3章 有機ELディスプレイ

3-2 フレキシブル有機EL技術

～技術動向、長寿命化技術～

正会員 藤崎 好英[†]

キーワード：フレキシブル有機ELディスプレイ，プラスチック基板，薄膜トランジスタ，酸化物TFT，逆構造有機EL

1. まえがき

プラスチック基板を用いたフレキシブルディスプレイは、現行のガラス基板を用いたフラットパネルディスプレイよりも格段に軽量で薄く、落としても壊れにくいなどさまざまな利点を併せ持っている。さらに、柔軟性というこれまでのディスプレイにない新たな付加価値を備えることで、従来の視点に捉われない幅広い応用展開が可能と言える。特に、表示デバイスに有機EL (Electro Luminescence) 素子を用いたフレキシブル有機ELディスプレイは、バックライトを必要としないため超柔軟・薄型のディスプレイを実現可能である。また、有機ELは色再現性、応答性、視野角特性などに優れている。これらの利点から、フレキシブル有機ELディスプレイは、中・小型のスマートフォン・タブレット端末、情報サイネージをはじめ、スーパーハイビジョンなど次世代の高臨場感放送用の大画面シート型ディスプレイまで幅広い応用が期待されている¹⁾²⁾。

フレキシブル有機ELディスプレイの研究開発は2005年頃から活発になった。当初は、プラスチック基板の耐熱性の制約もあり、低温プロセスで作製可能な有機薄膜トランジスタ (Thin Film-Transistor：以下TFT) を駆動素子に用いたディスプレイ開発が先行し、先駆的な報告がなされた^{3)～5)}。その後、プラスチック基板など周辺材料技術の急速な進展とディスプレイ駆動バックプレーン用薄膜トランジスタの作製技術および性能向上により、基礎レベルの段階であったフレキシブル有機ELディスプレイの研究は一気に実用化を目指した開発フェーズへと移行してきている。実際に、10インチ前後の画面サイズを中心に高画質・高精細のディスプレイが学会・展示会で報告・デモンストレーションされるとともに、韓国LG DisplayやSamsungなどで一部スマートフォンなど商品化も進んでいる⁶⁾。

本稿では、国内外のパネルメーカーが開発しているフレキシブルディスプレイの動向について解説するとともに、実

用化に向けての今後の課題について述べる。また、大気安定な逆構造有機ELを用いたディスプレイの試作例についても紹介する。

2. フレキシブル有機ELディスプレイの開発動向

フレキシブルディスプレイを開発する上での重要なアイテムとして、高耐熱・低線膨張のプラスチック基材開発、高性能な薄膜トランジスタ形成技術の確立、プラスチック基板上での有機ELの高精細パターン、封止技術および長寿命化などが挙げられる。フレキシブルディスプレイ用基材として、これまでPES (ポリエーテルスルホン)、PEN (ポリエチレンナフタレート)、ポリイミドなど多種多様なプラスチック基材が検討されてきた。近年の開発においては、300℃以上の高い耐熱性を有し、TFTプロセスと親和性の高いポリイミドが主流となっており、フィルムタイプやキャリアガラスに直接塗布形成するワニスタップなど多種材料が開発されている。TFTについては、アモルファスシリコンTFT、低温ポリシリコンTFT、酸化物TFT、有機TFTが広く検討されてきた。特に、InGaZnO (IGZO) を代表とする酸化物系半導体の進展が著しく⁷⁾、フレキシブル有機ELディスプレイ用駆動TFTの有力候補となっている。酸化物TFTは、アモルファスシリコンTFTとプロセス類似性が高く既設の製造ラインを活用できること、比較的低温プロセス (300℃以下) で10 cm²/Vs以上の高いキャリア移動度を実現できることから、材料からプロセスの多岐に渡り研究開発が急ピッチで進んでいる。これまで課題となっていたバイアスストレス印加時の不安定性 (閾値電圧変動など) の改善をはじめ、移動度が20 cm²/Vsを超える高移動度半導体材料の報告なども相次いでいる^{8)～10)}。一方、有機ELについても、高精細パターンニング技術や効率改善に向けた研究が進んでいる。パターンニングについては、FMM (Fine Metal Mask) を用いたRGB蒸着塗り分けと、白色有機ELとカラーフィルタアレイ (WOLED+CF) を組合せた技術に大別されるが、スケーラビリティと高精細化に優れたCF方式を採用するのが最近の主流となっている。

