

フラットパネルディスプレイ概論(5) 新規ディスプレイ(フレキシブル、3D)

Introduction to Flat Panel Display (5) New Display (Flexible, 3D)

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

新規ディスプレイとして、フレキシブルディスプレイと立体(3D)ディスプレイを取り上げる。フレキシブルディスプレイの実現で、我々のライフスタイルは大きく変化することが予想される。3Dディスプレイは、家庭ではフラットテレビとして実用化され、モバイル機器にも種々の方式が実用化されている。ここではこれらの技術を概説する。

2. フレキシブルディスプレイ

薄くて軽く、曲げたり折りたたみたり、しかも落としても割れにくいフレキシブルディスプレイは、パネルサイズを問わず、携帯・収納・設置などの使い方の自由度が高まる。そのため、このディスプレイの実現には大きな期待が掛っている。しかも、このディスプレイの製造には、従来のガラス基板を一枚ずつ処理する枚葉式から、ロール・ツー・ロール(R2R)式への生産革命への期待も大きい。

フレキシブルディスプレイの実用化には、下記のような技術選択肢があり、如何に組み合わせて性能、品質、量産性、価格に対応できるかが大きな課題である。

- ①フィルム材料:プラスチックフィルム、SUSフォイル、極薄板ガラスなど
- ②TFT半導体材料:a-Si TFT(低温形成<150℃)、酸化半導体TFT(TAOS-TFT)、有機物半導体TFT(OTFT)
- ③ディスプレイの種類:LCD、電子ペーパー(電気泳動:EPD)、有機EL(OLED)など
- ④基板のハンドリング:ラミネーション/デ・ラミネーション、転写など

⑤TFTのプロセス:真空+フォトリソグラフィ、印刷

以下、フレキシブル基板材料、ディスプレイの種類とTFTへの要求事項などについて概説する。

2.1 フレキシブル基板材料

ガラス、プラスチックフィルム(PEN)、SUSフォイルの特性比較を表1に示す。プラスチックフィルム(PEN)とSUSフォイルでは、重量が6倍以上重く、プロセス温度も400℃以上高く、大きく異なる。また、SUSは金属であるため、熱伝導性が良好である。従って、基板材料の軽さを重視した応用を考えるとプラスチックフィルムを選択するが、プロセス温度の低温化を実現する必要がある。一方、SUSフォイルは重いものの、プロセス温度はガラスと同じで問題なく、OLED基板として透明性が問われることもなく、熱伝導性が良好であることから放熱特性も優れている。なお、表中に熱膨張係数(CTE)を示した。基板とTFT

表1 各種基板材料の特性比較

	ガラス	PEN	SUS
重量 (mg/m ²) (for 100 μm thick film)	220	120	800
可視域の透過率 (%)	92	87	0
最高プロセス温度 (°C)	600	180	>600
熱膨張係数 CTE (ppm/°C)	5	16	10
ヤング率 E (Gpa)	70	5	200
O ₂ およびH ₂ O浸透性	なし	あり	なし
加湿下での膨張係数 (ppm/%RH)	0	11	0
平坦化の必要性	なし	なし	あり
導電性	なし	なし	あり
熱伝導度(W/m°C)	1	0.1	16

構成材料のCTEを合わせることが、各層間のパターンズレを防ぐために重要である。

極薄板ガラスには、日本電気硝子が開発した50 μ m厚の無アルカリガラス基板がある。最近、コーニングやショットといったガラスメーカーもこの分野に参入してきた。この極薄板ガラスはロール状に巻くことも可能で、R2R式の生産にも適用の可能性がある。

プラスチックフィルムは表1に示したように、ガラスやSUSフォイルに比べガス(酸素や水分など)バリア性に劣る。従って、プラスチックフィルムをフレキシブルディスプレイ基板として用いるには、デバイスに応じたバリア膜の形成が必要である。図1に用途とガスバリア性の関係を示す。図からOLED用には 1×10^{-6} g(cc)/m²/day/atm以下、電子ペーパーには 1×10^{-1} g(cc)/m²/day/atm以下のガスバリア性が求められることが分かる。

