

# フィルム基板上に作製したフレキシブル有機 EL ディスプレイ

NHK 放送技術研究所 本村 玄一

## はじめに

スマートフォンやタブレット端末の普及により、いつでも・どこでも高画質の映像や情報コンテンツを楽しむことができる社会が実現してきている。さらに、次世代のテレビ放送として、超高精細テレビ 8K スーパーハイビジョン (SHV) [1] が実用化に向けて進みつつある。これらを活用するために、次世代の薄型ディスプレイとして、「フレキシブルディスプレイ」への期待が急速に高まっている。プラスチックフィルムを基板に用いたフレキシブルディスプレイは、ガラスを用いたディスプレイと比較して薄くて軽く、耐衝撃性にも優れている。

フレキシブルディスプレイを小型の携帯機器に用いた場合は、持ち運びの利便性が向上するだけでなく、衣服や曲面を持つ機器にも搭載できるため、デザイン性の向上も期待できる。また、20 型程度の画面サイズであれば、雑誌を見るような感覚で、手軽に高画質な映像を楽しむことができる。一方、100 型以上の大画面ディスプレイであれば、凹面に表示することで臨場感・没入感の向上や、曲面の壁に貼り付けられることで利用範囲の拡大が期待できる。さらに、丸めた状態で容易に搬入・設置が可能であることから、一般家庭へ大画面ディスプレイの普及促進が期待されている[2]。

当所では、8K SHV にふさわしいディスプレイとして、大画面のフレキシブルディスプレイすなわち 8K SHV 用シート型ディスプレイの実現を目指して研究開発を進めている。本稿では、フィルム基板を中心に、フレキシブル有機 EL ディスプレイの技術について紹介する。

## フレキシブル有機 EL ディスプレイ用フィルム基板

フレキシブルディスプレイは、柔軟性を有する基板上に、薄膜トランジスタ (TFT) 等の駆動デバイスを形成し、それを用いて有機 EL 素子等の表示デバイスを制御することで動画を表示する。フレキシブルディスプレイ用基板材料は、プラスチックフィルムの他にも、金属箔[3]や薄板ガラス[4]等が候補として挙げられる。しかしながら、金属箔を用いる場合、導電性への対策と表面の凹凸を平坦化する必要がある。薄板ガラスの場合、極めて割れやすく、柔軟性も限定的なものとなってしまう。柔軟性、軽量性、安全性等を考慮すると現状ではプラスチックフィルムが最も適している。

フィルム基板に求められる性能としては、フィルム表面の平坦性や作製プロセスでフィルムが劣化しない程度の耐熱性と耐溶剤性が挙げられる。さらに、高精度パターンニングを考慮すると熱膨張率が小さいことも必要である。また、光を基板側から取り出すボトムエミッション構造のディスプレイを作製する場合は、可視光領域の透明性が必須となる。理想的にはガラス基板に近い性能であることが好ましく、耐熱性やガスバリア性など、劣っている部分を作製プロセスの工夫や様々な機能を有する材料で補う必要がある。代表的なフィルム基板材料として、デバイスを低温プロセス (180°C以下) で作製

する場合はポリエチレンナフタレート (PEN) [5]、より高い温度で作製する場合はポリイミド (PI) [6]などが挙げられるが、フィルム単体ですべての要求を満たすものはまだ存在しない。

次に、フィルム基板を用いてデバイスを作製する上で重要な点が、基板のハンドリング方法である。フォトリソグラフィーによる高精度なパターンニング、真空プロセスや塗布プロセスでの成膜、高温でのアニール等の工程を、柔軟なフィルム上で精度良く行うことはガラス基板で作製する場合に比べて難しい。そこで、ガラス等の支持基材にフィルムを固定し、ハンドリングし易い状態にした上でデバイス作製を行い、完成後にフィルムを剥離するなどの方法が取られている。この方法は、デバイス作製中はしっかりと支持基材に固定されており、完成後はデバイスにダメージを与えることなく容易に剥離できることが求められる。フィルムの固定方法や剥離方法の十分な検討が必要であるが、フィルム基板をガラスと同様に扱うことが可能となる上に、ガラスに固定されることでフィルムの寸法安定性を高める効果も期待できるため有効な方法である。