[†] NHK 放送技術研究所

"Technologies for Flexible OLED Display: Technology trend, air-stable OLED" by Yoshihide Fujisaki (NHK Science&Technology Research Laboratories, Tokyo)

表1 SID 2015で報告・展示されたフレキシブル有機ELディスプレイ

	ジャパンディスプレイ	パナソニック&imec	SEL&Advanced Film Device		NHK	LG Display	BOE
画面サイズ	5.2	18	81 (13.5"×36枚)	13.3	8	18	4.88
画素数	1920×RGB×240	QVGA 320×RGB×240	8K×4K	8K×4K 4320×RGB×7680	VGA 640×RGB×480	WXGA 810×RGB×1200	640×RGB×432
解像度	423 ppi	250 ppi	108 ppi	664 ppi	100 ppi		194 ppi
基 盤	—	ポリイミド	プラスチック		PEN	ポリイミド	ポリイミド
TFT素子	LTPS	IGZO (セルフアライン)	IGZO (C軸配向結晶)		ITZO	IGZO	LTPS
有機EL素子		トップエミッション	トップエミッション		ボトムエミッション	トップエミッション	トップエミッション
画素構造	白色EL+CF	赤単色	タンデム構造白色EL+CF		RGB塗り分け	RGB塗り分け	—
特 徴	厚さ<0.05 mm	4K×2Kスピードの ゲートドライバ内蔵	瓦タイプ	フォルダブル	大気安定な 逆構造有機EL	1枚パネルでは 画面サイズ最大 湾曲R=30 mm	湾曲 R=4 mm
リファレンス (SID論文No.)	展示会	29.4	70.2	18.4	65.3	65.1	9.2

この5月に開催されたディスプレイ業界で世界最大の国際会議SID (Society for Information Display) では、酸化物や低温ポリ Si-TFT を駆動素子に用いたフレキシブルディスプレイを中心に注目する報告・展示デモが相次いで行われた。表1に、SID 2015の報告例をまとめた。開発の全体的なトレンドはディスプレイの高精細化と大画面化に分けられるが、特に前者の進展が顕著で、中小型のモバイルディスプレイ応用を視野に400 ppi以上の高精細なフレキシブル有機ELディスプレイが開発されるに至っている。また、折り曲げ可能なフォルダブルタイプやタッチセンサ機能を搭載するなど新たなユーザインタフェースを意識した機能性の高いフレキシブル有機ELディスプレイも報告されている。以下に、開発例を紹介する。

ジャパンディスプレイは、423 ppiの解像度を持つ高精細フレキシブルOLEDを出展。駆動には低温ポリ Si-TFT を用いている。フルHD画素のディスプレイで完成度の高い画像表示をデモした。またパナソニック/imecの共同グループは、酸化物TFTを駆動素子に用い、ゲートドライバを内蔵したQVGA画素のパネルを報告し、4K×2K相当の駆動スピードを実証した。半導体エネルギー研究所 (Semiconductor Energy Laboratory: SEL) と Advanced Film Deviceの共同グループは、13.5インチ、HD画素のフレキシブルOLEDパネルを36 (縦6×横6) 枚組合せた瓦タイプのマルチディスプレイを報告。画面のトータルサイズは81インチに及び、8K (7680×4320) 画素を有する。駆動にはC軸配向結晶のIGZO-TFTを使用。その他、13.3インチで8K画素を有する超高精細664 ppiのディスプレイや8.67インチのタッチセンサ機能を内蔵した三つ折り可能なフォルダブルディスプレイも報告した。一方、海外メーカーからも発表が相次いだ。LG Displayは、1枚パネルとしては世界最大となる18インチのトップエミッション型OLEDディスプレイを展示デモ。コプラナー型のIGZO-TFTを駆動バックプレーンに採用し、画素はRGBを塗り分けして形成 (シャドーマスクを使った蒸着塗り分け)。基板にはポリ

(a) 81インチの瓦タイプディスプレイ¹¹⁾ (b) 18インチトップエミッションディスプレイ¹²⁾

図1 SID2015で報告されたフレキシブル有機ELディスプレイの一例

イミドフィルムを採用し、ALD成膜を使ってガスバリア性の高い封止膜を形成している。また、中国メーカーの台頭も著しく、BOEは4.8インチのトップエミッション型パネルや、9.8インチの透明タイプのフレキシブルOLEDディスプレイを出展した。図1に、ディスプレイの開発例を示す。

