



液晶パネルの位相変調特性

阿須間宏明・盧 学農・本田 捷夫・大山 永昭

東京工業大学工学部像情報工学研究施設 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1990年8月6日受付, 1990年11月20日受理)

Phase Modulation Characteristics of Liquid Crystal Panels

Hiroaki ASUMA, Xuenong LU, Toshio HONDA and Nagaaki OHYAMA

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

(Received August 6, 1990; Accepted November 20, 1990)

Recently, in the study of optical information processing, a twisted nematic liquid crystal (TNLC) panel is used as a spatial light intensity modulator (SLM) for rewritable and high speed processing. In this paper, firstly, we examined the phase modulation characteristics of TNLC panels, taking account that TNLC panel is used as a SLM in a coherent optical processing system. Secondly, in order to apply the LC panel to a spatial phase modulator (SPM), we examined the phase modulation characteristics in the case that the analyzer is rotated 45° from the polarizer. Finally, we examined the phase modulation characteristics of a homogeneously aligned LC panel. LC molecules of a homogeneously aligned LC panel are not twisted but arranged parallel to the glass plates. Therefore, this panel cannot be used as a SLM. It doesn't change the state of polarization of the output light. However it varies the optical path length by changing the direction of LC molecule's director. Therefore, a homogeneously aligned LC panel is superior and convenient as a phase only modulator than a TNLC panel.

1. はじめに

従来, 光演算の研究では, 光の空間変調およびフィルターとして感光材料が用いられていたが, 近年, 処理を高速化するため外部からの信号で直接変調できるような素子を用いる研究が行われ始めている. そのような素子の一つとして液晶パネルがあげられる. とくにツイストネマティック (twisted nematic 以下 TN) 液晶パネル¹⁾は, 旋光性を利用しておもにインコヒーレント光の空間変調素子 (SLM) として広く使われている. このパネルは最近では高透過率で画素数が多く, クロストークのないパネルがパターン表示素子としてかなり普及している. しかしながらその用途の関係上, 電圧-透過光強度の関係のみが重要視されており, コヒーレント光の SLM として使う場合に問題になる 電圧-位相変調特性について, 言及した論文は少ない^{2,3)}.

以上のことから, 本報告ではコヒーレント光学系で

TN 液晶パネルが光強度変調素子として使われる場合を考慮し, その位相変調特性を明らかにすることを目的とする. また TN 液晶パネルで, 光強度変調よりも位相変調を重要視する場合も考慮し, 検光子の偏光方向を変えた時の位相変調特性も調べる. さらに将来, 空間位相変調素子として使われる可能性のあるホモニアス配向 (ねじれていない平行な) のネマティック液晶についても, その位相変調特性について調べることも目的とする.

2. 液晶パネルの動作原理

現在, 表示素子として使われている TN 液晶パネルは, Fig. 1 に示すように, 電圧 0 V の状態で液晶分子がガラス面に平行で, かつ液晶分子が 2 枚のガラス基板の間で 90 度近くねじれた配向が施されている. 偏光子, 検光子の偏光方向が互いに平行に置かれている場合, 電圧が 0 V のときは, $\Delta n d \gg \lambda$ を満たす直線偏光は液晶パ

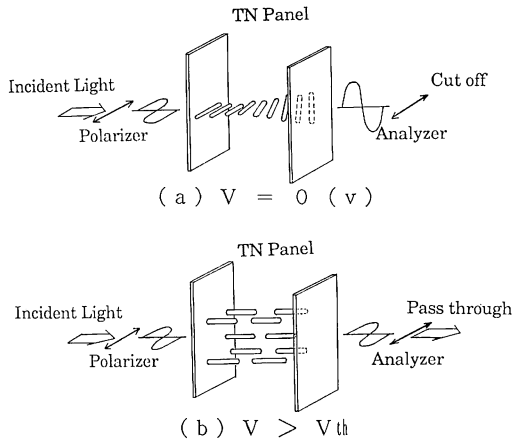


Fig. 1 Schematic figure of molecule directional change of TNLC panel.

