

フラットパネルディスプレイ概論(10)

FPDの将来展望

Introduction to Flat Panel Display (10) The future view of FPD

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

2010年に始まった「フラットパネルディスプレイ概論」もいよいよ今回が最終となった。FPD業界は一部の企業を除いて元気がなくなっている。また技術者も「夢の壁掛けTV」を実現したものの、かつてのチャレンジ精神を失いつつある。しかし、人間生活にディスプレイは欠かせない存在で、今後ますます重要になると思われる。そこで、最終章はFPD産業の光と影を述べ、次世代FPDとして欠かせない薄膜トランジスタの将来展望と要求される移動度の関係および脱真空・脱フォトリソグラフィによるロール・トゥ・ロール(R2R)への期待について述べる。最後に、若い技術者に託すメッセージを述べたい。

2. FPD産業の光と影

ディスプレイ技術者にとって長年の夢だった「壁掛けTV」は実現した。壁掛けTVに代表されるように、ディスプレイ技術のイノベーションで我々のライフスタイルは大きく変わってきた。

かつてFPDの目標はCRTの置き換えであったが、これからはFPDが新しい世界を切り開いていく時代となっている。FPDの技術革新に伴って、新しい商品が我々の生活の中の溶け込み、ライフスタイルが大きく変貌を遂げている。この流れは今後ますます加速するであろう。身の周りのあらゆる場所に様々な形態のディスプレイが存在する世界「アンビエント」の到来である。

TFT-LCDの生産方式は、半導体の生産方式と同様

にガラス基板毎に処理をする枚葉方式を採用している。ガラス基板サイズは、第1世代(約300mm角)から現在の第10世代(約3m角)となり、設備投資も数千億円と巨額になっている。TFT-LCDはFPDとして揺るぎない地位を確立しているが、更なる特性の向上と相まって省エネルギー、省資源といった環境対応技術分野(グリーン化)でも大きな進展を見せている。ポストフルハイビジョン用ディスプレイを目指す要素技術開発も活発で、この分野の最新情報から目が離せない状況である。今後は、この連載(5)の図2に示したように脱真空、脱フォトリソグラフィによるロール・トゥ・ロール(R2R)方式への期待が高まっている。この方式で生産されるFPDはフレキシブルであり、用いられる材料も無機から有機材料へと変わるものと思われる。図1にディスプレイの技術および市場推移とロードマップを示す。

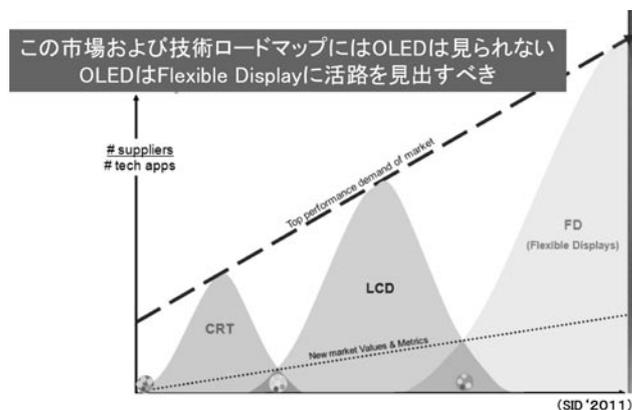


図1 FPD技術および市場推移とロードマップ

一方、調査会社によると2010年以降FPD市場は飽和すると言われている。しかし、FPDは人間生活に欠

かせないデバイスであり(連載(1)参照)、新規デバイスの開発と合わせて新しい応用分野を切り開いてきた。したがって、FPDは持続的成長が可能な産業と言える。図2には、フレキシブルディスプレイ実現への道程を示す。現状のガラス基板を用いたディスプレイの堅牢性(Unbreakable)を高めることから始める。つぎに、曲げられるBendable Displayへと進化し、最終目的であるRolled DisplayとしてのFlexible Displayを実現する。ここで用いられるであろうディスプレイとしてはOLEDやEPD(電気泳動ディスプレイ、電子ペーパー)が考えられる。

