

Chapter 1

ディスプレイの技術推移



1. 直視型フラットパネルディスプレイ (Flat Panel Display : FPD)

ディスプレイの進化を図1.1に示したが、デバイスとしてはCRTからLCD, PDPに代表されるFPDの実用化で薄型・軽量・大型化が実現した。しかも、CRTでは実現不可能なモバイル機器への適用も可能になった。中でも、TFT-LCDは既存分野の市場を拡大し、新たなアプリケーションを創出し続けることでFPD市場を大きくしてきたといっても過言ではない。FPDの進化に伴って、バックプレーン用TFT技術も変遷し続けている。今後の展開としては、スーパーハイビジョン(SHV: 4K × 8K)が2020年の東京オリンピックを照準に下準備が進められている。現状のHDTVに比べ臨場感や没入感が増すといわれている。ディスプレイメーカーおよびTVメーカーは高精細化・高品位化による次世代テレビの創出で価格下落の抑制を企んでいるが、消費者視線を忘れると過去の過ちを繰り返すことになりかねない。

なお、ここで用いられているディスプレイはガラス基板を用いたもので、フレキシブル性、形状の自由度、軽薄で堅牢などには大きな課題がある。そこで、注目されR&Dおよび実用化が活発なディスプレイがフレキシブルディスプレイである。

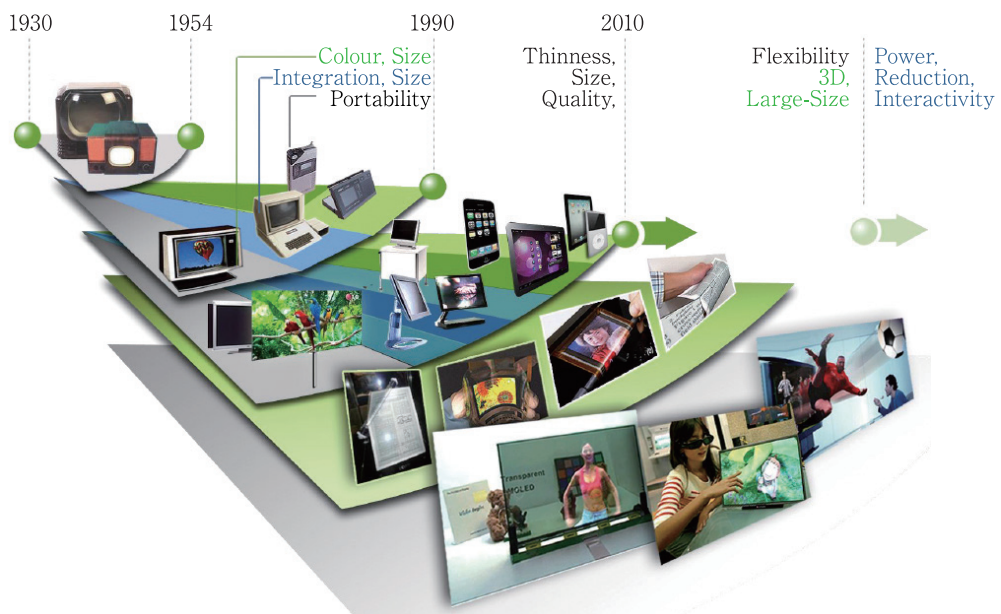


図1.1 ディスプレイの進化(IHS, SID2013 Business Conference)

Chapter 2



Display Week 2017の基調講演



Display Week 2017は米国Los Angeles Convention Centerで5月21～26日まで開催された(図2.1)。シンポジウムは、81のテクニカルセッションで300件の口頭発表と250件のポスター発表があった。参加者数は展示会を含めるとおおよそ8,000人と思われる。ここでは、基調講演から著者が興味を持ったものを紹介する。



図2.1 Los Angeles Convention Center(著者撮影)

