OLED, QD-LEDの最新技術開発動向

2021. 8

シニアアナリスト
占部哲夫

Chief Analyst
Dr. Choong Hoon YI

目次

1. 低分子 OLED 材料 5
   1.1 蛍光材料
   1.2 りん光材料
   1.3 TADF
   1.4 Hyperfluorescence
   1.5 次世代発光材料の提案
   1.6 AI による材料開発
   1.7 Summary
2. White OLED+CF 36
   2.1 Bottom-emission White OLED+CF 型
   2.2 Top-emission White OLED+CF 型
   2.3 White OLED+CF 方式の特性改善
3. OLED デバイス技術 49
   3.1 Inverted OLED
   3.2 Transparent OLED
   3.3 電極材料
   3.4 偏光板
   3.5 色度視野角依存性分析
   3.6 広視野角化技術
   3.7 Top-emissionでの透明カソード
   3.8 QD OLED 用 Tandem Blue OLED
   3.9 Rollable OLED Display
   3.10 車載用途に適した高温耐久性 OLED Display
4. Solution Process OLED 68
   4.1 Solution Process OLEDの現状と課題
   4.2 Solution Process用材料の開発状況
   4.3 Solution Process用材料と低分子蒸着用材料の比較
   4.4 Solution Process技術
   4.5 Solution Processデバイス技術
   4.6 Solution Processディスプレイ
5. 低分子蒸着技術 88
   5.1 FMM蒸着の開発状況
   5.2 蒸着条件が膜に与える影響
   5.3 低分子蒸着OLEDの特性再現性
   5.4 低分子蒸着膜のLithographyによるパターン化
   5.5 量産用低分子蒸着システム
   5.6 蒸発源内での材料劣化
   5.7 低分子蒸着用超高精細マスク
6. 封止技術 106
   6.1 薄膜封止技術の開発状況
   6.2 薄膜封止での水分侵入メカニズム
   6.3 Flexible, Foldableに適した薄膜封止の開発
   6.4 Face Seal
7. 光取り出し 122
   7.1 分子配向よる光取り出し改善
   7.2 屈折率の調整による光取り出し改善
   7.3 Waveguide modeの除去による光取り出し改善
   7.4 構造物の設置による光取り出し改善
8. Foldable技術 133
   8.1 Foldableのためのデバイス設計
   8.2 Neutral Plane Splittingを目指した開発
   8.3 Neutral Plane Splitting のための OCA
   8.4 Foldableのための部材開発
   8.5 Foldable が TFT に与える影響とその対策
   8.6 Foldable に適した LTPS プロセス
   8.7 Foldable Display
9. QD-LED技術開発動向 154
   9.1 Core-shell QD LED
   9.2 Quantum Dot
   9.3 QD LED 特性の進化と現状
   9.4 非Cd系 Blue QD の開発
   9.5 非Cd系 Red QD の開発
   9.6 QD LED デバイス構造
   9.7 QD LED プロセス
   9.8 QD LED ディスプレイ試作
   9.9 White 発光 QD LED
   9.10 Perovskite

© 2021 UBI Research. All rights reserved.

1.1 蛍光材料

❖ Blue 寿命改善

- SEL は更に SID2021 で Blue 蛍光素子の初期劣化を抑制する　Recombination-site tailoring injection （ ReSTI ）技術を開発し、更なる長寿命化を実現させたことを報告した。*
- ReSTI 技術では HOMO レベルが深い正孔輸送材料を用いて初期段階で少数の正孔キャリアを ETL に到達させる（図 1 (a)）が、その後、駆動により ETL の抵抗値を下げ、EML への電子注入を促進する（図 1 (b)）ことで、キャリアバランスが変化し、輝度が向上する。
- ReSTI のコンセプトに基づいて ETL と HTL の材料を図 2 のように変更して得られた EQE と LT95@50mA/cm^2 を測定した結果を図 2 に示す。Bottom emission で CIEy = 0.096 という Deep Blue で LT95@50mA/cm^2 = 870 h という長寿命を実現させている。

