



## 強誘電性液晶とその応用

小林 駿 介

東京農工大学工学部電子情報工学科 〒184 小金井市中町 2-24-16

(1990年3月10日受理)

### Ferroelectric Liquid Crystals and Their Application to Electrooptic Devices

Shunsuke KOBAYASHI

Department of Electronic Engineering, Faculty of Technology, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16, Naka-machi, Koganei 184

#### 1. はじめに

強誘電体とは、1) 電界を切った後も電気分極\*<sup>1</sup>をもち、これを自発分極と呼ぶ、2) そのような性質をもつ区域(ドメイン)内の自発分極の方向が印加電界の反転により逆転するような媒質を言う。固体強誘電体で有名なのはロッシェル塩やチタン酸バリウムなどであるが、液晶の強誘電体は Meyer ら<sup>1)</sup>による化学合成物質の紹介(1975年)をもって嚆矢とする。はじめの頃の物質は安定性にとぼしかったが、その後1980年に Clark と Lagerwall<sup>2)</sup>によってメモリ性(双安定性=bistability=BS)と $\mu$ sオーダーの高速度応答(従来のネマティックデバイスのその約1000倍位)が得られることが示された。その後1985年にセイコー電子工業からピクセル数 $400 \times 640$ ドットでA4サイズの強誘電性液晶マトリクス表示が発表され研究者の関心を集めた<sup>3)</sup>。その後多くのデモが行われた<sup>4)</sup>。なぜ強い関心を集めたかその理由はこうである。当時LCDの主流であったねじれネマティック(TN)方式で時分割駆動で走査線数 $N$ が100本(その逆数 $1/N$ がデューティ比)のドットマトリクス表示をしようとすると、クロストークの発生がひどくほとんど実用とならないことがわかってきた( $N=10$ 本程度でもかなりクロストークが発生する。その例を図1に示す)。

この困難さを解決する方式として、

- 1) アクティブマトリクス駆動のTN-LCD
- 2) スーパーツイストネマティック(STN)<sup>5)</sup>
- 3) ホメオトロピック配向のネマティックデバイス<sup>6)</sup>
- 4) 強誘電性液晶(FLC)

を用いるの四つの方式があった\*<sup>2</sup>。これらのうち、1)は小形テレビや投写形表示等に使用されており、膨大な設備投資と多大な技術開発が要求される。見やすさと情報表示量(ドット数)の増大を経済的に同時に実現しようとすると、2)~4)の方法をとらざるをえない。結果的に2)のSTN-LCDなしには現在急速に普及しつつあるラップトップパソコンやワープロはありえないのが実情である。当然STN-LCDが出現しなければferroelectric liquid crystal display (FLCD)が今ごろ主流になっていたであろう。その理由はどんな技術でもその気になって多くの人が取り組みればまとまってしまうからである。

筆者の経験と研究によれば、FLCDの実用化には基本的障害はないと判断できる。本稿において、FLCを用いた電気光学(EO)デバイスの動作原理、特徴、開発上の問題点、その克服法および応用などについて述べる。

\*<sup>1</sup> (a) アクティブマトリクス方式、トランジスタやダイオードなどの非線形スイッチの2次元アレイを用いたドットマトリクス表示の各ピクセルをオン・オフスイッチする。(b) スーパーツイストネマティック方式、従来のTN方式がねじれ角 $90^\circ$ であったものを $180^\circ \sim 270^\circ$ のねじれ角とし電気光学特性の急峻性を改善してクロストークを減らす方式。(c) 上記3)はネマティック分子を垂直に配向して表示する方式で黒の表示にすぐれている。

\*<sup>2</sup> 単位体積当りの電気的雙極子モーメントを電気分極という。

2. 強誘電性液晶電気光学デバイスの動作原理

図2に FLC の分子の一例を示す<sup>7)</sup>. 図で※印の所はカイラル中心であり分子集合体に“ねじれ”を生じる機能基である. また分子から図で下方に延びている二つのCOは電気的雙極子を与える(このCOが1個の分子もある). このような分子はスメクティック(S)A相では分子軸の回りを高速回転しており電気的雙極子は平均するとゼロとなる<sup>\*3)</sup>.

