

フラットパネルディスプレイ概論(3) 有機EL (Organic Light Emitting Diode : OLED)

Introduction to Flat Panel Display (3) Organic Light Emitting Diode : OLED

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

ディスプレイとして長く王座を占めていたCRTは、真空管のため大型で重かったが、LCDの実用化で薄型化・軽量化が実現した。LCDは、非発光型のためバックライトが必要で薄型化には限界がある。一方OLEDは、自発光型のオールソリッドステート(固体)のフラットパネルディスプレイ(FPD)としてポストLCDへの期待が大きい(図1)。ここでは、先ずOLEDの特徴、要求事項、技術的課題を述べる。次に、OLEDの動作原理と発光材料、駆動方式とバックプレーン技術、カラー化と色塗り分け技術を概説し応用についても触れる。

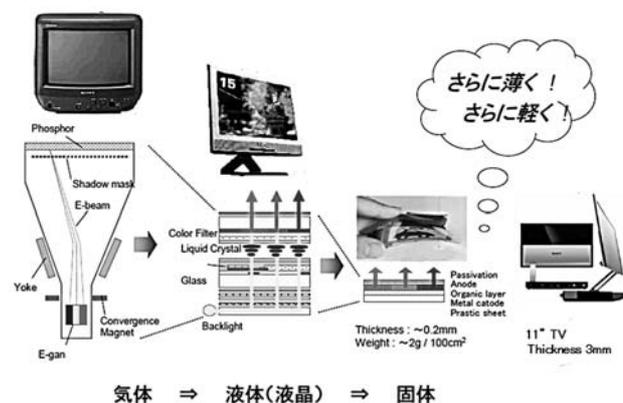


図1 ディスプレイの薄型化・軽量化

2. OLEDの特徴、要求事項、技術的課題

FPD概論(1)の表1でFPDの特性比較を示したが、OLEDの特徴、要求事項、技術的課題を箇条書きにす

ると下記の通りである。

(1)特徴

- ・全固体・自発光デバイス
- ・高コントラスト比(1,000,000:1以上、階調に依存しない)
- ・鮮明でキレの良い表示
- ・高速応答(～数 μ s)
- ・薄型化に適する
- ・低電圧・低消費電力 など。

(2)要求条件

- ・高い発光効率(特に青)
- ・長寿命、高信頼性
- ・大画面化に適したプロセス(材料、プロセス、設備等のスケラビリティ)など。

(3)技術的課題

- ・信頼性(特に高分子型)
- ・再現性
- ・材料コストの削減 など。

3. OLEDの動作原理と発光材料

3.1 動作原理と発光効率

OLEDは、図2に示すようにアノード(陽極)、正孔輸送層、カソード(陰極)、電子輸送層で有機物からなる発光層を挟んだシンプルな構造をしている。各層の厚さは20～30nmである。カソードとアノードに電圧をかけ、電子と正孔を注入する。電子と正孔は発光層で結合し、結合によって生じたエネルギーで周りの分子が励起される。そして、励起状態から再び基底状態に戻る、その際に放出され

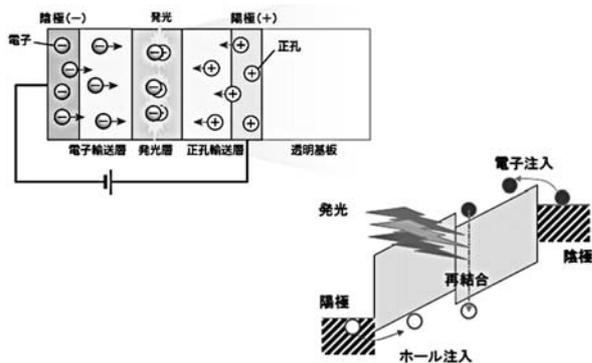


図2 OLEDのデバイス構造とエネルギー順位

るエネルギーによって光を発する。

電極材料としてカソードには、銀やアルミニウムなどの光を反射する金属を使用する一方で、アノードにはインジウムスズ酸化物(ITO)などの透明な電極を使用し、ガラス(プラスチック)基板を透過させ外部に光を取り出す。

電子と正孔の再結合により形成される分子励起の生成状況を図3に示す。三重項励起子は、そのまま失活して燐光を放出する過程と、三重項-三重項消滅を経由して一重項励起子を生成し失活する遅延蛍光過程が存在する。一重項励起からの発光が蛍光(Fluorescence)で三重項励起子からの発光が燐光(Phosphorescence)である。この割合は、蛍光:燐光=1:3である。