支持基材にフィルムを固定する代表的な方法として、接着剤を用いてフィルムを貼り付ける方法と液状のフィルム材料を塗布・焼成し支持基材に直接形成する方法が挙げられる。図1にそれぞれのフィルム固定法とフレキシブルディスプレイ作製の流れを示す。接着剤でフィルムを貼り付ける方法では、様々なフィルムを基板として手軽に用いることが可能である。バリア膜や配線電極が既に形成された状態のフィルムを用いれば、作製工程を減らせる可能性もある。しかしながら、最終的な剥離を考慮して接着剤の接着強度を調整する必要があること、さらに、接着剤にも十分なプロセス耐性を確保する必要があり、選定が難しくなる課題がある。一方、液状のフィルム材料を塗布形成する方法では、容易に剥離可能なフィルム材料を選定する必要がある。しかし、接着剤を用いないため、PIのような高耐熱フィルム材料を用いれば、高い温度で熱処理を施したディスプレイ作製が可能となる。さらに、フィルムの成膜条件で厚みを自由に調整できるため、極めて薄いフィルム基板を得ることもできる。

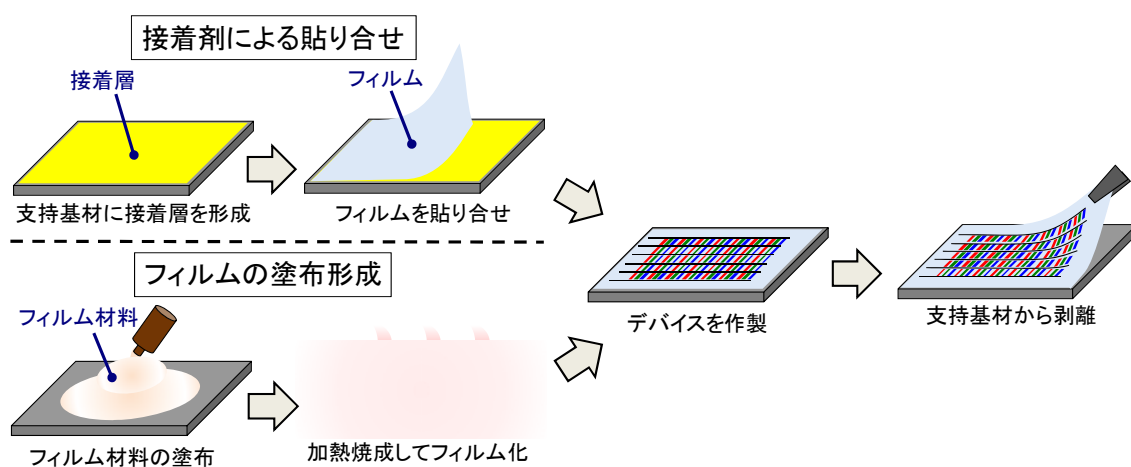


図1. フィルムの固定法とフレキシブルディスプレイ作製の流れ

## ディスプレイデバイス（有機 EL 素子・酸化物 TFT）

フレキシブルディスプレイに表示デバイスとして用いられる有機 EL 素子、駆動デバイスとして用いられる TFT について述べる。

有機 EL [7] とは、有機物に電流を流して発光させる現象であり、発光層、電子・正孔の注入や輸送を担う複数の有機層を、電極で挟んだ素子構造となっている。基本的な素子構造を図 2 に示す。有機層の膜厚を数十から百 nm 程度と極めて薄く設計することで、導電性の乏しい有機材料に十分な電流を流すことを可能にしている。高性能な有機 EL 素子を実現するためには、発光層や輸送層など各層についてそれぞれ最適な材料を選択する必要がある。発光層については、電気エネルギーをスムーズに供給するために、発光材料であるゲスト材料をホスト材料に分散させており、発光色に応じてそれぞれ最適な材料を用いることが求められる。

下部電極に透明電極を採用し、基板を通して光を外に取り出す構造をボトムエミッション構造、上部電極に透明電極を採用し、素子上部から光を取り出す構造をトップエミッション構造と呼ぶ。ディスプレイにボトムエミッション構造を用いる場合、画素回路と有機 EL を平面的に配置するため作製プロセスは比較的容易だが、開口率が小さくなるという課題がある。さらに、基板を通して光を取り出すことから、透明性に優れたフィルムを選定する必要がある。一方、トップエミッション構造では、画素回路の上部に有機 EL を配置することが可能になるため、開口率を大きく確保することが可能である [8]。有機層にダメージを与えずに上部透明電極を形成する必要があることや、光学設計を厳密に行う必要があるなど作製上の難しさはあるものの、ディスプレイの高精細化に伴いトップエミッション構造の採用が増えつつある。

