



## 表面安定化強誘電性液晶の位相変調特性

豊岡 了・町田 賢一・野平 博之・門野 博史・境川 亮

埼玉大学工学部 〒338 浦和市下大久保 255

(1994年3月2日受付, 1994年5月24日受理)

### Phase Modulation Characteristics of Surface Stabilized Ferro-electric Liquid Crystals

Satoru TOYOOKA, Kenichi MACHIDA, Hiroyuki NOHIRA, Hirofumi KADONO  
and Akira SAKAIGAWA

Faculty of Engineering, Saitama University, 255, Shimo-okubo, Urawa 338

(Received March 2, 1994; Accepted May 24, 1994)

Optical modulation characteristics especially phase modulation characteristics of surface stabilized ferroelectric and anti-ferroelectric liquid crystals are investigated theoretically and experimentally. A ferroelectric liquid crystal cell under one stable state is simulated by an uni-axial crystal model. On the other hand an anti-ferroelectric liquid crystal cell under intermediate state is simulated by superposition of two uni-axial crystals which make an angle on a plane. Experimental results of intensity modulation and phase modulation well agreed with theoretical results. Temperature dependence of the optical properties is also discussed.

#### 1. はじめに

液晶は外部電界により容易にその光学的性質を変化させることができ、今日平板表示装置等に広く普及している。これら表示装置においては液晶の光強度透過率特性を利用しているが、インコヒーレント・コヒーレント変換やホログラム記録のようなコヒーレント光学処理においては、位相変調特性が重要になってくる<sup>1-3)</sup>。

筆者らはネマティック液晶の屈折率が外部電界によって容易に変調できる性質(電界誘起複屈折効果)に着目し、これを位相変調素子として利用する新しい位相シフト干渉計測法を提案した<sup>4,5)</sup>。ネマティック液晶位相変調素子はわずかに数ボルトの交流電界を印加することによって  $0 \sim 2\pi$  の範囲で容易に位相を制御でき、任意のパターンの電極を形成できることから、PZTを用いた位相変調素子では実現できない特殊な干渉計においてもその有用性を発揮することができる。このような応用においては位相変調素子の高速応答性が要求されるが、ネマティック液晶においては 10 ms オーダーであり十分とはいえない。

一方、強誘電性液晶 (FLC)<sup>6)</sup> はネマティック液晶と比

較すると応答性が2桁以上速く双安定素子であるので、画像の2値記憶素子、光スイッチをはじめとしてアクティブマトリックスを必要としないディスプレイや空間光変調器<sup>7)</sup>、光アドレス型の joint transfer correlator<sup>8)</sup> への応用が研究されている。さらに最近は三つの安定状態をとる反強誘電性液晶 (AFLC) が注目されている<sup>9)</sup>。

本論文においては、これら FLC および AFLC の変調特性を一軸性結晶モデルで解析し、実験結果と比較検討した。また変調特性の温度依存性についても調べた。

#### 2. FLC および AFLC の電気光学的性質

液晶は分子の対称性の違いによって、ネマティック相とスメクティック相に2分類される。スメクティック相は1次元周期構造を持ち、スメクティックC相 (Sc) では分子の配向ベクトルが層法線と一定角  $\theta$  をなしている。分子がキラル (chiral) で反転対称性を持たない場合は配向方向が自発的に螺旋状に傾れたキラルスメクティックC相 (Sc\*) となる。言い換えると細長い分子は頂角  $2\theta$  の円錐の辺上にある。層に垂直な方向には分子軸が螺旋状に回転する構造をとる。分子長軸に垂直な双極子モーメントが存在する場合には、Sc\* 層が強誘電性とな

る. FLC 素材を  $2\mu\text{m}$  以下の狭いギャップ幅で対向させた透明電極付きのガラスセルに封入すると螺旋構造が解消する. このような液晶は表面安定化強誘電性液晶 (SSFLC) と呼ばれる. 通常, 室温で安定な  $\text{Sc}^*$  相を得るために, 強誘電性液晶を不斉炭素原子を持たないホスト液晶に添加し混合物として使用する. セルの一方に閾値  $E_{th}$  を越える電界を印加すると分子長軸は Fig. 1(a) に示すように一方にそろった状態で安定化する. 図において, 紙面はガラス面に平行であるとし, 自発分極の方向が  $\odot$  と  $\otimes$  で模式的に描かれている. 電界の向きを反転すると分子は  $2\theta$  だけ回転し, もう一方の安定状態に遷移する. この二つの安定状態間の遷移時間は  $\mu\text{s}$  オーダーであることから, 高速スイッチング素子として使うことができる. さらに, 電界を印加したときの安定状態は電界を取り除いても保存される, 言い換えるとメモリー作用を持っている.