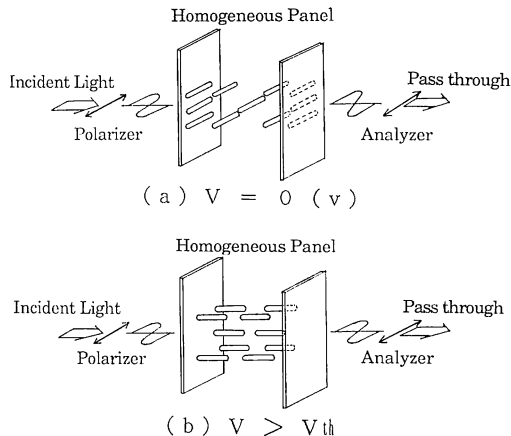


Fig. 2 Schematic figure of molecule directional change of homogeneous LC panel.

ネルを通り抜ける間に偏光面が回転するので、検光子を通過できない。閾値電圧より大きい電圧を印加すると、偏光面は回転しないので、光が検光子を通過することができる。偏光子と検光子の方向が互いに90度に置かれている場合は、この逆となる。

ホモジニアス配向液晶パネルを Fig. 2 に示す。ホモジニアス配向は、電圧 0 V の状態で液晶分子がガラス面に平行だが、TN パネルと違い液晶分子はねじれていないので、ディレクタ (director; 液晶分子の長軸方向) は液晶層内で一定である。印加電圧が閾値電圧より大きくなると、誘電異方性 $\Delta\epsilon$ が $\Delta\epsilon > 0$ の場合、液晶層中間の液晶分子からディレクタがガラス面に垂直になる。液晶分子がねじれていないので施光性はなく、光強度変調素子としては使えないが、液晶分子の複屈折から印加電圧によって光路長、すなわち位相を変化させることが

できる。

3. 液晶の光学的特性

実験に使用した液晶は、ZLI-1565, 3021, 2244 (いずれも MERCK 社製) の3種類で、おのおのホモジニアス、85度ツイストの配向処理が施された2種類のパネルを用いる。この実験でとくに重要な光学的性質 (複屈折率、異常光線に対する屈折率など) を、Table 1 に示す。印加電圧は、液晶の電気化学反応やイオンの流れなどが起こらないように 1 kHz の交流としている。

ディレクタと平行に振動する光 (異常光線) に対する屈折率 n_e と、ディレクタに垂直に振動する光 (常光線) に対する屈折率 n_o の差を複屈折率 ($\Delta n = n_e - n_o$) というが、ホモジニアス配向の場合を考えると、複屈折率の値から、液晶層の厚さが同じなので、ZLI-1565, 3021, 2244 の順に最大位相変化量が大きくなるのが簡単に予想される。

4. 干渉法による位相変化量計測およびシミュレーション方法

位相変化量の測定は、Fig. 3 に示すマッハツェンダー干渉計により行った。液晶パネルに入射する光波の直線偏光方向が、入射面側の液晶分子のディレクタに平行になるように、偏光子 P_1 を調整する。

実験のために試作した液晶パネルの構造を Fig. 4 に示す。このパネルは7本の帯状の透明電極をもつ。ホモジニアス配向の場合、観察される干渉縞画像の一例を

Table 1 Optical characteristics of liquid crystal.

	ZLI-1565	ZLI-3021	ZLI-2244
Δn	0.130	0.087	0.076
n_e	1.622	1.568	1.555
$\Delta\epsilon$	7.0	4.6	6.4
ϵ_{11}^*	10.7	8.5	11.7
Thickness of LC	7 μm	7 μm	7 μm

* ϵ_{11} : dielectric constant of liquid crystal director.

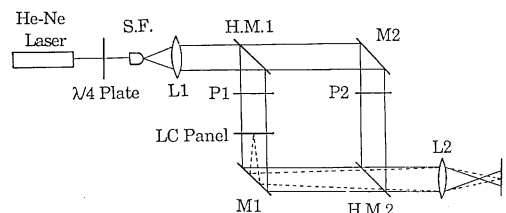


Fig. 3 Schematic optical system used for measuring phase change.

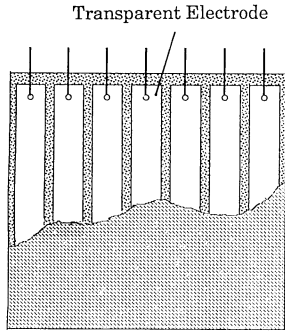


Fig. 4 Outline of LC panel.