図 1

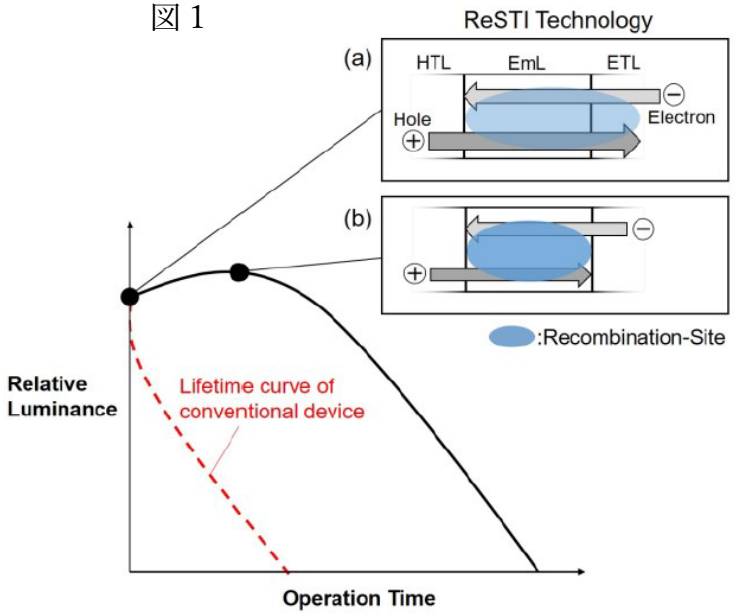
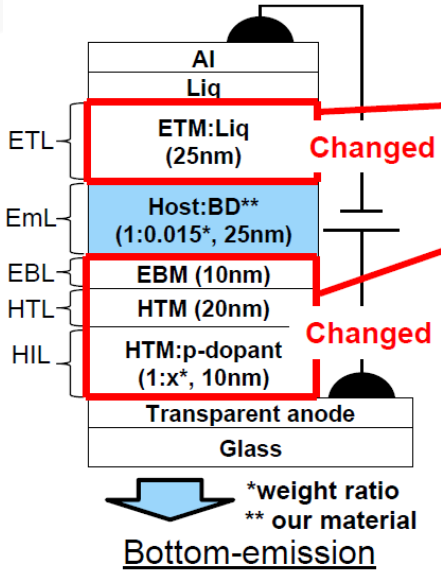


図 2



Device	HTM	p-dopant ratio x	EBM	ETM
1 (Ref.)	HT-01	0.03	EB-01	ET-01
5	HT-02	0.1	EB-02	ET-02

Device	Voltage (V)	Current Density (mA/cm2)	CIE (x,y)	EQE* (%)
1 (Ref.)	3.81	10.50	(0.141, 0.105)	10.74
5	4.55	11.53	(0.138, 0.096)	10.01

Device	Driving Voltage (V)	LT97 (h)	LT95 (h)
1 (Ref.)	4.2	46	140
5	5.7	624	870
		13 times	6 times

∗ Takuya Ishimoto　et.al. SID2021 Digest 19-4 p.236

© 2021 UBI Research. All rights reserved.

2.1 Bottom-emission White OLED+CF 型

❖ 8K TV

- LG Display は 2020.6 に発売した 88” 8K OLED TV に導入した新技術を SID2021 で発表した。* OLED のパネル構成は従来と同じく図 1 のような Bottom emission RGBW 方式 White + CF 型である。
- LGD の OLED は Bottom emission 型であるため、画素数が多くなると開口率が減少する。これに対処するために TFT のサイズやメタル配線幅を縮小するため、Photo-lithography で使用するマスクを Phase shift Mask とし、精細度をあげた。
- 動画応答特性を良くするために refresh rate を 120Hz としているため、画素への書き込み時間が非常に少なくなっている。図 2 に示すように通常の 60Hz refresh の 4K TV の場合は1画素あたりの書き込み時間は 15.2 μ sec であるが、120Hz, 8K の場合はわずか 1.9 μ sec となる。
- 高速書き込みのためにはゲート配線の浮遊容量を出来る限り小さくする必要があるため、画素Tr. として Self Align co-planer TFT を採用した。
- 更に信号波形のなまりによる書き込み不足を補うためにオーバードライブを採用した。
- これらの技術を用いて 2020.6 に77” 及び 88” の 8K TV を商品化した。

図 1

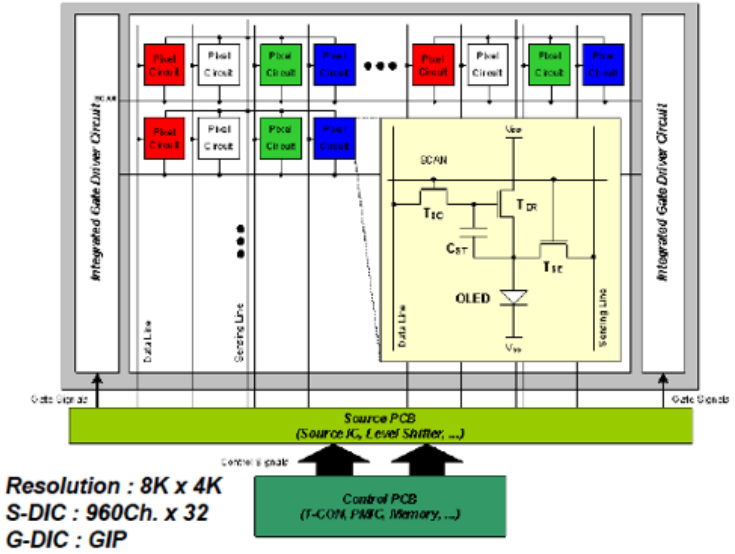
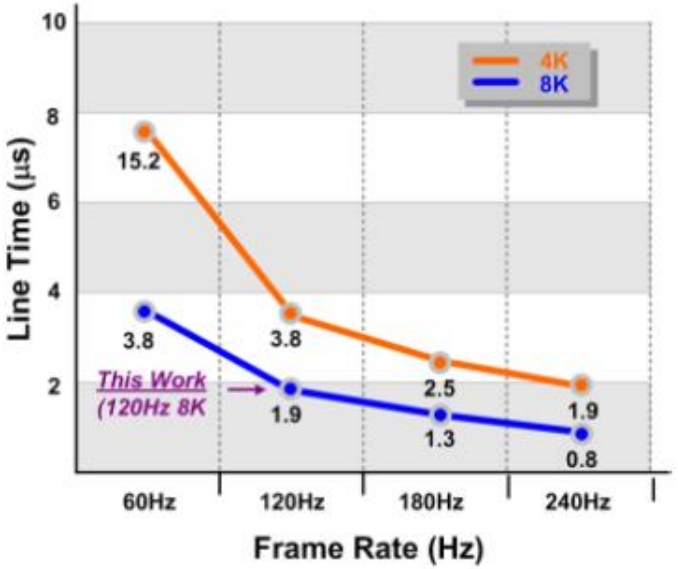