反強誘電性液晶 (AFLC) においては, 閾値  $E_{th}$  以上および  $-E_{th}$  以下では Fig. 1(b) に示すように FLC と同様な分子配列をとるが, 電界ゼロの近傍の中間状態では図の中央に示すように層ごとに分子が交互に傾き角を入れ換えるような配列をとる. この状態では巨視的には自発分極は解消し, 中間の安定状態となる. すなわち, FLC が双安定材料であるのに対して, AFLC は 3 安定材料である.

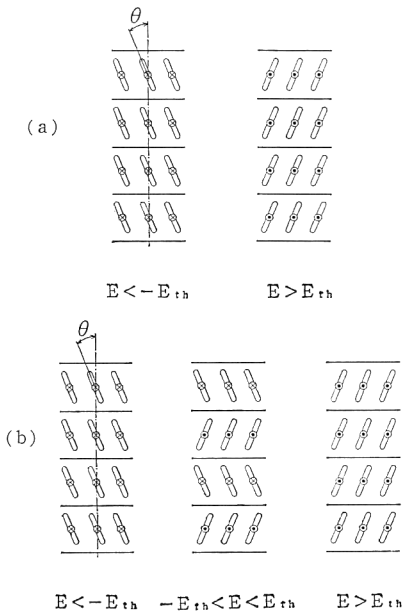


Fig. 1 Schematic description of molecular orientation of (a) surface stabilized FLC cells and (b) surface stabilized AFLC cells.

このように, FLC や AFLC は広く用いられているネマティック液晶とは構造も遷移機構も全く異なる材料である. FLC セルを直交する偏光板の間に置き, 一方の安定状態における分子長軸の方向を入射側の偏光板の透過軸に合わせると, 出射側の偏光板を通過する光強度は最小値をとる. 電界を反転すると, 入射直線偏光は楕円偏光となり, 出射側偏光板を通過する成分が生じる.  $2\theta=45^\circ$  のとき出力光強度は最大になる. 一方, 位相変調素子として利用したい場合は, FLC セルを 2 枚の透過軸を平行にした偏光板の間に挟む. 液晶分子層法線の方向が偏光板の透過軸と  $45^\circ$  の角度をなすように配置すると, 透過光強度変調をほとんどゼロにして位相のみを変化させることができる. 次節ではこれらの現象を一軸性液晶モデルで解析する. さらに 4 節では実験を示し, 解析結果と比較する.

### 3. 一軸性結晶モデルによる変調特性の解析

#### 3.1 FLC セル

FLC セルの変調特性は一軸性結晶モデルを仮定して説明することができる. ここでは一つの安定状態にある FLC セルを 2 枚の偏光板で挟んだときの出力光の複素振幅分布をジョーンズベクトルを使って解析した. Fig. 2 に示すように入射側の偏光板の透過軸を  $y$  軸とし, 分子層の法線と  $y$  軸のなす角を  $\phi$ , 分子長軸が層法線となす角を  $\theta$  とする.  $\theta$  はティルト角と呼ばれ, セルの光学的特性を決める重要なパラメータである.  $\text{PL}_1$  に入射する光および  $\text{PL}_2$  から射出する光のジョーンズベクトルは

$$\mathbf{u}_i = \begin{pmatrix} u_{xi} \\ u_{yi} \end{pmatrix} \quad \mathbf{u}_o = \begin{pmatrix} u_{xo} \\ u_{yo} \end{pmatrix} \quad (1)$$

セルのジョーンズ行列は

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda}n_1d\right) & 0 \\ 0 & \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda}n_2d\right) \end{pmatrix} \quad (2)$$

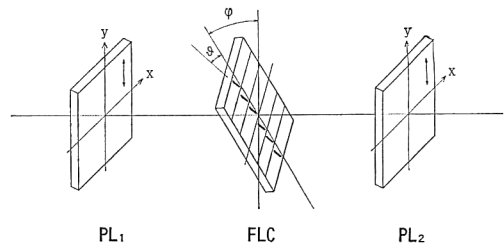


Fig. 2 Coordinate system of an FLC cell sandwiched by two polarizers.