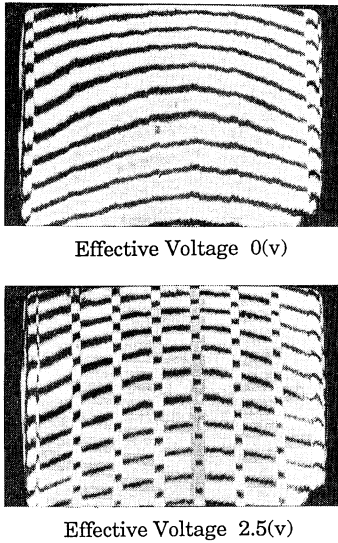


Fig. 5 Image of interference fringes (ZLI-1565 homogeneous panel).

Fig. 5 に示す.

このパネルでは液晶層の厚さにばらつきがあり、干渉縞が曲がっているが、閾値電圧を越えた印加電圧状態では、帯状の電極部分の干渉縞と、電極のない部分の干渉縞の位置の変動、すなわち、位相の変化が観察される。

位相 (光路長) の決定には、2通りの方法を用いる。一つは、観察面で記録された干渉縞画像から各干渉縞の中心線の位置変化量から導出するものである。この方法は、ホモジニアス配向液晶パネルを測定する場合には問題ないが、TN配向パネルの場合、電圧を低下させると施光性のためしだいに干渉縞のコントラストが低下するので中心線の決定時に誤差が大きくなる。したがって、TN配向の場合は、フーリエ変換法を用いた。

計測結果とあわせて、印加電圧に対する位相変調特性のシミュレーション結果も示す。シミュレーションは、液晶層を何層かに分け、各層内における印加電圧時

の液晶分子のディレクタの方向を連続体理論によって計算する。次にジョーンズベクトル法⁴⁾により各層ごとの位相変化量を計算し、それらを積算して全位相変化量を算出する。

5. 液晶パネルの位相変調特性

5.1 TN 液晶パネル (P_1, P_2 の偏光方向は平行)

コヒーレント光の表示素子として TN パネルが使われる場合を想定し、検光子 P_2 の偏光方向は P_1 と平行にする。TN 液晶パネルの位相変調特性 (□印) および透過光強度変調特性 (○印) を Fig. 6 に示す。また、

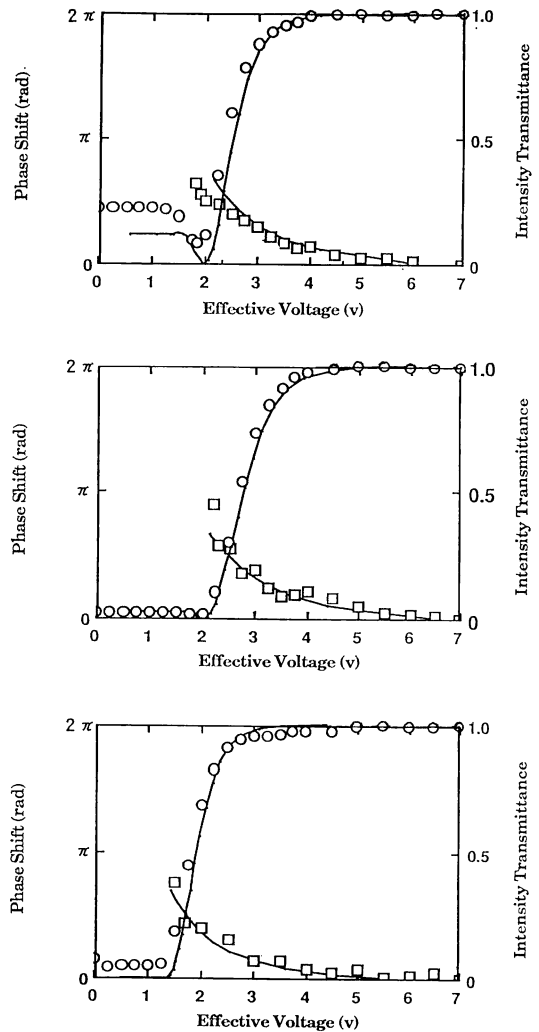


Fig. 6 Phase modulation characteristics and light intensity modulation characteristics of 85° twisted nematic LC panel. P_1, P_2 are directed to parallel. (a) ZLI-1565, (b) ZLI-3021, (c) ZLI-2244.

