6-3 液晶

三菱電機株式会社 中央研究所 新 居 宏 壬
伊 吹 順 章

1. ま え が き

数年前、液晶によるディスプレイデバイスの可能性が発表されて以来¹⁾、実用面での関心が高まり数多くの検討がなされつつある。液晶がこのように注目されたのは

- ① 低電圧で動作する。
- ② 消費電力が非常に小さい。
- ③ パネル状の表示素子ができる。
- ④ 大きな表示パターンも実現可能である。

などの特徴をもっているためで、すでに時計や卓上電子計算機などの数字表示用として製品化の段階に達している。また最近、新しい液晶の電気光学効果の利用や駆動回路の新方式なども開発され、マトリクスアドレス方式の表示についても可能性が出てきている。

液晶とは、液体のような流動性をもちながら光学的には結晶のような異方性を示すもので、特にある温度範囲で液晶となるようなものをサーモトロピック液晶と呼び、ディスプレイ用材料として注目されているものはこの種類に属するものである。サーモトロピック液晶は、その分子配列によって、スメクチック、ネマチック、コレステリックの3種に分けられるが、ディスプレイ用として利用されているのはネマチックと呼ばれるものが大部分であるので、ここではネマチック液晶を中心にして述べる。

2. 液晶によるディスプレイの原理

初めネマチック液晶では室温付近で液晶になるものは知られていず、表示素子として利用する場合、温度を高くするといったことが必要であったが、数種の液晶を混合することによって液晶域温度を下げるができるようになり、素子として使いやすいものになってきた。その後、単体でも室温で液晶状態になるものが発見され

て、これらの混合液晶を用いれば 0°C 以下でも動作するディスプレイができるようになった。

代表的なネマチック液晶としては APAPA[anisilidene-*p*-aminophenylacetate] (液晶状態温度域 82°C ~ 110°C) や MBBA [*n*-(*p*-Methoxybenzylidene)-*p*-*n*-Butylaniline] (液晶状態温度域 20°C ~ 40°C) など数百種のものが知られている²⁾。以下、ネマチック液晶によるディスプレイに利用されるいくつかの電気光学効果について述べる。

2.1 動的散乱モード (DSM)

最初に液晶による表示素子が発表された RCA のものがこの原理を利用したものである¹⁾。これは数 10 μm 厚の液晶層に 10⁴ V/cm 程度の電界を印加すると、透明であった液晶層が光を散乱して白濁して見える現象で、図 1 に DSM による光の散乱機構を示す。液晶分子は細長い棒状をしており、DSM が見られるのは分子の長軸に対して直角方向に永久双極子モーメントをもつものに限定されている。電圧が印加されると液晶分子は図 1 の電界配向した分域のようにモーメントが電界方向に向くよう分子が回転し、ある電界を起えると液晶内に含まれる陰イオンが陽極に移動し、それによる分子の方向のずれやイオンによる局所的な電界によって分子配向の異な

図 1 DSM による光の散乱機構³⁾

"6-3 Liquid Crystals" by Hirotsugu Arai and Sumiaki Ibuki
(Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation,
Amagasaki, Hyogo)

図 2 コントラスト比の電圧依存性⁴⁾

った部分が生じる。液晶は強い複屈折性を示すため領域の境界で入射した光を散乱するようになる。

液晶による表示は発光させて行なうものではないので、暗い場所では表示することはできなくなるが、明るい所ではその明るさに影響されことなく一定のコントラストで表示できるという特徴がある。コントラスト比は図 2 に示すように 30 : 1 から 50 : 1 程度は得られる⁴⁾。応答時間は電圧によって大きく変わるが、立上りが数 ms、立下りが数 10 ms と、あまり早くない。また、応答時間は液晶層厚の 2 乗に比例し⁵⁾、温度が高くなると短くなる。電流密度は $1 \sim 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ と小さく、きわだって低消費電力の素子可以实现できる。現在液晶としては MBBA, EBBA などがよく使われる。

2.2 ゲストホスト効果

これはネマチック液晶に多色性色素を加え、色素の吸収スペクトルが入射光の偏光面に対する分子の配向状態によって異なることを利用するものである⁶⁾。図 3 に示すように、液晶には分子長軸方向に永久双極子モーメントをもつものを使い、色素を混合して 2 枚の電極 (透