と書くことができる。ここで、 $n_1, n_2$  はそれぞれ分子の長軸方向および直交する方向の屈折率、 $d$  はセル厚、 $\lambda$  は光の波長である。方位角  $\phi$  に依存する回転行列は

$$\mathbf{R}(\phi \pm \theta) = \begin{pmatrix} \cos(\phi \pm \theta) & -\sin(\phi \pm \theta) \\ \sin(\phi \pm \theta) & \cos(\phi \pm \theta) \end{pmatrix} \quad (3)$$

である。ここで複号はそれぞれ二つの安定状態に対応するものとする。PL<sub>2</sub> から射出する光のジョーンズベクトルは(1)~(3)式より

$$\mathbf{u}_o = P_2 \mathbf{R}(\phi \pm \theta) \mathbf{W} \mathbf{R}(-\phi \mp \theta) P_1 \mathbf{u}_i \quad (4)$$

ここで、 $P_1, P_2$  は Fig. 2 の2枚の偏光板のジョーンズ行列で、透過軸が  $y$  軸および  $x$  軸に平行な場合はそれぞれ次のように与えられる。

$$P_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad P_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (5)$$

PL<sub>2</sub> の透過軸が  $y$  軸に平行な場合、すなわち2枚の偏光板を平行に配置した場合について(4)式を計算すると、出力光の複素振幅は

$$\begin{aligned} u_{yo} &= u_{yi} \left\{ \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} n_1 d\right) \sin^2(\phi \mp \theta) \right. \\ &\quad \left. + \exp\left(-i\frac{2\pi}{\lambda} n_2 d\right) \cos^2(\phi \pm \theta) \right\} \\ &= u_{yi} \exp(-i\Phi) \{ \cos \alpha + i \sin \alpha \cos [2(\phi \pm \theta)] \} \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ただし

$$\alpha = \frac{n_1 - n_2}{2} \frac{2\pi}{\lambda} d = \frac{\Delta n}{\lambda} d, \quad \Phi = \frac{n_1 + n_2}{2} \frac{2\pi}{\lambda} d \quad (7)$$

とした。したがって PL<sub>2</sub> を通過した光波の強度と位相は次式で与えられる。

$$I_{FLC} = |u_{yo}|^2 = I_0 \{ 1 - \sin^2 \alpha \sin^2 [2(\phi \pm \theta)] \} \quad (8)$$

$$\phi_{\pm} = -\tan^{-1} \{ \tan \alpha \cos [2(\phi \pm \theta)] \} \quad (9)$$

また、二つの安定状態の間の相対的位相差は

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \phi_- - \phi_+ \\ &= \tan^{-1} \left\{ \frac{-2 \tan \alpha \sin(2\phi) \sin(2\theta)}{1 + \tan^2 \alpha \cos [2(\phi + \theta)] \cos [2(\phi - \theta)]} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

で与えられる。

(8)式で与えられる二つの状態の出力光強度を方位角  $\phi$  に対してプロットすると Fig. 3 のようになる。次に、位相変調素子として重要な特性は二つの安定状態における位相の値そのものではなく、(10)式で与えられる位相差である。Fig. 4 に位相差と強度差をそれぞれ実線および破線でプロットした。これらの式に含まれる定数は、 $\theta = 22.5^\circ$ ,  $\Delta n = 0.156$ ,  $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ ,  $d = 1.3 \mu\text{m}$  とした。

同様に、PL<sub>2</sub> の透過軸が  $x$  軸に平行な場合、す

なわち2枚の偏光板がクロスする場合の出力光の複素振幅は

$$u_{xo} = -i u_{yi} \sin \alpha \sin [2(\phi \pm \theta)] \quad (11)$$

となる。この式より、 $u_{xo}$  は純虚数であり、方位角  $\phi$  に無関係に常に  $-90^\circ$  の位相差を与えることがわかる。この場合の透過光強度は次式で与えられる。

$$I_{FLC} = |u_{yo}|^2 = I_0 \sin^2 \alpha \sin^2 [2(\theta \pm \phi)] \quad (12)$$

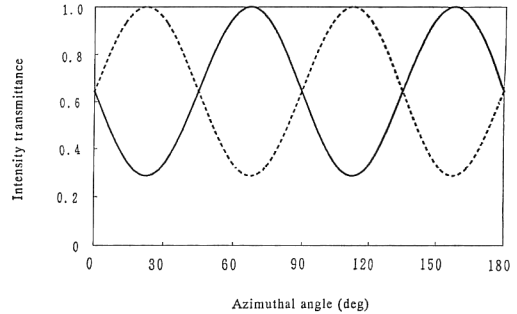


Fig. 3 Intensity transmittance of two stable states of an FLC cell sandwiched by parallel polarizers calculated from Eq. (8).