シミュレーションの結果を実線で示す。ここで左の縦軸の波長 λ は、He-Ne レーザーの値である。

この場合、低電圧時には、液晶パネルの出力光強度は、 P_2 と平行な偏光成分がほとんどなくなるので、位相変化量の決定にはフーリエ変換法を用いる。しかし、実効値電圧 0~2V の範囲では、干渉縞のコントラストが低下し、位相変化量の測定が不可能となるのでグラフでは示されていない。

測定可能な電圧範囲 (2V 以上) で、透過光強度変調に付随して必ず光路長の変化が生じることが観察される。

Fig. 6 の結果から、TN 液晶パネルでは、透過光強度変化が急峻であるのに対して、位相変調は緩やかな変化であること、また TN 配向における位相変調特性は、複屈折率の値にあまり影響を受けず、ほぼ同じ様な変化特性をもつことが観察される。

5.2 TN 液晶パネル (P_2 の偏光方向が P_1 に対して 45 度)

TN 液晶パネルを位相変調素子として使う場合を考慮する。検光子 P_2 の偏光方向が P_1 と平行または垂直の場合、 P_2 を透過する光強度が 0 になることから印加電圧の一部の範囲で位相変調特性がわからない。そこですべての印加電圧範囲で位相変調特性が観察されるように検光子 P_2 の偏光方向は P_1 に対して 45 度として位相変調特性を求める。この場合、透過光強度は干渉縞が観察できなくなるほど低下することはないので、全電圧範囲に渡って位相変調特性が測定できる。位相の決定には、フーリエ変換法を用いた。ここでは ZLI-1565 のみを Fig. 7 に示した。最大位相変化量は、約 1.2π rad ほどである。

TN 液晶パネルでは、仮に P_1, P_2 の方向を適当に調整したとしても、位相変化量が小さく、また透過光強度

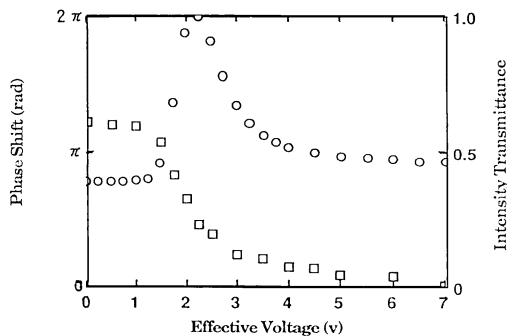


Fig. 7 Phase modulation characteristics and light intensity modulation characteristics of 85° TNLC panel. P_2 is rotated 45° from P_1 .

の変化が大きい。これらの点を考慮すると、近年、TN 液晶パネルを位相変調素子として使用した論文がでてきているが⁵⁾、位相変調素子として最適なデバイスとはいえない。

5.3 ホモジニアス配向液晶パネル

ホモジニア配向液晶パネルでは、電圧 0V の状態で、偏光子、検光子の偏光方向を液晶分子のディレクタと平行にすれば、透過光強度特性はほぼ一定である。したがって透過光強度特性は意味がない。 P_1, P_2 の偏光方向をそのようにした場合の位相変調特性を Fig. 8 に示す。

