フレキシブルフィルム液晶ディスプレイの印刷形成

藤 掛 英 夫

液晶ディスプレイにプラスチックフィルム基板と印刷プロセスを導入することにより、表示パネルのフレキシブル化と軽量・大画面化が可能となる。そこで、液晶/ポリマー複合膜により、柔軟なプラスチック基板を接着したフィルム液晶素子を試作した。フレキシ印刷と光重合相分離により形成された微細なポリマー構造は、素子が丸められても基板間隔を一定に保持して、一様な表示動作を実現した。

1. はじめに

近年、液晶はディスプレイとしての発展・普及が目覚ましく、フラットパネルディスプレイの主要な地位を占めるに至っている。液晶は言うまでもなく、“液”体の分子流動性と結“晶”の分子配向性を併せ持つ低分子有機材料で、その電気光学特性を活用したディスプレイは、開発当初、低消費電力という特徴から、腕時計や電卓などの簡易表示素子として実用化された。その後、表示のコントラストや解像度が向上して視認性が大幅に改善されるとともに、パネル製造技術の発展に伴って表示サイズが拡大した。そして現在、文字や静止画表示のコンピューター用途から、高画質の動画表示が求められるテレビディスプレイの分野にまで進出し、さらに大きく飛躍しようとしている。

それらを踏まえた上で、今後の液晶ディスプレイの発展性を考えるとき、筆者は2つの魅力的で挑戦的な課題があると認識する。すなわち、フレキシブル化と軽量・大画面化である。前者は、収納・携帯時の利便性を求めて自由に曲げられる電子ディスプレイを目指すものである。また、後者に関しては、迫力あるテレビディスプレイに向けて、ガラス基板により50インチを超える大型パネルが試作されるに至った現在、軽量化や生産性向上の問題が、ますます深刻化する。基板サイズの増大に伴って、自重によりガラス基板の変形を招き、作製工程が煩雑化するとともに、機械的なストレスによりパネルがゆがみ、表示が乱れかねないためである。

それら2つの課題を抜本的に克服するキーテクノロジーとして、プラスチック基板¹⁾と印刷作製プロセスが考えられる。仮にそれらの技術を用いて、フレキシブルで軽量・大画面のシート状ディスプレイが実現されれば、丸めてさらには巻き取って持ち運べるため、いつでもどこでも手軽に大画面の動画を享受できる。また、壁からスクリーンのように引き出したり、ポスターのように壁に貼り付けて、迫力ある超大画面映像を手軽に楽しむことも夢ではなくなる。

そのためのアプローチとして筆者は、高速応答の強誘電性液晶²⁾とポリマーの複合膜³⁾により、柔軟なプラスチック基板を保持した新構造素子⁴⁾を、印刷プロセスで作製する研究を進めている。本稿では、液晶ディスプレイのフレキシブル化を可能にするフィルム液晶技術を解説するとともに、フレキシブル液晶ディスプレイに関する今後の研究動向を展望する。

2. プラスチック基板を用いた柔構造

柔軟なプラスチック基板の導入は、液晶ディスプレイの素子構造そのものに大きな変革をもたらす。これまでの液晶ディスプレイでは、図1に示されるように厚くて平坦なガラス基板(約0.7 mm厚)を用いて、流動性のある液晶材料を、スペーサー粒子を介して挟み込んできた。そして現在、携帯電話用小型液晶パネルにおいて軽量化や耐衝撃化を図るため、ガラスの代替としてプラスチック基板の導入が進められている。その場合も、基板の平坦性により液晶層の厚みを一定に保持しなければならないため、厚くて硬いプラスチック基板(0.4 mm厚)が使用される。それに対して、本研究ではプラスチック基板を大幅に薄くして(0.1 mm厚)、積極的に素子を曲げることを意図したものであり、自ずから素子開発の方向性が異なってくる。

液晶を用いてフレキシブル素子を構成する場合、液晶層

FUJIKAKE, Hideo NHK放送技術研究所(157-8510 東京都世田谷区砧1-10-11)・表示・光デバイス主任研究員、工学博士。1985年 東北大学大学院工学研究科電気および通信工学専攻修士課程修了。専門は液晶/ポリマー複合膜、液晶ディスプレイ、液晶光学素子。