OLEDの外部量子効率EQE(External Quantum Efficiency)は、スキーム1に示すように内部量子効率と光取り出し効率の積で表される。電荷注入バランス、励起子生成効率、励起子の輻射再結合確率および光取り出し効率の四つの積からなる。ここで、電荷注入バランスは、電子と正孔の注入・輸送効率と電子と正孔の再結合確率に分離できる。発光効率を最大にするには、これら四つの因子をそれぞれ100%近い効率にする必要がある。

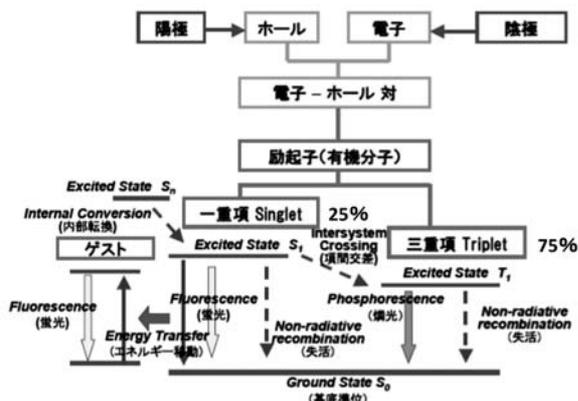


図3 発光メカニズムとエネルギー移動過程

$$\text{外部量子効率[\%]: } EQE = \eta_{int} \eta_{out} = \gamma \eta_{ex} \phi_r \eta_{out}$$

$$\text{パワー発光効率[lm/W]: } \eta_{pow} \propto \eta_{int} \eta_{out} \eta_v$$

- η_{int} : 内部量子効率 (%)
- η_{out} : 光取り出し効率 (%)
- η_v : 電圧効率 = V_{photon} / V_{drive}
- γ : キャリア注入バランス
- η_{ex} : 励起子生成効率 (%)
- ϕ_r : 励起子の輻射再結合確率

スキーム1 発光効率

3.2発光材料とデバイス構造

発光材料に低分子材料を用いた低分子型と、高分子材料を用いた高分子型のデバイス構造を図4に示す。図5に発光材料の一例として、低分子材料、高分子材料、蛍光材料および燐光材料を示す。

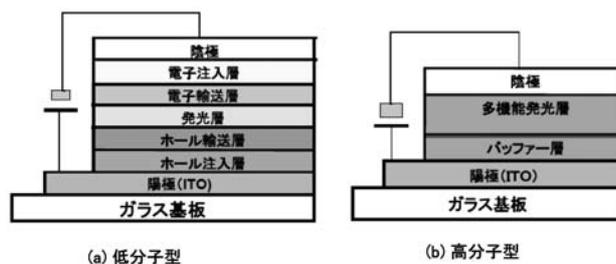


図4 OLEDデバイスの構造

<p>Alq3 低分子系 トリス(8-キノリノラト)アルミニウム</p> <p>Almq3 トリス(4-メチル-8-キノリノラト)アルミニウム</p> <p>BeBq2 ビス(ベンゾキノリノラト)ベリリウム</p> <p>CBP 4,4'-N,N'-ジカルバゾルピフェニル</p>	<p>PPP 高分子系 ポリパラフェニレン誘導体</p> <p>PPV ポリパラフェニレンビレン誘導体</p> <p>PDCHT ポリチオフェン誘導体</p> <p>PVK ポリビニルカルバゾル誘導体</p>
<p>TPB 蛍光材料 1,1,4,4-テトラフェニル-1,3,5-ピリジン</p> <p>Quinacridone 5,12-ジヒドロキノ[2,3-b]アクリジン-7,14-ジオン</p> <p>Coumarin6 3-(2-ベンゾチアゾリル)-7-(ジエチルアミノ)クマリン</p> <p>Rubrene 5,6,11,12-テトラフェニルテトラセン</p>	<p>Ir(ppy)3 燐光材料 トリス(2-フェニルピリジン)イリジウム</p> <p>Eu(TTA)3phen (1,10-フェナントロリン)トリス(4,4,4-トリフルオロ-1-フェニル)-1,3,5-ピリジンジオン)ユーロピウム</p> <p>PtOEP 白金オクタエチルプロフィン</p>

図5 OLED発光材料

3.2.1低分子材料

低分子材料は、図4(a)に示すように有機材料を蒸着により薄膜化・積層化することによりデバイスを作成している。前述の発光原理により蛍光材料と燐光材料に大別できる。蛍光材料は、一重項発光を利用した材料で、光の三原色となる赤(R)・緑(G)・青色(B)ともコスト・寿命・耐久性・成膜性に十分な要件を持った材料が揃っている。

