《7》 次世代ディスプレイ ～フレキシブルディスプレイを中心として～

〔正会員〕藤掛 英夫[†]

キーワード 次世代ディスプレイ, フレキシブルディスプレイ, プラスチック基板, 薄膜トランジスタ, 有機EL, 液晶, フレキシブルエレクトロニクス

1 ま え が き

近年、コンピュータネットワークやデジタル映像技術の発展により、放送・通信・出版など多様な情報メディアの連携・融合が進んでおり、それに伴って多くの情報サービスが創出されている。そのようにメディア環境が大きく進展する中でも、人々に情報を提示するという電子ディスプレイの基幹的役割は変わるものではない(図1)。昨今、ヒューマンインタフェース(出力部)としてのフラットパネルディスプレイの出現が、携帯電話、コンピュータ端末、テレビの形態を一変させたように、今後もディスプレイの技術革新が、メディアサービスが支える情報化社会のライフスタイルを変革していく。さらには、次世代ディスプレイをはじめとする先進的な映像技術が、今後もエレクトロニクス産業を先導していく可能性が高い。

放送・通信サービスに向けた次世代ディスプレイには、豊かな情報や高画質映像をいつでも享受できる機能が求められる。さまざまな次世代ディスプレイ候補の中でも、表示パネルが柔軟化したフレキシブルディスプレイ^{1)~3)}は、放送分野に限らず、ディスプレイ全体の視聴形態や用途に大きな変化をもたらす可能性がある。

フレキシブルディスプレイを実現する基盤技術としては、パネル作製も従来の真空成膜工程や光微細加工技術(フォトリソグラフィ)に頼るのではなく、大面積化や量産性に優れた新たなパネル製造技術の研究も急がれている。例えば、次世代エレクトロニクスとして、シリコンではなく有機物の半導体をベースとした有機エレクトロニクス、柔らかいプラスチック素材で電子部品を構成するフレキシブルエレクトロニクス、電子回路の印刷形成を実現するプリンタブルエレクトロニクスの研究が活発になっている。それらの究極の目標の一つは、基板を1枚ずつ加工する従来の作製法(枚葉方式)ではなく、パネルを巻き取りながら連続作製するロール法⁴⁾⁵⁾を実現することにある。

フレキシブルディスプレイは、これまで近未来映画など

図1 次世代ディスプレイの役割とそれを支える周辺技術

で頻繁に登場してきたが、昨今のディスプレイ国際会議では、ホットなトピックとして欠かせない技術分野にまで発展している。

本稿では、メディアサービスと次世代ディスプレイの関係を解説した後に、次世代ディスプレイの最有力候補として期待されるフレキシブルディスプレイの現状と展望について概説する。

2 次世代ディスプレイの方向性

ハイビジョン放送用のフラットパネルディスプレイの量産技術が成熟しつつある中で、次世代ディスプレイへの期待が高まっている。将来のディスプレイ技術としては、目に疲労のない自然な立体表示を実現する基盤技術の開拓が求められる。

その一方で、昨今の豊富なデジタル情報をいつでもどこでも享受できるユビキタス/ユニバーサル/アンビエント情報化社会を実現させるため、新たな機能のディスプレイが求められている。現在までに、さまざまなディスプレイ概念が提案されて、実際の試作も含めて研究・開発が精力的に続けられている。技術的成熟度との兼ね合いにもなるが、以下のような技術コンセプトが今後のディスプレイのあり方を考える上で有望視されている。

[†] NHK 放送技術研究所

"Research and Development of Next-Generation Displays" by Hideo Fujikake (NHK Science & Technical Research Laboratories, Tokyo)

(1) 重くて硬いディスプレイパネルからの脱却

薄い、軽い、曲がる、壊れないようにするなど、現在のフラットパネルディスプレイのパネル構造を、究極まで進化させる取組みが提案されており、それが実現すればディスプレイの携帯性・収納性などの利便性が飛躍的に高まることになる。

(2) あらゆる生活空間への進出

普段は生活環境(アンビエント)に溶け込んで隠れていて、必要な時に適切な情報を提供するディスプレイが注目されている。あらゆる生活空間の情報提示に用いられるため、極めて広い用途が見込まれる。そこに求められる機能としては、既存の構造物との整合性を高める柔軟性・伸縮性、設置の自由度を広げる任意形状パネル、ガラス板の代わりに用いる透明ディスプレイ、目の疲労が少ない自然な表示を実現する反射表示のパネルなどが考えられる。