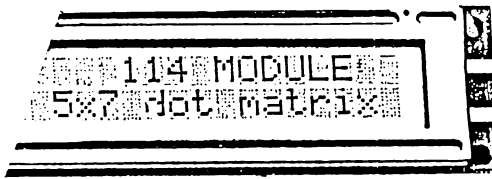


図1 ネマティックLCDで生じるクロストーク発生例

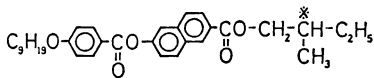


図2 FLCとなる分子の例<sup>7)</sup>

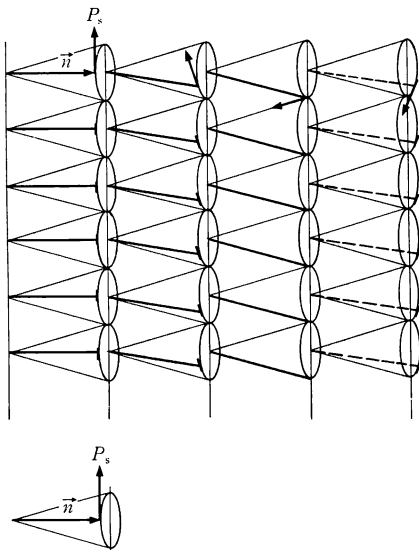


図3 カイラルスメクティック相の分子配列(らせん構造)  
n: 分子ダイレクター, Ps: 自発分極

\*3) ある温度で FLC となる系の相転移の典型例は高温→低温に移ると, 等方相→(カイラル)ネマティック(N\*)→スメクティックA(SA)→カイラルスメクティックC(C\*)と移行する. このC\*はFLCとなる. N\*が無い場合もある.

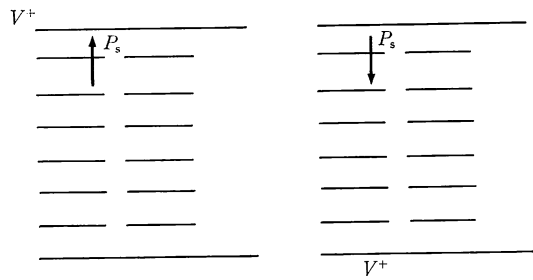


図4 ブックシェルフ構造

さて, FLC となる C\* 相での分子の並び方を図3に示す. 分子は層状をなし, かつ円錐の上のり, 層をたどるとらせん状に回転している. したがって, このままでは自発分極(spontaneous polarization, Ps)は平均化でゼロになってしまう.

FLCD には動作モードとして三つある:

- 1) 光散乱形
- 2) 複屈折率形
- 3) ゲストホスト形

である.

実は, 図3のような分子配列に電界を印加するとらせんピッチが延びて媒質は光学的透明になる. これが1)である. またこの場合, 二色性色素を液晶に添加して行う3)のゲストホスト形として用いることもできる.

さて, もう一つ別の形で2)および3)を実現するには, ①界面と液晶との相互作用を用い, また, ②狭い空間に液晶を閉じ込めることによって, らせんはほどこけてしまい, 理想的には図4に示すようないわゆるブックシェルフ(本棚)形となり, 分子長軸も上面からみると図5のように配向して一様状態となる.

電界を⊕⇌⊖とスイッチすることにより自発分極は⊗⇌⊙と変化する, そのときそれらの状態は電圧を取り去った後もその状態を保持する, つまり記憶している. さて, このような分子媒質の変化を可視化したものが複屈折制御方式, electrically controlled birefringence=ECB または tunable birefringence=TB mode である. いま, FLC 媒質の複屈折率を  $\Delta n = n_1 - n_2$  とし, コーン角(または傾き角)を  $2\theta_0$  とすれば, FLC 媒質を直交偏光板の間に挟んだ系の透過光の強さは

$$I = I_0 \sin^2(4\theta_0) \cdot \sin^2(\pi \Delta n d / \lambda) \quad (1)$$

で与えられる.

FLCD の場合, 印加電圧の極性を変えると, 分子の方向(ダイレクター)  $2\theta_0$  だけ変わる. したがって最大のコントラスト比は  $4\theta_0 = 90^\circ$  すなわち  $\theta_0 = 22.5^\circ$  で得