Printing Fabrication of Flexible Film Liquid Crystal Displays

にもブレークスルーが求められる。液体である液晶材料を柔軟なプラスチック基板で挟んだだけでは、素子が曲げられたとき、液晶層の厚みが変動して、表示が乱れるためである。それを克服するため、筆者らは強誘電性液晶に微細なポリマーを形成したフィルム素子を提案している。その構造は図2に示されるように、ポリマー繊維と強誘電性液晶の複合膜を、透明電極の付いた2枚のプラスチック基板で挟んだものである⁴⁾。ポリマー繊維のネットワーク構造は、柔軟な基板を使用した場合でも基板間の間隔を一定に保ち、曲げたときに複合膜に加わる外力から、液晶の分子配向を保護する。さらにポリマー繊維は、一方向に伸びた形態となっているため、液晶分子の配向を乱すことなく安定化する。

2つの透明電極間に電圧を印加すると、電気双極子モーメントを有する液晶分子に強いクーロン相互作用が働くため、液晶の分子配向が変化する。その応答速度は、既存のディスプレイに使われるネマチック液晶に比べて、2桁以上高速である。電圧強度に応じて液晶の分子配向が変化した際、入射する光の位相が変わるため、液晶素子を2枚の偏光板で挟めば、表示動作に必要な光変調効果が得られる。

3. 印刷法による素子作製

これまで、ディスプレイを構成する液晶セルを作製する際には、2枚の平坦な基板で数 μm のギャップを形成した後、液晶を真空注入してきた。しかし、そのような方法で柔軟な基板を用いた場合、ギャップの均一形成が著しく困難になる。そのため、上記のフィルム液晶素子には、従来

図1 液晶素子の進化

のセル化工程は適用できない。

そこで筆者らは、独自の作製方法を考案した。その工程は、以下のとおりである。最初に透明電極が成膜されたプラスチック基板（ポリカーボネート製、0.1 mm 厚）の上に、ポリイミド樹脂の配向膜を塗布・焼成し、液晶分子の配向を促すためのラビング（摩擦）処理を施す。その配向膜の上に、紫外光照射により重合するモノマーを強誘電性液晶に混合して均一に塗布する。

この工程は、図3の左図に示すフレキシ印刷法により行われる⁵⁾。混合液はドクターブレードによりアニックスロールに塗布された後、印刷ロールの凸版にすくい取られてプラスチック基板上に印刷される。フレキシ印刷では、混合液の厚みがアニックスロールの細孔サイズとピッチにより制御されるとともに、凸版で塗布エリアを精度良く選択できる利点が見られる。

次に図3の右図に示されるように、もうひとつの基板を用いて液晶/モノマー混合液を挟み込み、ラミネータの圧力ローラーにより基板端部からプレスしていく。あらかじめ混合液には、微量のスペーサ粒子（2 μm 径）が分散してあるため、基板がスペーサ径まで押し込まれ、混合液の厚みが均一となる。

このとき配向膜の作用により、細長い分子構造を有する強誘電性液晶とモノマーの分子が、ラビング方向に配向する。この状態で紫外光を照射すると、モノマーが混合液中を浮遊しながら重合して、ポリマー繊維⁶⁾が形成される。分子量が増したポリマーは液晶中に溶解できなくなり、析出・凝集して硬化する（光重合相分離）。

ここでは、ポリマー含有率が高く機械強度に優れた複合膜を形成するため、液晶材料に相溶性が高いポリマーの原材料として、アクリル系の単官能モノマー⁷⁾を採用した。複合膜中に形成されたポリマー構造の観察例（モノマー配合比 20 wt%）を図4に示す。ラビング方向に著しく伸長したフィブリルが凝集し、サブ μm 径の繊維構造が形成されている。本素子で、一方向にそろったフィブリルが形成されるのは、混合液中では液晶分子が配向方向に激しく流

図2 フィルム液晶の基本構造

図3 フィルム液晶の作製プロセス

図4 形成されたポリマー繊維

図5 ポリマー壁を含んだ複合膜

動しており、それ以外の方向のポリマー成長が阻害されるためと筆者は理解している。それを裏づけるように、高温では混合液の配向オーダーが低下するにもかかわらず、相分離で形成されるポリマーの配向オーダーが高まる現象が、ラマン散乱測定により確認されている⁹⁾。