(3) 情報コンテンツとの連携

ディスプレイ業界では、携帯電話、コンピュータ、テレビに続く応用分野として、汎用タブレット端末への期待が高まっている。今後、創出されるさまざまな情報コンテンツ、ソフトウェア、サービスの特徴を生かすため、それに沿ったディスプレイハードウェアの開発も進展する。今後のディスプレイには、新しい入力インタフェースも求められ、情報入力機器との一体化が加速する。それらにより、人間の感性と画像情報の距離が狭まり、相互作用が強くなるため、新しいコンテンツサービスが創出される可能性もある。

(4) 高臨場感化に向けたハイスペック映像の追求

スーパーハイビジョン用超大画面高精細ディスプレイをはじめ、高画質化により臨場感を追い求めるアプローチは、ディスプレイ研究の王道とも言える。その技術要件としては、映像の高精細化、高コントラスト化、高フレームレート化、広色域化などがある。その実現には、映像の出口としてのディスプレイだけでなく、映像の撮像、処理、伝送、表示にわたってトータルでアプローチする必要がある。現在、それらの相互連携が求められている。

(5) 省電力表示技術の模索

ハイビジョンの普及に伴って、環境負荷の小さいパネル製造技術と表示動作の省電力化は、フラットパネルディスプレイにとっても重要な課題になっている。現状のディスプレイでも省電力化の取組みは進展しているものの、次世代ディスプレイとしては、表示方式、製造方法も抜本的に議論されるべき時期にきている。

言うまでもなく(1)のコンセプトに基づくフレキシブルディスプレイは、将来の多様な進化により、(2)や(3)はもとより(4)や(5)の機能獲得も視野に入れる。それらが実現されれば、既存の携帯用もしくは据え置き用途に関わらず、ほとんどのディスプレイ用途がフレキシブルディスプレイに置き換わる可能性もある。そのためフレキシブル

図2 フレキシブルテレビの応用例

ディスプレイは、情報化社会に向けてインパクトの大きな開発テーマと考えることができる。

3 放送サービスへのインパクト

地上デジタル放送後の放送分野において、フレキシブルディスプレイの出現は、新たな視聴スタイルを数多く創出することになる。これまでにない形態のディスプレイであるため、放送のサービス側が思いもつかなかった用途をユーザー側から提案してくる可能性もあり、極めて自由度の大きなディスプレイ技術と言える。

ディスプレイパネルが柔軟になることで、まず第一にテレビ受信端末の携帯性が飛躍的に向上する。例えば、図2に示されるようにA4～A3サイズの携帯用の中型パネルであっても、持ち運びにカバンは必要なく、ポケットに収納して手軽に持ち運べる。それにより、迫力のある映像サービスをいつでもどこでも楽しめるようになる。

さらに将来、家庭用のテレビ受信機が、高臨場感が得られる超大画面ディスプレイ(例えば、対角80～100インチ)に進展しても、ディスプレイパネルが軽量で曲げられれば、エレベータや玄関からの家庭搬入を可能とするばかりでなく、パネル設置の作業自体も容易となる。さらに、それらを湾曲表示させれば、部屋のコーナも使えて省スペースになるとともに、取り囲むような視野環境により高臨場感が得られる効果も期待できる。

このようにフレキシブルディスプレイは、高臨場感の映像を楽しむためのツールとして有用であり、画面サイズの増加に伴って利点が大きくなる特徴がある。

4 フレキシブルディスプレイの開発例

現在のフレキシブルディスプレイのハード研究は、用途別の分類に基づき、文字・静止画の表示機能を基本とするフレキシブル電子ペーパー⁶⁾と、高画質のフルカラー動画表示を可能とするフレキシブルフラットパネルディスプレイに大別される。前者の電子ペーパーは、言わば読むディスプレイで、電気泳動方式やコレステリック液晶方式が採用されており、メモリー機能により超小電力表示となる、反射表