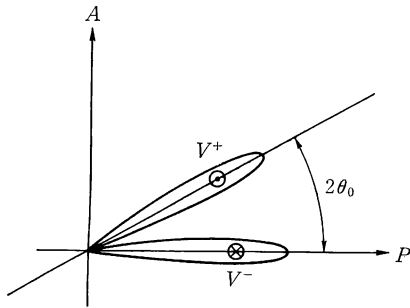


図5 FLCDのスイッチ機構

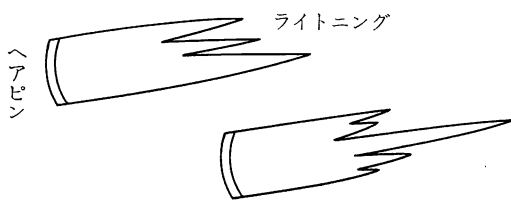


図6 ジグザグ欠陥

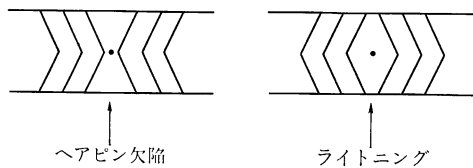


図7 シェブロン構造とジグザグ欠陥との関係

られる。

実際的には  $\theta_0$  はオーダーパラメーターと同質のものであり、 $\theta_0$  は  $C^* \rightarrow A$  転移で消失する。しかし A 相で  $A^*$  形も知られておりエレクトロクリニック効果も知られている<sup>8)</sup>。

二色性色素を FLC に添加してゲストホスト形のカラースイッチングも可能である<sup>9)</sup>。

実際的には、図4および5のブックシェルフ形一様状態は一つの理想的な場合であって、試料をつくれれば直ちにこうなるとは限らない。むしろならない場合のほうが多い。

顕微鏡組織でみるとジグザグ欠陥組織(図6)が発生してしまう。この欠陥と層構造との対応は図7に示すようなシェブロン構造で説明されている<sup>10,11)</sup>。温度を下げていき  $SA \rightarrow C^*$  相に転移すると分子はコーンの上を傾く、そうすると層厚は小さくなる。しかし層ごとの体積は不変(濃度不変)とすると層は折れ曲って長さを稼がなければならないからである。

このようなシェブロン構造があると、式(1)で有効的

な  $\theta_0$  が変わり、光の透過率が変わってしまう。また分子の長軸はねじれた状態になりやすい<sup>12),\*4)</sup>。

### 3. FLCD の電気光学 (EO) 特性

#### 3.1 FLCD の特徴

はじめに期待された FLCD の EO 特性は

- 1) バイスタビリティ (BS) (双方向性メモリー)
- 2) 高速度応答
- 3) 広視角特性

であった。

はじめは小さな試料を作るのに、上下のガラス板を機械的にずらせる運動を与えて分子配向を得ていた<sup>2)</sup>。しかし大面積のパネルを作ろうとすると分子配向膜が必要となる。

よく用いられるポリイミドなどの絶縁性配向膜を用いると、まず BS 特性がよく出ないことがわかってきた。

つぎに高速度応答であるが、時定数  $\tau$  は

$$\tau = \eta / P_s E \quad (2)$$

と表される、ここに  $\eta$  は回転粘性係数である。この関係からわかるように  $P_s \uparrow \rightarrow \tau \downarrow$  の関係にあるので  $P_s$  を大きくしたほうがよい(はじめは  $P_s =$  数  $nC/cm^2$  程度であったが、これが数  $1000 nC/cm^2$  という化合物も可能になってきた)。しかし  $P_s$  が大きいとますます BS 特性が悪くなってしまった。さらに原理的に中間調が出ないこともわかってきた。その上、FLCD のセルは機械的衝撃に弱く分子配向が壊れてしまう。このような理由で研究は暗礁にのり上げてしまった。

#### 3.2 コントラストがよく完全なバイスタビリティを得る方法

これらの諸問題に対する解決策に対するアイデアが筆者らにより提唱され、実験的にもその有効性が示されてきた。その方法とは

(1) 良好な BS 特性を得るための分子配向法として

- 1) Langmuir-Blodgett 膜のような超薄膜<sup>13-15)</sup>

または

- 2) 導電性薄膜を用いる<sup>16)</sup>
- 3) FLC に電荷移動錯体を添加する<sup>17)</sup>
- 4) SiO などの斜方蒸着膜を用いる<sup>18)</sup>

(2) ブックシェルフ構造を得るには

- 1) FLC 物質を選ぶ<sup>7)</sup>
- 2) 動作中 AC 交流電界を印加する<sup>19)</sup>
- 3) 事前に AC 電界を印加する