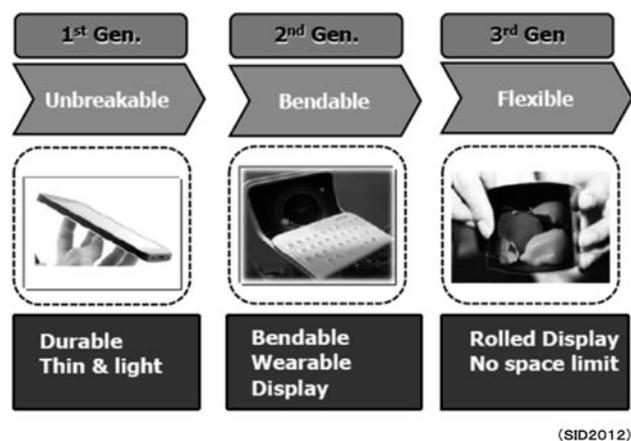


図2 フレキシブルディスプレイのロードマップ

日本のFPDメーカーは、世界のFPD産業に対して多大の貢献をしてきた。最大の貢献は、技術者が寝食を忘れてFPDという技術を研究開発から量産技術確立し製品開発に導いたことある。その過程で、日本メーカーは多くの経験やノウハウを積んできた。例えば、製造装置、部材、製造・プロセス技術など豊富な経験とノウハウを持っている。しかし、現状は、日本のFPDメーカーに元気のある会社は少なく、技術者もかつてのチャレンジ精神を失いつつある。

FPDメーカーおよびFPD-TVメーカーは軒並みに赤字である。しかも、アジアのメーカーが赤字で苦しんでいるのは裏腹に、欧米の部材メーカーやセットメーカーは巨額の利益を得ている。このパターンは昨今、固定化してきたように思える。一橋大学沼上幹商学部長は、「ディスプレイ産業の巨額投資に対する極端な反省論は思考停止を生む」と警告する¹⁾。さらに「日本企業には戦略思考力を高める以外に競争力向上の道はない」と言い切る。我々技術者には、今一度消費者目線

に立ち戻り、消費者が「わくわく」する商品開発に取り組む必要がある。技術開発は、「儲かって何歩の世界」である。我々にはビジョンを持ち、目標に向かって果敢に挑戦することが求められている²⁾。

ここからは、次世代FPDとして欠かせない薄膜トランジスタの将来展望と要求される移動度の関係、脱真空・脱フォトリソグラフィによるロール・トゥ・ロール(R2R)への期待について述べる。

3. 薄膜トランジスタの将来展望

薄膜トランジスタが電子デバイスとして初めて実用化されたのは、a-Si TFTとLCDの特徴を上手く活かしたa-Si TFT-LCDである。当初は、3型の小型ディスプレイからは始まった商品化は、現在では100型を超えるものが商品化されていることは既に述べたとおりである。ディスプレイの面積化と相まって、高精細化への需要が高まっている。2003年から始まった地上デジタル放送に対応したフルHD(1080 × 1920)が既に商品化されている。また、TFT-LCDの応答特性を改善するために、フレームレートが従来の倍速(120Hz)駆動のデバイスが商品化され、3D対応のLCD-TVでは4倍速(240Hz)が実用化されている。

小型ディスプレイから大型ディスプレイに至るまで、基本的なデバイス構造およびプロセスを順守できるデバイスは、数あるフラットディスプレイ中a-Si TFT-LCDのみである。しかし、更なる高精細化および高フレームレート対応には、現状のa-Si TFTは限界である。高精細化の動向として、2005年10月から配信放送が開始されたデジタルシネマ[2k × 4k(2160 × 4096) 1k × 2k(1080 × 2048)]や2015年試験放送開始、2020年から2025年に実用放送が予定されているスーパーハイビジョン(4k × 8k)には、a-Si TFTのスイッチング特性では対応できない。TFTのスイッチング速度は、移動度に逆比例するため、高精細化、ハイフレーム駆動を実現するにはa-Si TFTの移動度(0.5cm²/Vs)の10倍以上の移動度を有するTFTが求められる。

4. TFTに要求される移動度³⁾

TFTには、選択時間 T 内に、液晶容量 C_{LC} および蓄

積容量 C_S を所定の電位に充電する能力が求められる。TFTの選択時間 T (s) は、走査線数 n 、60Hzを基準とした駆動フレーム比 m を用いて、

$$T = \frac{1}{60 \times n \times m} \quad (1)$$

で表され、高解像度化、駆動フレームレートの高速化に伴ってTFTの選択時間 T が短縮される。

一方、TFTによる画素充電に必要な時定数 τ (s) は、液晶容量 C_{LC} (F)、蓄積容量 C_S (F)、TFTのON抵抗 R_{TFT} (Ω) を用いて、