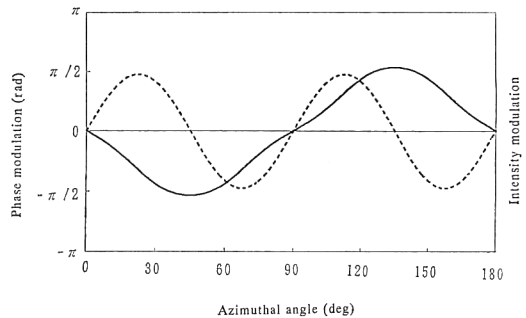


Fig. 4 Intensity modulation (broken line) and phase modulation (solid line) between two stationary states of an FLC cell calculated from Eq. (8) and Eq. (10), respectively.

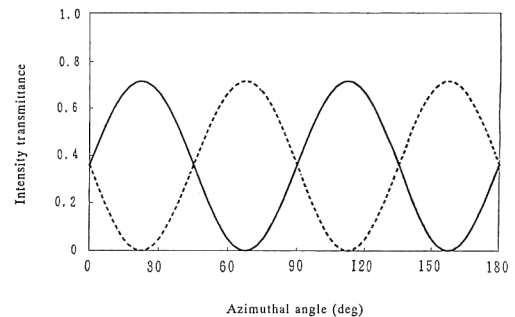


Fig. 5 Intensity transmittance of two states of an FLC cell sandwiched by two crossed polarizers calculated from Eq. (12).

方位角  $\phi$  の変化に対する出力光強度を Fig. 5 にプロットした。

Fig. 3 と Fig. 5 を比較すると、2枚の偏光板を垂直に配置した場合は方位角  $45^\circ$  ごとに一方の状態の強度がゼロになりコントラスト比が最大になるのに対して、平行配置では十分なコントラスト比が取れないことがわかる。したがって透過光強度を変調するためには直交ニコルの間にセルを置けばよい。逆に、位相変調のためには透過軸を平行にした2枚の偏光板の間にセルを置くと、方位角が  $45^\circ$  および  $135^\circ$  において強度変調はゼロで位相変調が極値をとる。すなわち、この場合にのみ純粋な位相変調素子が実現する。本論文では特に位相変調特性に注目し、以下の議論においては主として偏光板を平行に配置した場合について取り扱うことにする。

(10)式の位相差はセル厚  $d$  の関数である。この式より所望の位相変調素子を得るためにはセル厚をコントロールすればよいことがわかる。(10)式において、 $\phi = 135^\circ$  のときの位相差をセル厚  $d$  に関してプロットすると Fig. 6 のようになる。位相差はセル厚  $d$  の増加とともに単調に増加し、 $d = 4.06 \mu\text{m}$  で  $2\pi$  変化する。このようにして複屈折率が既知であれば、セル厚を変えることによって  $0$  から  $2\pi$  間での任意の変調量の位相変調器を作ることができる。しかし、実際には後に述べるようにある程度以上  $d$  が大きくなると双安定性が保持されなくなる。

### 3.2 AFLC セル

表面安定化 AFLC セルにおいては、閾電界  $E_{th}$  以上または  $-E_{th}$  以下では FLC セルと同じ一軸性結晶と考えられるので、透過光の強度と位相は平行偏光の場合 (8), (9)式で与えられる。それに対して Fig. 1 (b) に示す中間状態の場合は同一平面内に2枚の一軸性結晶が重ね合わされているとした光学モデルを考え、複素振幅透過率はそれぞれの状態の複素振幅透過率の平均であ

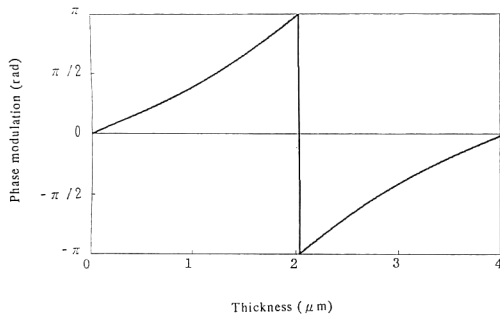


Fig. 6 Phase modulation depending on the thickness of FLC cells.