3. 大気安定な逆構造有機EL素子とディスプレイへの応用

小型サイズを中心にフレキシブル有機ELディスプレイの研究開発が急ピッチで進んでいるが、実用化に向けてはまだ課題が残る。最も大きな課題は有機ELの長寿命化である。プラスチック基板はガラスに比べ酸素や水蒸気を透過し易

図2 (a) 逆構造有機EL素子の構造と(b) 保存寿命の評価結果

いため、有機EL素子が劣化し易い。このため、無機・有機膜を積層した多層構造のバリア膜を形成してOLEDの劣化を抑制するアプローチが一般的に採用されている。しかし、複雑でコストの高いプロセスが必要となり、ディスプレイの実用化に向けてボトルネックとなっている。また大画面ディスプレイを想定した場合に、ピンホールの少ないバリア性能の高い積層膜を均一に形成することは極めて困難と考えられる。これに対し、OLED素子自体の大気安定性を高める研究が盛んとなってきた。特に、アルミやアルカリ金属など大気中で不安定な陰極材料を使わない逆構造型の有機EL素子 (Inverted Organic Light Emitting Diode: 以下 iOLED) が注目されている^{13) 14)}。図2(a)にiOLED素子の断面構造を示す。一般的な有機ELの構造(図2(a)右)と電極積層構造が逆(陽極と陰極が逆配置)となっており、有機層より先に陰極、電子注入層を形成するのが特徴である。これにより、先に形成する陰極、電子注入層の形成に際し、有機層にダメージを与えやすい成膜手法を用いることができるため、陰極にITOなど安定な電極材料を、電子注入層に不活性な材料を適用することができ、素子の劣化を抑制することができる。筆者らのグループは、実際に量産が容易なバリアフィルム(水蒸気透過率 10^{-4} g/m²/day)を用いた際の大気安定性を比較した。図2(b)に結果を示す。通常の有機EL素子は15日経過から顕著な輝度劣化、ダークスポットの発生が観察されたのに対し、iOLED素子では250日以上劣化が見られず安定した発光状態を示した¹⁴⁾。

図3 (a) 試作した逆構造有機EL素子を用いたフレキシブルディスプレイの構造と(b) 支持ガラス基板からディスプレイを剥離する様子

さらに、iOLEDのディスプレイ適用性と動作を検証するため、8インチサイズのフレキシブルディスプレイを試作した^{15) 16)}。以下にそのプロセスや試作結果を紹介する。

図3(a)に試作したフレキシブルディスプレイの断面構造を示す。粘着層を形成したキャリアガラスにプラスチック基板をボンディングしてディスプレイを試作した。本試作においては、比較的安価で高透明性、低線膨張率を有するPENフィルムをプラスチック基板として採用した。まず、下地層を形成した後、ゲート電極をパターンニング形成した。次にゲート絶縁膜(SiO₂)、半導体層(IGZO)を順次成膜し、アイランド化およびビアホールを形成した。その後、ソース/ドレイン電極をパターン形成した後、アニール処理を行い、酸化物TFTのバックプレーンを作製した。本プロセスでは、PENフィルムの耐熱性を考慮して200℃以下の低温プロセスで作製した。次に、バンク構造を予め形成した画素電極上にiOLED用の電子注入層、電子輸送層を形成し、発光層(赤、緑、青)はマスク蒸着により塗り分け形成した。正孔輸送層、正孔注入層、陽極を順次形成した後、プラスチック基板をキャリアガラスから剥離(debonding)して(図3(b))、ディスプレイを試作した。

図4に、プラスチック基板上に作製した酸化物TFTバックプレーンの伝達特性の一例を示す。移動度として7cm²/Vs、電流オンオフ比として10⁷以上を得た。図5には、試作した8インチサイズのフレキシブルディスプレイの動画表示の様子と主な仕様を示す。画素数はVGAで精細度は100ppiで

図4 試作したフレキシブルディスプレイ用バックプレーンのTFT特性

ある。iOLEDのアクティブ駆動表示に初めて成功し、湾曲させた状態でも60 Hzのフレームレートで明瞭なカラー動画表示を確認することができた。先にも述べたように、逆構造有機EL (iOLED) は厳密な封止バリア層を必要とせず、簡易なバリア構造で長寿命化が期待できる。今後、フレキシブルディスプレイの実用化・大画面化を検討する上で重要な技術となるであろう。