図 3 ゲストホスト効果の原理⁶⁾

明) 間にはさみ電圧を印加するようにする。電圧 0 の状態では色素は不規則に並んでおり、入射偏光の特定の波長の光を吸収し、透過光は色づいて見える。電圧が印加されると液晶分子が電界方向と平行になるよう配列し、それにつれて色素分子も同様の方向に配列するため吸収が起らなくなり、透過光は色がつかなくなる。

応答時間は立上り数 ms、立下り 100 ms と遅いが、動作電圧が $2 \sim 8 \text{ V}$ と低い。色素に、たとえば Indophenol Blue を用いたときには青色が電圧によって無色に変わる。液晶には *p*-ethoxybenzylidene-*p'*-aminobenzonitrile などが使われるが、 100°C 以上でしか液晶にならないのでセルを加熱する必要がある。ゲストホスト効果を利用すればカラーディスプレイができるが、色が固定されること、コントラストが悪いなどの問題があり、現在あまり利用されていない。

2.3 ツイスト構造分子配列

これはネマチック液晶分子を電極面に平行になるように配列させ、電界によってその配列を変化させるものである。図 4 に示すように上部電極面では紙面に平行に分子長軸を向けて配列しており、下部電極面に近づくに従ってその方向は紙面に垂直になってゆくという、 90° 配列方向がねじれるような配列をしているものである⁷⁾。

このようなセルに直線偏光が入射すると偏光面が回転させられるので、検光子を配置すれば光の透過を制御できる。すなわち、使用される液晶は分子長軸方向に永久

図 4 ツイスト構造分子配列⁷⁾

図 5 透過光強度とツイスト角の電圧依存性⁷⁾

双極子モーメントをもつものなので、電圧が印加されると、図4(b)のように電極近傍以外の分子は分子長軸が電界に平行になるように向きを変える。図5に示すように液晶セルの両側に配置された検光子と偏光子の偏光方向が平行になるようになっている場合には、入射した直線偏光は偏光方向が 90° 回転し、光は透過しない。電圧が印加されると分子が電界方向を向き偏光の回転角は小さくなり、光は透過しはじめるようになり、約6Vで透過光強度は最大となっている。使用されている液晶はn(4'-ethoxybenzilidene) 4-amino-benzonitrile 他2種の混合物である。この方式は白黒パターンの表示となるが、カラー化も不可能ではない。

最近、さらに低電圧で動作するものが報告されている。これは液晶に4'-Cyanophenyl-4-n-heptylbenzoateと4'-cyanophenyl-4-n-butylbenzoateの混合物を用いたもので1.3V(20Hz)で100:1のコントラストが得られている⁸⁾。この方式はDSMより低電圧で動作するため、時計などへの応用が最近進められつつある。

2.4 DAP 効果

これはネマチック液晶分子が液晶セルの電極面に対して図6に示すように分子長軸が垂直になるように配列する現象を利用するものである^{9)~12)}。液晶セルはツイスト構造の場合と同じように偏光子と検光子の間におかれ、それらの偏光方向は互いに直角になるように配置されている。この方式では液晶は永久双極子モーメントが分子長軸に対して直角方向に向いているものが用いられる。

電極面に対して垂直配列している状態に電極面から直線偏光が入射すると、そのまま光は液晶セルを透過し検光子で遮断される。電圧が印加されると分子は電極面に対して平行になるように変化してゆく。これによって液晶セルに入射する直線偏光は液晶の複屈折性のため楕円偏光となり、検光子からある特定の波長域の光が透過してくるようになる。

図7は透過光強度の電圧依存性を3種の波長の光でみたもので、約5Vで光が透過しはじめ、電圧の増加とともに周期的に透過光強度が変化する¹²⁾。この方式は6V

図6 DAP 効果の分子配列 (液晶セル断面)

図7 透過光強度の電圧依存性¹²⁾

前後の低電圧でカラー表示ができるという大きな特徴をもっている。その他、100kHz程度の高周波でも動作する、コントラストが高いなどの特徴もある。応答時間は液晶にMBBAとEBBAの混合液晶を用いた場合、数百msから数secと遅いことが問題である¹²⁾。

