

Quantum DotのDisplay応用技術開発動向

2024.7

シニアアナリスト
占部哲夫

1. Quantum Dot 開発と事業化の経緯	4	2.4 Micro LED Micro Display の画素内色変換試作例	41
1.1 Quantum Dot 開発の歴史	5	2-4-1 Sharp	
1.2 CdSe Quantum Dot	7	2-4-2 BOE	
1.3 非 Cd 系 Quantum Dot	8	2-4-3 Mojo Vision	
1.4 Perovskite Quantum Dot	9	2-5 Micro LED Micro Display の画素内色変換応用まとめ	45
1.5 各種 QD の特性まとめ	10		
1.6 I III IV Quantum Dot	11		
2. 色変換素子への応用	12	3. QD-LED 技術開発動向	46
2.1 色変換材料としての QD	13	3.1 要約	47
2.2 液晶バックライトへの応用	14	3.2 QD-LED 特性の進化と現状	48
2-2-1 エッジライト型バックライトへの応用形態		3-2-1 Overview	
2-2-2 直下型バックライトでの応用形態		3-2-2 非Cd系 QD-LED と Cd系 QD LED の特性比較	
2-2-3 Mini LED バックライト用色変換材料		3-2-3 非Cd系 QD-LED 特性の進化	
2-2-4 Perovskite QD を用いた Mini LED LCD		3-2-4 QD-LED の劣化要因	
2.3 画素内色変換 (In Pixel Color Conversion)	21	3.3 Blue QD-LED の開発	52
2-3-1 要約		3-3-1 ZnSe/ZnS QD-LED の長波長化	
2-3-2 画素内色変換の実用化例：QD OLED		3-3-2 ZnSe/ZnS QD-LED の反応性制御エピタキシャル成長による長波長化	
2-3-3 画素内色変換における課題と対策		3-3-3 ZnSe/ZnS QD-LED の長波長化と更なる特性改善	
2-3-4 QD パターン化プロセス		3-3-4 Core/Shell 構造設計による特性改善	
2-3-5 Micro LED Micro Display の画素内色変換		3-3-5 QD 保護技術による特性改善	

3.4 非 Cd 系 Red QD-LEDの開発 -----	57	3.7 QD-LED ディスプレイ試作 -----	80
3-4-1 デバイス設計による非Cd系 Red QD-LED の特性改善		3-7-1 BOE	
3-4-2 非Cd系 Red QD-LED の寿命解析		3-7-2 Sharp	
3.5 QD-LED デバイス構造 -----	59	3-7-3 Samsung Display	
3-5-1 Inverted		3.8 White 発光 QD-LED -----	88
3-5-2 ZnO ETL層		3.9 Perovskite QD-LED -----	89
3-5-3 New HTL層		3-9-1 EQE の進化	
3-5-4 Top Emission		3-9-2 Ligand Exchange による EQE改善	
3-5-5 Tandem		3-9-3 ETL による特性改善	
3-5-6 Meta surface によるフルカラー化		3-9-4 今後の課題	
3-5-7 今後の QD-LED の更なる性能向上に向けて		3-9-5 課題への対策：Blue Perovskite の高効率化	
3.6 QD-LED プロセス -----	72		
3-6-1 Spin Coating			
3-6-2 Inkjet Printing			
3-6-3 EHD Printing			
3-6-4 UV Lithography			
3-6-5 転写 Micro Contact Printing			

2-2 液晶バックライトへの応用

2-2-3 Mini LED Backlight 用色変換材料

- Green及びRedの色変換材料としての蛍光体（KSF など）とQD（CdSe, InP, Perovskite）の発光スペクトル幅と変換効率をプロットしたのが図1である。スペクトル幅は色純度に、変換効率は輝度（或は輝度一定であれば消費電力）に対応している。この図から、消費電力的にはInPやCdSeのようなQDよりも蛍光体の方が優れているが、GreenではPerovskite が蛍光体とほぼ同等の消費電力である上に色純度がはるかに優れていることが判る。一方で、RedはKSFが色純度も消費電力も優れている。^{*}
- 図2はGreenとRedのどのような組み合わせがRec2020のカバー率と輝度で優位となるかを示しており、GreenはPerovskite、RedはKSFという組み合わせが最良であることが分る。