ると仮定した。このような AFLC セルを透過軸を平行にした2枚の偏光板で挟んだときの出力光の複素振幅分布は次式で与えられる。

$$u_{yo} = \frac{u_{y,+} + u_{y,-}}{2} = u_{y,i} \{ \cos \alpha + i \sin \alpha \cos^2 2\phi \cos^2 2\theta \} \quad (13)$$

ただし、 $u_{y,+}$  および  $u_{y,-}$  は (6)式における複号のそれぞれに対応する複素振幅である。したがって、透過光の強度と位相は

$$I_{AFLC} = I_0 (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha \cos^2 2\phi \cos^2 2\theta) \quad (14)$$

$$\phi_0 = -\tan^{-1} (\tan \alpha \cos 2\phi \cos 2\theta) - \Phi \quad (15)$$

となる。(9)式および(15)式より反強誘電状態と二つの強誘電状態の間の相対的な位相差は次式で与えられる。

$$\Delta\phi = \phi_0 - \phi_{\pm} = -\tan^{-1} \left\{ \frac{\mp \tan \alpha \sin 2\phi \sin 2\theta}{1 + \tan^2 \alpha \cos 2\phi \cos 2\theta \cos 2(\phi \pm \theta)} \right\} \quad (16)$$

中間の反強誘電状態を基準にした位相差は (15), (16) 式より Fig. 7 のようになる。この場合の (7)式における定数はそれぞれ  $\theta = 22.5^\circ$ ,  $\Delta n = 0.12$ ,  $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ ,  $d = 2.0 \mu\text{m}$  とした。ここで、中間状態との位相差は  $\phi = 36^\circ$

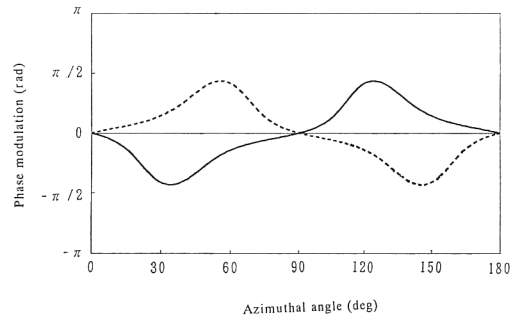


Fig. 7 Phase modulation between two FLC states and intermediate state of an AFLC cell calculated from Eq. (16).

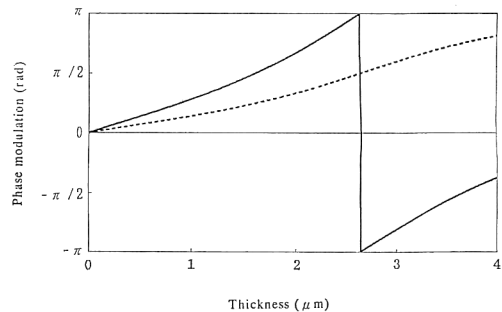


Fig. 8 Phase modulation depending on the thickness of an AFLC cell.

と  $124^\circ$  および  $54^\circ$  と  $146^\circ$  で極値  $\Delta\phi = \pm 1.36 \text{ rad}$  をとり、 $\phi = 45^\circ$  と  $135^\circ$  で対称な位相変調  $\Delta\phi = \pm 1.06 \text{ rad}$  が得られる。しかし、(8), (14)式よりこれらの点で強度透過率も同時に変化する。すなわち AFLC セルにおいては、強度の変調を伴わない純粋な位相変調は実現できないことがわかる。

FLC セルの場合と同様にセル厚  $d$  を変えたときの  $\phi = 135^\circ$  における位相差の変化を計算すると Fig. 8 のようになる。図において破線は (16)式で与えられる中間状態から一方の強誘電状態への遷移に伴う位相差、実線は一方の強誘電状態から反転した強誘電状態への遷移に伴う位相差である。いずれもセル厚  $d$  の増加に伴って位相差は単調に増加し、 $d = 2.65 \mu\text{m}$  でそれぞれ  $\pi/2$  および  $\pi$  をとる。

## 4. 実験

### 4.1 液晶セルおよび位相計測系

実験に用いた FLC 材料は常温付近で安定な動作をするためにキラル化合物 (キラルドーパント) をアキラルなホスト液晶に混合したものを調製した。これらの化学構造式および混合比を Fig. 9 に示す<sup>10,11)</sup>。キラルドーパントはフッ素を置換することによる不斉炭素原子 C\* を持つ Sc 相になっている。また、AFLC は数種類のキラル化合物を混合したものである。セルは透明電極と配向膜を着けた 2 枚の基板ガラスを厚さ一定のギャップ材を挟んで貼り合わせることによってセル厚を一定に保つようにしたもので、FLC について  $1.3 \mu\text{m}$ ,  $2.0 \mu\text{m}$ ,  $3.4 \mu\text{m}$  の 3 種類、AFLC について  $2.0 \mu\text{m}$  のセルを用意した。温度依存性も同時に測定するために、これらのセルを 2 枚の  $\text{SnO}_2$  膜付きガラス (ネサガラス) で挟んだ。 $\text{SnO}_2$  膜に電流を流すことにより発生するジュール熱により液晶セルを室温から  $70^\circ\text{C}$  の間で加熱すること

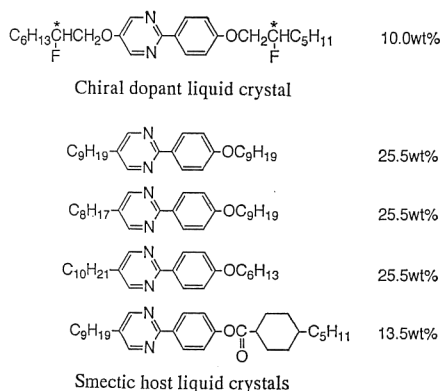


Fig. 9 Preparation of FLC materials.