図 2



＊ Hon-Jae Shin et. al. SID2021 Digest 45-1 p.611

© 2021 UBI Research. All rights reserved.

3.2 Transparent OLED

- 画素の発光部分を透明にするのではなく、画素を発光部と透明部に分ける構成をAUOがSID2018で、JDIがIDW2018で発表した。
- JDIが開発したパネルの画素部の断面を図1に示すが、OLEDはWhite OLED+CFでRGBW画素配列を採用している。[*1,2]
- JDIの平面パターンを図2に、AUOの平面パターンを図3に示す。
- AUOはOLEDの有機層は透明部分を含めて全面ベタに残し、カソードは透明部分は除去するようにパターン化していたが、JDIは有機層もカソードもパターン化しない構成を選択。
- JDI と AUO の Transparent OLED の試作パネルを図 4 と図 5 に示す。

図1

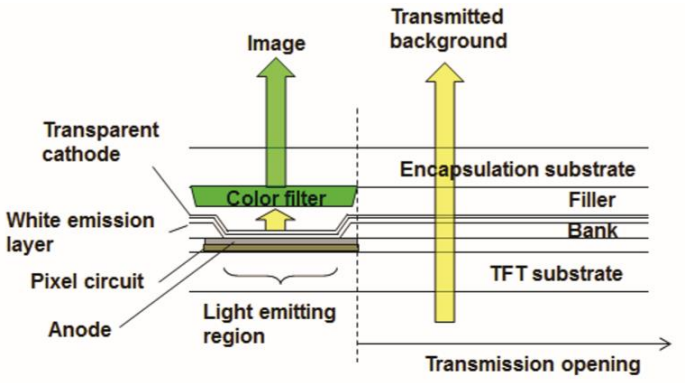


図2

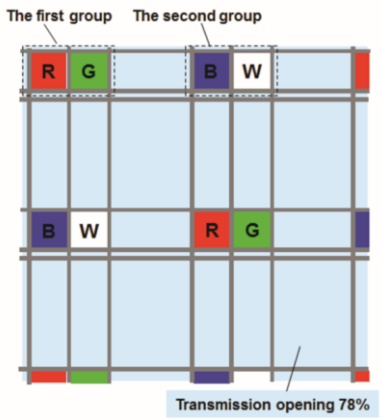


図3

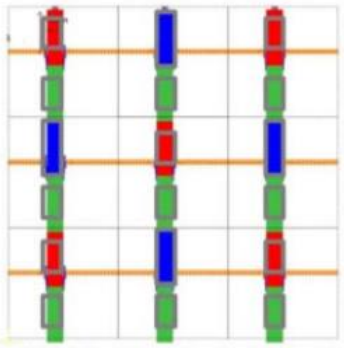


図4

JDI 4.5” Transparent OLED

図5

AUO 13” Transparent OLED

	サイズ	解像度	透過率
AUO	13”	100 ppi	68%
JDI	4.5”	163 ppi	63%

＊1 Yu-Hsin Lin et. al. SID2018 Digest 47-2 p.621　＊2 Simmasaya Adachi et. al. IDW2018 Digest OLED 4-3 p.657

© 2021 UBI Research. All rights reserved.