また、有機 EL においては信頼性や寿命の確保が大きな課題である。一般的に有機 EL は、水分や酸素にさらされると劣化し、ダークスポットと呼ばれる非発光領域が発生してしまう。特に、フィルムはガラスに比べて水蒸気透過率が高いため、フレキシブルディスプレイではより切実な問題となる。現状では、水蒸気を遮断するためにフィルム上に高品質なバリア層を形成して対処しているが、欠陥の無い大面積なバリア層の形成は難しく、高コスト化の要因となる。そこで当所では、水分や酸素にさらされても劣化しにくい逆構造有機 EL の研究を進めている [9]。逆構造有機 EL は、通常有機 EL と電極および有機層の積層順を逆転した構造を持つ。この素子の陰極や電子注入層として水分や酸素に不活性な材料を用いることで、劣化を抑制することができる。

駆動デバイスである TFT は、薄膜の半導体を基板に成膜して作製されたトランジスタであり、ゲート電圧を印加することでドレイン電流を制御することができる。基本的な TFT 構造を図 3 に示す。TFT は半導体の種類によって分類される。各 TFT の比較を表 1 に示す。多結晶シリコンによる TFT は、大型化には向かないものの、高い移動度

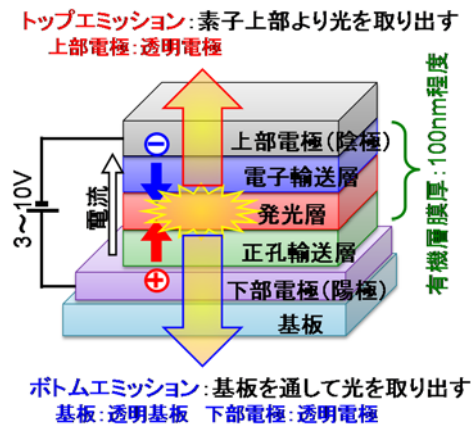


図 2. 基本的な有機 EL 素子の構造

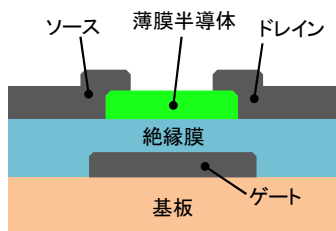


図3. 基本的な TFT 構造

表1. 半導体材料による TFT の比較

	酸化物 (IGZO)	シリコン	
		非晶質シリコン	多結晶シリコン
移動度 (cm <sup>2</sup> /Vs)	10	0.5~1.5	100~150
作製温度	室温~400°C (信頼性確保のためには高温作製が必要)	~300°C	~500°C
大面積対応	○	○	△
信頼性	○	△	◎
特性ばらつき	小	小	大

を有しており、中小型ディスプレイに多く使用されている。非晶質シリコンによる TFT は、移動度が低いが、大型ディスプレイを低コストで実現できるという長所がある。In-Ga-Zn-O (IGZO) に代表される酸化物半導体を用いた TFT [10]は、スパッタ法を用いて比較的低い温度で大面積に形成することが可能であり、非晶質シリコン TFT よりも高い移動度を得ることができるため、フレキシブルディスプレイ駆動への応用が盛んに研究されている[11]。

フレキシブルディスプレイにおいては、作製プロセス温度も TFT を選択する上で重要なパラメータになる。フィルム基板の耐熱性が、作製プロセス温度の上限になることも多い。フィルム上に多結晶シリコン TFT を作製する場合、400°C以上の耐熱性が要求されるので、特に耐熱性に優れたフィルムを選定する必要がある。一方、酸化物 TFT の場合は、室温での作製も可能であり、様々なフィルム基板を使用できる。ただし、プロセス温度が高い方が良好な性能を得やすく、300°C以上のプロセス温度で作製されることが多い。