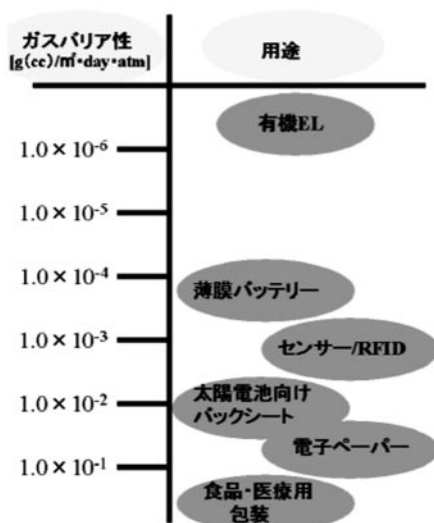


図1 用途とガスバリア性の関係

2.2 ディ스플레이の種類とTFTおよび透明電極への要求性能

フレキシブルディスプレイの候補としては、LCD、EPD、OLEDなどがある。これらのバックプレーン用TFTに要求

表2 各種ディスプレイの駆動に要求されるTFT特性

TFT特性	EPD	LCD	OLED
移動度(cm ² /Vs)	0.02 ~	0.5 ~	1.0 ~
V _{th} の安定性(ΔV _{th}) V	< 9	< 3	< 1
I _{on} /I _{off}	>10 ⁶	>10 ⁶	>10 ⁶

される主な性能を表2に纏める。LCD、EPD、OLEDの移動度、しきい値電圧の安定性(ΔV_{th})、オン/オフ電流(I_{on}/I_{off})をTFTの性能として取り上げた。このように、TFTへの要求性能は、ディスプレイの種類を明確にした上で検討することが重要である。なお、現在実用化されているLCDはセル厚や配向制御が必要であるため、フレキシブルとの両立は困難である。

ディスプレイに用いられる透明電極としてはITOが多く用いられている。しかし、ITOはフレキシブルディスプレイ用電極としては最適ではない。表3に現在実用化もしくは開発中の透明導電膜の種類と特性比較を示す。中でも、導電性高分子(例えばPEDT/PSS)やCNT(カーボンナノチューブ)は可撓性に優れている。

表3 透明導電膜の比較

項目	ITO(SP)	ITO(塗布)	Agワイヤ	CNT	導電性高分子
導電率	◎	△	○	○	○~△
透過率	◎	○	○	◎	◎
色調	黄色味	ほぼ無色	ほぼ無色	ニュートラル	青み
耐環境性	△~○	△~○	○	◎	△
可撓性・強靱性	△~○	○	○	◎	○
加工性	真空系	溶液塗布	塗布や印刷	溶液塗布	溶液塗布
エッチング性	◎	○	○	○	△~×
資源の安定性	△	△	○	◎	◎
価格	高い	普通	普通	?	安い

有機半導体材料は、Si系半導体に比べ柔軟性に富み、機械的な曲げに対して安定である。また、室温から100℃程度の比較的低い温度で作製可能なため、フレキシブルなプラスチック基板上に容易に形成することができる。さらに、大面積・低コスト化にも有利である。そのため、フレキシブルディスプレイのスイッチングデバイスとして大いに期待されている。しかし、実用化に関しては課題も多い。一般的に、有機半導体は水や酸素、熱、紫外線、有機溶剤によって特性が劣化してしまうため、無機半導体の微細加工に用いられているフォトリソグラフィやエッチングのプロセスをそのまま用いることができない。また、アレイ化したTFTの特性のバラツキも問題となる。