4.2 Solution Process用材料の開発状況

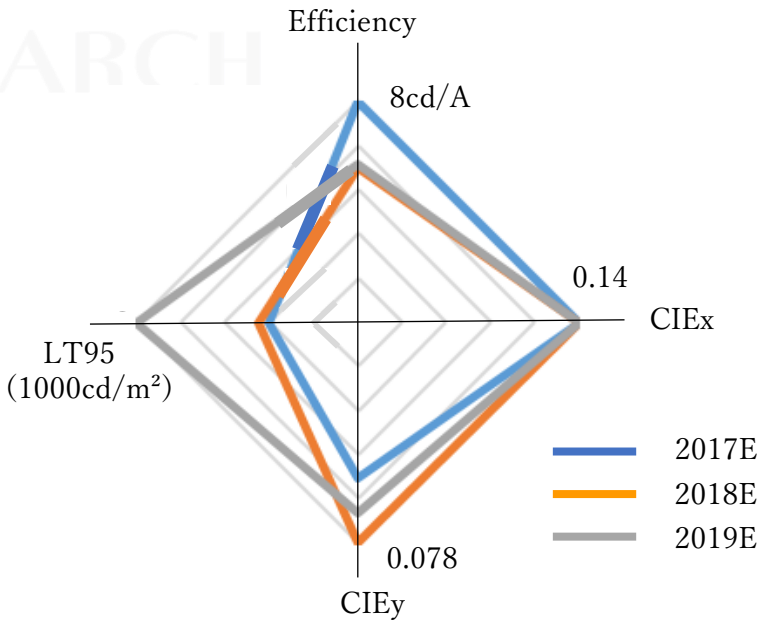
❖ 高分子系

- 住友化学は高分子の塗布型OLED材料を開発してきているが、最新の材料特性についてSID2020で発表した。*
- 表1に最新の材料特性を示す。Green材料は昨年から変化は無いが、Red材料は寿命が改善している。
- Blue材料についてここ3年間の特性進化を図1にプロットした。最も大きな進化は寿命であり、色度を若干落としているが寿命は倍増している。但し、前ページのSamsungの指摘のように色純度と効率両方の指標となるEfficiency(Cd/A/CIEy)は 63.3であり低分子蒸着材料に比べて大幅に低いという課題は引き続き抱えている。

表1

Spin/BE device ITO/HIL/IL/LEP/NaF/Al @ 1000nit		End/2018 Achieved	End/2019 Acheived
R	Efficiency cd/A	24	23
	CIE-x,y	0.66,0.34	0.66, 0.34
	T95 hrs @1000nt	5800	7000
G	Efficiency cd/A	76	76
	CIE-x,y	0.32,0.63	0.32,0.63
	T95 hrs @1000nt	25000	25000
B	Efficiency cd/A	5.6	5.7
	CIE-x,y or By	0.14,0.08	0.14, 0.09
	T95 hrs @1000nt	450	1000

図1



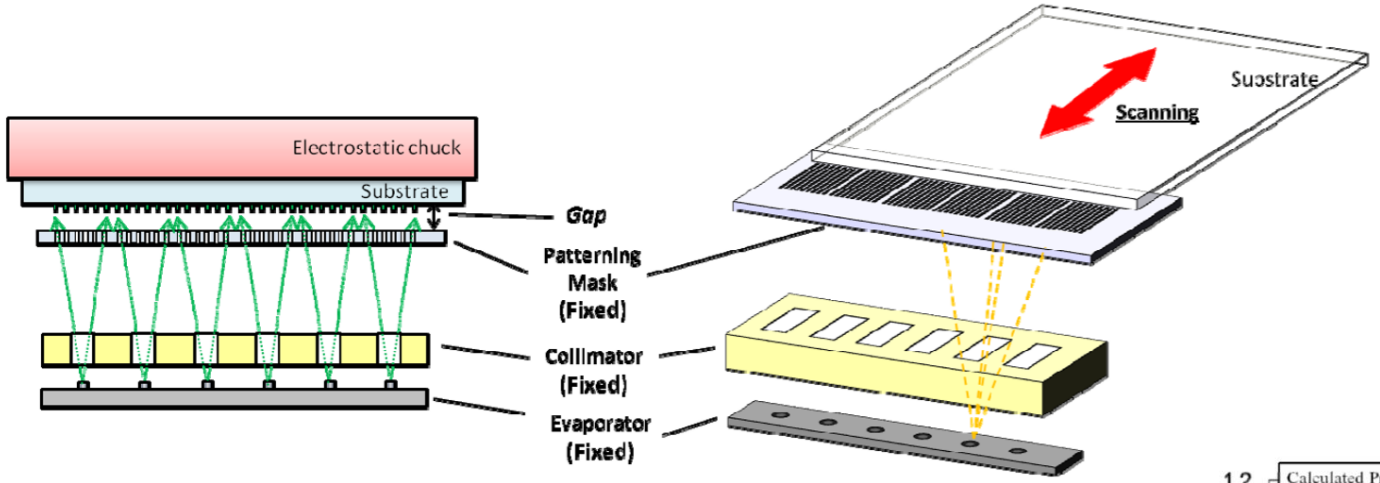
＊ Jin-goo Kan et. al. SID2020 Digest 41-2 p.591

© 2021 UBI Research. All rights reserved.

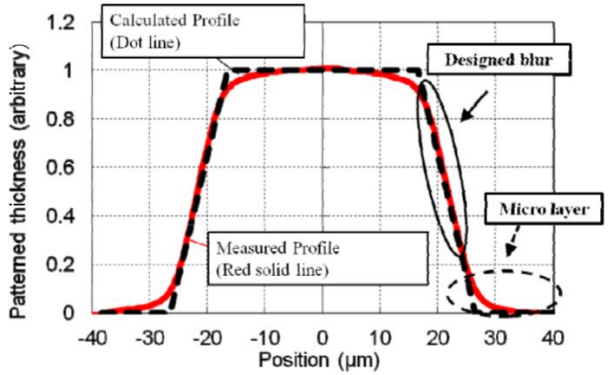
5.1 FMM蒸着の開発状況

❖ SMS

- 2010年前後にSamsungはFMMと基板を密着させるのではなく、固定した短冊型マスクと僅かな間隙を持って基板をスキャンさせるSMS(Small Mask Scanning)を精力的に開発していたが中止した。SharpはSID2016でこれを改良した方式を提案した。*
- 改良点の一つはリニア蒸発源の上にCollimator を設置したこと。これによってマスク開口部を斜め方向に通過する有機分子の割合が減るため、Shadow効果が抑制される。