### 極薄ポリイミドフィルムに形成したフレキシブルディスプレイの湾曲耐性

フレキシブルディスプレイは、湾曲状態での表示や巻き取り状態での収納といった用途が期待されていることから、高い湾曲耐性が要求される。ディスプレイを湾曲させると、生じた歪みによって、デバイスの伸び縮みが発生し、ダメージを受ける恐れがある。ディスプレイに形成される有機 EL・TFT・配線電極などの構造物は、数十~数百 nm と極めて薄いため、湾曲時に生じる歪みは、基板に起因する成分が大きい。そこで、湾曲に対する基板の影響を小さく抑えるために、極薄の透明 PI フィルム基板を用いて、デバイスの湾曲特性を評価した[12]。

フィルム材料を選定する上で以下の点を考慮した。まず、ボトムエミッション構造の有機 EL ディスプレイを想定していることから、可視光領域で十分な透明性を有すること。次に、300°C以上の耐熱性を有し、熱膨張率が低いこと。これらの点を考慮して、表2に

表2. 透明 PI フィルムの特性

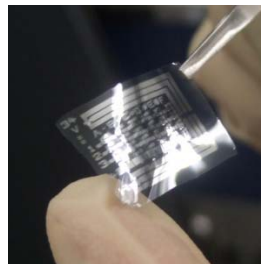
全光線透過率	89 %
ガラス転移温度	355°C
線膨張係数	12 ppm/°C
抵抗率	> 10 <sup>16</sup> Ω cm

示す特性を有する透明 PI フィルム材料を使用した。フィルム材料はスピンドコート等の方法で塗布成膜し、その後、300°Cで1時間加熱しフィルム化した。

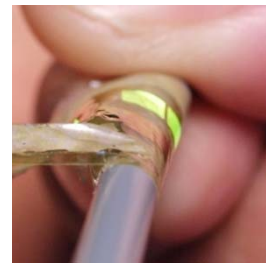
厚さ 7 $\mu\text{m}$  の透明 PI フィルム基板の上に酸化物 TFT および有機 EL 素子を作製し、湾曲状態での特性を評価した。

図 4 (a)に作製した酸化物 TFT を示す。酸化物 TFT の半導体材料は IGZO、ゲート絶縁膜は SiO<sub>x</sub>、電極は Al を用い、

メタルマスクを通してスパッタ成膜することでパターンを形成した。作製した TFT を平坦な状態から曲率半径 1 mm まで湾曲させても、伝達特性の変化は小さく、移動度は 10 cm<sup>2</sup>/Vs 程度の値が維持されることが分かった。これは、絶縁膜や半導体に硬くてもろい層を有する酸化物 TFT であっても、フィルム基板を薄くし、基板による歪みを小さく抑えることによって、高い湾曲耐性を得られたためであると言える。同様に有機 EL 素子についてもフィルム基板上に作製し、図 4 (b)に示すように湾曲状態で発光が得られることを確認した。



(a) 酸化物 TFT



(b) 有機 EL 素子

図 4. 極薄 PI 基板上に作製した酸化物 TFT および有機 EL 素子

続いて、極薄フィルム基板を用いて柔軟性に優れたフレキシブル有機 EL ディスプレイを作製した。表示部分の大きさは対角 5 インチ、画素数は 320 × 240 (QVGA) で、緑色発光有機 EL を画面全体に成膜したモノクロディスプレイである。ディスプレイの厚みは 20  $\mu\text{m}$  で、その内の 15 $\mu\text{m}$  がフィルム基板である。剥離後の取り扱い易さを考慮し、湾曲評価用サンプルよりもフィルムをやや厚めに形成した。作製したフレキシブル有機 EL ディスプレイの断面構造を図 5 に示す。作製後、支持ガラスからディスプレイを剥離し、FPC(Flexible Printed Circuits)で駆動装置と接続して動画を表示した。作製したディスプレイは極めて薄く柔軟性に富んでおり、湾曲状態はもちろん、ディスプレイを巻き取った状態でも動画を表示することができた (図 6)。