\*4) ねじれ状態に関しては別の機会に著者の見解を述べることとし、ここでは文献をあげるにとどめる。

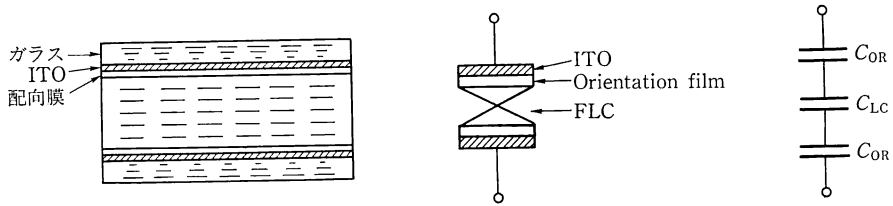


図 8 FLC の断面図と等価回路

などの方法がある。

〔3〕 中間調は LB 膜を用いれば可能である<sup>20)</sup>。

まず、なぜ超薄膜が好ましいかと言うと、図 8 に示すように分子配向膜電気容量  $C_{OR}$  は液晶のそれ ( $C_{LC}$ ) に比べ大きな値とすることができる。FLC に加わる電圧  $V_{LC}$  は外部からの印加電圧  $V_{appl}$  に対して

$$V_{LC} = \{C_{OR}/(C_{OR} + 2C_{LC})\} V_{appl} \approx (1 - 2C_{LC}/C_{OR}) V_{appl} \quad (3)$$

となる。  $C = \epsilon_0 \epsilon A/d$ ,  $d$  は厚さである。そうするとポリアイミド (PI) の LB 膜の場合  $d = 2 \text{ nm}$ ,  $d_{LC} = 2 \mu\text{m}$  であるからほぼ誘電率が同じとすれば  $C_{OR}$  は  $C_{LC}$  の 1000 倍大きい ( $C_{OR} \gg C_{LC}$ ) ので

$$V_{LC} \approx V_{appl}$$

つまり FLC には十分に電圧が加わることになる。

図 9 に絶縁性ポリアイミド (厚さ 100 nm) を用いてラビングした場合と PI-LB 膜を用いた場合とで EO 特性を比較する。PI-LB 膜を用いた場合がメモリ時のコントラスト比で格段にすぐれていることがわかる。

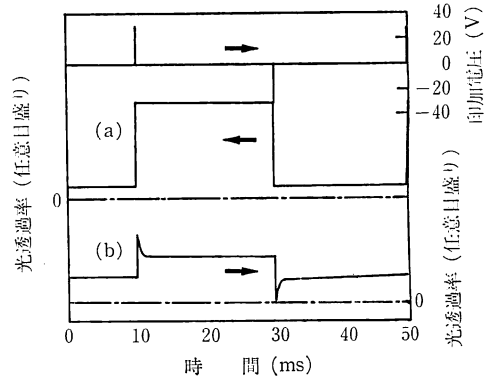


図 9 強誘電性液晶素子の EO 応答特性, 30 V で  $100 \mu\text{s}$  の幅をもつパルス状の電圧を FLC-EO 素子に印加したときの透過光量特性 (a) は配向膜として LB 膜を用いたときの特性であり, (b) は通常用いられているポリアイミドラビング配向膜を用いたときの特性である。