4. むすび

フレキシブル有機ELディスプレイの開発動向と最新の技術について紹介した。近年、10インチ前後の小型ディスプレイを中心に高画質・多機能なフレキシブルディスプレイが報告・展示されており、研究開発が着実に進展している。しかし実用化にあたっては、歩留まりの高いプロセス技術の構築、TFT特性・信頼性の向上、有機ELの長寿命化など各要素技術における一層の進展が求められる。

一方、現状の製造方法は、従来の真空成膜・フォトリソグラフィプロセスをベースとしている。将来、有機エレクトロニクス、プリンテッドエレクトロニクスなど次世代の技術が導入できると、ディスプレイの大画面化、ディスプレイ素材を含めたパネル構造の超柔軟化、低コスト化など新たな進展が期待できる。

最後に、本稿において紹介したiOLEDは、日本触媒(株)と共同で開発したものであり、関係者の方々に感謝します。

(2015年8月28日受付)

〔文 献〕

- 1) “シート型ディスプレイ特集号”, NHK 技研R&D, 145 (2014)
- 2) 藤掛: “フレキシブルディスプレイの基礎”, 映情学誌, 67, 12, pp.1048-1053 (2013)
- 3) L. Zhou et al.: "Pentacene TFT driven AM OLED displays", IEEE Electron Device Lett., 26, 9, 640 (2005)
- 4) M. Mizukami et al.: "Flexible AM OLED panel driven by bottom-contact OTFTs", IEEE Electron Device Lett., 27, 4, 249 (2006)
- 5) I. Yagi et al.: "A Full-Color, Top-Emission AM-OLED Display Driven by OTFTs", SID Symposium Digest, 38, 1753 (2007)
- 6) S. Hong et al.: "Development of Commercial Flexible AMOLEDs", SID Symposium Digest, 45, 334 (2014)

画面サイズ	8インチ
画素数	VGA 640×480
解像度	100 ppi
基板	PEN
TFT	酸化物IGZO
有機EL	iOLED ボトムエミッション
厚さ	0.3 mm

図5 酸化物TFT駆動フレキシブル逆構造有機ELディスプレイの外観と主な仕様

- 7) T. Kamiya et al.: "Present status of amorphous In-Ga-Zn-O thin-film transistors", Sci. Technol. Adv. Mater., 11, 044305 (2010)
- 8) H. Yamaguchi et al.: "11.7-inch Flexible AMOLED Display Driven by a-IGZO-TFTs on Plastic Substrate", SID Symposium Digest, 43, 1002 (2012)
- 9) E. Fukumoto et al.: "High-mobility oxide TFT for circuit integration of AMOLEDs", J. Soc. Info. Display, 19, 867 (2011)
- 10) J.H. Song et al.: "Achieving High Field-Effect Mobility Exceeding 50 cm²/Vs in In-Zn-Sn-O Thin-Film Transistors", IEEE Electron Dev. Lett., 35, 853 (2014)
- 11) D. Nakamura et al.: "An 81-in. 8k x 4k OLED Kawara-Type Multidisplay that Provides a Seamless, Continuous Image", SID Symposium Digest, 46, 1031 (2015)
- 12) J. Yoon et al.: "World 1st Large Size 18-inch Flexible OLED Display and the Key Technologies", SID Symposium Digest, 46, 962 (2015)
- 13) K. Morii et al.: "Encapsulation-free hybrid organic-inorganic light-emitting diodes", Appl. Phys. Lett., 89, 183510 (2006)
- 14) H. Fukagawa et al.: "Highly efficient and air-stable inverted organic light-emitting diode composed of inert materials", Appl. Phys. Express, 7, 082104 (2014)
- 15) G. Motomura et al.: "A Flexible Display Driven by Oxide-Thin-Film Transistors and Using Inverted Organic Light-Emitting Diodes", ITE Trans. MTA, 3, 121 (2015)
- 16) M. Nakata et al.: "Development of Flexible Displays using Back-Channel-Etched In-Sn-Zn-O TFTs and Air-Stable Inverted OLEDs", SID Symposium Digest, 46, 969 (2015)

好英 藤崎 1998年、早稲田大学大学院電子情報通信専攻修士課程修了。同年、NHK入局。2001年より、放送技術研究所にて、フレキシブルディスプレイ、薄膜トランジスタの研究に従事。現在、同研究所新機能デバイス研究部上級研究員。博士(工学)。正会員。