燐光材料は、前述の三重項発光を利用した材料であり、原理的に蛍光材料よりはるかに発光効率がよい。しかし、燐光材料は、寿命、電流増加時の効率低下(Triplet-triplet annihilation)、精製の困難さ、熱耐性の点で蛍光材料ほどの普及はしていない。特に青色はまだ十分な特性を持つ材料が開発されておらず、実用化には至っていない。各社がこの青色燐光材料の開発競争を続けている状況である。

高分子材料と比したとき、低分子材料の欠点として製造技術が挙げられる。デバイスにする際、薄膜製造には透明のガラス基板やプラスチック基板に蒸着させる方法が一般的である。しかし通常のシャドウマスクを用いた色分け成膜技術は、シャドウマスクの精度、熱膨張の観点から大型化が困難である。現状のOLEDが小型のものに限られるのはそのためである。この問題を解決するために様々な手法が提案されている。

3.2.2 高分子材料

高分子材料は、それをインクとした印刷技術の応用により大量・安価・大型のOLEDデバイスが容易に生産できると言われ、次世代の材料として国内外の研究開発が続けられている。しかし高分子材料でOLEDを作製する場合、層間の材料同士が溶解しやすくOLEDに不可欠な前述の薄膜化・積層化することが非常に困難である。そのため単層ないし少数の層の素子構造しかできず、多くの機能(各層の機能)をこれら単数または少数の層や材料に持たせる必要がある(図4 (b))。したがって高分子材料の分子設計への要求は低分子材料のそれに比べて非常に高く、そのため低分子材料に比べて高分子材料の開発は遅れている。しかし、ここ数年で効率、寿命、色度ともに大きな進歩が見られ、赤、緑については実用領域に入りつつある。表1に低分子型と高分子型の比較を示す。

表1 低分子型と高分子型の比較

項目	低分子型	高分子型
分子量	数千	数十～数百万
プロセス	ドライプロセス 蒸着、転写	ウェットプロセス 印刷
パターンニング	シャドウマスク蒸着	インクジェット等の印刷
構造の特徴	複雑な層構造(5~6層) 製造複雑	単純な層構造(2~3層) 比較的容易、 スケールビリティ大
材料の特徴	機能特化型 不純物に敏感 耐熱性と蒸着性の 両立困難	機能集約型 不純物に比較的鈍感 高い耐熱性
課題	層構造が複雑 大面積パターンニング困難	性能、特に寿命に課題 塗り分け技術の確立

4. 駆動方式とバックプレーン技術

4.1 駆動方式

4.1.1 パッシブマトリクス(単純マトリクス、マルチプレックス駆動とも呼ばれる)

パッシブマトリクス駆動は、図6(a)に示すように構造は単純だが瞬間的に光らせるのは1ラインであるため、その瞬間の発光輝度を大きくしている。よってデバイスの寿命が短くなってしまふ欠点がある。また、パッシブ方式では、単純マトリクス駆動のLCDと同様にクロストークによる画質低下が問題になる。LCDではSTN型がパッシブマトリクスに対応する。

4.1.2 アクティブマトリクス

パッシブマトリクス駆動の欠点は大型化や高精細化でより深刻になるため、大型パネルや高精細パネルには図6(b)に示すアクティブマトリクス駆動が採用される傾向にある。TFT-LCDとの違いは、LCDの画素には基本的にTFTが1個であるが、OLEDの場合はスイッチ用と駆動用の2個が必要なことである。TFTにアモルファスシリコン(a-Si)を使用すれば、しきい値電圧の面内均一性が優れていることから、画素ごとのバラツキは少なくなるが経年変化が大きくなる。低温多結晶シリコン(LTPS : Low Temperature Poly Silicon)-TFTを使用すれば経年変化が小さくてすむ代わりに、しきい値電圧のバラツキが大きくなる。いずれの場合も、これらを補償するための画素TFTの構造が複雑になる。

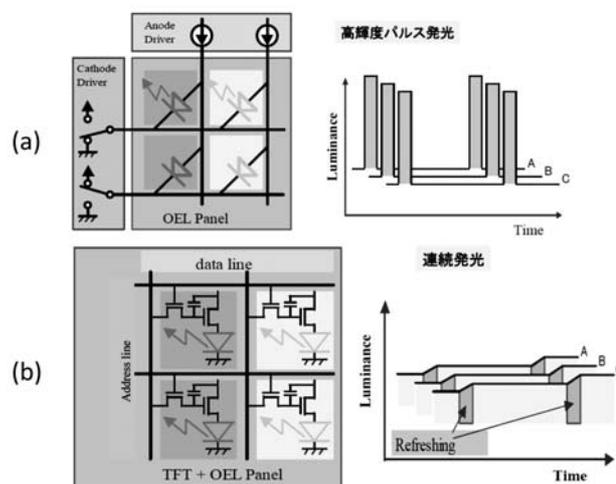


図6 パッシブマトリクス駆動(a)と アクティブマトリクス駆動(b)