筆者らは、素子の湾曲耐性をさらに高めるため、図5に示されるように複合膜の内部に、ポリマー繊維とともに格子状のポリマー壁⁹⁾を形成する研究を進めている。素子の機械強度を高めるポリマー壁と、液晶配向を安定化するポリマー繊維を同一面内に作り分ける試みであり、紫外光の2段階露光を用いる。まず、30 wt%にモノマー添加量を増やした液晶/モノマー混合液に、格子状のフォトマスクを介して紫外光をパターン露光する。このとき、混合液中に拡散・浮遊するモノマーの分子は、露光部にたどり着いた時点で硬化して壁構造を構築する。その後、紫外光の全面露光を行い、未露光部に残された混合液中のモノマーにより、液晶内にポリマー繊維を形成する。

4. 試作したフィルム素子

ポリマー繊維を作り込んだフィルム液晶素子は、液晶配向が均一であるため、光散乱がほとんどなく透明である。素子を2枚の偏光板で挟み、電圧で駆動した結果、電圧強度に応じてアナログ的に透過光の強度が変化した。その応答速度は、数十 μ sと高速である。これは、分子量が大きく動きにくいポリマーと、低分子の強誘電性液晶の成分が高

図6 フィルム液晶の湾曲表示

純度に分離しているために得られるものである。析出した液晶の純度は96%以上であることがクロマトグラフィーによる成分分析により明らかになっている。本素子で得られた高速な階調動作は、高画質の動画表示に好適と言える。

さらにポリマー壁の構造を導入したフレキシブル素子(サイズ10 cm×10 cm)の外観を図6に示す。この素子は曲げられた状態でパターン電極により液晶が駆動されている。微細なポリマー構造により基板が複合膜からはく離せず、液晶層の厚みが一定に保たれるため、液晶配向が保持されている。その結果、直径3 cmに丸く巻いた状態であっても階調に表示ムラが生じず、一様な表示動作が維持されている。

なお、プラスチックフィルム基板の大面积延伸形成技術は確立されているため、本素子のサイズは実質的に印刷装置で制限される。今後、ポスターなどの印刷物のように、大型印刷装置を用いて大画面のフィルム液晶が実現される可能性がある。さらに本素子は、基板ごと切断された場合でも、ポリマー構造により透明電極が短絡せず、残った液晶部位が動作する。そのため、大面积素子を作製した後、切断して複数の小型ディスプレイを作製することも可能であり、量産性の面でも優位性を発揮する。

今回、試作したフィルム液晶素子(基板厚0.1 mm)の重量は、同様の面積のガラス基板(0.7 mm厚)を用いたものに比べて1/13ときわめて軽量である(3 g)。表示サイズの大面积化が進むにつれて、軽量素子のメリットはますます大きくなると考えられる。

5. フレキシブル液晶の駆動技術

さらに、フレキシブルな液晶素子を用いて高画質な表示を行うためには、液晶セルの構造強化のみならず、柔軟な基板上に薄膜トランジスター(TFT)を設けなければならない。昨今、液晶ディスプレイの湾曲化に向けた研究開発が盛んに行われており、熱安定性に優れたプラスチック基板にTFTを実装したり¹⁰⁾、また薄板化したガラス基板をプラスチックフィルムと貼り合わせて補強することにより¹¹⁾、表示パネルの湾曲化が図られている。

さらに将来、表示パネルを抜本的に柔軟化するためには、TFT も柔らかい素材で構成する必要がある。a-Si 並みの電荷移動度を有するペンタセン半導体を用いた有機トランジスターが脚光を浴びており、基礎的な試作段階ながら液晶の駆動¹²⁾も試みられている。

一方、文字や静止画の表示を目指したメモリー性のフレキシブル表示媒体、いわゆる電子ペーパーの開発が、現在、国内外で精力的に進められている。液晶を応用した方式としては、ねじれ配向の選択反射を用いたコレステリック液晶¹³⁾や、双安定性のねじれネマチック動作モード¹⁴⁾が検討されている。それらは、静止画表示を想定したものであるが、液晶のメモリー性により TFT を用いずマトリックス表示が行える利点があり、早期の実用化が期待でき、今後の進展が楽しみである。

6. む す び

強誘電性液晶とポリマーの複合膜を用いて、柔軟なプラスチック基板を保持したフレキシブルフィルム液晶素子を開発した。本素子により、動画表示に適した高速な階調表示機能と、高い柔軟性を併せ持ったフレキシブル素子が実現された。今後、フィルム液晶素子に適したアクティブマトリックス駆動技術やカラー化方式について検討を進める予定である。