今年の基調講演 Keynote Session は、下記の3件の講演が行われた。

- ・ Paul Peng, Chairman and CEO, AU Optronics Corp., Hsinchu, Taiwan, *“The Warring States Era of Display Technologies”*
- ・ Clay Bavor, Vice President of Virtual Reality, Google Inc., Mountain View, CA, USA, *“Enabling rich and immersive experiences in virtual and augmented reality”*
- ・ Sanjay Dhawan, President, Connected Services, HARMAN, Stamford, CT, USA, *“Humanizing the Autonomous Car Experience”*

ここでは、AU Optronics(AUO)社の講演を紹介する。AUO社のCEO, Paul Peng氏は、「ディスプレイ技術の戦争状態」をテーマに講演した。

過去20年間で、TFT-LCDは、PDP, FED, OLEDディスプレイなど競合技術の中で最も支配的なフラットパネルディスプレイ(FPD)技術といえる。というのは、競合技術と比較して、優れた優位性と継続的な技術の向上により、ディスプレイのアプリケーションにタイムリーなソリューションと手頃な価格で贅沢なパフォーマンスを提供し続けている(図2.2)。

図2.2は、CES(毎年アメリカのラスベガスで開催される。コンシューマエレクトロニクスのショーでは世界最大)における液晶テレビの変遷を示す。2004年のフラットTVに始まり、2006年FHD(Full High Definition), 2008年にはBLU(Back Light Unit)が冷陰極蛍光灯からLEDに、2009年にはEdge LEDが採用された。2011年には3Dが各社から商品化されるも不発に終わった。2014年にはUHD(3,840×2,160)4Kが、2015年には画面がフラットから曲面にな

Chapter 3

TFT-LCD の高コントラスト化技術

見本

映像の品質は図1.2に示したように、①空間解像度、②階調(量子化数もしくは量子化率。ピクセルの濃度を濃淡といい、濃淡の数は量子化数(率)または階調数と呼ぶ。)、③時間解像度(フレームレート)、④色再現範囲、⑤コントラスト(輝度範囲)、の5つの要素で表現できるが、①～③が画素の密度を表すのに対し、④と⑤は画素が表現可能な色と輝度の範囲を表しており、それぞれのグループは異なる性格を持っている。これら5要素の進化により映像品質が向上してきたが、これまでの進化は主に解像度が中心であり、SDからHD、そして4Kへと数値で表せるわかりやすい進化であった。一方、数年前にBT.2020としてITU-Rで規格化された広色域は色の表現範囲を広げたが、輝度の表現範囲は数十年前に決められた範囲(SDR: Standard Dynamic Range)のままであり、5要素の中で唯一進化していない要素となっていた。

それが、SMPTEのST2084およびITU-RのBT.2100によりHDRが導入され、ついに大きく広がることとなった。ここでは、HDRにより輝度の表現範囲が拡張される意味について説明する。上述したように、実世界における輝度範囲は非常に広く、 10^{-6} cd/m²程度の夜空から 10^9 cd/m²程度の直射日光まで 10^{15} にもなるダイナミック・レンジを持つが、人の目はその1/3程度のダイナミック・レンジを持ち、さらに瞳の調整により 10^{12} 程度のダイナミック・レンジを得ているといわれている(図3.1)。

カメラの絞りはこの瞳の機能を模しており、図3.2に示すように高性能化された撮像素子のダイナミック・レンジを活用して人の目を満足させるダイナミック・レンジを持った映像を撮像できるようになってきた。また、近年ディスプレイも高性能化しており、人の目を満足させるダイナミック・レンジを持った映像を再生できるようになってきた。ところが、図3.3に示すように旧来のSDR信号では伝送可能なダイナミック・レンジが狭いために、人の目に対して十分なダイナミック・レンジの映像を送ることができなかった。それに対し、図3.4に示すようにHDR信号では十分に広いダイナミック・レンジを伝送することができるので、非常にリアルに見える映像を提供できるようになった。