ができるようにした。このようにして作成した液晶セルは回転ホルダーに取り付けられ、2枚の偏光板の間に置かれた。このようにして得られた一組の液晶サンプルは Fig. 10 に示すようにマッハ・ツェンダー干渉計の一方の光路に置かれた。もう一方の光路には、液晶以外の要素の温度変化による位相誤差を補正するためのダミーセルを置いた。ダミーセルは液晶を封入していない点を除けばすべて液晶セルと同じ構造をしている。両セルのネサガラスに等しい電流を流して熱電対で両セルの温度をモニターしながら実験を行った。

He-Ne レーザー ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ) から発する光は BS<sub>1</sub> で 2 分され、それぞれ  $80.00 \text{ MHz}$  と  $80.03 \text{ MHz}$  でドライブされた音響光学素子 AOM<sub>1</sub>, AOM<sub>2</sub> に入射する。それぞれの 1 次回折波のみが選択され、液晶セルとダミーセルを通して BS<sub>2</sub> で重ね合わせられる。 $30 \text{ kHz}$  で変調された光ビート信号はホトダイオードで検出され、ロックインアンプに入力される。一方、二つの AOM のドライブ信号はミキサーで混合された後ロックインアンプの参照信号とされた。両信号の位相を比較することによって、液晶セルの位相を決定した。

### 4.2 透過光強度および位相変調特性の測定結果

上述の各種液晶サンプルについて、液晶の分子層に垂直な方向が偏光板 P<sub>1</sub> の透過軸と一致する位置を角度の原点とし、ホルダーの方位角を変えたときの透過光の強度と位相を測定した。

はじめに、セル厚  $1.3 \mu\text{m}$  の FLC セルの室温 ( $24^\circ\text{C}$ ) における透過光強度の測定結果を Fig. 11 に示す。これは、2枚の偏光板の透過軸を平行にした場合と直交させた場合について、セルに  $+10 \text{ V}$  と  $-10 \text{ V}$  印加したときの透過光強度を測定したものである。上の 2 曲線が偏光板を平行にした場合、下が直交させた場合の結果である。二つの安定状態に対応する正弦波状の変化の位相差がティルト角の 2 倍に相当し、この場合は  $45^\circ$  である。

2枚の偏光板の透過軸を平行にした場合について

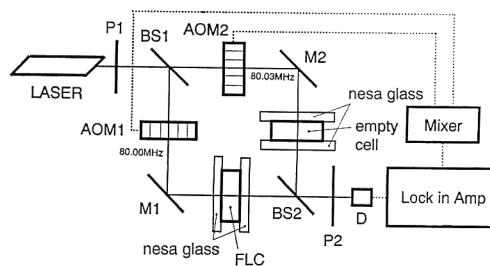


Fig. 10 Experimental setup of heterodyne interferometry.

Fig. 11 と同じサンプルで得られた位相差および強度差の測定結果を Fig. 12 にプロットした. この液晶セルでは方位角が  $45^\circ$  と  $135^\circ$  のときに位相変調量の絶対値は  $1.55 \text{ rad}$  ( $89^\circ$ ) で, そのときの強度の変調がゼロになる. すなわち, 液晶セルをこの角度に設定すれば純粋な位相変調器が得られる. この結果は Fig. 6 に示した計算結果と良い一致を示している. セル厚  $2 \mu\text{m}$  および  $3.4 \mu\text{m}$  のセルについても同様な測定を行った. これらのセルについて実験的に得られた最大位相変調量を Fig. 6 における計算結果と共に Table 1 に示す.  $1.3 \mu\text{m}$  のセルでは両者はほぼ一致しているが,  $2 \mu\text{m}$  および  $3.4 \mu\text{m}$  のセルにおいてはかなりの差異がでている. セル厚を実際に測定していないので厳密な議論はできないが, Fig. 6 の計算結果で定性的には裏付ける結果といえるであろう. なお,  $3.4 \mu\text{m}$  のセルでは土の閾値以上の電界からゼロにすると, いずれの場合も必ず一方の安定状態に引き戻される現象が観察された. セル厚がこの程度になると分子の配向膜による拘束力が相対的に弱くなりもはや双安定性が保持されなくなると考えられる.