図3 プラスチックフィルム基板の外観

示で目の疲労が少ないなどの特徴を有する。

本稿では、高画質の動画表示が求められる放送用途を見据えて、後者について解説を進める。

フレキシブル動画ディスプレイには、超薄型・柔軟化、高速表示が期待される有機EL方式と、大画面化が容易な液晶方式が検討されている。ここでは、フレキシブルディスプレイを実現するためのプラスチック基板技術と、それを用いた有機ELおよび液晶を用いたフレキシブルディスプレイの現状と課題について、材料・素子技術を中心に解説する。

4.1 プラスチック基板

フレキシブルディスプレイの実現に求められる材料技術として、プラスチック基板が挙げられる。これまで市販されているフラットパネルディスプレイ（液晶ディスプレイ、プラズマディスプレイ、有機ELディスプレイなど）は、硬いガラスを基板にして作製される。ガラス基板を柔軟なプラスチックのフィルム基板（図3）に置き換えるためには、以下に示すようなさまざまな特性改善が求められる。

プラスチック基板の導入は、ディスプレイパネルに柔軟化を実現する一方で、その不安定な機械的特性によりパネル製造には困難を伴う。そのため、プラスチック基板の安定性・信頼性の確保が最も大きな課題となる。フレキシブルディスプレイ用のプラスチック基板には、ガラス基板と同程度の表面平坦性、透明性、耐熱性・寸法安定性、ガスバリア性などが求められるが、平坦性や透明性などはすでに一定のレベルに達している。現在、深刻な課題は、寸法安定性がガラス基板に比べてはるかに劣ることであり、その改善が急務と言える。

例えばディスプレイ作製では、パネル内に微小な画素構造（表示材料はもとより、薄膜トランジスタ（TFT）、電極、配線、絶縁膜、カラーフィルタ、ブラックマトリックスなど）を形成しなければならない。しかし、これまでのフォトリソグラフィ（フォトマスクによるレジスト樹脂の光硬化を

利用して、薄膜材料を微細にパターン化する工法）では、レジスト焼成などの加熱工程や、酸・アルカリ・有機溶剤の暴露工程（現像・洗浄）により基板が膨張・収縮する。プラスチック基板の寸法が途中工程で変化すると、その後の工程のマスク合わせが不能となる。特にTFTは微細なゲートチャンネル構造を伴うため、その作製には困難が伴う。加熱処理により基板自体の湾曲変形することも少なくない。

プラスチック基板の寸法安定性を確保するため、プラスチック素材の耐熱性向上とともに、フォトリソグラフィ工程の低温化、表面コート技術の導入が進められている。また、ガラス基板に貼り付けて工程を進めることも常套手段になっている。

フレキシブルディスプレイ用の基板としては、ポリエーテルサルフォン（PES）、ポリエチレンナフタレート（PEN）、ポリカーボネート（PC）、ポリイミド（PI）、ポリエチレンテレフタレート（PET）などの基材が主に用いられる。それらの中でもポリイミド基板は耐熱性に優れており、昨今、フレキシブルディスプレイ応用が急速に進展している。その一方、寸法安定性・耐熱性には劣るものの、安価なパネル製造を目指して、ポリエチレンテレフタレート基板を使用する取組みも試みられている。

しかし、すべての条件をクリアするプラスチック素材は得られていないのが実情であり、それらの制約を表示素子やTFTの作製条件と整合させることが、現在のフレキシブルディスプレイ開発の課題と言える。

4.2 フレキシブル有機ELディスプレイ

フレキシブルな有機ELディスプレイは、1枚の基板上に柔軟な電子機能性有機薄膜（二重結合を含む π 電子共役分子が電荷移動を担う）を積層した構造を有する。その単純な構造によりパネル自体が極めて薄くて高い柔軟性を有するため、フレキシブルディスプレイに理想的な表示媒体と言える。

フレキシブル有機ELの表示原理は、ガラス基板素子と同様である。図4の断面構造に示すように、二つの電極層の間に電子輸送層、発光層、ホール輸送層など複数の有機半導体薄膜が積層される。それぞれから正負の電荷が注入されて再結合して、そのエネルギーにより発光層の有機色素が励起されて光を放出する。無機半導体の発光ダイオード（LED: Light Emitting Diode）と同様、両極性電荷の注入（電流）に伴って発光する。そのため、有機ELは、英語ではOrganic Light Emitting Diodeと表記される。フレキシブルな有機ELディスプレイの課題は、高輝度・高効率化、寿命などであり、それらは各電極からの電荷の注入、輸送、バランスにより大きく左右される。