- 右図は画素部の膜厚分布を示す。点線は計算値、赤線は実験値である。図から判るように予測されるShadow効果によるDesigned Blurに加えてMicro Blurが生じる。これはGapを1mmから0.3mmにしても減らない。
- このMicro BlurをCollimatorとEvaporatorを改良することで無くした。どのようにしたかは公にしていない。



＊ Shinichi Kawato et. al. SID2016 Digest 74-2 p.1005

© 2021 UBI Research. All rights reserved.

6.3 Flexible, Foldableに適した薄膜封止の開発

❖ SVI

- Samsung Displayはflexibilityを大きくするOLEDの封止方法としてSequential Vapor Infiltration(SVI)をSID2020で発表した。*
- SVI processはALDと似ているが、precursor gasのdosingの間にexposingのための時間を取るところが異なり、この時間の間に下地の空隙の間にdepo物質が拡散していくために、このような空隙な無い緻密な膜を形成することが出来る手法である。(図1)
- 評価したサンプルは図2のように、PI基板の上に有機/無機のHybrid barrier膜を形成するが、この無機膜にSVIプロセスによるAlO_xを成膜したものと、referenceとして PECVDでAlO_xを成膜したものを作製し、これらを曲率半径3mmで200,000回曲げテストを行った前後でのbarrier性能をMOCON 試験機で評価したのが図3である。
- SVIプロセスのものが曲げ試験後も$1x10^{-5}$g/m²day以下であるのに対し、PECVDのものは$1x10^{-2}$ g/m² dayレベルに劣化しているのが判る。

図1

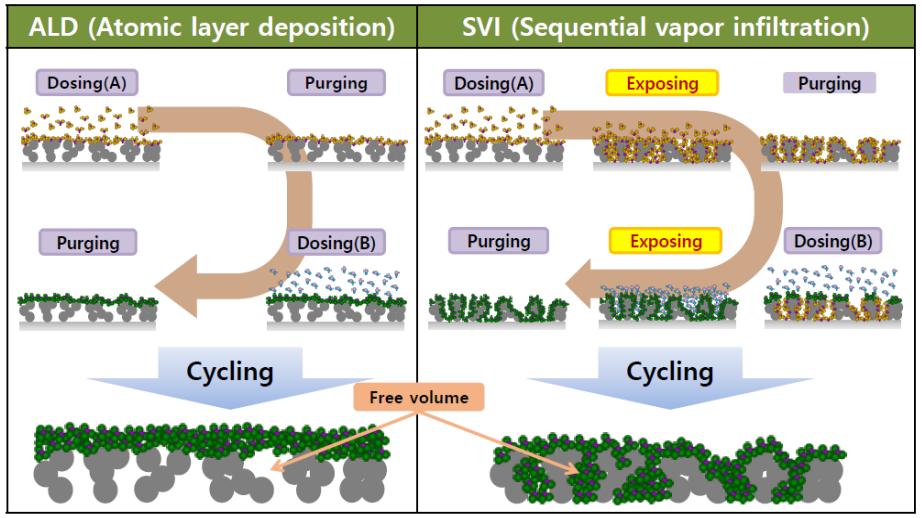


図2

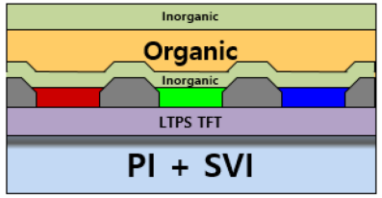
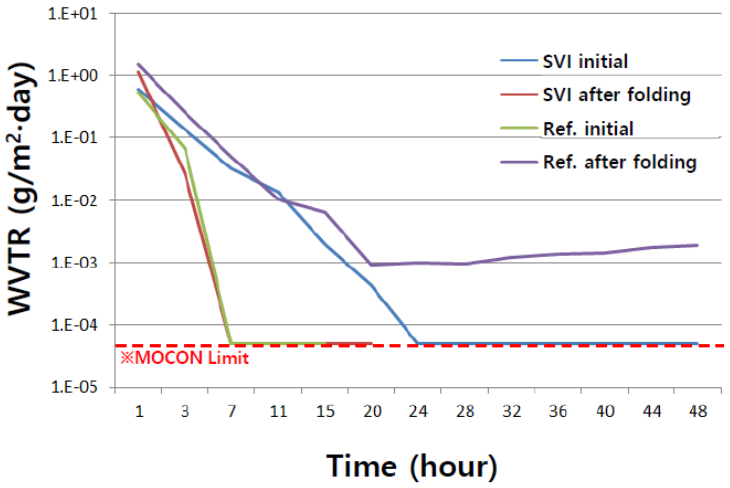


図3



＊ Seung Hum Kim et. al. SID2020 Digest 84-4 p.1273

© 2021 UBI Research. All rights reserved.