## おわりに

フィルム基板を中心に、フレキシブル有機 EL ディスプレイ技術を紹介した。フィル

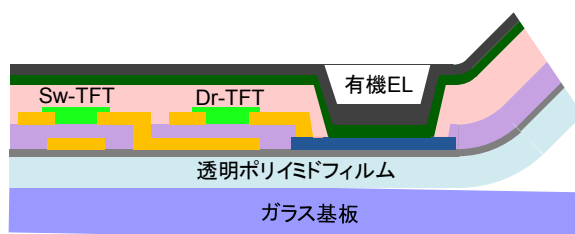


図 5. フレキシブル有機 EL ディスプレイの断面構造

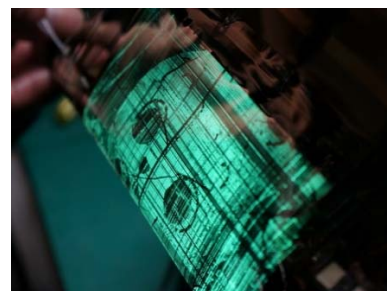


図 6. 湾曲状態で駆動するフレキシブル有機 EL ディスプレイ

ム基板には、耐熱性・耐溶剤性・低熱膨張率など様々な性能が要求される。さらに、ディスプレイ構造によって、透明性など高い光学特性やガスバリア性が必要となる。フィルム基板のみでこれらの高い要求をすべて満たすことは困難であるが、フィルム技術の進歩と作製プロセスの工夫により、極めて柔軟性に富んだディスプレイが実現しつつある。しかしながら、大型化・生産性といった点には課題も多く、8K SHV 用大画面シート型ディスプレイを実現するためには、さらなる材料開発、作製プロセスの検討が必要である。当所でも、薄くて柔らかい8K SHV 用大画面シート型ディスプレイの実現に向けて、各デバイスやプロセスの研究開発を進めていきたい。

#### 参考文献.

- [1] T. Yamashita, H. Masuda, K. Masaoka, K. Ohmura, M. Emoto, Y. Nishida and M. Sugawara, *Inf. Disp*, Vol.28, No.12, pp.12-17, (2012).
- [2] 栗田泰市郎, *NHK 技研 R&D*, No.145, pp.4-17, (2014).
- [3] T. Chuang, M. Troccoli, P. Kuo, A. Jamshidi-Roudbari, M. K. Hatalis, I. Biaggio, and A. T. Voutsas, *Appl. Phys. Lett.* vol.90, pp.151114-1-3, (2007).
- [4] C. Kuo, Y. Chen, B. Chiou, J. Chiou, Y. Lee, and Y. Huang, *Proc. IDW/AD'12*, pp.1497-1499, (2012).
- [5] 本村玄一, 中嶋宜樹, 武井達哉, 藤崎好英, 深川弘彦, 辻博史, 中田充, 清水貴央, 山本敏裕, *NHK 技研 R&D*, No.145, pp.40-47, (2014).
- [6] J. Park, T. Kim, D. Stryakhilev, J. Lee, S. An, Y. Pyo, D. Lee, Y. G. Mo, D. Jin, and H. K. Chung, *Appl. Phys. Lett.*, vol.95, pp.013503-1- 3, (2009).
- [7] C. W. Tang and S. A. VanSlyke, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 51, pp.913-915, (1987).
- [8] T. Ishibashi, J. Yamada, T. Hirano, Y. Iwase, Y. Sato, R. Nakagawa, M. Sekiya, T. Sasaoka and T. Urabe, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 45, No. 5B, pp. 4392–4395, (2006).
- [9] H. Fukagawa, K. Morii, M. Hasegawa, Y. Arimoto, T. Kamada, T. Shimizu, and T. Yamamoto, *Appl. Phys. Express*, Vol. 7, pp.082104-1-4, (2014).
- [10] K. Nomura, H. Ohta, A. Takagi, T. Kamiya, M. Hirano, and H. Hosono, *Nature*, vol.432, pp.488-492, (2004).
- [11] M. Nakata, H. Sato, Y. Nakajima, Y. Fujisaki, T. Takei, T. Shimizu, M. Suzuki, H. Fukagawa, G. Motomura, T. Yamamoto and H. Fujikake, *SID Int. Symp. Digest Tech. Papers* Vol.42, pp.202-205, (2011).
- [12] 本村玄一, 中嶋宜樹, 中田充, 武井達哉, 山本敏裕, 栗田泰市郎, 清水直樹, *信学誌*, Vol. J97-C, pp.61-68, (2014).