有機ELの発光過程には、蛍光機構と燐光機構が知られており、後者の場合、熱になるエネルギーも光として取出せて高い効率が見込まれるが、寿命向上のための材料開発が求められる。また、有機EL素子を構成する有機半導体材料

図4 フレキシブル有機ELの基本構造

図5 フレキシブル有機ELディスプレイのパネル断面構造

は、高分子と低分子に分類される。低分子有機半導体の系であれば、機能が異なる多数の有機薄膜を真空蒸着法で容易に積層できるため、高い発光効率を得られる。高分子の場合、有機溶剤で希釈されて印刷・塗付工程により薄膜を形成できるため、将来の大面积化に有利である。しかし、印刷製法やインク材料は開発途上であり、寿命や発光効率の向上が望まれる。

プラスチック基板に起因した課題としては、ガスバリア性がある。一般にプラスチック基板は、ガラス基板に比べてはるかに気体を透過しやすい。酸素や水蒸気が有機ELを構成する有機半導体に進入すると、発光輝度の低下やダークスポットを生じる。そこで、陽極側のガスバリア層として、シリコンの酸化膜・窒化膜が基板上に設けられる。また、陰極側にも同様な無機薄膜を形成して封止することが求められる。さらに、陰極上部をプラスチックフィルムで覆って密封することも多い。

上記の観点から、筆者らは、高効率な発光材料や印刷・塗付工程の研究により、フレキシブル有機ELディスプレイの開発を進めている。また、3原色の発光層の塗り分け技術として、低分子材料のマスク蒸着とともに、高分子の印刷形成（インクジェット法⁷⁾）に取り組んでいる。

さらに、有機ELをマトリックス電極で走査駆動するためには、走査期間以外にも画素に電流を供給するためのTFT回路をプラスチック上に形成する必要がある。そのため、柔軟なペンタセン有機半導体⁸⁾（蒸着形成）と高分子ゲート絶縁膜（塗布形成）を用いたTFTアレイを開発して、有機ELパネルのアクティブ駆動を進めている。

図5に試作したフレキシブルパネルの断面構造を示す。プラスチック基板上に二つの有機TFTを形成している。走査駆動時の選択TFT、および電流供給用の駆動TFTの二つのトランジスタで有機EL素子の発光を制御する。このパネル構造により、有機ELディスプレイを試作して、図6に示されるようなフルカラー動画を実現した（対角5インチ、QVGA：320×(RGB)×240画素、80ピクセル/インチ、フレーム周波数60Hz）。さらに、高移動度の酸化物TFTアレ

図6 フレキシブル有機ELの画像表示例

イを用いたパネル試作⁹⁾も進めており（プロセス温度130℃以下）、より高輝度な動画表示を確認している。

4.3 フレキシブル液晶ディスプレイ

液晶ディスプレイは、さまざまなフラットパネルディスプレイの中で、現在、最も普及した表示方式である。プラスチック基板を導入したディスプレイパネルでも、これまで蓄積されてきた高度な大面积製造技術と高精細駆動技術を活用できれば、高画質で大画面の表示を早期に達成できる可能性がある。

光源/光変調機能が分離した非発光表示方式の代表である液晶の原理は、プラスチックを用いた場合でも既存のものと変わるものではない。バックライトを含めたフレキシブル液晶のパネル構成例（断面）を図7に示す。2枚のプラスチック基板で挟まれた液晶層（液状）では、基板内側に塗布された配向膜（分子配向した硬質樹脂）により、細長い分子の向きが制御される。この場合、液晶層の厚みは、周期的に配置された樹脂製スペーサにより数 μm の厚みに制御され、面内一様に保持される。

透明電極に電圧が印加された場合、液晶分子の向きが変わり液晶層の光学特性が変化するため、透過光の偏光が制御される。これにより、バックライトからの照明光が偏光板を透過して画素ごとに強度変調されるため、画像を表示

