

フラットパネルディスプレイ概論 (2) 液晶ディスプレイ : LCD

Introduction to Flat Panel Display (FPD)(2) Liquid Crystal Display : LCD

Ukai Display Device Institute 代表 工学博士 鵜飼 育弘
YASUHIRO UKAI Ph.D.
Ukai Display Device Institute

1. はじめに

FPDの中で揺るぎない地位を占めている液晶ディスプレイ(LCD)について、構成部材としての液晶、偏光板について説明する。次に液晶配列と表示モードについて述べLCDの理解を深める。LCDの中でも一番多く用いられている薄膜トランジスタ(TFT)駆動のTFT-LCDの構造と動作原理を概説し、最後に応用分野についても触れる。

2. 液晶とは

通常の固体は、昇温により融点で液体に変化する。しかし、特殊な分子構造を有する物質は、図1に示すように、固体から液体に直接には転移しない。液晶(liquid crystal)と呼ばれる中間状態を経てから、通常の液体に変化する。このような、ある温度範囲で液体と結晶の双方の性質を示す物質を総称して液晶と呼ぶ。

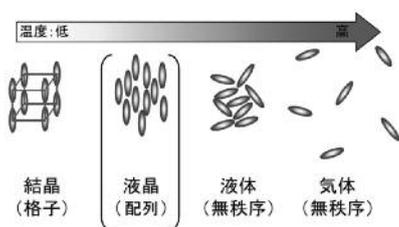


図1 物質の状態

液晶にはネマティック(nematic)、スメクティック(smectic)、コレステリック(cholesteric)等が知られている。ディスプレイには主にネマティック液晶が用いられている。いずれも棒状分子か板状分子の集団からなる。例えば

図2に示す棒状液晶3PBC_{3,4}F₂は44.2℃で固体となり118℃で液体となる。なお、この液晶分子の長軸は~20Å、短軸は5Åである。各タイプの液晶はそれぞれ特有な規則的分子配列を形成し、分子長軸が互いに平行に配列している点が共通している。

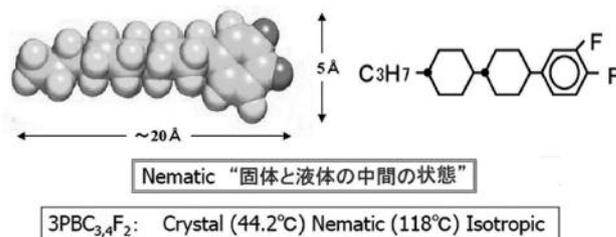


図2 液晶分子と特性

このような特徴的な分子配列のため、液晶が持つ屈折率、誘電率、磁化率、電導度、粘性率など物性値(図3)は、分子長軸に平行な方向と直角な方向(短軸)では相違し、異方性を有す。このような異方性の特徴に加えて、液晶の分子配列は電場、磁場、応力などの外部場の作用で容易に変化するという特徴がある。これは、液晶の弾性率が非常に弱いことに基づいている。誘電率異方性と屈折率異方性を組み合わせた電気光学効果や磁化異方性と屈折率異方性を組み合わせた磁気光学効果などは工学的応用に役立っている。

ネマティック液晶に電界を印加すると、液晶分子配列の遷移とそれに伴う光学的性質の変化が生じる。これは、液晶分子軸方向の誘電率 ϵ_{\parallel} とこれに直行方向の誘電率 ϵ_{\perp} が異なるからである。この誘電率異方性 $\Delta\epsilon (= \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp})$ は、液晶の持つ各種の電気光学効果ならびに液

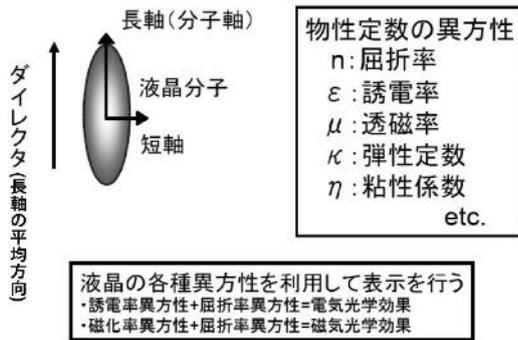


図3 液晶分子の各種異方性

液晶分子への多様な応用にとって重要な役割を担っている。図4に示すように、誘電率異方性が正の液晶 ($\Delta\epsilon > 0$) をNp液晶と呼び、負 ($\Delta\epsilon < 0$) の液晶をNn液晶と呼ぶ。