また、本素子で用いたプラスチック基板と印刷作製プロセスは、枚葉式からロールツウロール式プロセスへの転換の足がかりにもなりうる。将来、軽量で大面積なシート状

ディスプレイが、ロールに巻かれながらローコストで作製されることを、筆者は期待するものである。

文 献

- 1) T. Oh-ide, M. Higa, K. Fujimura: *Asia Disp. Dig.*, P1.2-1, 169 (1995)
- 2) N. A. Clark, S. T. Lagerwall: *Appl. Phys. Lett.*, **36**, 899 (1980)
- 3) H. Fujikake, T. Aida, J. Yonai, H. Kikuchi, M. Kawakita, K. Takizawa: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38**, 5212 (1999)
- 4) H. Fujikake, T. Murashige, H. Sato, Y. Iino, M. Kawakita, H. Kikuchi: *J. SID*, **10**, 95 (2002)
- 5) 佐藤弘人, 藤掛英夫, 飯野芳己, 河北真宏, 菊池 宏: 映像情報メディア学会誌, **56**, 1001 (2002)
- 6) H. Fujikake, T. Murashige, J. Yonai, H. Sato, H. Kikuchi, Y. Iino, M. Kawakita, Y. Tsuchiya, K. Takizawa: *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **13**, 295 (2000)
- 7) S. Kataoka, Y. Taguchi, Y. Iimura, S. Kobayashi, H. Hasebe, H. Takatsu: *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, **292**, 333 (1997)
- 8) H. Fujikake, T. Murashige, H. Sato, M. Kawakita, H. Kikuchi: *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 1622 (2003)
- 9) H. Sato, H. Fujikake, Y. Iino, M. Kawakita, H. Kikuchi: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41**, 5302 (2002)
- 10) M. Okamoto, Y. Okada, A. Ban, W. Oka, Y. Matsuda, S. Shibahara: *Proc. IDW*, AMD8-2, 315 (2002)
- 11) T. Hioki, M. Akiyama, M. Nakajima, M. Tanaka, Y. Onozuka, Y. Hara, H. Naito, Y. Mori: *Proc. IDW*, AMD8-3, 319 (2002)
- 12) P. Mach, S. Jrodriguez, R. Nortrup, P. Wiltzius, J. A. Rogers: *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 3592 (2001)
- 13) K. Ochi, E. Yamakawa, K. Hashimoto, K. Kohriyama: *Proc. IDW*, PLC1-1, 281 (2000)
- 14) J. C. Jones, J. R. Hughs, A. Graham, P. Brett, G. P. Brown, E. L. Wood: *Proc. IDW*, PLC2-2, 301 (2000)

LSI 実装用ポリマー材料 は、LSI 製造プロセスの後行程プロセスとしてのチップ搭載用プリント基板材料、LSI チップを基板に固着するために用いるダイアタッチ剤、ワイヤボンディング接続終了後チップを応力や水分などの外部環境から保護するために用いられる封止樹脂が主である。最近の高密度化の要求に対する BGA (Ball Grid Array), CSP

(Chip Size Package) などのパッケージには、高密度、微細配線基板用ビルドアップ基板材料、ポリイミドフィルム材料が用いられている。ダイアタッチ剤、封止樹脂は、おもにエポキシ樹脂が用いられており、とくに封止樹脂は、チップ、配線金属との熱膨張差を緩和するために、エポキシ樹脂中にシリカフィラーが混合された材料が一般的である。 [560 頁]

光実装 光信号を入出力するルーターなどの装置や、電気信号を光信号に変換する光モジュールや光パッケージなどのハードウェアを構成するための技術。狭義には、光信号を光モジュールや光パッケージに入出力したり、光モジュールや光パッケージ内で合・分波などの処理をするために、発光デバイスや受光デバイスなどの光デバイスを、所望の結合損失に収まるように光導波路や光ファイバーと位置合わせして、モジュールやパッケージに固定すること。位置合わせ精度は、シングルモードの場合 $1\mu\text{m}$ 以下、マルチモードの場合 $5\mu\text{m}$ 程度と、高精度を要

ポリワーズ

する。したがって、レンズの挿入など位置合わせ精度を緩和するための工夫が検討されているが、決定打はまだない。またこの精度を常に保つために、光デバイスの固定は Au-Sn 等のはんだが使用される。したがって、光実装では光学設計から機械工学、信頼性工学までのさまざまな領域が含まれる。ルーターなどの大型装置では、光モジュールや光パッケージが搭載されて機能回路を構成したプリント板から、プリント板が搭載されたユニット、ユニットが何段か収納されたキャビネットと、光実装を分類することができる。 [562 頁]