7.2 屈折率の調整による光取り出し改善

- Taiwan National Univ.はSID2016でITOの屈折率によるEQEの低下を防ぐ方策について発表した。*
- EQE が低い原因の一つがITの屈折率が高い(n~2.1)ことで、この対策として低屈折率の導電性高分子PDOT/PSS(n~1.5)を用いることを提案。
- 図1はITOを用いたデバイスと、それをPEDOT/PSSに変えたデバイスのEQEを示す。ITOをPDOT/PSSに変えると EQEは低下するが基板外側にレンズを付けるとEQEは高くなる。これはPDOT/PSS に変えると基板への光取り出し効率は上がっているが、基板から外へ光が取り出せていないことを示している。
- そこでPDOT/PSSと基板の間に高屈折率のTiO2を挿入して測定したのが図2である。 基板内へ取り出した光を更に基板の外へ取り出せたためにEQEは高くなっている。

図 1

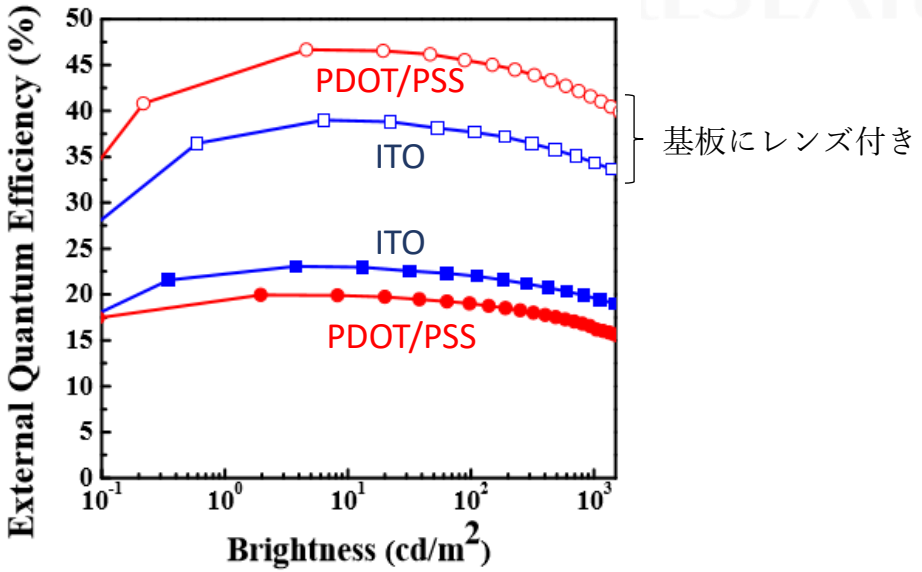
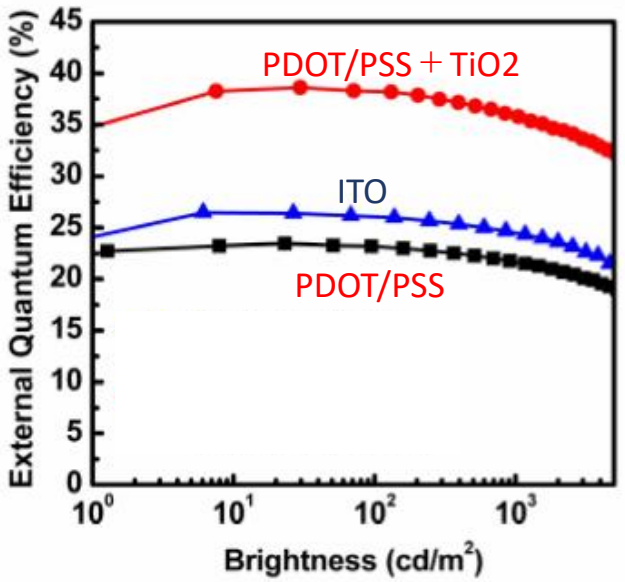


図 2



＊ Chung-chih Wu et. al. SID2016 Digest 24-3 p.298

© 2021 UBI Research. All rights reserved.

8.1 Foldableのためのデバイス設計

- Flexible OLEDをより小さな曲率半径でFoldableにするためには、従来のデバイス構造を見直す必要がある。従来の Flexible OLEDはPI基板ベースのOLEDの上に反射防止のための位相差板・偏光板が重ねられており、更にその上にタッチパネルという3層構成になっている。AUOはSID2016で、このようなAsymmetric Panel Stack(APS)をSymmetric Panel Stack(SPS)にして、曲げに弱い部分をNeutral Planeに集中させることを提案した。*1
- まず反射防止のための位相差版・偏光板を無くして、OLEDのMicrocavityとカラーフィルタの組み合わせで反射防止する方式を採用。この方式は2004年にSonyが発表した技術であり、その後 11” OLED TVを商品化したときに採用した技術であるが、AUOはCF とTPを同一のフィルム上に集積させ、このフィルムとOLED側のフィルムをSymmetricに貼り合わせる形態としたところが進化している。
- CFとTPは下図のように一体化されていることが、IDW2016で報告された。*2
- CFは10μm厚のフィルム上に形成され、このBMの上にTP用のメタルメッシュがつけられている。この構造によってTPの電極からの反射が外から見えなくなると同時に、抵抗の低いMetalをつかうため線幅を細くできて開口率に寄与する。