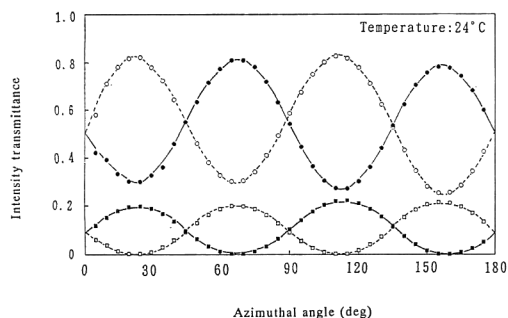
同様な実験を温度を変えて行った. FLC セルについ

てティルト角および最大位相変調量についての測定結果を Fig. 13 に示す. 室温から徐々に温度を上げていくと, 強度透過率に関しては Fig. 11 における二つの安定状態に対応する正弦波の位相差が小さくなり,  $55^\circ\text{C}$  を越えると両者はほとんど重なってしまう. すなわちティルト角は温度上昇に伴って単調に小さくなる. 位相変調量に関しては  $12^\circ\text{C}$  から  $35^\circ\text{C}$  まではほぼ一定値をとり, その後単調に減少して  $55^\circ\text{C}$  でゼロになる. この温度は  $\text{Sc}^*$  相から強誘電性を示さない  $\text{S}_\text{A}$  相への転移温度に相当する.

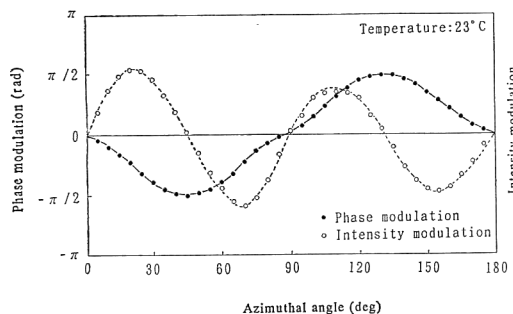
次に, AFLC セルについても同様な実験を行った. 平行偏光下に置いた AFLC セルに  $+30 \text{ V}$ ,  $0 \text{ V}$ ,  $-30 \text{ V}$

**Table 1** Comparison between calculated values and experimental values of maximum phase modulation in FLC cells of different thickness.

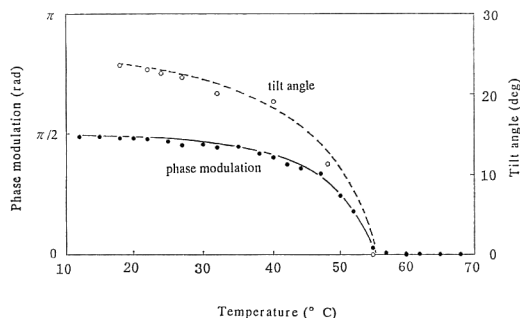
Thickness	$\Delta\psi$ (calculated)	$\Delta\psi$ (experimental)
$1.3 \mu\text{m}$	1.68	1.54
$2.0 \mu\text{m}$	3.08	1.98
$3.4 \mu\text{m}$	0.75	1.35



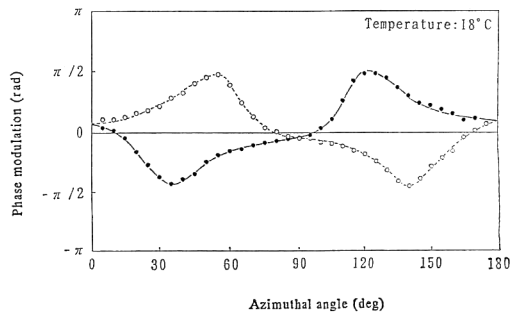
**Fig. 11** Intensity transmittance of two states of an FLC cell sandwiched by parallel polarizers (upper lines) and crossed polarizers (lower lines).



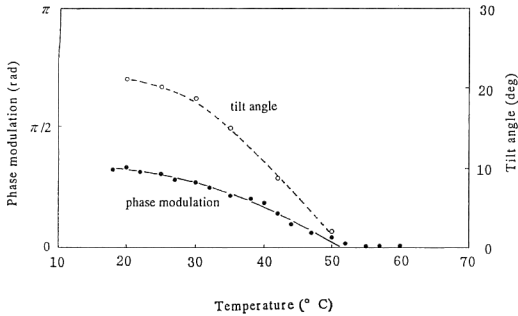
**Fig. 12** Intensity modulation (○) and phase modulation (●) between two stationary states of an FLC cell.