図1*

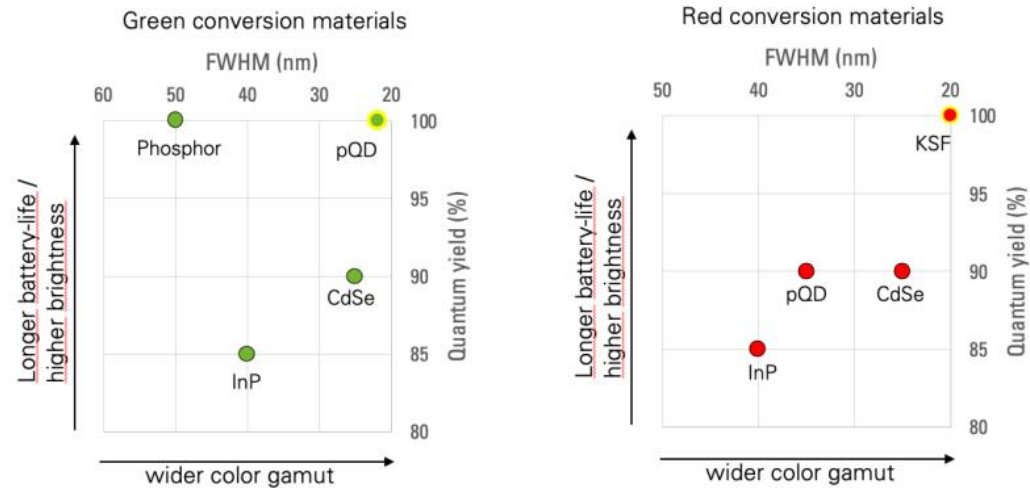
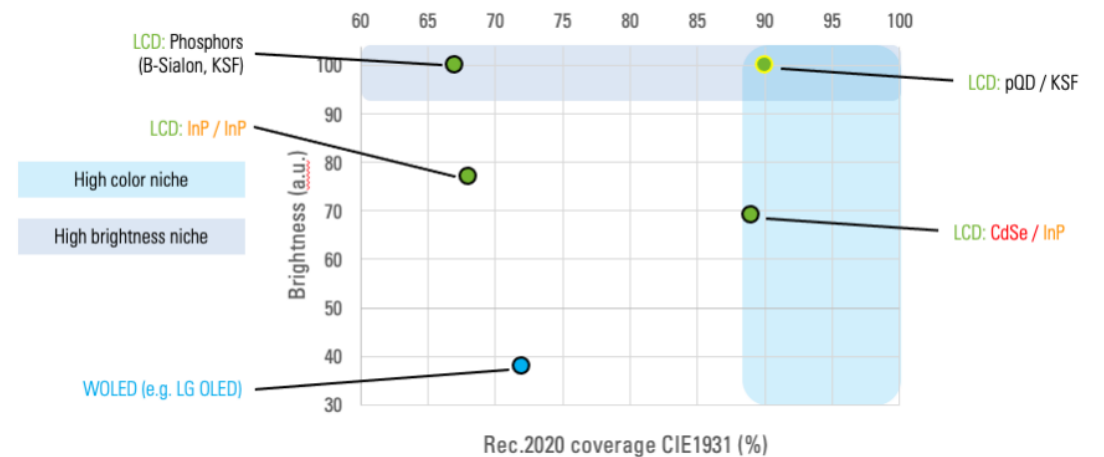