$$\tau = R_{TFT} \times (C_{LC} + C_S) \quad (2)$$

で表され、大面積化、すなわち画素容量 ($C_{LC} + C_S$) の増加とともに充電に必要な時定数 τ が増加する。

TFTのON抵抗 R_{TFT} (Ω) は、TFTが線形領域で動作している場合、電界効果移動度 μ (cm^2/Vs)、チャネル長さ L (μm)、チャネル幅 W (μm)、ゲート絶縁膜の単位面積当たり容量 (C_{INS})、TFTのゲート電圧 V_G (V)、ドレイン電圧 V_D (V)、しきい電圧 V_t (V) を用いて、

$$R_{TFT} = \frac{V_D}{I_D} = \frac{1}{\mu \frac{W}{L} C_{INS} (V_G - V_t)} \quad (3)$$

で表される。

TFTによる画素の充電が、選択期間内に余裕をもって終了するには、 $\tau \ll T$ を満足する必要がある。これよりTFTの要求移動度は、

$$\mu \gg \frac{(C_{LC} + C_S)}{\frac{W}{L} C_{INS} (V_G - V_t)} \times 60 \times n \times m \quad (4)$$

で表現され、大面積化による画素容量の増大、高精細化による走査線数 n の増加、駆動フレームレート比 m の増加とともに、TFTには高い移動度が要求される。

表1は、ある条件下での要求される移動度を、表示

表1 要求される移動度と表示容量、フレーム周波数の関係

	1920 x1080 (HD)	4k x 2k	8k x 4k (Super HD)
60Hz	1.0 cm^2/Vs	2.0 cm^2/Vs	4.0 cm^2/Vs
120Hz	2.0 cm^2/Vs	4.0 cm^2/Vs	8.0 cm^2/Vs
240Hz	4.0 cm^2/Vs	8.0 cm^2/Vs	16.0 cm^2/Vs

容量、フレーム周波数の関係をシュミレーションした結果である。表から、表示容量がHD (1920×1080)、フレーム周波数 60Hz 駆動に要求される移動度は 0.9 cm^2/Vs と実情の2倍の値が必要であることが分かる。

a-Si TFT-LCDは表示容量の増加やフレーム周波数の増加に伴って、TFTの書き込み時間が減少するため、トランジスタのサイズを大きくしたり、駆動電圧を上げたりすることで対策している。しかし、このような対策では、開口率の低下や消費電力の増加などデバイスとして好ましい状態ではない。そこで、書き込み特性を向上することが重要な課題になってきた。表2に実用化されているSi系TFTと一部実用化が始まった酸化物半導体TFT (Metal Oxide TFT) と開発中のナノ結晶Si (nc-Si TFT) および有機半導体TFT (OTFT) の特性と特徴の比較を示した⁴⁾。図2に示したフレキシブルディスプレイ用TFTの有力候補は有機半導体TFT (OTFT) と思われる。

表2 各種TFTの特性と特徴

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	Uncertain

5. 脱真空・脱フォトリソグラフィによるロール・トゥ・ロール(R2R)への期待

a-Si TFT-LCDおよびLTPS TFT-LCDは、技術者の寝食を忘れた努力の結果、CRTを凌駕する性能と高度の生産性を実現し、大きなビジネスとして開花した。デバイスの観点から見ると、TFT-LCDは、CRTに比べ軽薄短小のデバイスであり、CRTでは実現不可能な領域のマン・マシン・インターフェースとしての地位を確立

したといえる。しかし、課題がないわけではない。例えば、生産技術面では、ライン構築に当って巨大なクリーンルーム(建屋)と重厚長大な設備を必要とする産業になっている。また産業の海外流出も大変重要な問題となっている。

そこで、TFT-LCD生産工程における省資源、省エネルギーを実現しなければならない。とりわけ、TFTアレイ工程の革新的な生産技術開発が求められる。確かに、TFT-LCDは、CRTに比べて省エネルギーのデバイスといえる。しかし、生産に必要なエネルギーの観点からは、到底CRTを凌駕しているとはいえない。TFT-LCDを生産するのに必要な電力、純水、薬液等はCRTの比ではない。そこで、真にCRTを凌駕するために生産技術としての課題を列記すると、

- ① 脱真空プロセス
- ② 脱フォトリソグラフィ
- ③ 低温プロセス
- ④ 枚葉プロセスからロール・トゥ・ロールプロセス
- ⑤ 環境に優しいプロセス、地球と共生する技術^{ともいき}の確立などが急務である。