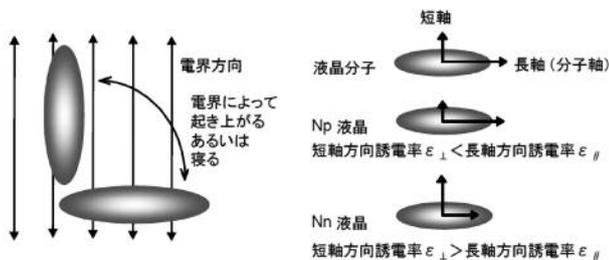


図4 液晶分子の誘電率異方性

3. 偏光と偏光板

光は振動ベクトルが異なるいくつかの成分を含んでいる。偏光 (polarization) とは電場および磁場が特定の方向にのみ振動している光のことである。振動方向が規則的な光波の状態を偏光という。偏光板は図5に示すように、光の進行方向に垂直で、特定の方向に強く振動する光だけを透過し、他の成分は吸収 (遮断) する機能を持っている。

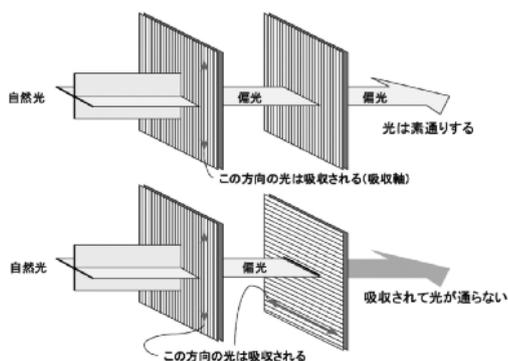


図5 偏光板の機能：光のシャッター

市販されているフィルム状の偏光板は、図6に示したように偏光子と呼ばれるポリビニールアルコール (PVA) による素 (I) を染色し延伸した膜を保護層としてのトリアセチルセルロース (TAC) でサンドイッチしたものである。なお、一般に片側支持フィルムの外側に粘着剤が塗布されたセパレーターフィルムが添付されている。液晶セルにはセパレーターを剥がして直接貼り付けができる。

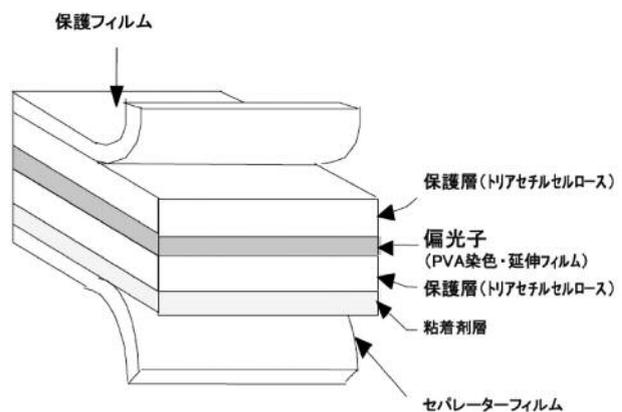


図6 偏光板の構造

4. 分子配列と表示モード

4.1 分子配列

均一で安定な液晶の分子配列はLCDに必須である。というのは、いずれのタイプのLCDデバイスを取って見ても、液晶の特定な初期分子配列を電場の作用で別の分子配列状態に変化させ、この分子配列変化に伴う液晶セルの光学特性の変化を視覚的に変換することにその基礎をおいている。

液晶分子配列の種類は多様であるが、図7に現在実用化されているLCDに用いられている代表的なものを紹介する。

- ①ホモジニアス配向：全ての液晶分子が両方の基板面に対して平行に、かつ同一方向に配列している。Np液晶を用いた場合、両側の基板間に電圧を印加することで、液晶分子は電界方向に平行に再配列する。
- ②ホメオトロピック配向：すべての液晶分子が液晶セルの両方の基板面に対して垂直に配列している。Nn液晶を用いた場合、両側の基板間に電圧を印加することで、液晶分子は電界方向に垂直に再配列する。