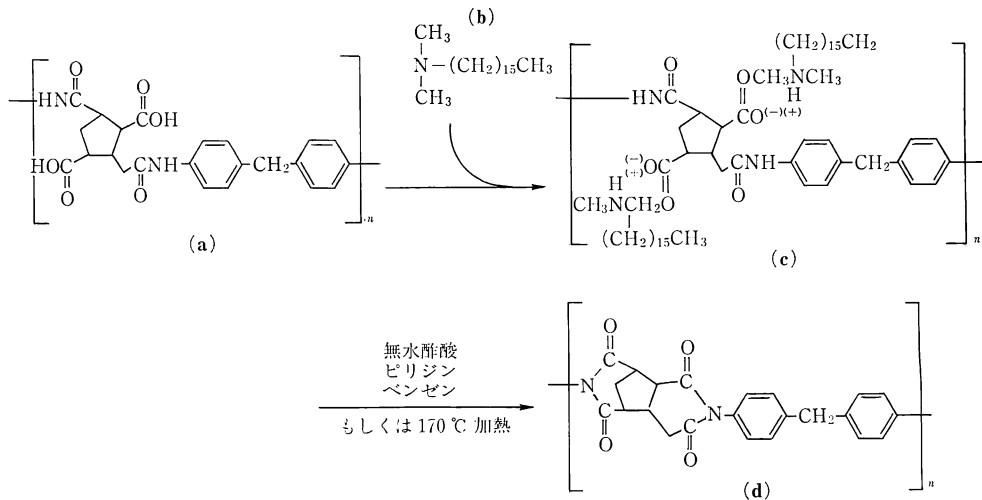


図 10 ポリアイミド LB 膜を得る過程

親水基であるポリアミック酸 (a) に、疎水性の基であるアルキルアミン (b) を混合することによって反応させ、両親媒性のポリアミック酸塩 (c) を得る。この状態で LB 法によって基板上に累積し、無水酢酸、ピリジン、ベンゼンの混合溶液または、 $170^\circ\text{C}$  で熱処理することでポリアイミド構造 (d) の LB 膜を得る。

ラビング配向膜でも  $V_{LC} \approx V_{appl}$  となり問題はないが、なぜメモリ性の劣化がこの場合生じたか？ 答えは界面に生じる電荷の蓄積による反電界の発生によるスイッチバック効果のためである。

有効電界 (式(4)) の第2項は、FLC中のイオンの界面電荷  $\sigma$  および自発分極  $P_s$  の誘起電荷による反電界である。

$$E = \frac{V_0}{d + 2d' / (\epsilon / \epsilon')} - \left[ \frac{2d' / \epsilon'}{(d/\epsilon) + (2d' / \epsilon')} \right] \left( \frac{\sigma(t) + P_s}{\epsilon} \right) \quad (4)$$

ここに、 $d$ ,  $\epsilon$ ,  $d'$ ,  $\epsilon'$  は FLC 媒質の厚さと誘電率、 $d'$ ,  $\epsilon'$  は配向膜のそれである<sup>21)</sup>。

もし導電性配向膜を用いればパルス発生器 (その抵抗値は  $50 \Omega$ ) を含む外部回路を通して、イオン電荷  $\sigma$  や  $P_s$  は放電により中和されてしまう。従来  $P_s$  が大きいと BS が得られなかった理由がこれで理解されよう。

ポリイミドの LB 膜を得るには西片ら<sup>22)</sup> により方法が簡便である。図 10 に、前駆体ポリアミック酸 (a) (日本合成ゴム提供) → ポリイミド LB 膜 (d) 作成のプロセスを示す<sup>13-15)</sup>。これが図 9 に示すように LB 膜を用いれば完全な BS が得られる理由である。

PI-LB 膜はトンネル電流またはプール・フレンケル電流により適度の導電性を示す。この導電性は、今のところ ITO 膜に適度な凹凸がありその不均一性から起因していると考えられる。また LB 膜ではないが種々の導電性高分子配向膜を用いて良好な結果を得ている。

もう一つ別な完全 BS を得る方法として電荷移動錯体 (CTC) を FLC 媒質に添加する方法がある<sup>17)</sup>。これは技術の功拙によらずよい結果を得ることができる。

われわれが試みて成功した錯体の例を図 11 に示す。その名称は TMTTF・ODTCNQ (日本カーリット提供) である。

CTC 添加の効果を図 12 に示す。通常の BS と違って書き込みまたは消却パルスの終りの端 (rear edge) で反転した形 (inverted BS) で生じている。これは式(4)の  $\sigma$  が大きい場合である。いまのところパルス幅が  $500 \mu s$  くらいより広い場合に限定されるが、ほぼブックシェルフ形層構造でコントラスト比  $50:1$  くらいの素子も製作可能である<sup>17)</sup>。