TFT-LCD産業は、装置産業と労働集約産業から成り立っている。基板サイズの大型化は、装置産業としての投資生産性の向上に大いに貢献してきた。既に3m角の超大型基板を用いて量産されているが、さらなる大型化には疑問視する向きが多い。

また、TFT-LCD産業は半導体産業に比べ直材費比率が大きい産業でもある(TFT-LCDモジュールのコストに占める直材費比率は70%から80%)。TFT-LCDは、図3に示すように、偏光板、位相差板等の光学フィルム、タッチパネル、バックライトユニット(BLU)等のモジュール部材を使用している。図3には比較のためOLEDと構成部材のコスト割合を示す。そこで著者はそれらの部材をセル内に形成するいわゆる「In-Cell化」を提唱している⁵⁾。In-Cell化によって、

- ① TFT-LCDモジュールの薄型化、軽量化、堅牢性および信頼性の向上
 - ② TFT-LCDモジュールの部材・材料費を付加価値としてパネルメーカーに取り込む
 - ③ 労働集約的な生産工程の削減による産業流出の回避
 - ④ 新規デバイスの創生
- などが期待できる。

OLEDは自発光のため、バックライト、カラーフィルタ、偏光板が基本的に不要

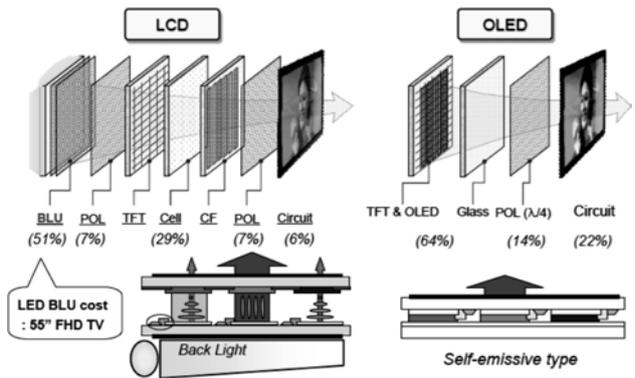


図3 LCDとOLEDのコスト構造比較

さらにデバイスの性能でも取り組むべき課題は残されている。まずデバイスの入力に対する出力、いわゆる効率の問題である。現状のTFT-LCDの構成は、表示モードによらず2枚の偏光板とカラーフィルタで構成されている。この構成を用いる限り原理上、最大でも15%以上の効率を実現することは不可能である。しかも、TFTの開口率に起因する透過率の低減があり、BLUの効率を考慮すると、図4に示すようにトータルの効率は数%に過ぎない。この点からみても光の取り出し効率は、必ず解決しなければならない問題である。

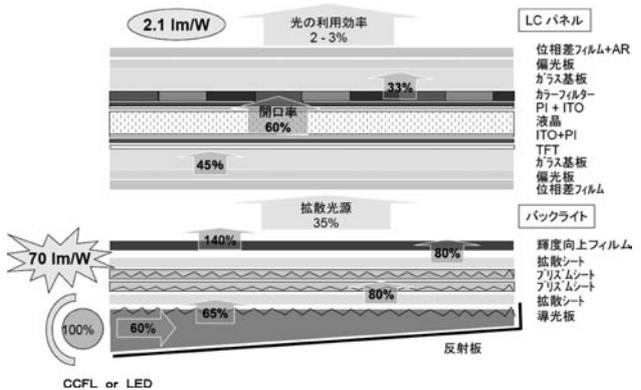


図4 TFT-LCDの光利用効率

デバイスの表示品位でも解決しなければならない問題はあ。TFT-LCDはコントラスト、色再現性、応答時間等でCRTと同等もしくはCRTを凌ぐ性能が実現されている。しかし、ディスプレイとしての質感、光沢等の感覚的な領域まで表現できる状況には至っていない。

連載(6)でFPDを支える部品・材料として「タッチパネル」をとりあげた。タッチパネルは、機器とのインターフェースとして重要であり、キーボードやマウスに比べ直

観的に使えることから飛躍的に成長している。しかも、今年（2012年）はソニーからIn-Cell TPを用いたTFT-LCD（Pixel Eyes “ACX433BLN”）の量産が始まり、正しくIn-Cell TP元年と呼ぶに相応しい年となった。この技術は、従来のタッチパネル技術では成し得なかった新しいマン・マシン・インターフェースを切り開くものと期待される。新技術がビジネスの糧になるように、しかもメーカーの技術者が開発の喜びを分かち合えるようにしたいものである。タッチパネルは最早 FPD を支える部品ではなく、FPD と一体化したデバイスとしてなくてはならない存在となった。