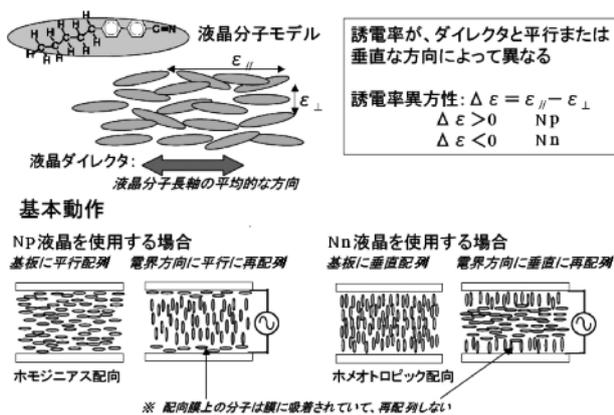


図7 誘電率異方性と液晶分子の再配列

4.2 表示モード

LCDの表示モードを大別すると、図8に示すように透過型 (Transmissive Mode)、反射型 (Reflective Mode)、半透過型 (Transflective Mode) がある。透過型はノートPCや液晶TV用として広く採用されているモードである。このモードは、背面もしくはサイドからの面状もしくは線状のバックライト光をLCDパネルで時間的空間的に変調し情報を表示するものである。光源には冷陰極蛍光ランプ (Cold Cathode Fluorescent Lamp: CCFL) や白色LEDが用いられている。透過型は後述の反射型に比べ、コントラスト比や輝度、色再現範囲などの表示性能が優れている。これらは、LCDの光透過率の低さと目障りな表面反射を透過型では強力なバックライト・ユニット (BLU) で凌いでおり、暗所および室内での表示の視認性は良好である。ただし、LCD本来の低消費電力の特徴はBLUの使用で半減される。

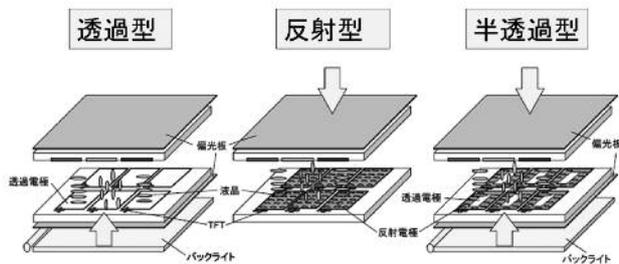


図8 LCDの表示モード

反射型のセル構造を同図に示すが、反射電極としての拡散反射板を液晶層のすぐ背面に配置した構造 (In-Cell構造) で、反射電極と画素電極が一体構造のため、

視差 (parallax) による2重像が生じない。従って高精細化が可能となる。反射型は周囲光を変調することで表示を行う。したがって、周囲光が暗くなるとおのずと輝度は低くなり視認性が悪くなる。これをカバーするのがフロント・ライト・ユニット (FLU) である。光源として白色LEDが用いられている。

最近のモバイル機器用ディスプレイには、いつでも、どこでも綺麗な表示品位が要求され全環境型のディスプレイの実現が高まっている。この要求を実現するための表示モードが半透過型である。セル構造を同図に示したが、1画素は2分割された透過部と反射部から構成されている。透過部と反射部のセル厚が異なるマルチギャップ構造を採用し、各部に対応するカラーフィルタは顔料および膜厚の最適化を図り、透過光および反射光で広色再現性を実現し、高品位の表示が得られる構造のものも市販されている。

5. TFT-LCDの構造と動作原理

FPDの駆動方式については前回 (1) で触れたので、ここでは広く実用化されている薄膜トランジスタ (TFT) 駆動のTFT-LCDについて述べる。

5.1 TFT-LCD

TFT-LCDは、図9に示すようにスキャンラインとデータラインのマトリクス交差部の画素ごとにスイッチングデバイスを組み込んだ構造 (アクティブマトリクス) で駆動する方式であり、必要に応じてキャパシタを付加している。この方式を用いることにより、単純マトリクス方式に比べ、コントラストや応答時間などの表示特性が大幅に向上している。

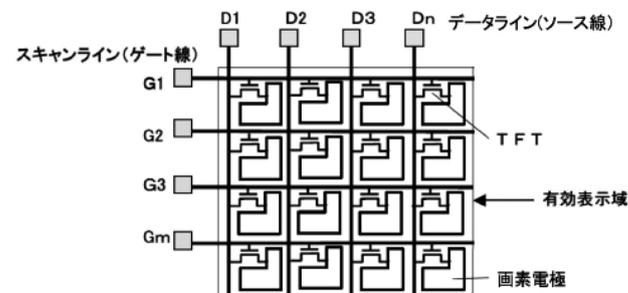


図9 TFT-LCDの基本構成

この方式は、用いるスイッチングデバイスにより薄膜トランジスタTFT (Thin Film Transistor) などを用いる3端子で

バイス型とMIM(Metal Insulator Metal)などの2端子デバイス型に大別される。なお、現在商品化されているものは3端子デバイス型のみである。

5.2 デバイス構造と駆動方法

図10(a)にTFTLCDのデバイス構造を示す。TFTアレイが形成された基板と、対向電極として透明電極が形成された基板の間に液晶が注入されている。図には表示していないが、カラーLCDの場合は、対向基板上に赤、緑、青のカラーフィルタが画素電極に対応して設けられている。なお、画素の等価回路を図10(b)に示す。