さらにこれに加えて、広色域は色の表現範囲を拡張するので、HDRと広色域を組み合わせることで表現可能な範囲が三次元的に広がる。それを表したのが図3.5であり、図3.5左側の一般的な色度図を底面として高さ方向に輝度を取ると図3.5右側の立体が構成される(これをカラーボリュームと呼ぶ)。従来の色域とSDRの組み合わせ(内側の立体)に対し、広色域とHDRの組み合わせ(外側の立体)では、表現可能な範囲が非常に大きくなっていることがわかる。このように、広色域とHDRにより拡張された範囲には多くの色が含まれるが、特にSDRの範囲を超える高輝度の色は青い空や海、車の塗装などの「綺麗な色」の再現を可能とし、また、光が当たると白く飛びやすい人の鼻筋は高輝度の色により再生可能となるように、高輝度の色は物体の「立体感」も表現することができる、という点が重要である。

Chapter 4

TFT-LCD の広色再現範囲化技術

見本

SID2016の展示会場では、LG Display社がAMOLED-TVを展示する一方で、Samsung Display社はVA Mode LCD-TVをアピールしていた。OLED-TVと比べ色再現範囲に劣るLCD-TVの対抗策として、ここでは、量子ドットによるTFT-LCDの色再現範囲の改善を述べる。

1. 量子ドット (Quantum Dot : QD) とは

電子を微小な空間に閉じ込めるために形成した直径数～数十ナノメートル(nm)の半導体結晶である。電子をその波長とほぼ同じ大きさの空間に注入すると、三次元のどの方向にも自由に移動できないため、特定のエネルギー状態をとる。このエネルギー状態は、量子ドットの大きさを変えることで、ある程度自由に变化させることができるため、新しい機能を発現する素材をつくることができる。離散的なエネルギー状態はあたかも原子のエネルギー順位のように見えることから、人工原子と呼ばれることもある。量子ドットの種類としては、結晶成長により作製したものと溶液プロセスにより作製したものがある。後者の量子ドットはコロイド量子ドットと呼ばれる。このコロイド量子ドットの特徴は、

- ①室温・大気圧下溶液プロセスによりデバイスを作製可能(図4.1)
- ②材料、粒径により吸収波長を制御可能(図4.2および図4.3)
- ③励起エネルギーを有効に活用可能(Multiple Exciton Generation : MEG, 1光子吸収で2つの励起子が生成, 図4.4)

などである。

図4.5に示すように、直径が1～10 nmの量子ドットはCore/Shell構造を有し、紫外光(たとえば365 nm)励起によって、粒子が小さいほど短い波長の光を蛍光し、粒子が大きいほど長い波長の光を蛍光する。Core材料としてはCdSeが代表的である。最近では、カドミウムを含まない低毒性材料としてInPなどのⅢ－Ⅴ族半導体やSiなどが研究開発されている。Shell材料としてはZnSが使われることが多い。

Ligands(配位子)は、CoreまたはShell表面に存在する不安定な部分(非結合手：ダングリングボンド)をなくし、水あるいは有機溶剤への溶解性や分散性を高める役割がある。先述のように、量子ドットはCoreのサイズにより半導体のバンドギャップが変化するため、ディスプレイ材料として極めて有利な光学特性を示す。つまり、Coreのサイズが大きくなると発光スペクトルが長波長シフト、小さくなると短波長シフトし、サイズ制御により紫外～可視光～赤外の広い波長領域で発光波長を自在にチューニングすることが可能である。さらに、サイズのばらつきを小さくすると、発光スペクトルの半値幅が小さくなるため、色純度の高い発光材料となる。Coreのサイズおよびそのばらつきは、量子ドット合成時の温度や時間、原料の種類

Chapter 5

フレキシブルディスプレイ



数あるFPDの中でOLEDが高コントラスト、高色再現範囲を実現でき、しかも極薄型化も容易であることからフレキシブルディスプレイの本命技術として注目されている。

電子ペーパーの代表的な電気泳動ディスプレイ(EPD)はフレキシブルディスプレイとしての実用化は早かった。しかもこのディスプレイは、メモリ性を有しバックライトが不要な反射型で、しかも偏光板が不要のため、明るく無彩色の表示が得られる。しかし、カラー表示と動画対応への課題が残る。