図5にタッチ技術の過去・現在・未来を示す。光センサ内蔵技術でスキャン機能が可能となる。我々が日常用いている複写機やファックスでは、ラインセンサによるドキュメントの取り込みが行われている。しかし、これらの機器にはラインセンサの走査機構が必要であるため、機器のコンパクト化などには適さない。これに対し、フォトセンサアレイ内蔵のデバイスを用いることでこの機構が不要となる。瞬時に2次元のドキュメントの読み込みが可能となり、しかも同じデバイスで表示できる。すなわち入力/出力一体型デバイスが実現する。その先は、タッチしなくても入力できるジェスチャ機能やエアータッチに進展するとともに、対話型ディスプレイが主流となり、タッチデバイスとディスプレイデバイスは切っても切れない関係となる。インプット・アウトプット一体型デバイスの時代の到来である。

6. 技術者はロマンを求めて Never Give-Up の精神で

TFT-LCD の本格的な研究開発が始まって四半世紀。私は幸いにしてそのスタートからこの研究に携わり、発展の歴史とともに歩むことができた。その間、TFT-LCD 技術と産業の典型的な特質を目の当たりに見、多くのことを学習した。ここでは、若い技術者の皆さんへ伝えたいことを述べる²⁾。

故東大名誉教授の多田富雄氏が朝日新聞に掲載された記事⁶⁾の中から一部紹介する。『このごろの研究者は、なんでも競争、後から参入して成果の先っぽだけ横取りすることをなんとも思っていない。そんな競争は、嫉妬と憎しみが残るだけ。文部科学省も過去の成果だけを重んじて、これから何をやりたいかということを開こうともしない。勢い成果主義と仁義なき戦いに走ることになる。やせ細った、小粒の研究しか育たない。何より未来への夢が無い。若い研究者は、小さい競争に現を抜かすのではなく、自分のアイデアを引っさげて、世界の研究者のコミュニティーに参加する心がけが大切である。そのためにも自国の文化を知ることは必須である。また、他国の文化を知ることも、競争相手の科学的モチベーションを知る大事な手がかりである。いくら英語で論文を書いても、競争一辺倒のぎすぎすした論文しか生まれない』。