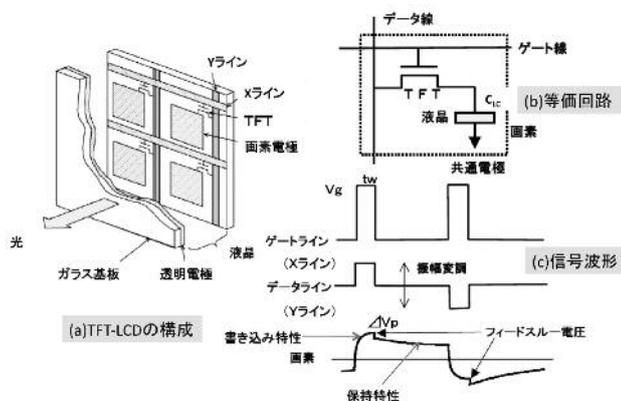


図10 TFT-LCDの構成と駆動方式

5.3 TFTによるアクティブマトリクス駆動

TFT-LCDでは図9に示したように、 m 本のスキャンライン($G_1, G_2, G_3 \dots, G_m$) (ゲート線あるいはYラインともいう)と n 本のデータライン($D_1, D_2, D_3 \dots, D_n$) (ソース線あるいはXラインともいう)からなる $m \times n$ マトリクス配線の交点に、スイッチング素子であるTFTが設けられる。TFTのゲート電極はスキャンラインに、ソース電極はデータラインに接続され、ドレイン電極は画素の透明電極に接続される。スキャンライン群は外部でXドライバICに、データライン群はYドライバICに接続される。

液晶を直流駆動すると液晶内部のわずかな不純物が電荷となり一方に偏って蓄積し、液晶が劣化し、正常な表示ができなくなる。これを防ぐために常に極性を反転させる交流駆動を行なわねばならない。このため、1フレームで1画面を構成し、1フレームは正フィールドと負フィールドで構成される。すなわち、データラインには常に図11のように正および負フィールドにおいて対称なプラスとマイナスの信号を加え交流信号が印加される。

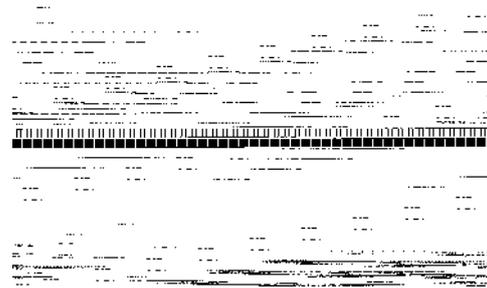


図11 TFT-LCDの駆動波形

各ゲートラインは表示のスキャンに対応し、まず G_1 に接続されたTFT列をオンさせる。このとき表示のレベルに対応した電圧がデータライン D_1 から D_n に送られ、オンしている G_1 列のTFTを介し各画素の液晶に一斉に伝えられる。このように、 G_2 列、 G_3 列と順次書き込まれ、1フィールド時間内にすべての画素に表示信号が書き込まれる。TFTを介して画素に書き込まれた信号は、基本的にはTFTのオフ時には電流が流れないため、次に書き込まれるときまで、画素に電荷の形で保持される。これにより、各画素には図10(c)に示すように1フレームで2回、プラスとマイナスの信号が書き込まれることになる。

画素電極波形は、(a)書き込み特性、(b)フィールドスルー特性、(c)保持特性に依存して変化する(図10(c)参照)。書き込み特性は、TFTのオン電流、画素容量、書き込み時間、信号電圧に依存する。 t_w 時間後にゲートがオフした瞬間、画素電極電位 V_p はフィールドスルー電圧 ΔV_p (突き抜け電圧ともいう)分だけ低くなる。その後の保持特性は、TFTのオフ電流、画素容量、保持時間、液晶抵抗を通してのリーク電流などに依存する。

フィールドスルー現象は、TFTのゲート・ソース間の寄生容量 C_{gs} が原因であり、ゲートパルスがオンの時に液晶容量 C_{LC} 、蓄積容量 C_s 、 C_{gs} に充電された電荷が、ゲートパルスがオフになった瞬間に各々の容量に再分配されることに起因する。このフィールドスルー電圧 ΔV_p は、

$$\Delta V_p = \frac{V_g C_{gs}}{C_{gs} + C_{LC} + C_s}$$

で表される。寄生容量 C_{gs} はTFTの構造に依存するパラメータであり、容易に変えることはできない。したがって、設計的には、蓄積容量である C_s を大きくすることで ΔV_p の低減をはかることになる。TFTのデバイス構造面からの C_{gs} 低減策としては、ゲートとソース電極パターンを自己整合