図 1

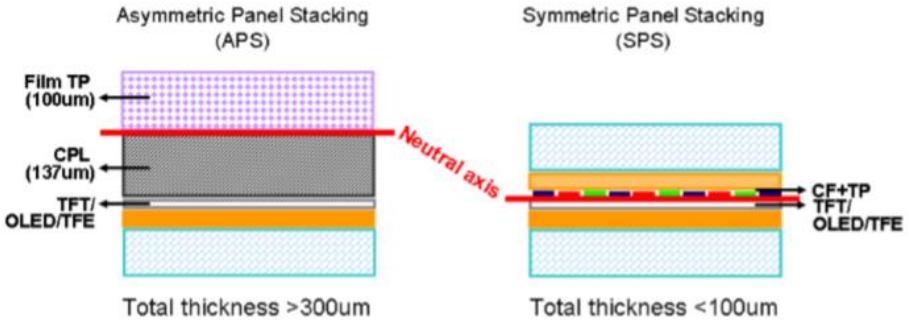
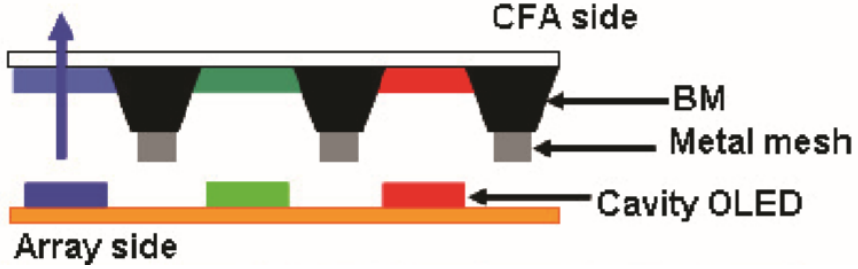


図 2



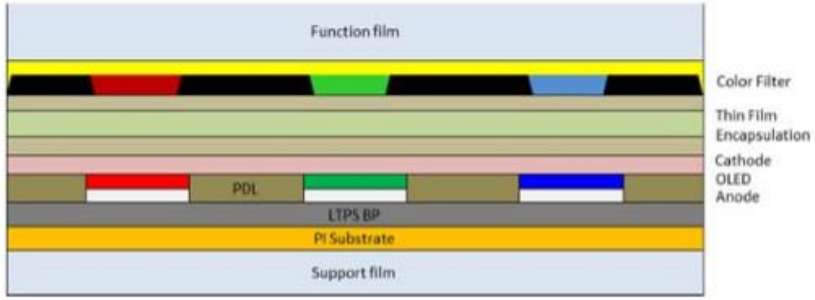
- AUOはSID2017で曲げ耐性を向上させ、60℃ 90%RH環境下で曲率半径4mmでin-ward & out-wardそれぞれで 1,500,000回の曲げテストをクリアしたことを報告した。*3　さらにemitter材料の変更とCFとの合わせ込みで BT.2020 98%の色域を実現したと報告した。

*1 Meng-Ting Lee et. al. SID2016 Digest 24-5 p.305
*2 Meng-Ting Lee et. al. IDW2016 Digest OLED 1-1 p.645
*3 Meng-Ting Lee et. al. SID2017 Digest 24-2 p.334

© 2021 UBI Research. All rights reserved.

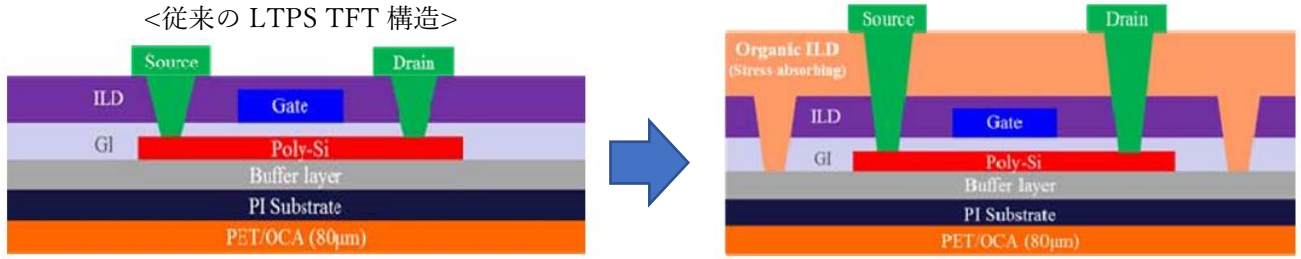
8.1 Foldableのためのデバイス設計

- BOEはSID2018でAUOの方式を更に進化させた技術を報告した。*1　即ちAUOと同じ構成を採用しながら、CFをTFEの上に直接形成した。この利点は貼り合わせCFに比べてより高精細化が可能になること。