2.5 相転移による光散乱

これはネマチック液晶とコレステリック液晶の混合物が電圧による相転移によって光を散乱するようになる現象で、直流または低周波電界を $3 \times 10^4 \text{V/cm}$ 程度印加すると、透明であったものが白濁して見えるようになる。この現象は、電圧を切った後も記憶されるという特徴をもっているものである。コントラストは15:1程度と報告されている¹³⁾¹⁴⁾。また、同じような混合液晶で、セルに入射する光の一方の円偏光成分を選択的に散乱する現象を利用するディスプレイも考えられている¹⁵⁾¹⁶⁾。

3. 液晶ディスプレイ素子とその特徴

液晶を利用したディスプレイ素子は、いまのところDSMを利用したものが中心ではあるが、動作電圧がまだICと組合すためにはいくぶん高いことなどから、さらに低電圧で動作するツイストやDAPが最近注目されている。

3.1 DSMを利用したディスプレイ素子

DSMを利用するディスプレイ素子は、液晶層厚を20~50 μm とし、用途によって透過型と反射型のセルに分けられる。図8にその構造を示すように、(a)(b)は透過型セルで、電圧0のとき(a)のようにセルは透明で入射光はそのまま透過し、電圧が印加されると(b)のように光を散乱する。光の進行方向以外からセルを観測すると、電圧0では光は見えないが、電圧が印加されると見えるようになる。(c)(d)は反射型で、一方の電極は反射鏡になっており、電圧のON-OFFで散乱光が見えたり見えなかったりする。

液晶セルの駆動は直流でも交流でもよいが、直流では液晶やその電極(SnO_2 または In_2O_3 膜)の分解によって寿命が短くなるため交流が使われる。交流駆動での寿命は少なくとも1万時間は得られるようになってきた。

単純な数字表示の場合、電極をセグメントパターンにするのが普通で、時計、卓上電子計算機などに応用さ

図 8 透過型セルと反射型セルの動作

れ、すでに市販されているものもある。なお、このような数字表示、特に多桁の表示の場合、1桁ごとに駆動回路をつけるのはコストアップにつながるため、駆動回路を順次各桁にスイッチしてゆくダイナミック駆動を採用する必要がある。しかし、DSM はコントラストが低く、閾値が不明確である、応答時間が長いなどの点で、ダイナミック駆動は困難である。そのため、2つの周波数の電圧を重畳してこの問題を解決する方法が提案されている¹⁷⁾¹⁸⁾。

電極を Y-X マトリックス構造にして複雑なパターンも表示できるようにしたものも検討されている。マトリックス方式の場合、クロスエフェクトによって非選択点に電圧がかかりコントラストが低下するが、電圧印加法に工夫をこらし 10 : 1 のコントラストで写真 1 に示すようなキャラクターディスプレイが行なわれている¹⁹⁾。

3.2 ツイスト構造を利用したディスプレイ素子

液晶によるディスプレイの中では最も低電圧で動作す

写真 1 DSM によるマトリックスディスプレイ¹⁹⁾

写真 2 ツイスト構造分子配列を利用した数字表示の例⁹⁾

ることから、デジタル腕時計の数字表示用として特に注目されている。見やすさとか寿命などまだ未検討の部分もあるが、時計用としては DSM よりも利用される可能性は大きい。実際、時計用の開発も急速に進められている。写真 2 は時刻表示の一例で、反射型セルで 1.3 V (50Hz) で 100 : 1 のコントラストが得られている⁸⁾。また 120×120 のマトリックス電極構造で TFT を組せ、カラーフィルターを用いてカラーテレビディスプレイを行なう試みが報告されている²⁰⁾。

3.3 DAP 効果を利用したディスプレイ素子

DAP 効果は、その特性や装置の構成からみて、投写型の大型カラー表示用として適していると考えられる。

図 9 は装置の構成例で、簡単に大型画面が得られる¹²⁾。

図 9 大画面のカラー表示装置¹²⁾

写真 3 DAP 効果によるカラー表示²¹⁾
(黒地にオレンジ数字パターン)