させることによりマスクアライメントに起因するパターン精度の低下を防ぐか、短チャネル化を図ってTFT自体を小さくすることなどが行われている。

5.4 Si系トランジスタの特徴比較

現在実用化されているアクティブマトリクス駆動用のSi系トランジスタには、アモルファス・シリコン(a-Si)、低温ポリシリコン(Low Temperature poly-Si : LTPS)、高温ポリシリコン(High Temperature poly-Si : HTPS)、単結晶シリコン(Single crystal-Si : c-Si)が用いられている。各種基板上に形成されたトランジスタの特徴を表1に示す。ディスプレイ用として比較するために、移動度、デバイス構造(n-ch, p-ch, CMOS)、基板の種類と透明性、基板サイズ、プロセス温度、マスク枚数を挙げた。移動度についてみると、a-Si TFTが $1\text{cm}^2/\text{Vs}$ 以下であるのに対してLTPS-TFTおよびHTPS-TFTは1桁から2桁以上の移動度を有し、開発レベルではc-Si TFT並みの移動度を有するLTPS-TFTも報告されている。作製に必要な基板温度は、a-Siが一番低く、表の右側になるほど高温プロセスを必要とする。無アルカリガラス基板が使えるプロセス温度(600°C)を境にして、低温プロセスによる多結晶Si TFTをLTPS-TFT、高温プロセスによるものをHTPS-TFTと呼んでいる。基板サイズは、HTPSおよびc-Si用の直径300mmの基板からa-Si用の第10世代無アルカリガラス($\sim 3\text{m}$ 角)の超大型基板が用いられる。Siウエハは不透明のため、LCDへの応用を考えると反射型による表示しか実現できないが、ガラス基板および石英基板は透明なので透過型も実現できる。プロセスに必要なマスク枚数は、a-Si TFTの3-5枚からc-Siの30-40枚と表の右側になるほど多くのマスクを必要とする。プロセスコストは、基板の種類、マスク枚数に左右されるため、表で右側の方が高くなる。

表1 Si系デバイスの比較

5.5 TFT-LCDの種類と応用分野

(1) a-Si TFT-LCD

1986年に3型LCD-TVが商品化されたのが最初である。その後ノートブックPC、デスクトップモニター用、大型LCD-TVと応用分野が広がるとともに表示品位も向上し、今やCRTの地位を奪う状態まで市場が成長した。応用分野も民生用に留まらず、航空機のcockpitやナビゲーションなどの車載用にも広く採用されている。

(2) LTPS TFT-LCD

LTPS TFT-LCDはa-Si TFT-LCDと比較して、微細なCMOS回路を大型基板上に形成できる。したがって、応用分野はこの特長を活かした中小型の携帯機器用ディスプレイが主である。ビデオカムコーダ(VCR)、デジタルスチルカメラ(DSC)、ミュージックプレーヤー(MP)、携帯電話、ノートPCなどである。

(3) HTPS TFT-LCD

a-Si TFT-LCDおよびLTPS TFT-LCDが、ディスプレイを直接目で見える(直視型ディスプレイ)のに対し、HTPS TFT-LCDはパネルと光学系の組み合わせで、パネル上の画像を投影して見る投影型(プロジェクションタイプ)のディスプレイである。応用分野としては、データプロジェクタおよびプロジェクションTVがある。

(4) LCOS (Liquid Crystal on Silicon)

LCOSとは、Siウエハと対向する透明基板の間に液晶を挟みこむ構造である。Siウエハ側には液晶駆動回路と画素電極を設け、透明基板と液晶層を通過した光は、画素電極において反射される。透過型液晶デバイスでは、画素電極の周囲に信号線等の回路が作られているため開口率が低下するが、反射型液晶デバイスでは、画素電極下に回路が作られているため高い開口率を実現できる。例えば、HD対応のデバイスでは、画素ピッチ $7\mu\text{m}$ 、画素間スペース $0.35\mu\text{m}$ 、開口率90%以上のものが実用化されている。

6. おわりに

LCDとしての基礎的なことについて述べたが、現在実用化されている広視野角技術や広色再現技術などに関しては紙面の都合で触れられなかった。これらの技術に関しては、第6回および第7回の部品・材料技術の中で取り上げる予定である。