一方、LCDは大画面・高精細で広色再現範囲など、高品位のディスプレイとして広範囲の用途で実用化されている。しかも、製造技術の完成度は高く、今や中国での生産量がトップになる日も遠くない。しかし、液晶は所詮液体であり、配向が必要なところから極薄型化やフレキシブル化に伴う表示品位の安定化に課題を有する。

1. フレキシブルAMOLEDと製造工程

Apple社のiPhoneにフレキシブルOLEDが採用されることで、関連企業の動きは活発になっている。ここでは、フレキシブルAMOLED固有の製造技術について述べる。

現在量産されているフレキシブルAMOLEDの製造プロセスを図5.1に示す。ガラス基板上にPI膜をコートし、OLED駆動用にLTPS-TFTを形成する。さらに、ディスプレイとしてのOLEDはファインメタルマスク(FMM: Fine Metal Mask)を用いた真空蒸着でRGBの発光層を作製する。OLED材料は酸素や水に弱いので封止をする。次に、ガラス基板の裏面からレーザを照射し、ガラス基板とPI層を剥離し(LLO: Laser Lift Off)、最後にディスプレイサイズに合わせてPI基板を切断する。

モバイル用のLTPS-TFTの基板サイズは、例えばG6(1,500 mm×1,850 mm)である。この

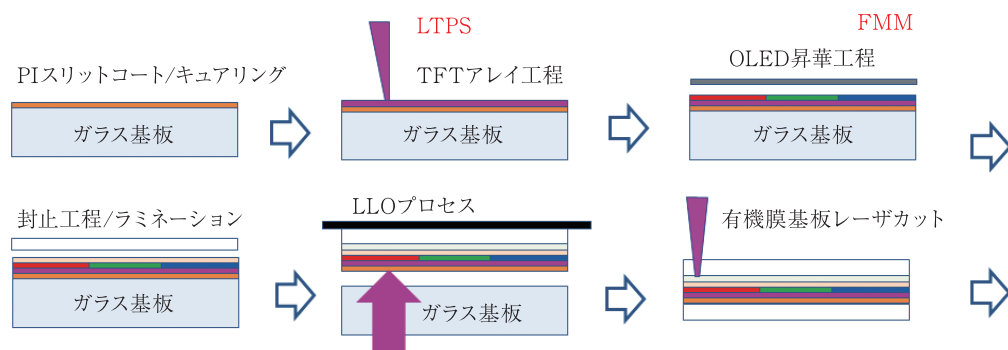


図5.1 フレキシブルAMOLEDの製造工程((株) オプトピア提供資料)

Chapter 6

薄膜トランジスタ (TFT)

見本

1. TFTの種類と特徴

表6.1に現在実用化されている無機系TFTと開発中の有機TFTの特性比較を示す。取り上げたTFTは、アモルファスSi(a-Si)、微結晶(ナノnc-Si)、低温ポリシリコン(Low temperature poly-Si : LTPS)、有機(Organic)および金属酸化物(Metal oxide)である。比較した特性は、伝導型(PMOS, NMOS)、移動度(μ)、駆動能力(オン電流 I_{ON})、しきい値電圧の安定性(ΔV_T)、しきい値電圧の均一性、移動度の均一性、補償回路、量産性、コストおよびフレキシブル基板である。

Chapter 5でフレキシブルディスプレイの生産方式として、R2R方式への期待が大きいと述べたが、これに対応できるのは唯一OTFTであることが表からわかる。現在、スマートフォンのディスプレイに用いられているAMOLEDの駆動にはLTPSが用いられている。ただ、LTPSはa-SiをELAすることで多結晶Siを作製している。したがって、作製に必要な温度は450℃前後である。プロセスとしては、ガラス基板上にPI膜を塗膜し、その上にLTPSを作製後、ガラス基板からレーザを用いた剥離でフレキシブル基板を作製する。枚葉方式で、グリーンプロセスからほど遠いと言わざるを得ない。Si系は、基本的に真空中のプロセスが必須であり、脱真空プロセスには適さない。