つぎにブックシェルフ構造を作る方法であるが、ま

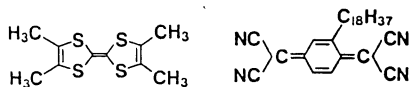


図 11 電荷移動錯体 TMTTF・ODTCNQ

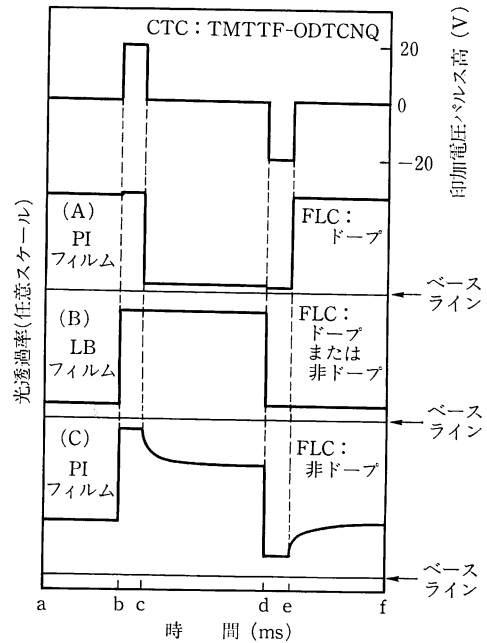


図 12 FLCD の応答波形 (A) CTC 添加, (B) LB 配向膜, (C) PI 配向膜

ず、動作中に AC 電界を印加すると常誘電効果 ( $\epsilon = \epsilon_0(1 + \frac{1}{2}\Delta\epsilon E^2)$ ) により  $\Delta\epsilon < 0$  ならば分子は水平 (プレーナー) 構造をとる。しかし、このような余分な電界の印加を好まない人もいる。

事前に AC を印加する方法については別の機会に詳しく紹介したい。

最後に FLC 物質を選べばブックシェルフ構造をとることができるという方法であるが、経験的にそのような物質もありうるということで科学的根拠はしだいに判明してくるだろう。目下研究が進行中であり筆者の見解は別の機会に詳述したい。

つぎに FLCD の中間調表示であるが、FLCD は原理的に 2 値表示でダイサー\*<sup>5)</sup> や網点表示以外は不可能であるとふつう考えられている。しかし筆者らは LB 配向膜を用いたとき、マルチドメインの形で中間調表示が可能であることを示した。反転ドメインの核は  $100 \times 100 \mu m^2$  の領域に数十個ある。これらの核は ITO の表面構造に関係するらしい。この場合中間調の状態でも数日間もメモリ状態を保つことができる、その一例の顕微鏡写真を図 13 に示す<sup>23)</sup>、また、印加電圧値で決まってくる中間調を図 14 に示す<sup>23)</sup>。

最近、光学状態が  $\oplus$ ,  $\ominus$ ,  $\ominus$  の 3 状態をとる反強誘電

\*5) 画素を小部分に分けて行く方法。

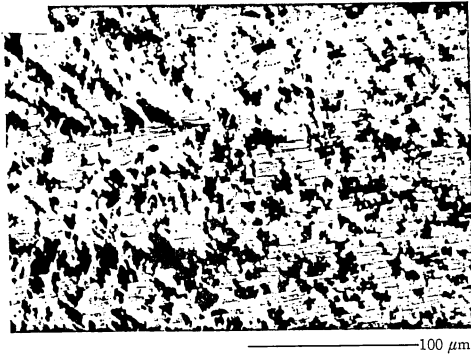


図 13 FLCD の中間調表示マルチドメインの例 ( $V=13$  V)

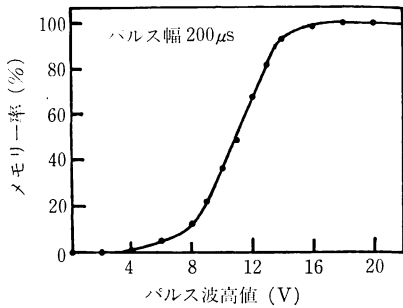


図 14 FLC の中間調表示の例

性 LCD も紹介され、注目されている<sup>24)</sup>。

#### 4. FLCD の応用

液晶の応用として、(1) 情報表示、(2) プリンターヘッドのような EO シャッター、(3) 光情報処理 (光コンピューター) などの応用が考えられる。

##### 4.1 FLCD

LCD は今日そのピクセル数が少なくとも  $400 \times 480 \times 3$  (3 は RGB 3色) 必要である。

幸いなことに FLCD には時分割駆動に必要な閾値電圧が存在する。ただしパルス幅を決めると波高値に対して生じる閾値である。

直視形の FLCD のカラー表示も紹介されている<sup>25)</sup>。また投写形ではフルカラー 4M ピクセルの報告もある<sup>26)</sup>。また面順次形のフルカラー表示も発表されている<sup>27)</sup>。さらに 3 状態 FLCD の研究も盛んに行われている。

基礎的な技術の積み重ねが進行しつつあり、あと数年で本格的な実用化が行われるだろう。

##### 4.2 プリントヘッド

FLCD の高速性を生かして二、三の研究が行われて

いる<sup>28)</sup>。

#### 4.3 光空間変調器<sup>29,30)</sup>

一般にライトバルブとも呼ばれ、これはある空間分解能と応答時定数をもって、光の偏光、位相、あるいは強度を考慮することができる媒質である。情報表示もこれを用いていることになるが、将来動画立体テレビも可能かもしれない。また光論理演算のほかニューロコンピューターへの展開が期待されている。