図2*



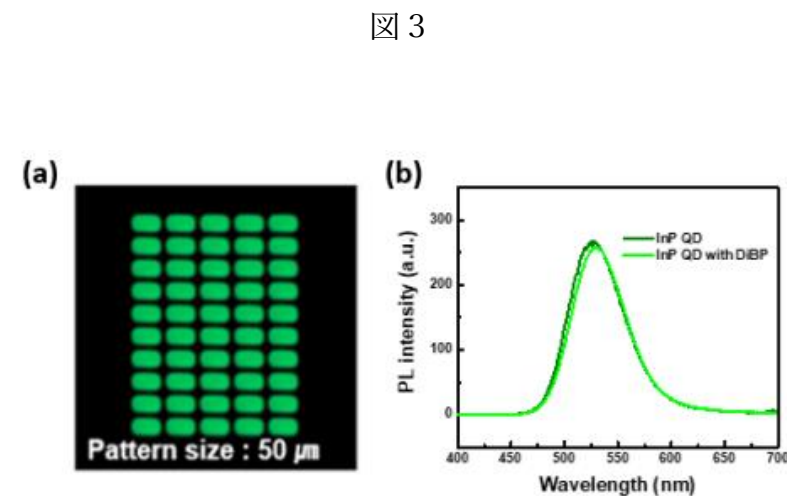
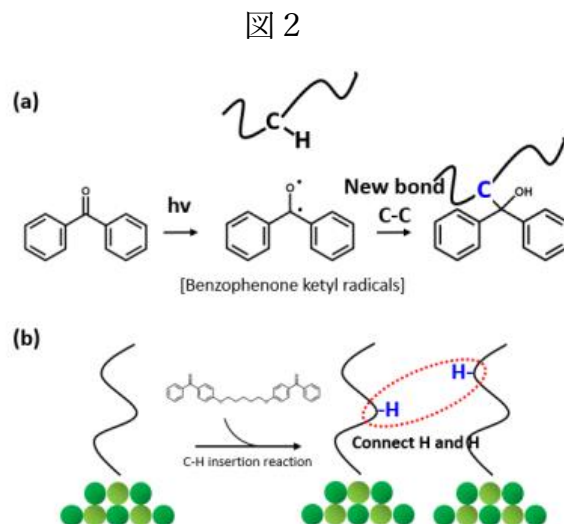
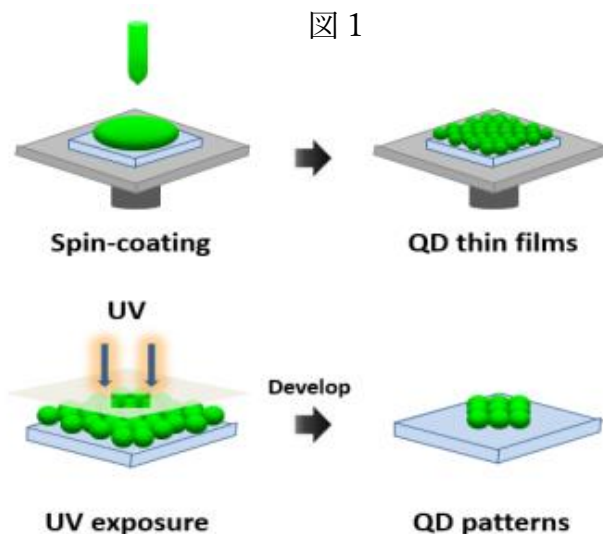
* Norman A Luechinger SID2022 Digest 26-2 p299

2-3 画素内色変換 (In Pixel Color Conversion)

2-3-5 Micro LED Micro display の画素内色変換

❖ フォトリソによるパターン化

- QDのPhotolithography として、QD膜上にフォトレジストを塗布・現像する方式では、そのプロセス中にQD膜が損傷する危険性がある。これを防ぐ方法としてジベンゾフェノン(DiBP)を用いた溶液ベースのプロセスをSungkyunkwan Univ. が開発し IDW2023で報告した。*
- クロロホルム中のInPとDiBPを図1のようにスピコートで塗布し、紫外線で露光するとDiBPがケチルラジカルを生成し、このラジカルがInPと相互作用して架橋を形成する。その様子を図2に示すが、生成したケチルラジカルが近傍のQD配位子の存在下で C-H挿入反応により新たな C-C 結合を形成して架橋する。
- このプロセスで作成した Green InP のパターンを図3に示す。パターンのサイズは50 μm である。