図7 フレキシブル液晶ディスプレイの断面構造

図8 フレキシブル導光板バックライトの開発例

できることになる。フレキシブル液晶においても、既存のディスプレイに用いられる液晶材料（ネマチック液晶）が使用される。

フレキシブル液晶で最も重要な課題は、変形しやすいプラスチック基板の間隔、すなわち光変調を担う液晶層の厚みを一定に保持することである。ここでは、パネルに外力が加わったりパネルが曲げられたりしても、基板間隔が一定に保たれる新たなスペーサ構造が求められる。さまざまなスペーサ構造が考案される中で最も有力な方法は、両基板をスペーサを介して接着するというものである。もう一つの大きな技術課題は、バックライトの柔軟化の問題である。フレキシブル液晶においても、高コントラストな表示を実現するためには、バックライトなどの照明光学系も柔軟化しなければならない。

筆者らは、高画質の動画表示に適した高速応答液晶（応答時間1ms以下）に、直交格子状の高分子スペーサ壁¹⁰⁾を形成して、2枚のプラスチック基板を固定する素子構造を提案している。このポリマ壁は、液晶に溶解したモノマー成分（高分子の原材料）を紫外線のパターン露光で析出・硬化させることで得られる。さらに、液晶/モノマー溶液の塗付工程にはフレキソ印刷法が活用できるため、大面積化が容易である。筆者らは、本方式に基づき、A4サイズパネルまでの印刷形成を実現している。

その一方で、筆者らはフレキシブルバックライトとして、色域の広い3原色LEDチップを2次元的に表面実装した直下照明方式（ポリイミドの回路基板使用）や、プラスチックフィルム状の導光板を用いたエッジライト方式を開発した。図8は、LEDチップをエッジライトとした導光板バックライト（透明シリコンゴム製）である。両方式のバックライトは、A4サイズまで開発されている。

フレキシブル液晶のアクティブマトリックス駆動には、高移動度で高精細化に適した低温形成のpoly-Si TFT技術¹¹⁾（プロセス温度150℃以下）も活用した。耐熱基板を用いてフレキシブルな液晶パネルを試作した結果、カラー表示動作が得られている（図9、対角5.1インチ、128×72画素、

図9 フレキシブル液晶の画像表示例

180Hzフィールドシーケンシャルカラー方式）。さらに、パネルの柔軟化を目指して、有機TFTアレイ¹²⁾を設けた対角5インチのフレキシブル液晶（QQVGA：160×120画素）を試作して、動画表示動作を確認している。

なお、微細なTFTアレイについては、著者を含め枚葉式のフォトリソグラフィより作製する研究例が多いが、将来に向けて、オール印刷のロール工程によりパネルを作製する取組みも検討されており、今後の進展を期待したい。

5 む す び

次世代ディスプレイとして待望される動画用フレキシブルディスプレイの現状と課題を解説した。高画質で大画面のフレキシブルディスプレイの実現には、まだ克服すべき技術課題は少なくないが、今後も高度化する情報化社会の中で、インパクトの大きなディスプレイ技術として研究・開発を進める必要がある。また、大画面化に適した印刷製法をはじめ、フレキシブルディスプレイの製造技術の構築も、産業分野にとっては大きなチャレンジと言える。

なお、超大面積のフレキシブルディスプレイが実現されると、生活環境を演出・提供する情報サービスが生まれる

可能性もある。その場合、あたかも壁紙を変えるように、フレキシブルディスプレイの映像を切替えることもできよう。そのような夢の高臨場感ディスプレイがどのように実現されていくのか、さらに臨場感が高まってディスプレイの存在が感じられなくなった時に、ディスプレイの進化はどこに向かうのか、今後もディスプレイ研究から目を離さない。真に豊かな情報化社会の実現に向けて、次世代ディスプレイ研究の活性化を望むものである。

最後に、筆者らのフレキシブル有機ELパネルの作製にあたり、有機TFTのゲート絶縁膜材料を提供いただいた日本ゼオン社に深く感謝する。また、フレキシブル液晶の作製にあたり、導光板バックライトの試作および低温多結晶シリコンTFTの形成に関して、それぞれミネベア社および大日本印刷社にご協力いただいた。関係各位に厚くお礼申し上げます。

(2011年6月20日受付)