これらの材料は、フレキシブルで低価格に対応できる材料としてR2Rプロセスに適しており、幅広いエレクトロニクス分野への応用が期待される。

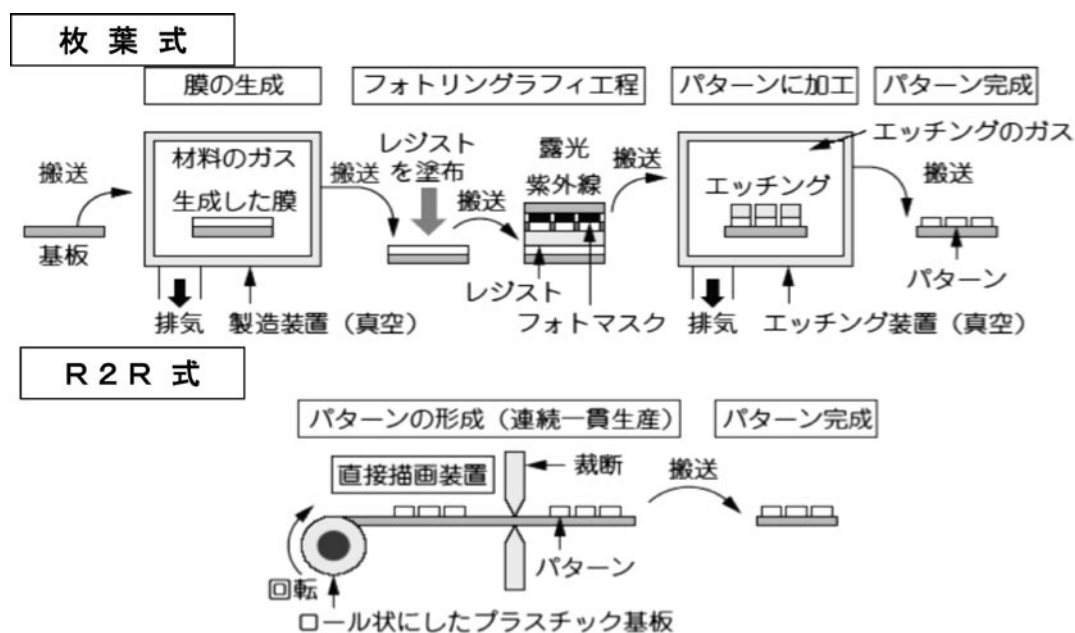


図2 枚葉式からR2R式へ

2.3 ロール・ツー・ロール (R2R) 式生産

図2に枚葉式およびR2R式概念図を比較して示す。例えば、長さ数百m、幅1mほどの大きなロール状の基板に回路パターンを印刷し、同じくロール状の封止膜などと貼り合わせてから、再びロール状に巻き取る(図では、個別に切り離す)。従来の枚葉式では個別に切り離された基板を使うため、次の工程に個々の基板を搬送する手間が掛る。搬入・搬出部を設けなければならず、製造装置の規模も大きかった。R2R式を採ると、基板は装置の間を連続的に流れることになる。そのため、製造装置はたがいに連結され、搬送に必要な手間や装置を大幅に省くことができる。

表4に各種印刷方式の比較を示す。印刷方式によって、基板サイズ、解像度、アライメント精度等が異なるた

表4 印刷方式の特性比較

方法	解像度 (μm)	アライメント精度 ±(μm)	基板サイズ (mm)
フレキシ印刷	20	5	1800 (a)
スクリーン印刷	20	10	3300 x 3700 (b)
インクジェット	50	15	2400 x 2400
インクジェット + PLバンプ	3	1	2160 x 2400 (c)
マイクロコンタクト	~1	1	6"径
R2PAT(d)	0.9	1	100径

(a) フレキシ印刷機のロール幅、(b) スクリーン印刷機のスクリーン・フレーム寸法 (c) G8用フォトリソ装置の仕様、(d) Sonyが開発中の技術

め、プロセス適用に際してはTFTの各層に要求される仕様を満たす印刷方式の選択が重要である。このR2R式に印刷技術を活用するとともに、半導体および金属材料によって回路を直接書き込む直接描画技術を併用すれば、ロール状のプラスチック基板を用い、薄いFPDパネルや軽い太陽電池、床や服などにびっしり埋め込むことができるセンサなど、これまで実現が難しかった部品を製造できる可能性がある。薄く、軽く、曲げられるといった性質を実現出来る上に、製造コストは従来に比べ何ケタも低くなる可能性を秘めている。例えば、実用化されているTFT-LCDの単価は1000ドル/m²程度であるが、高品質の印刷物は0.25ドル/m²程度である。

3. 立体(3D)ディスプレイ

ここでは、現在実用化されている立体(3D)ディスプレイ技術と特徴について概説する。図3に立体表示方式の分類を示す。

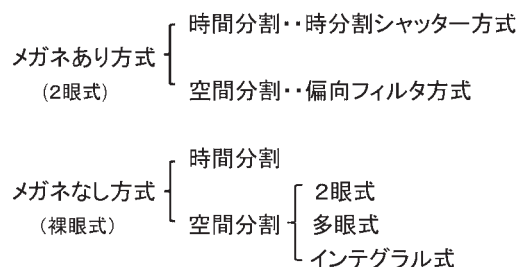


図3 立体表示方式

3.1 メガネあり方式(2眼式)

最も基礎的な立体表示方式がメガネあり2眼式立体表示である。立体映画(3D)映画や家庭用3D-TVなどで利用されている方式である。2眼式立体表示では、右目と左目にそれぞれの目から見た画像を表示することで、立体感を与える。図4(a)に示すように右目と左目に異なる映像を表示するために、光学フィルタを取り付けたメガネをかける。右眼用と左眼用の画像を同一画面に表示し、光学フィルタにより分離する。光学フィルタとしては、偏光フィルタ、波長フィルタ、液晶シャッターなどが用いられる。