金属酸化物半導体は、塗布方式の進捗が目覚ましいので、フレキシブルデバイスとして実用

表6.1 TFTの特性比較(UDDI資料)

Attributes	a-Si	nc-Si	LTPS	Organic	Metal Oxide
Circuit type	NMOS	NMOS/PMOS	NMOS/PMOS	PMOS	NMOS
Mobility(μ)	Low	>a-Si	High	Low	>a-Si
Drive capacity(I_{ON})	Large W/L to Reduce V_G	Small W/L at Small V_G	Small W/L at Small V_G	Large W/L to Reduce V_G	Small W/L at Small V_G
Stability(ΔV_T)	Issue	Stable	Stable	Improving	Improving
V_T uniformity	High	High	Improving	Improving	High
Mobility uniformity	High	Potential high	Improving	Improving	Improving
Compensation circuit	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Manufacturability	Mature	PECVD	ELA	Has potential	Sputtering
Cost	Low	Low	High	Promising	Low
Flexible substrate	Promising	Promising	Uncertain	Promising R2R	Uncertain

Chapter 7

マイクロLED (Light Emitting Diode)



1. マイクロLEDとは

光源の輝度および電力効率、適切な応用を決定する上で重要な要素である。発光ダイオード(LED)は、 $50,000,000 \text{ cd/m}^2$ を超える非常に高い輝度が実現でき、直射日光下での応用にも適している。しかもLEDは電力の光パワーへの変換効率は最高である。材料システムに応じて、60%を超えるエネルギー変換を達成することができる。これらの利点と小さなソリッドステートフォームファクタにより、発光型LEDはあらゆるサイズのディスプレイに適用できる。

最近のディスプレイ用途では、TFT-LCDのBLUとして、LEDは0.5型から100型など、すべてのサイズに使用されている。個々にパッケージ化されたLEDは、大面積のビルボード・ディスプレイの個々の画素としても使用されており、LEDディスプレイの唯一のフォーマットである。残されている応用分野は、競合技術に比べ小さい表示フォーマットの個々の画素としてのLEDである。

HDRテレビや拡張現実感などの新しいアプリケーションでは、大面積ディスプレイと同じ高性能仕様が要求されるが、パッケージ化されたLEDの場合は対応が困難である。例えば、TVディスプレイは、将来のHDRコンテンツ用に、高輝度 $10,000 \text{ cd/m}^2$ を必要とし、AR/MR用メガネに用いられるマイクロLEDディスプレイでは $10,000 \text{ cd/m}^2$ を実現する必要がある。これらの要件は、 $50,000,000 \text{ cd/m}^2$ までの輝度を有することができるLEDによって容易に実現できる。他の発光型ディスプレイと同様に、発光型LEDディスプレイは、LCD(偏光子、カラーフィルタなどで構成)のように大きな光損失なしに、ピクセル光源の輝度および効率を実現できる。

70型よりも小さい高輝度発光型解像度FHDのLEDディスプレイは、パッケージ化されたLEDピクセルから作ることができないため、新しい製造技術の開発が必要である。具体的には、これらのより小さい表示形式では、より小型のLED素子または「マイクロLED」を使用する。緩く定義されたマイクロLEDは、1画素当たりのLED発光面積が $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ または 0.0025 mm^2 未満のデバイスである。マイクロLEDのアレイはマイクロLEDディスプレイを構成し、そのサイズは1~70インチの範囲までである。

マイクロLEDディスプレイの作製方法を図7.1に示す。作製方法は図に示すように、「直視型マイクロLEDディスプレイ」と「マイクロLEDマイクロディスプレイ」の2通りがある。