**Fig. 13** Temperature dependence of phase modulation (●) and tilt angle (○) of an FLC cell.



**Fig. 14** Phase modulation between two FLC states and an intermediate state of an AFLC cell.



**Fig. 15** Temperature dependence of phase modulation (●) and tilt angle (○) of an AFLC cell.

の電界を印加したときの室温(18°C)における位相を方位角を変えて測定した。0 V における位相を基準としたときの+30 V および-30 V の位相差の分布を **Fig. 14** に示す。これらの結果はFig. 7 の計算結果と良く一致しており、提案したモデルの妥当性が示された。また、ティルト角および最大位相変調量の温度依存性を測定した結果を **Fig. 15** に示す。ティルト角は単調に減少し、対応して位相変調も減少し、両者とも 52°C でゼロになった。位相差に関しては FLC セルで見られたような室温付近の安定な領域は現れなかった。

## 5. 結 論

高速光変調素子として注目されている FLC および AFLC セルの光学的諸特性のうち特に位相変調に注目して基本的な解析と実験を行い、次の結論を得た。

(1) FLC セルの透過光強度および位相変調の方位角依存性は一軸性結晶モデルで説明することができる。セルを透過軸を平行にした 2 枚の偏光板で挟みセル厚をコントロールすることにより、強度変調を伴わない 2 値位相変調素子を作ることができる。

(2) AFLC については同一平面内に角度  $2\theta$  だけ傾いた 2 枚の一軸性結晶が重ねておかれたモデルで説明することができる。平行偏光板で挟むことにより 3 値位相変調が可能だが、透過光強度の変調を避けることはできない。

(3) 室温から 60°C 以上にわたるセルの、ティルト角および位相変調の温度依存性について実験的に調べた。いずれも温度上昇に伴ってほぼ単調に減少し、50°C 以上で変調特性は消滅した。しかし、FLC セルにおいては室温付近 (12~30°C) で位相変調特性が安定な領域が存在することがわかった。

ネマティック液晶においては 0 から  $2\pi$  の全域で任

意に位相をコントロールできるが、FLC の場合は 2 値、AFLC では 3 値しか取ることができない。しかし、このことは位相変調素子として必ずしも不利な特性であるとはいえない。ネマティック液晶と比較した利点を挙げると次のようになる。

(4) 本論文では応答性に関する議論はしていないが、実験的に測定したスイッチング時間はいずれも 50  $\mu$ s 以下であった。

(5) 位相変調量は電界の閾値以上で安定している。すなわち印加電圧の不安定性は位相誤差を生じない。

(6) 0 から  $2\pi$  までの全域多値位相シフターはこれらのセルを複数枚重ねることによって容易に実現できる。

本研究は一部文部省科学研究費補助金によって行われたことを記し謝意を表す。また、反強誘電性液晶素材をご提供くださった昭和シェル石油株式会社に感謝する。

## 文 献

- 1) 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.
- 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) J. Amako, H. Miura and T. Sonehara: "Wave-front control using liquid crystal devices," *Appl. Opt.*, **32** (1993) 4323-4329.
- 4) H. Kadono, S. Toyooka and Y. Iwasaki: "Speckle-shearing interferometry using a liquid-crystal cell as a phase modulator," *J. Opt. Soc. Am. A*, **8** (1991) 2001-2008.
- 5) H. Kadono and S. Toyooka: "Phase shifting common path interferometer using a liquid crystal phase modulator," *Proceedings of International Conference "From Galileo's 'occhialino' to optoelectronics"* (1993) pp. 895-900.
- 6) 小林駿介: "強誘電性液晶とその応用", *光学*, **19** (1990) 410-416.
- 7) 福田教夫, 竹添秀男: 強誘電性液晶の構造と物性 (コロナ社, 1990).
- 8) D. A. Jared, K. M. Johnson and G. Modell: "Joint transfer correlator using an amorphous silicon ferroelectric liquid crystal light modulator," *Opt. Commun.*, **76** (1990) 97-102.
- 9) N. A. Clark and S. T. Lagerwall: "Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals," *Appl. Phys. Lett.*, **36** (1980) 899.
- 10) S. Nakamura and H. Nohira: "Synthesis and mesomorphic properties of ferroelectric liquid crystal with a fluorinated asymmetric frame," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **185** (1990) 199-207.
- 11) H. Nohira: "Synthesis and properties of ferroelectric liquid crystals having a variety of fluorinated frames," *Proceedings of the 4th International Conference on Ferroelectric Liquid Crystals* (1993) p. 28.