### 5. おわりに

FLCD は将来の立体表示や光空間変調器として光コンピューターへの応用が期待されているが、基礎的な特性で未解決の問題が多いので、これらの諸問題の解決法を中心に述べた。

### 文 献

- 1) R. B. Meyer, L. Liebert, L. Strzelecki and P. Keller: "Ferroelectric liquid crystals," *J. Phys. (Lett.)*, **36** (1975) L 69-L 71.
- 2) N. A. Clark and S. Lagerwall: "Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals," *J. Appl. Phys. (Lett.)*, **36** (1980) 899-901.
- 3) T. Harada, M. Taguchi, K. Iwasa and M. Kai: "An application of chiral smectic-C liquid crystal to a multiplexed large-area display," *Digest of Tech. Papers, 1985 Soc. Inf. Display Int. Symp.*, **16** (1985) pp. 131-134.
- 4) J. Kanbe, H. Inoue, A. Mizutome, Y. Hanyu, K. Katagiri and S. Yoshihara: "High resolution, large area FLC display with high graphic performance," *2nd Int. Conf. on Ferroelectric Liquid Crystals (June 27-30, Goteborg, 1989)*.
- 5) T. J. Scheffer, J. Nehring, M. Kaufmann, H. Amsutz, D. Heimgarten and P. Eslin: "24×80 character LCD panel using the supertwist birefringence effect," *Digest of Tech. Papers, 1985 Soc. Inf. Display Int. Symp.*, **16** (1985) pp. 120-123.
- 6) S. Yamauchi, M. Aizawa, J. F. Clerc, T. Uchida and J. Duchene: "Homeotropic-alignment full-color LCD," *Digest of Tech. Papers. 1989 Soc. Inf. Display Int. Symp.*, **20** (1989) pp. 378-381.
- 7) A. Mochizuki, T. Yoshihara, M. Iwasaki, M. Nakatsuka, Y. Takaniishi, Y. Ouchi, H. Takezoe and A. Fukuda: "Electro-optic switching of the bookshelf layer structure Sc\* cells aligned with a rubbed polymer film," *Proc. 9th Int. Display Research Conference (Oct. 16-18, Kyoto)* pp. 30-33.
- 8) S. Graroff and R. B. Meyer: "Electroclinic effect at the A-C phase change in a chiral smectic liquid crystal," *Phys. Rev. Lett.*, **38** (1977) 848-851.
- 9) F. Nakano, M. Isogai, K. Iwasaki and M. Satoh: "Electro-optical effects in surface-induced homogeneously aligned ferroelectric liquid crystal cells," *9th Int. Liq. Cryst. Conf. (Bangalore, 1982) Abstr.* 339, J-2 p.
- 10) T. P. Rieker, N. A. Clark, G. S. Smith, D. S. Parmar,

