{2} \left[A(V)\exp\{j\delta_a(V)\} + B(V)\exp\left\{j\delta_b(V) \pm j\frac{\pi}{2}\right\} \right]$$

なお、 V_{sat} は液晶の配向の変化が飽和する電圧であ

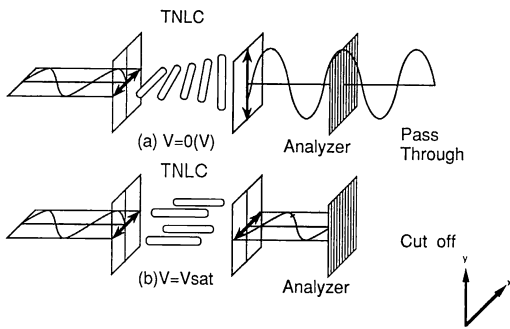


Fig. 1 Schematic figure of TNLC in linearly polarized light incidence.

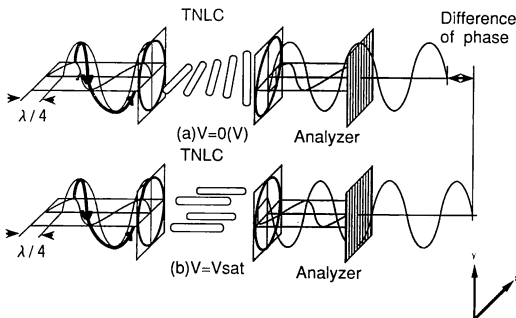


Fig. 2 Schematic figure of TNLC in circularly polarized light incidence.

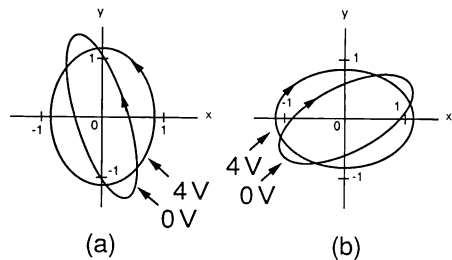


Fig. 3 Output light polarization of TNLC in circularly polarized light incidence. (a) Opposite rotation from the LC's twist, (b) same rotation as the LC's twist.

る。

また、検光子と x 軸のなす角が θ であるとき、位相変化量 $\phi(V; \theta)$ は式(4)で表せる。

$$\phi(V; \theta) = \arg \{E_{out}(V; \theta)\} - \arg \{E_{out}(V_{sat}; \theta)\} \quad (4)$$

ここで、式(4)での $E_{out-x}(V; \theta)$ は、次式で与えられる。

$$E_{out}(V; \theta) = E_{out-x}(V) \cos \theta + E_{out-y}(V) \sin \theta$$

このように、位相変調特性は入射光の偏光状態と検光子の角度によってきまる。

3. 位相変調特性の計測

上記のことから、円偏光を入射することにより、振幅透過率に変化を及ぼすことなく位相変調を行うことができると考えられるため、円偏光を入射した場合の位相変調特性を測定した。

今回実験で使用した液晶は、MERCK 社製 ZLI-1565 の 85 度ツイストのもので、この液晶パネルの各特性を **Table 1** に示す。この液晶は、He-Ne レーザーの波長 ($\lambda=633 \text{ nm}$) に対して、 $\Delta n d/\lambda$ が 1.43 ありツイストを施していないホモニアス配向の液晶パネルであれば、最大 1.43λ ($2.86\pi \text{ rad}$) の位相変調が期待できる。同一液晶の TN 液晶パネルで、直線偏光を入射した場合 $1.2\pi \text{ rad}$ 程度の最大位相変化が得られることが、報告されているがホモニアス配向のものとは比べるとはるかに小さい²⁾。

位相変調特性測定には **Fig. 4** に示すマッハツェンダーク干渉計を用いた。円偏光がビームスプリッタを通過するとき、入射光の電気ベクトルのビームスプリッタに垂直な成分 (S 偏光) と平行な成分 (P 偏光) とで透過率が異なるので、S 偏光、P 偏光それぞれの透過率の比の楕円率をもつ楕円偏光になってしまう。そのため、**Fig. 4** 中のビームスプリッタ BS1 の後に、BS1 とは S 偏光、P 偏光の関係が逆になった、偏光状態補正用ビームスプリッタを配置し (**Fig. 4** では省略)、液晶パネル入射面で円偏光になるように調整した。