図7に示すようにTFT-OLEDの光の取り出し方法には、有機層の「上」からと「下」からの2種類がある。製造工程が比較的簡単とされているボトムエミッション方式は、発光層からの光をTFT基板側の「下」から取り出す方式である。TFT基板にはOLED駆動用の画素回路が存在するため、光取り出し領域が限られてしまい、光利用効率が落ちてしまう。これに対しトップエミッション方式は、画素回路など光をさえぎるものがない封止ガラス側の「上」から光を取り出すので、発光した光を外部に効率よく取り出し、低消費電力かつ長寿命を実現できる。

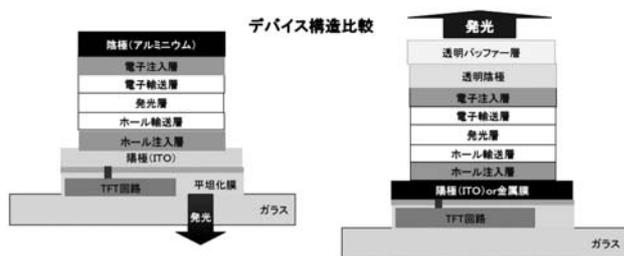


図7 TFT-OLEDのデバイス構造比較

4.2バックプレーン技術

現在実用化されているTFT-OLEDのバックプレーン用TFTの半導体層は、a-Si膜をエキシマレーザ(ELA)でLTPSとしたものである。小型のTFT-OLEDにはELAが用いられているが、課題は基板面内のしきい値電圧をいかに小さくするかである。この方式では、基板サイズが730mm×920mmが最大で、大型TV用のTFT-OLEDの製造技術としては不向きである。そこで、図8に示す各種TFT材料と製法の開発が行われている。中でも、透明酸化半導体(transparent amorphous oxide semiconductor : TAOS)は、移動度が2桁と大きくスパッタリングで大面積の基板に比較的低温で成膜できることから大学および企業の開発が盛んである。しかし、表2から分かるようにチャンバークリーニング法が確立されていない等、量産上の課題

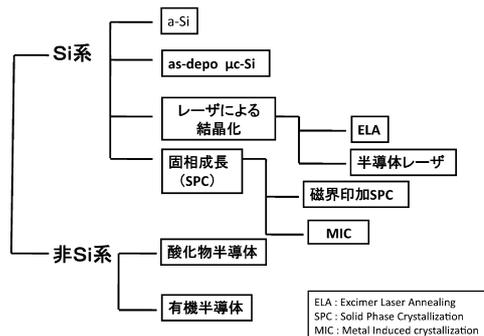


図8 OLEDバックプレーン用TFT材料と製法

表2 バックプレーン用TFTの特性と生産性

	a-Si TFT	μc-Si TFT	LTFS-TFT	TAOS-TFT
TFT駆動能力	×	△	◎	○
Vth均一性	○	○	△	○
Vth安定性	×	△	◎	△~○
設備投資	○	○	×	○
基板サイズ	◎(G10)	△~○	△(G4~G5)	○
チャンバークリーニング	○	○	○	×

TFT特性および生産性の両面からみて、大型高精細TFT-OLEDの商品化を目指すには、現状のOLED用バックプレーン技術はまだ見当たらないと言える。

も残されている。したがって、現状では大型TFT-OLEDの量産に適したバックプレーン技術は未確立と言える。詳細は、第8回、9回に予定しているFPDの製造技術で取り上げる予定である。

5. カラー化と色塗り分け技術

OLEDのカラー化方式には、図9に示すように三色方式、カラーフィルタ方式、色変換方式の3種類ある。

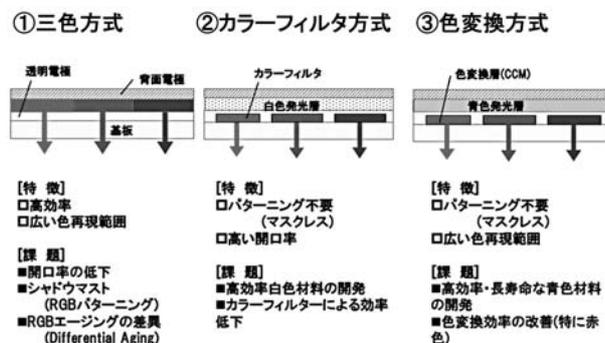


図9 色塗り分け技術

(CCM: color change medium)