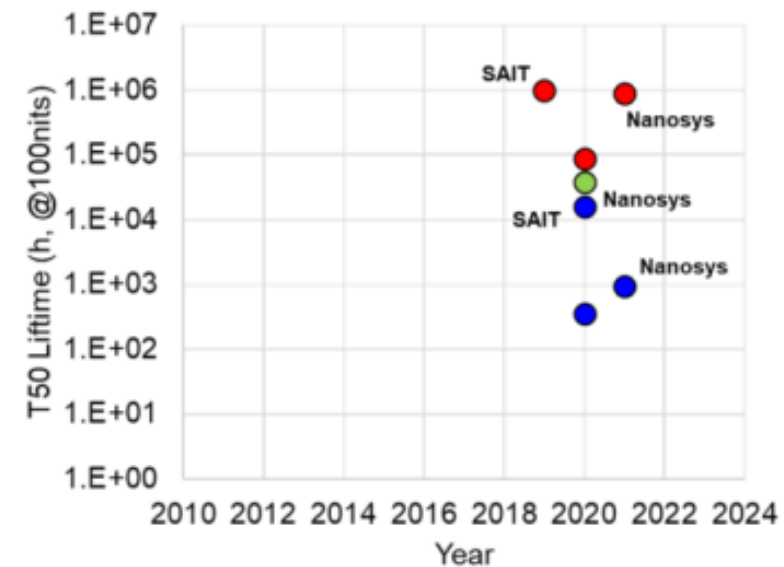
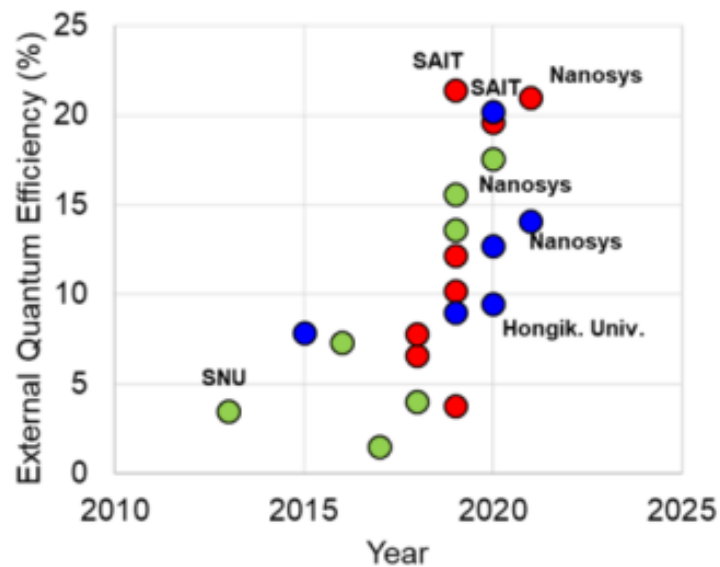


* Boram Kim et. al. IDW2023 Digest FMC11-2L p404

3-2 QD-LED 特性の進化と現状

3-2-3 非Cd系QD-LED 特性の進化

- Samsung Display は InP QD を用いた All Inkjet QD-LED を SID2022 で発表した。その中で非 Cd 系 QD-LED の EQE と寿命の進化を下図のように纏めている。*
- Nanosysが良好な特性を出しているが、SAIT (Samsung Advanced Institute of Technology) も肩を並べる特性を報告している。