- E. B. Sirota and C. R. Safinya: "Chevron' local layer structure in surface stabilized ferroelectric smectic-C cells," *Phys. Rev. Lett.*, **59** (1988) 2658-2661.
- 11) Y. Ouchi, H. Takano, H. Takezoe and A. Fukuda: "Two kinds of switching processes in surface stabilized ferroelectric liquid crystals," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **26** (1987) L21-L24.
  - 12) A. Fukuda, Y. Ouchi, H. Arai, H. Takano, K. Ishikawa and H. Takezoe: "Complexities in the structure of ferroelectric liquid crystal cells: The chevron and twisted states," *Liq. Cryst.*, **5** (1989) 1059-1073.
  - 13) H. Ikeno, A. Ohsaki, M. Nitta, N. Ozaki, Y. Yokoyama, K. Nakaya and S. Kobayashi: "Electrooptic bistability of a ferroelectric liquid crystal device prepared using polyimide Langmuir-Blodgett orientation films," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27** (1988) L475-L476.
  - 14) H. Ikeno, A. Osaki, M. Nitta, K. Nakaya and S. Kobayashi: "LCDs fabricated using Langmuir-Blodgett polyimide orientation films," *Digest of Tech. Papers, 1988 Soc. Inf. Display Int. Symp.*, **19** (1988) pp. 45-48.
  - 15) 池野英徳, 前田博己, 吉田正明, 小林駿介: "ポリイミド Langmuir-Blodgett 膜による強誘電性液晶の配向制御と LCD への応用," *応用物理*, **58** (1989) 1084-1089.
  - 16) K. Nakaya, B. Y. Zhang, M. Yoshida, I. Isa, S. Shindoh and S. Kobayashi: "Electrooptic bistability of a ferroelectric liquid crystal device prepared using charge-transfer complex-doped polyimide-orientation films," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27** (1988) L477-L478.
  - 17) M. Nitta, N. Ozaki, H. Suenaga, K. Nakaya and S. Kobayashi: "Electrooptic characteristics of a charge-transfer complex-doped surface-stabilized ferroelectric liquid crystal device," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27** (1988) L477-L478.
  - 18) C. Bowry, M. G. Clark, A. Mosley and B. M. Nicholas: "A thick bistable ferroelectric liquid crystal display," *Proc. Eurodisplay '87* (1987) C-61.
  - 19) J. P. LePesant, B. Mourey, M. Hareng, G. Decobert and J. C. Dubois: "Ferroelectric optical switching of chiral smectic liquid crystal mixture," *Proc. 4th Display Research Conference* (Sept. 18-20, Paris, 1984) pp. 217-220.
  - 20) H. Ikeno, H. Maeda, B. Y. Zhang, M. Yoshida and S. Kobayashi: "A ferroelectric LCD with gray-scale capability using conventional-CTC doped and/or undoped-LB polyimide alignment layers," *Digest of Technical Papers, 1989 SID Int. Symp.*, **20** (1988) pp. 382-385.
  - 21) T. C. Chieu and K. H. Yang: "Transport properties of ions in ferroelectric liquid crystal cells," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28** (1989) pp. 2240-2246.
  - 22) 西片康成, 森川敦司, 滝口康之, 金本明彦, 鈴木正明, 柿本雅明, 今井淑夫: "ポリイミド LB 膜における高分子鎖の配向とその LB 膜上での液晶の配向特性," *日本化学会誌*, **11** (1987) 2174-2179.
  - 23) H. Maeda, C. M. Gomes, M. Yoshida, B. Y. Zhang, M. Kimura, H. Sekine and S. Kobayashi: "Electrically and optically controlled grayscale in SSFLCDs," *Proc. 9th Int. Display Research Conf.* (Oct. 16-18, Kyoto, 1989) pp. 344-347.
  - 24) A. D. L. Chadani, T. Hagiwara, Y. Suzuki, Y. Ouchi, H. Takezoe and A. Fukuda: "Tristable switching in surface stabilized ferroelectric liquid crystal with a large spontaneous polarization," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **27** (1988) L729-L732.
  - 25) S. Matsumoto, A. Murayama, H. Hatoh, Y. Kinoshita, H. Hirai and M. Ishikawa: "Large-area video-rate multicolor ferroelectric liquid-crystal display," *Digest of Tech. Papers, Soc. Inf. Display Int. Symp.*, **19** (1988) pp. 41-44.
  - 26) Y. Imai, N. Wakita, T. Uemura, S. Fujiwara, Y. Gohara, S. Kimura, Y. Matsumoto, Y. Miyake, T. Tsuda, Y. Horio and I. Ohta: "Multicolor, high resolution projection display with FLC light valve with 4 M pixel," *Proc. 6th IDRC* (1989) pp. 180-183.
  - 27) H. Hasebe and S. Kobayashi: "A full-color field sequential LCD using modulated backlight," *Digest of Tech. Papers, SID Int. Symp.*, **16** (1985) pp. 81-83.
  - 28) S. Naemura, H. Ichinose, H. Kitayama, S. Ishizaki, K. Ohsawa and C. Tani: "High-resolution and high-speed printing head using 1/8 duty multiplexed ferroelectric liquid-crystal shutter array," *Digest of Tech. Papers, Soc. Inf. Display*, **18** (1987) pp. 356-362.
  - 29) G. Model, K. M. Johnson, I. Abdulhalim and M. A. Handschy: "Advances in optical addressing of chiral smectic liquid crystal spatial light modulator," *2nd Int. Conf. on FLCs* (June 27-30, Goteborg, 1989) O-17.
  - 30) 松尾慎治, 福島誠治, 黒川隆志: "強誘電性液晶空間光変調器の特性," 第50回応用物理学会学術講演会 (1989) 28 P-ZD-11, p. 764.