Structure	OLED + C-Pol	OLED + COE
Inch	5.46	
Resolution	2560*1440	
PPI	538	
Reflectivity	5.0 %	5.4%
Thickness	360 *um*	250 *um*
Brightness	350 *nit*	430 *nit*
NTSC Gamut	99%	112%

- この技術によって試作したパネルを公開したが、538ppiという高精細であった。
- ITRIはSID2016でLTPS TFTに有機物のInter LayerをStress Absorbing Layerとして挿入する構造を発表した。*2



- これらを曲率半径3mmの曲げテストを50,000回行った結果、従来構造のLTPS TFTはGate電圧 vs Drain電流特性がシフトしたのに対して、Stress Absorbing Layerを導入したLTPS TFTは全く変化が無かった。

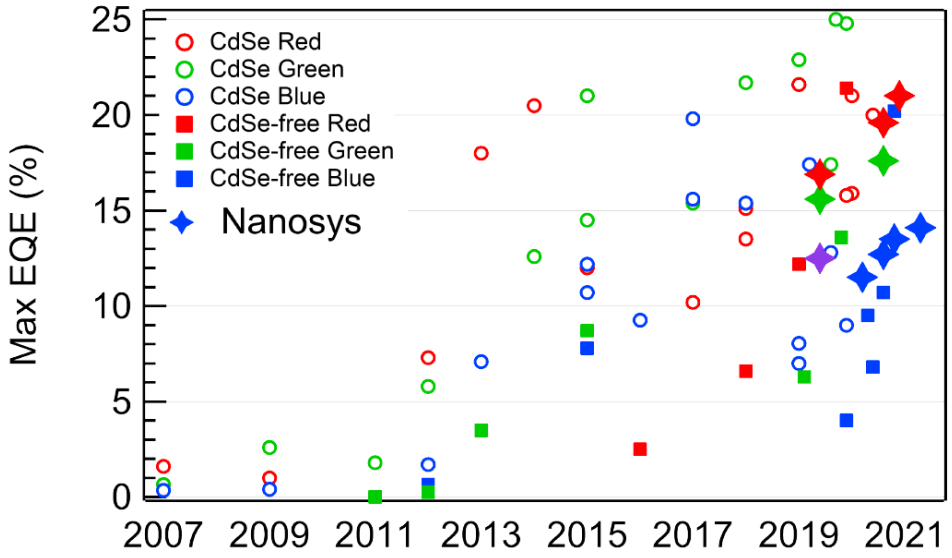
＊1　Chuan X. Xu et. al. SID2018 Digest 24-4 p.310　　＊2　Janglin Chen et. al. SID2016 Digest 78-1 p.1041

© 2021 UBI Research. All rights reserved.

9.3 QD LED 特性の進化と現状

- Nanosys はQD LED の EQE と寿命特性の進化の過程と現状の値について、SID2021 で報告した。*
- EQE に関して非 Cd 系が Cd 系に肩を並べたのは Red のみで、Greenは今一歩、Blue は大幅に低い現状である。（図１）
- 寿命は Red、Green が着実に改善している一方、Blue はまだまだ不十分な状況である。（図２）

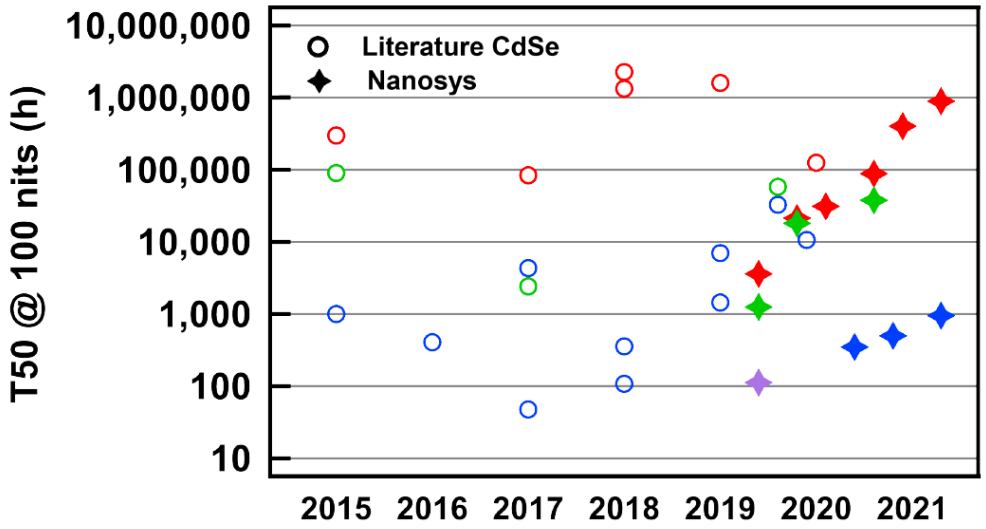
図１



Color	EQE
Red	21.0%
Green	17.6%
Blue	14.1%

True Blue at 452 nm

図２



Color	T50 @ 100 nits
Red	890,191 h
Green	37,719 h
Blue	949 h

True Blue at 452 nm

* Diego Barrera et. al. SID2021 Digest 65-1 p945

© 2021 UBI Research. All rights reserved.