Fig. 5 に干渉縞の例を示す。同図(a)にこの液晶パネルの構造を示す。液晶の印加電圧を変化させる際の干

渉縞の移動量より位相変化を求めた。干渉縞の移動量を測定するため、干渉縞を TV カメラで取り込み、電圧を印加する前後の干渉縞のずれ量 (位相変化量) を、計算機処理によって得た。

検光子を射出側の液晶分子の配向方向と一致させた場合の結果を **Fig. 6** に示す。図中の (○) が液晶のツイストと同じ回転方向の円偏光で (□) が液晶のツイストと逆の回転方向の円偏光である。

また、第2章で述べたジョーンズマトリックスによる計算機シミュレーションの結果を **Fig. 6** の実線で示す。シミュレーションと実際の測定結果は、どちらの円偏光についても比較的一致しており、円偏光の場合もジョーンズマトリックスを用いた計算方法が妥当であることがわかる。入射光の偏光状態が位相変調特性に大きく依存し、円偏光でも回転方向によって、最大位相変化量が異

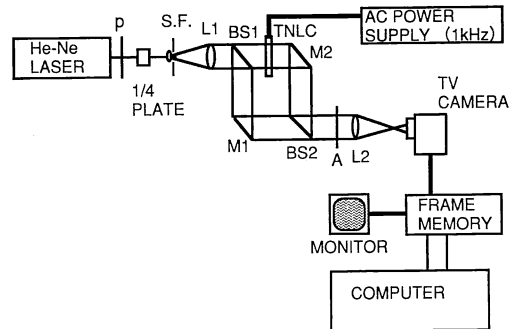
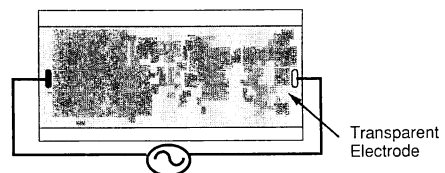
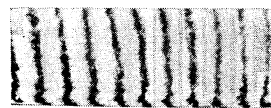


Fig. 4 Mach-Zehnder interferometer to measure phase modulation characteristics of TNLC.



(a) Structure of LC Panel



(b) Applied Voltage 0(V)



(c) Applied Voltage 2(V)

Fig. 5 Image of interference fringes.

Table 1 Specifications of liquid crystal.

Angle of twist (degree)	85
$\Delta n(n_e - n_o)$	0.13
Thickness of LC	7 μm
$\Delta n d/\lambda$ ($\lambda=632.8 \text{ nm}$)	1.43

なる。液晶のツイスト方向と逆回りの円偏光では 2π rad 以上の最大位相変化が得られるが、液晶のツイスト方向と同じ回転方向の円偏光では π rad 程度である。第 1 章で述べた直線偏光を入射した例に比べると、印加電圧に対する位相変化は緩やかであり、電圧制御の面で位相変調素子として利用しやすい。

また、 2π rad 以上の最大位相変化の得られるツイストと逆回りの円偏光について、透過光強度変調特性を Fig. 7 に示す。Fig. 6 と同様にプロットが測定結果で、実線がシミュレーションである。印加電圧に対する著しい透過光強度変化は十分抑えられている。

以上の測定および計算結果は検光子を射出側の液晶分子の配向方向と平行にした場合である。これは、第 2 章式(1)の $E_{out-y}(V)$ の位相変化について測定したものである。検光子の角度を変えた場合、式(1)の $E_{out-z}(V)$ の影響により一般に最大位相変化量は異なる。そこで、検光子の角度を変えた場合について、ジョーンズマトリックスを用いた計算を行った。結果を Fig. 8 に示

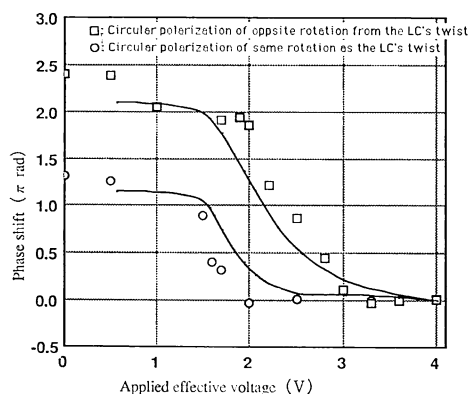


Fig. 6 Phase modulation characteristics.