光学系の振動を防ぐのが不完全だったため、全体的に測定点の微少な変動がある。また、電圧が比較的高く、

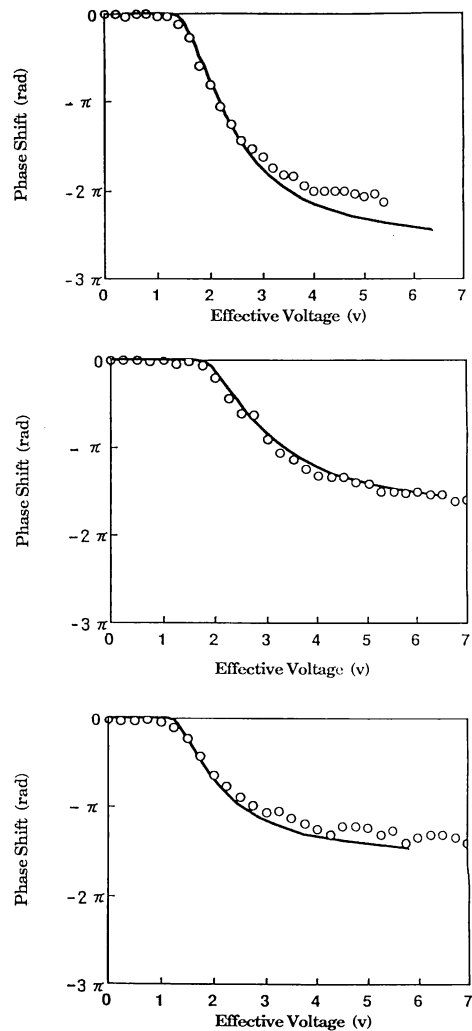


Fig. 8 Phase modulation characteristics of homogeneous LC panel. (a) ZLI-1565, (b) ZLI-3021, (c) ZLI-2244.

光路長変化が飽和し始める部分で、シミュレーションの値と測定値の誤差が大きくなる傾向がみられる。これは、液晶分子の配向処理が十分でなく、印加電圧がない状態でも、液晶分子がガラス面に対して完全に平行でなく、少し傾いていることが原因として挙げられる。しかし、変化が急峻な部分で、光路長変化の範囲としては広い範囲で測定結果とシミュレーション結果は、よく一致している。

前述したように、飽和時の光路長変化量は、複屈折率の大きさの順になるので、他の液晶と比べ複屈折率の大きい ZLI-1565 で位相変化が最大となる。このパネルでは最大光路長変化量が、 2π を越えており、位相変調素子として使う場合、ここに挙げた液晶のなかでは、ZLI-1565 が最も適当であると考えられる。しかし、変化量が 2π の近くになると位相変化が不安定となり、できれば位相変化がほぼ線形である範囲で 2π を越えるものが望ましい。変化量を大きくするには、液晶層を厚くするか、複屈折率がさらに大きい液晶を使うかの2通りの方法が考えられるが、液晶パネルを高速変調素子として使うことを考えると液晶層の厚さは、薄いほうがよいので、複屈折率の大きい液晶が望ましい。

6. 結 論

1) TN 液晶パネルの場合、光強度変調だけでなくそれに付随して必ず位相変化が生じてしまう。ダイナミック・レンジの広い強度変調特性を保つには、液晶層の厚さを十分厚くする（市販のパネルは約 $5\mu\text{m}$ から $8\mu\text{m}$ ）ことが必要なので、位相変化量を減らすことは困難であ

る。したがって、コヒーレント光学系での使用には位相変化についても注意を払う必要がある。

2) 旋光性のない、純粋に位相変調素子として使用する場合には、ホモジニアス配向液晶パネルのほうが望ましい。このようなパネルは市販されていないが、基本的に TN 液晶パネルと同じなので製作は可能である。

3) 複素振幅型の入力パターン、フィルターの実現は、パネルの画素の位置合わせの問題があるが、TN 配向とホモジニアス配向の液晶パネルの両方を使用することで、将来可能になると考えられる。

問題点（課題）としては、制御できる位相変化の最小値はどの程度まで可能であるかがあげられる。

各種液晶パネルのサンプル提供ならびに実験結果についての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心から感謝いたします。

文 献

- 1) M. Schadt and W. Helfrich: "Voltage-dependent optical activity of a twisted nematic liquid crystal," *Appl. Phys. Lett.*, **18** (1971) 127-128.
- 2) T. H. Barnes, T. Eiju, K. Matsuda and N. Ohyama: "Phase-only modulation using a twisted nematic liquid crystal television," *Appl. Opt.*, **28** (1989) 4845-4852.
- 3) K. Lu and B. E. A. Saleh: "Theory and design of the liquid crystal TV as an optical spatial phase modulator," *Opt. Eng.*, **29** (1990) 240-246.
- 4) 応用物理学会光学懇話会編: 結晶光学 (森北出版, 東京, 1975) 5章.
- 5) 門野博史, 小楠 誠, 豊岡 了, 齊地禎昭: "液晶位相変調素子の位相シフト干渉計への応用", 第37回応用物理学会予稿集 (1990) 30 a-C-4.