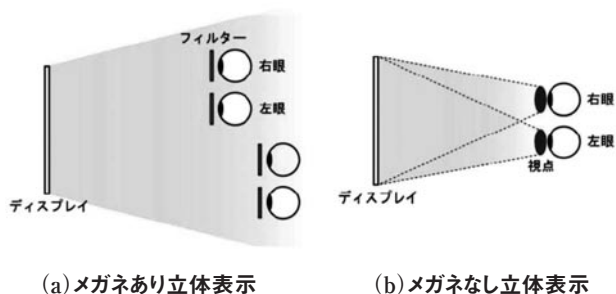


図4 メガネあり・メガネなし立体表示

3.1.1 時分割シャッター方式

この方式では、表示は1サブ・フレームごとに左右の映像を順次出力し、メガネは左右交互にON/OFFする液晶シャッターを用いる。しかも、TFT-LCDやPDPの高速駆動が利用できる。TFT-LCDを4倍速駆動して、黒フレームを間に入れて左右の映像を表示することで、クロストークを低減した立体表示を実現できる。この方式は解像度の低下はない。

3.1.2 偏向フィルタ方式

この方式では、走査線ごとに回転方向が逆の円偏光を与える円偏光板を貼り付ける。奇数と偶数の走査線で左右の画像を表示する。この方式を用いると、比較的容易に立体化が実現できる。ただし、垂直解像度が半分に減少する。また、TFT-LCDやPDPのピクセルと偏向板の間隔が大きくなると、観察する垂直位置によって、偏光板と走査線の対応関係にずれが生じるといった問題点がある。

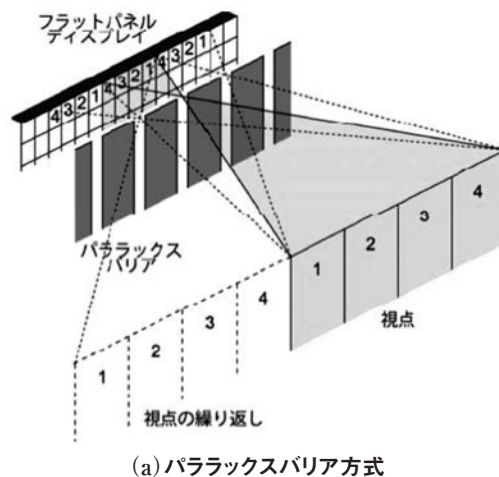
3.2 メガネなし方式(裸眼式)

メガネを用いないでどのようにして左右の画像を分離するのか。それは、「視点」を空間に設定する必要がある。視点とは、右眼と左眼を置いて見る位置のことをい

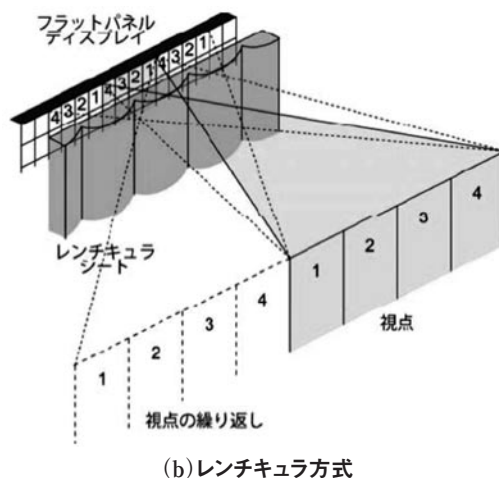
い、図4(b)に示すように、それぞれの視点位置に集光する光線で、対応する右眼用画像と左眼用画像を表示する。視点位置に眼を置いて見れば、対応する画像を見ることができる。このように、視点を用いることでメガネなし表示が実現できる。しかし、観察位置が制限されることが分かる。以下にフラットパネル型としてのパララックス・バリア方式とレンチキュラ方式について述べる。モバイル用途の中小型ディスプレイ用に実用化されている。

3.2.1 パララックス・バリア方式

図5(a)に示すようにフラットディスプレイにパララックス・バリアを取り付けた構造である。パララックス・バリアとは、スリットを水平方向に並べた1次元スリット・アレイである。一つのスリットに対して水平方向に複数の色画素(色画素群)を対応させる。このとき、スリット間隔を、色画素の水平幅より若干小さくする。その結果、色画素群から出て対応するスリットを通過する光線群を考えたとき、すべてのスリットを通過した光線群が、ディスプレイか



(a) パララックスバリア方式



(b) レンチキュラ方式

(東京農工大学 高木先生資料)

図5 パララックスバリア方式とレンチキュラ方式

ら特定の距離で交わることが分かる。この交わった位置に視点が形成される。なお、一つのスリットに2個の色画素を対応させると2眼式となり、3個以上対応させると多眼式となる。