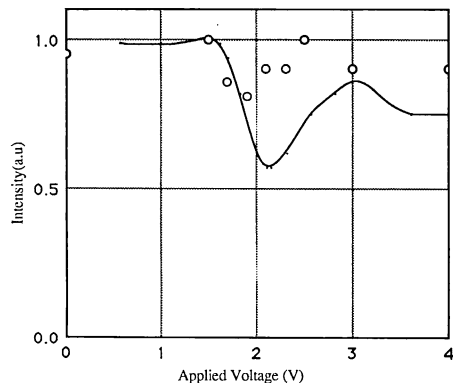


Fig. 7 Intensity modulation characteristics in the case that circularly polarized light of opposite rotation from the LC's twist incident.

す。この場合、検光子が射出側の液晶分子の配向と平行 (Fig. 8 では 90 度、前述の実験結果と同様の角度) のとき最大位相変化量が 2π rad 以上あり、検光子を回していき、検光子が射出側の液晶分子の配向とほぼ垂直 (Fig. 8 では 0 度付近) で最も小さくなる。

このように、本研究で使用した液晶の場合、TN 配向の液晶でも、ツイストと逆回りに回る円偏光を入射し、検光子を射出側の液晶分子の配向と平行にさせた場合、ホモニアス配向の液晶に近い位相変調特性が得られることがわかった。

4. む す び

任意の偏光状態のコヒーレント光を TN 液晶パネルに入射した場合の位相変調特性について、ジョーンズマトリックスを用いて解析を行った。そしてある液晶パネルに円偏光を入射した場合について、位相変調特性を計測し、同時に計算を行った。この結果、入射光の偏光状態および検光子の角度を適切に選ぶことによって TN 液晶パネルでも、十分空間位相変調素子として利用できることが確認できた。

複素振幅変調をする場合に位相変調にホモニアス配向の液晶を用いた例もあるが⁶⁾、TN 液晶が位相変調素

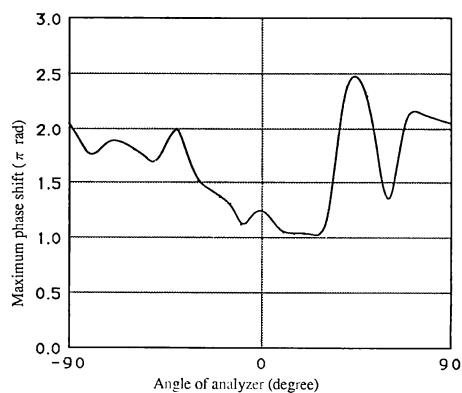


Fig. 8 Dependence of maximum phase shift on analyzer angle.

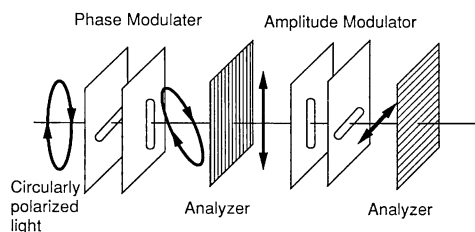


Fig. 9 Schematic figure of complex amplitude modulator with double TNLC.

子として利用できれば、Fig. 9に示すように、2枚の同じ TN 液晶パネルで複素振幅変調が実現できる。

TN 液晶パネルを位相変調素子として用いる場合、円偏光を入射し、検光子を用いると、若干の強度変調がかかってしまうなどの問題もあるが、強度変調用の TN 液晶パネルで補正すればよい。このように、コヒーレント光の波面制御の研究において、三次元動画表示や光情報処理用デバイスとして、TN 液晶パネルを利用する価値は十分あると考えられる。

最後に、本研究においていろいろと議論をいただいたセイコーエプソン研究開発本部の曾根原富雄氏に感謝する。

文 献

- 1) N. Hashimoto, S. Morokawa and K. Kitamura: "Real time holography using the high resolution LCTV-SLM," SPIE Proceedings, Electronic Imaging 1991 Spring Practical Holography V (San Jose, 1991).
- 2) 阿須間宏明, 盧 学農, 本田捷夫, 大山永昭: "液晶パネルの位相変調特性", 光学, 20 (1991) 98-102.
- 3) N. Konforti, E. Morom and S.T. Wu: "Phase only modulation with twisted liquid crystal spatial light modulators," Opt. Lett., 13 (1988) 251.
- 4) たとえば, 応用物理学会光学懇話会編: 結晶光学 (森北出版, 1975) 5章.
- 5) K. Lu and B. E. A. Saleh: "Theory and design of the liquid crystal television," Appl. Opt., 28 (1989) 4845.
- 6) J. Amako and T. Sonehara: "Kinoform using an electrically controlled birefringent liquid-crystal spatial light modulator," Appl. Opt., 30 (1991) 4622.