また、この方式では電圧に対する光の透過が明確な閾値を示すことから、マトリックス方式によるカラーディスプレイも可能であり、写真3に示すようなカラーの数字表示が試みられている²¹⁾。

3.4 相転移を利用したディスプレイ素子

ネマチック液晶とコレステリック液晶の混合物の電圧による相転移を利用した大型キャラクターディスプレイ装置が報告されている²²⁾。これは100文字のキャラクターが表示(1字は5×7のマトリックス)できるマトリックス方式で、15:1のコントラストが得られている。

4. 液晶によるディスプレイの問題点

液晶によるディスプレイは、電圧を変調すればDSMの場合50:1程度コントラストがとれ、単純なキャラクター表示だけではなく中間調表示も原理的には可能である。しかし、マトリックス方式にするとクロストークでコントラスト低下やデューティの低下によって応答しなくなるなどの問題がある。そのため、液晶セルにIC技術を用いてダイオードやMOSトランジスタなどを組込んで解決することが試みられているが、実用的ではない。このような点から、ツイストやDAPや相転移を利用するものは明確な閾値をもって光に対する特性が変化することから、任意のパターンを出すマトリックス方式に適しているのではないと思われる。

一方、液晶自体の寿命は1万時間程度のものが得られるようになったとはいえ、周囲の状態に大きく影響されるため、再現性良く、信頼度の高いセルを製作することは容易ではない。

また、液晶セル自体は高価にはならず商品用途に適しているが、実際にはその特性を充分発揮させるため周辺の回路や装置に費用がかかり、システムとして決して安価にならないといった問題も残っている。

5. む す び

以上、液晶を利用したディスプレイについて、ネマチック液晶を中心に述べてきたが、まだ解決しなければならぬ問題も多々あり、今後の進展に期待されるところ大である。液晶によるディスプレイは決して万能ではなく、その特徴が充分発揮でき、他の方式では得られないメリットをもつような応用で、初めてその真価が発揮できるものと思われる。このような最適の応用面を探索することも今後の重要な課題となろう。

(昭和48年1月24日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) G. H. Heilmeyer, L. A. Zanoni, L. A. Barton: Proc. IEEE, **56**, (1968) 1162
- 2) たとえば上原, 稲葉: 化学の領域, **23** (1970) 893
- 3) 亀井: 画像技術 (1970) 19
- 4) L. T. Creagh, A. R. Kmetz, R. A. Reynolds: IEEE Conf. Display Devices (1970)
- 5) G. H. Heilmeyer, L. A. Zanoni, L. A. Barton: IEEE Trans., **ED-17** (1970) 22
- 6) G. H. Heilmeyer, L. A. Zanoni: Appl. Phys. Lett., **13** (1968) 91
- 7) M. Schadt, W. Helfrich: Appl. Phys. Lett., **18**, (1971) 127
- 8) A. Boller, et al.: Proc. IEEE, **60** (1972) 1002
- 9) M. F. Schiekkel, K. Fahrenschoen: Appl. Phys. Lett., **19** (1971) 391
- 10) R. A. Soref, M. J. Rafuse: J. Appl. Phys., **43** (1972) 2029
- 11) M. F. Schiekkel, K. Fahrenschoen: SID Symp. (1972)
- 12) 新居, 上田: テレビ学会画像表示システム委資, No. 7-2 (1972)
- 13) G. H. Heilmeyer, J. E. Goldmacher: Proc. IEEE, **57** (1969) 34
- 14) J. J. Wysocki, J. Adams, W. Haas: Phys. Rev. Lett., **20** (1972) 1024
- 15) J. Adams, et al.: J. Appl. Phys., **42** (1971) 4096
- 16) S. Sato, M. Wada: 4th Conf. Solid State Dev. Tokyo, (1972)
- 17) C. R. Stein, R. A. Kashnow: Appl. Phys. Lett., **19** (1971) 343
- 18) C. R. Stein, R. A. Kashnow: SID Symp. (1972)
- 19) 高田: 応物, **39** (1970) 1056
- 20) A. G. Fischer, T. P. Brody, W. S. Escott: SID Symp. (1972)
- 21) 上田, 新居: 第3回画像工学コンファレンス (1972)
- 22) 塚本, 大塚, 土屋: 第33回応物学会 (1972 春)