3.2.2 レンチキュラ方式

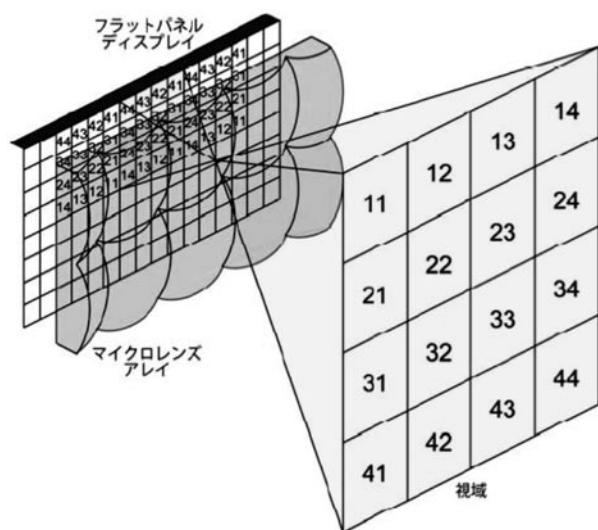
図5(b)に示すようにレンチキュラ・レンズを用いる方式である。レンチキュラ・レンズとは、1次元のレンズであるシリンドリカル・レンズを水平方向に並べたものである。このレンズは、光線の偏向に関しては、基本的にはパララックス・バリアと同じ働きを持つが、レンズであるため視点に対する光線の集光性に優れている。

いずれの方式でも、視点数の増加に伴い、水平解像度が逆比例して低下することが分かる。両者を比較すると、パララックス・バリア方式は作製が容易で作製精度も高いが、光の利用効率が低い。一方、レンチキュラ・レンズ方式は、光の利用効率は高いが、樹脂で作製される場合が多いため湿度や温度の環境変化による形状変化が問題となる。

3.2.3 インテグラル・イメージング方式

光線再生型の水平・垂直視差型立体ディスプレイはインテグラル・イメージングと呼ばれている。もともとは、写真技術として考案されたもので「インテグラル・フォトグラフィ」と呼ばれていたが、最近になり写真技術と区別するためインテグラル・イメージングと呼ばれるようになった。図6に代表的な構成例を示す。

インテグラル・イメージング方式は、物体が反射する光(反射光)を複数方向からサンプリングし、ディスプレイに



(東京農工大学 高木先生資料)

図6 インテグラル・イメージング方式の原理

よりその反射光を再現するという原理に基づいたもので、専用メガネを用いることなく、滑らかな映像表現が可能な方式である。従来の技術では、解像度が低下しやすい、明るさのむら(干渉縞)が出やすいなど実用化にあたっての課題があったが、3D映像のために専用画素配列と専用画素形状を施したTFT-LCDを採用し、垂直レンチキュラシートを貼ることで、鮮鋭感があり、干渉縞の少ない3D映像が実現されている。メガネなしで3D映像が見られるLCD-TVとして商品化されている。

4. おわりに

OTFTによるフレキシブルディスプレイの実用化に向けた開発は始まったばかりである。今後、さらなる印刷可能な高移動度でしかも安定性に富んだ有機半導体の登場を期待したい。また、全工程に印刷プロセスを用いるOTFTについては、パターン精細度の向上・制御と歩留まりを現行のフォトリソグラフィ・プロセス並みにまで向上すべく開発が進められている。環境に優しく、資源の有効利用が可能な生産方式で、Si系TFTでは実現不可能なディスプレイの創生に期待したい。

メガネ方式の3D-TVが次々に商品化され話題になっている。また裸眼3D-TVも商品化された。2次元表示から3次元表示への流れは、技術の進化を考えると自然と思える。しかし、立体映像は2次元映像に比べ人体に与える影響が大きい。現状の技術には課題も多く、今後は人間の立体知覚のメカニズムに対応した技術が求められる。

参考文献

東京農工大学 高木先生資料:

http://www.tuat.ac.jp/~e-takaki/pdf/nikkeibp_nenkan2010.pdf

*「フラットパネルディスプレイ概論(4)電子ペーパー」の訂正
THE CHEMICAL TIMES 2011 No.2(通巻220号)、2ページ左欄、下から5行目~同右欄、下から5行目の記載を、下記へ訂正させていただきます。

図1に代表的な電子ペーパーの方式を示す。元松下電器の太田氏が開発した電気泳動ディスプレイ(EPD: Electrophoretic Display)では、図2に示すように1粒子型(図2(a))と2粒子型(図2(b))が実用化されている。1粒子型は、当時の構造で、電極に挟まれた着色溶液の中に1種類の電荷を帯びた着色粒子が分散している。