〔文 献〕

- 1) H. Fujikake, T. Murashige, J. Yonai, H. Sato, Y. Tsuchiya, H. Kikuchi, Y. Iino, M. Kawakita and K. Takizawa: "Flexible Ferroelectric Liquid Crystal Devices with Polymer Fiber Network Supporting Plastic Substrates", Proc. Int. Display Res. Conf. 3.3, pp.68-71 (2000)
- 2) S. Tokito: "Flexible Organic Light-Emitting Diode Displays", IEEE LEOS Annual Meet. Conf. Proc., TuEE2, pp.426-427 (2006)
- 3) I. Yagi, N. Hirai, M. Noda, A. Imaoka, Y. Miyamoto, N. Yoneya, K. Nomoto, J. Kasahara, A. Yumoto and T. Urabe: "A Full-Color, Top-Emission AM-OLED Display Driven by OTFTs", SID Dig. 63.2, pp.1753-1756 (2007)
- 4) E. Huitema, F. Touwslager, E. van Veenendaal, N. van Aerle, and P. van Lieshout: "Rollable Displays: from Concept to Manufacturing", SID Dig., 10.3, pp.104-107 (2009)
- 5) T. Eguchi, A. Sonehara, A. Sugizaki, T. Ito, A. Kumano and T. Takahashi: "New Color Filter Carried Out by a Roll-to-Roll Process", Proc. IDW, FMC3-3, pp.579-583 (2004)
- 6) N.S. Roh: "Development of Flexible E-Paper and its Applications", Proc. IDW, EP4 -3, pp.1295-1297 (2007)
- 7) M. Suzuki, T. Tsuzuki, T. Kurita, T. Koyama, T. Yamaguchi, T. Furukawa and S. Tokito: "Fabrication of Flexible Phosphorescent OLED Display by Ink-Jet Printing", Proc. Asia Display/ IDW, OLED2-3, pp.601-604 (2005)
- 8) Y. Nakajima, T. Takei, Y. Fujisaki, M. Suzuki, H. Fukagawa, G. Motomura, H. Sato, T. Yamamoto and S. Tokito: "Improvement of Moving Image Quality on a Flexible Color AMOLED Display with OTFT Backplane", Proc. Eurodisplay, 21.3, pp.584-587 (2009)
- 9) M. Nakata, H. Sato, Y. Nakajima, Y. Fujisaki, T. Takei, T. Shimizu, M. Suzuki, H. Fukagawa, G. Motomura, T. Yamamoto and H. Fujikake: "Low-Temperature Fabrication of Flexible AMOLED Displays Using Oxide TFTs with Polymer Gate Insulators", SID Dig., 16.4, pp.202-205 (2011)
- 10) H. Sato, H. Fujikake, Y. Iino, M. Kawakita and H. Kikuchi: "Flexible grayscale ferroelectric liquid crystal devices containing polymer walls and networks", Jpn. J. Appl. Phys., 41, 8, pp.5302-5306 (2002)
- 11) Y. Iwamoto, K. Motai, Y. Naitou, M. Kadowaki, K. Ichimura, H. Sato, Y. Fujisaki, T. Yamamoto, H. Fujikake and T. Kurita: "Flexible Field-Sequential-Color FLCN Panels Driven by poly-Si TFTs", SID Dig., 23.3, pp.318-321 (2008)
- 12) Y. Fujisaki, H. Sato, T. Takei, T. Yamamoto, H. Fujikake, S. Tokito and T. Kurita: "Flexible Color LCD Panel Driven by Low-Voltage Operation Organic TFT", Proc. IDW, LCT7-1, pp.417-420 (2007)

藤掛 英夫 1983年、東北大学工学部通信工学科卒業。1985年、同大学大学院修士課程修了。同年、NHK入局。長野放送局を経て、1988年より、放送技術研究所に勤務。以来、液晶材料・素子、光学デバイス、光情報処理、プロジェクションディスプレイ、フレキシブルディスプレイ、有機エレクトロニクス、番組制作技術などに関する研究に従事。2011年当学会情報ディスプレイ研究委員会委員長。2010年より、IDW国際会議フレキシブルディスプレイワークショップ委員長。現在、同研究所表示・機能素子研究部主任研究員。東京理科大学大学院客員教授。博士(工学)。正会員。