* Myoungjin Park et. al. SID2022 Digest 3-3 p5

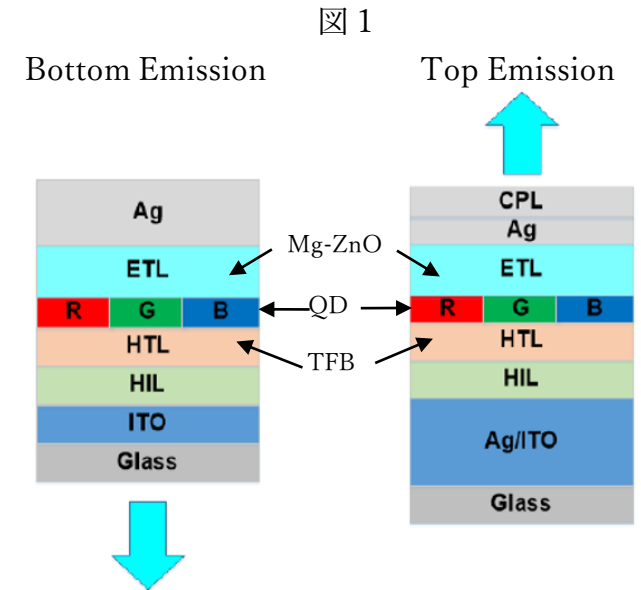
3-5 QD-LED デバイス構造

3-5-4 Top Emission

❖ Strong cavity & RGB

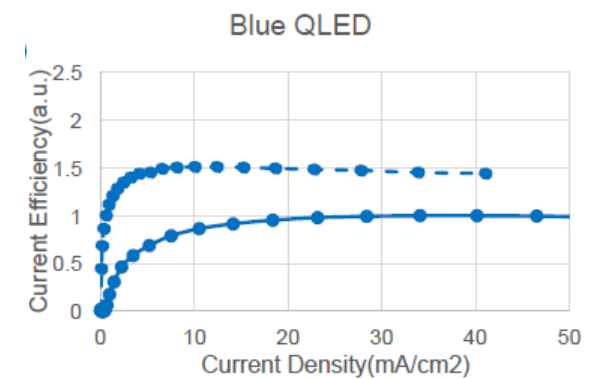
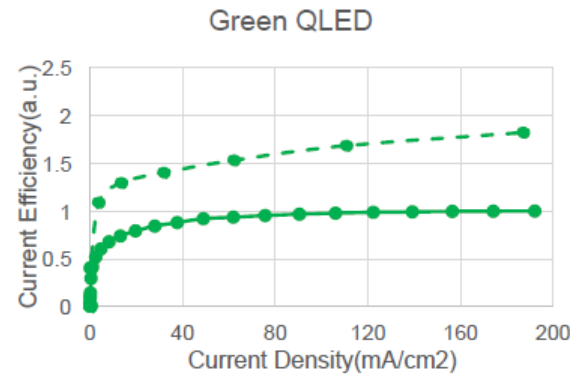
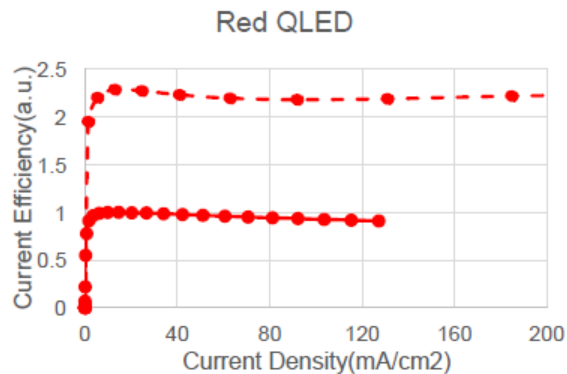
- TCL は RGB 全てを CdZnSe/ZnS 系の Core/Shell 型 QD で発光させ、それを Top Emission デバイスとして Bottom Emission デバイスの特性と比較した結果を SID2021 で報告した。*
- 図1のような構成で作ったNormal Stack の Bottom Emission QLED の特性は下記にまとめた。この特性は Solution process OLED とほぼ同等の特性と言える。
- 次にこれを Top Emission の構成としてその電流効率を比較したのが図2である。電流効率は Green と Blue のTE-QLEDで、それぞれ1.8倍と1.5倍に向上した。また Red と Green のTop Emission QLED の実用寿命は、Bottom Emission QLEDと同等であった。

* Wenjin How et. al. SID2021 Digest 63-1 p.920



	R	G	B
Current Efficiency (max)	20 Cd/A	80 Cd/A	8 Cd/A
LT95@1,000Cd/m	4,000 h	7,000 h	200 h
FWHM	22 nm	23nm	22nm