いずれもマイクロLEDアレイからスタートし、ピック&プレイス技術でトランジスタバックプレーンに実装したものが「直視型マイクロLEDディスプレイ」、半導体集積化技術で実装したものが「マイクロLEDマイクロディスプレイ」である。

直視型マイクロLEDディスプレイでは、マイクロLEDは小さなピクセルピッチで製造され、個々のダイスに分離され、ピック&プレイス技術を用いてアクティブマトリクス用バック

Chapter 8

量子ドットLED (QLED)



コロイド状量子ドットは、特に発光スペクトルが狭く、発光波長が調整可能であり、製造プロセスが容易であることから、LED技術にとって魅力的な材料である。昨今のQLEDに関する活発な研究はその性能に飛躍的な改善をもたらし、製品化に必要な条件を議論できるレベルになってきた。

図8.1に代表的なQLEDの構造を示す。図からわかるように、量子ドットによる発光層の両側に電子輸送層(ETL)および正孔輸送層(HTL)とそれぞれの電極を有する構造である。この構造はOLEDと類似でしかも構成層の膜厚も同程度である。図8.2にQLEDのRGB3色の発光スペクトルをOLEDと比較して示す。図からQLEDの発光波長の半値幅は30 nm以下で、OLEDに比べ狭いことがわかる。

SID2017でのQLED関係の論文を図8.3と図8.4に示す。以下に、この中からいくつか選んだ論文の概要を紹介する。

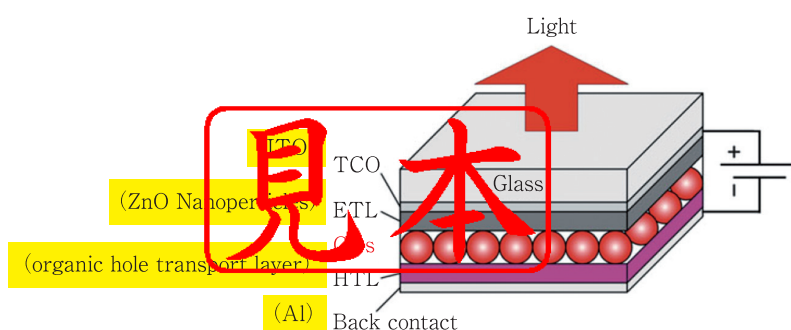


図8.1 QLEDのデバイス構造¹⁾

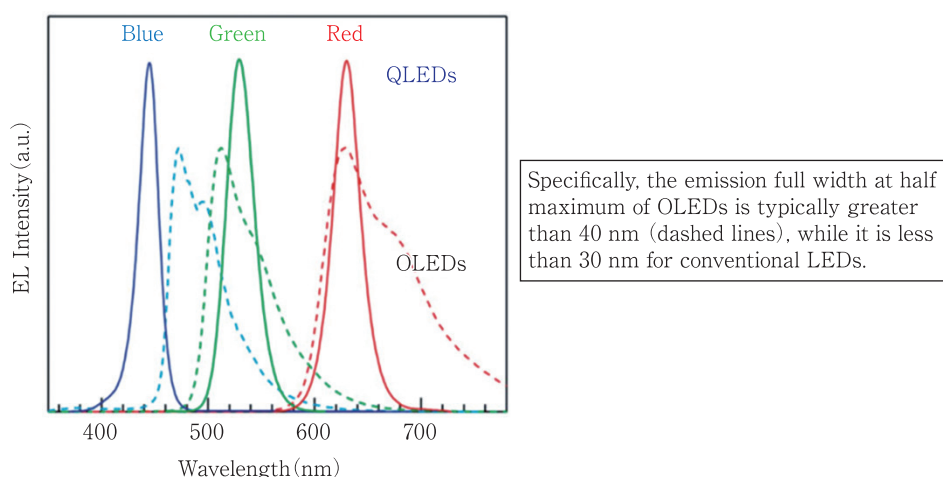


図8.2 QLEDの発光スペクトルとOLEDとの比較²⁾