5.1三色方式

赤色(R)・緑色(G)・青色(B)の発光層をそれぞれ用いる方式である。色純度を向上させるため、カラーフィルタを併用する場合もある。高精細メタルマスクと低分子材料の蒸着法は、現在実用化されているOLED生産の主流である。この方式は発光効率、色度とも優れているが、R,G,Bの発光層を塗り分けるため開口率が低下する。さらに、大型基板での高精細パターンニングには大きな課題がある。マスク蒸着に代わる技術として、レーザを用いた転写法も開発されている。

これらはいずれも低分子材料を用いたドライプロセスであるが、高分子材料をインクジェット等で印刷するウエツ

トプロセス技術も開発されている。

5.2 カラーフィルタ方式

白色発光層を用い、カラーフィルタを通すことでR,G,Bを得る方式である。この方式は、高精細パターンニングを必要としないので大型化・高精細化対応は現実的と言える。しかし、カラーフィルタを用いることで効率は低くなる。対策として、R,G,Bに白色(W)を加えた方式が提案・開発されている。この方式の課題は、高効率・長寿命の白色OLEDの開発が鍵といえる。

5.3 色変換方式

青色発光層を用い、その発光の一部を色変換層を介して赤色・緑色を得る方式である。波長の短い色への色変換は困難であり、また青色材料の開発も赤・緑に比べ難しく十分な材料も乏しいため青色LEDに希土類錯体などの色変換材料を組み合わせた白色照明の開発も行われている。この方式の特徴は、パターンニングが不要で開口率を大きくできることである。

6. 応用

OLEDの市場規模は、2010年には1億個を超え、2013年には2億個を超えると予測されている。パッシブ型とアクティブ型を数量で見ると、現在はパッシブ型が多い。しかし、パッシブ型は、小型、安価で応用範囲が広く市場を牽引してきたが、発光色が単色で小型に限定され、台頭してきたアクティブ型が、今後は成長すると見込まれている。

6.1 パッシブマトリックス駆動OLED

1997年に、モノクロム低分子型が市販されたのが始まりである。高分子型は、シェーバー用に2002年商品化された。最近では、自動車のダッシュボードに採用されている。採用の理由は他のFPDに比べ視認性に優れ過酷な環境条件に耐えられることにある。

従来の規格型ディスプレイで対応困難だった場所に、画質や見やすさなどを悪化させずに大きさや形をフレキシブルに構成できるスケーラブルなディスプレイが求められている。

2009年CEATECで、世界で初めてパッシブ型OLEDを用いた155型の大型ディスプレイが展示され好評を博した。2010年のCEATECでは、縦横384mm×384mmの標準モジュールを複数組み合わせているいろいろな形状・サイズを構成できる大型ディスプレイの発売が発表された。

モジュールは約8kgと軽く人力で搬入ができるので、従来大型ディスプレイの搬入が難しかった設置場所にもデザインや大きさに合わせてフレキシブルにディスプレイが構成でき、また、従来導入が困難であった曲面の柱や角度のついた壁面などさまざまな場所への設置も可能である。このディスプレイの特徴は、

- ・面発光するOLEDにより、上下左右±80度以上の広視野角
 - ・明るい場所でも見やすい、1,200cd/m²の高輝度と高コントラスト(LED比約2倍)
 - ・新開発の制御技術で駆動し、高精細な画像を表示
- である。今後の展開を大いに期待したい。

6.2 アクティブマトリックス駆動OLED

アクティブマトリックス駆動OLEDは、現在2～3型の小型が主流で携帯電話機のメインディスプレイ等として採用されている。テレビ用は、2007年に11型が発売されたのが世界初である。2010年には、15型が市場投入された。

7. おわりに

TFT-LCDは3型から108型まで実用化され、基本的に同一材料、プロセス、装置等で生産できている。一方、OLEDはここで述べたように材料、バックプレーン技術、色塗り分け技術等がディスプレイサイズに左右されるのが現状である。この点がTFT-LCD技術および産業との大きな違いで、この課題が解決されない限り一大産業に成長できるかは、大いに疑問がある。

競合デバイスのTFT-LCDは性能・コストパフォーマンス共に日進月歩で、OLEDにとっては厄介なムービングターゲットである。単に「固体だ、次世代だ」と言うだけでは、そのハードルは日々高くなっている。最近、消費電力の観点からTFT-LCDに比べOLEDはグリーンデバイスに適しているとの報告や固体照明としての期待は大きい。上述の課題が何時解消されるかが注目されるところである。