最近、日本における a-Si TFT-LCD 産業は、一部の企業を除いて元気がなくなりつつある。また、技術者もア

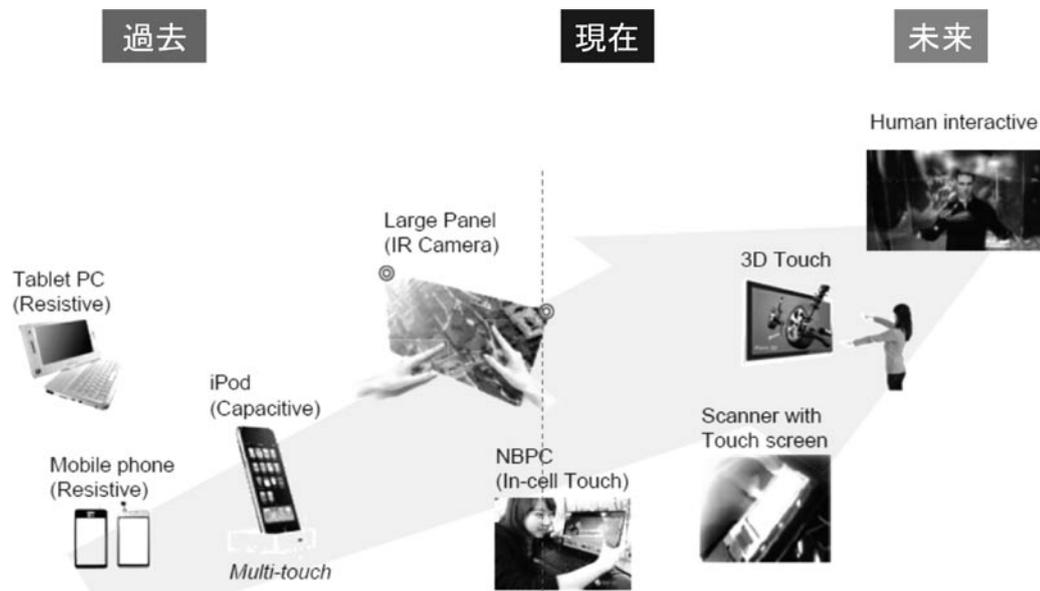


図5 タッチ技術の過去・現在・未来

メリカナイズされた人事制度の導入により、リスクを伴う研究開発には取り組み難くなりつつある。このような状況の中で、最近の関連技術者は夢と自信を失いつつある。

元立命館大学・末川博総長の言葉に、「青年は未来を信じ未来に生きる。そこに青年の使命がある」がある。私は、ここで言われている「青年」とは、肉体的に「青年」のみならず精神的にも「青年」を意味しての言葉と理解している。死ぬまで1日19時間、数学の問題を解き続けた鬼才の数学者ポール・エルデーシュは、「頭を働かせている人は若々しい」と弟子たちに話していたという。また彼は、研究を止めた、つまり脳細胞の活動を停止した人を「死んだ」といい、人が死んだ時は「去った」と表現したという。

TFT-LCDはいくつかのBreak Throughを経て、現在に至っている。しかし、克服しなければならない課題も多々ある。もちろんこれらの技術的課題を突破するのは技術者の役目である。しかし忘れてはならないことは、技術者自身のものの考え方、および仕事の進め方に常にBreak Throughが求められることである。独創的な技術で、夢と情熱を常に持ち、しかもNever Give-Upの精神で果敢に挑戦する。そのことで、真にCRTを凌駕した理想のTFT-LCD技術が確立すると私は信じている。技術者には、未来を信じ大きな夢を抱いて、日々夢を実現するために失敗を恐れず果敢に挑戦する精神と実行力が問われている。

イラク戦争やリビア内戦に見られるように、地球上には残念ながら戦争が絶えない。東京電力の原発事故は、人災と言われながらも加害者(東京電力と国)と被害者(国民)の区別なく「日本の文化」で済まそうとする風潮がある。日本人によって何の罪もない人々から命と土地および生活を奪ったことを忘れてはいけぬ。この被害は未来永劫続くかもしれない。我々には地球との共生(我々の生きている時代)だけではなく、共生(ともいき)(開発した技術や製品が孫末代に与える影響を考慮すること)が重要である。技術者以前に一社会人として、世界が戦争や核兵器および原発のない平和で幸せな時代になるよう常日頃関心を持ち、地道な活動が重要である。

ホシデンでa-Si TFT-LCDの黎明期から研究開発や事業化に携わり、ソニーではLTPS TFT-LCDの事業化

と開発に従事した。小学校卒業の文集に書いた「科学者」の夢は残念ながら実現できなかった。しかし、2008年3月末まで通算30年間もTFT-LCDの技術開発と事業化に携わった。技術者にとってこのようなことは多くの機会があることではないと思う。本当に技術者冥利に尽きる。

顧みれば、先生、上司、先輩、同僚、仲間の多くの方々と、両親と家族の支えがあって今の私がある。『福、受けつくすべからず』(法演の四戒:瀬戸内寂聴著「美しいお経」より)を肝に銘じ、今後ともTFT分野の学界に少しでも寄与できれば幸いである。

7. おわりに

TFT-LCDはフラットパネルディスプレイとして揺るぎない地位を確立しているが、更なる特性の向上と相まって省エネルギー、省資源といった環境対応技術分野でも大きな進展を見せている。ポストフルハイビジョン用ディスプレイを目指す要素技術開発も活発で、この分野の最新情報から目が離せない状況である。ここで紹介した技術が確立し、新規フラットパネルディスプレイ(FPD)、とりわけフレキシブルディスプレイを用いた商品が人々に感動を与えてくれることを期待している。読者には新規FPDの実用化に参画され、「知」の創造に寄与されることを切望する。

長期間にわたり連載を読んで頂いた読者の方々に感謝いたします。また、この連載の企画をいただいた関東化学の関係者の方々に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 沼上 幹. 朝日新聞朝刊. 2011.11.8
- 2) 鶴飼育弘. 研究開発リーダー. 2009, Vol.5, No.12, 70-77.
- 3) 鶴飼育弘. マイクロ・ナノx領域の超精密技術. 日本学術振興会 将来加工技術第136委員会編, オーム社, 2011, 183-201
- 4) 鶴飼育弘. 液晶. 2011, 15(3), 201-216
- 5) Ukai, Y. Proceeding of the XIV International Workshop on the Physics of Semiconductor devices. IEEE, 2007, 29-34
- 6) 多田富雄. 朝日新聞朝刊. 2008.6.18