図2



3-6 QD-LED プロセス

3-6-3 EHD (Electro Hydro Dynamic) Printing

- EHD Printing はピエゾ式インクジェット印刷 (IJP) とは異なり、図1のようにノズルと基板間に高い静電気力が加わるため、ノズル直径の大きさよりも 2~5 桁小さい液滴 (即ち、0.001~10 pL の範囲) を吐出することができる。更にピエゾ式インクジェットが吐出できるインク粘度が 1~30mPa.s の範囲であるのに対して、EHD Printing は 1~10,000mPa.s という広い範囲のインク粘度を吐出できるため、インク中のQD濃度に対する制限が大幅に緩和される。
- Fraunhofer は InP/ZnSe/ZnS QD をチオール官能性を有する半導体ポリマーと統合した QD/有機ナノハイブリッドを用いて、EHD Printing した結果をSID2023で報告した。*
- 図2に示すように EHD Printing によって 5 μ mピッチの印刷ができた。(a) は QD/有機ナノハイブリッド、(b) は HIL として用いた TFB を 5 μ mピッチで印刷してものの蛍光顕微鏡写真である。

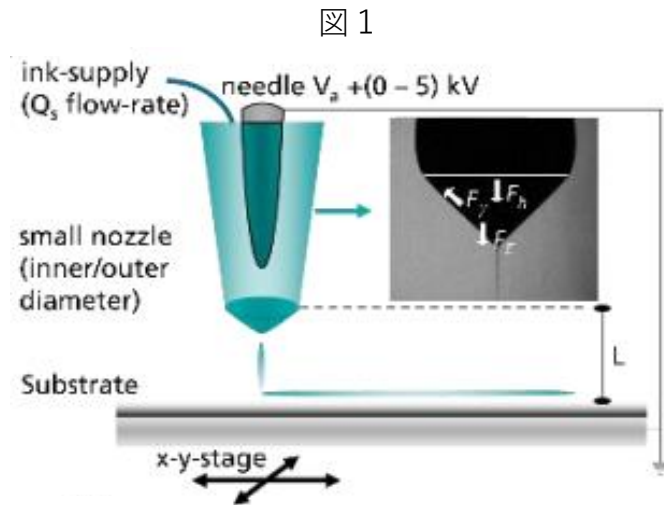
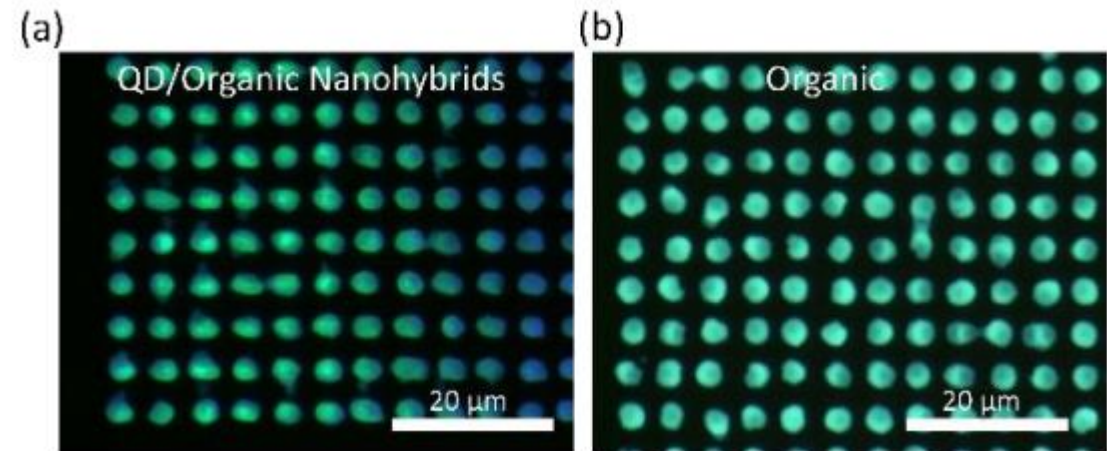


図2



* Yohan Kim et. al. SID2023 Digest 69-4 p.982