量子ドットフィルムによってLCDの色表示が50%向上

ジョン・バン・ダーロフスケ、アート・ラスロップ

量子ドット増強フィルムによって、LCDメーカーは、量子ドットを製造工程に組み込む効率的なメカニズムを持つようになっている。

数十年の研究開発を経て、量子ドット（QD）を採用した初の液晶ディスプレイ（LCD）が市場に出てくる。QDは、分子サイズの球形半導体材料である。このようなディスプレイは、初期のLCDと比べて色表示能力は50％優れており、カラーパフォーマンスは商用有機発光ダイオード（OLED）ディスプレイと同等かそれを上回ることになる。

LCDメーカーは、QDを自社の製造工程に組み込むために、それぞれの技術開発を行っている。米3M社のQuantum Dot Enhancement Film（3M QDEF）は、効率的で耐久性の高い構造であることが分かってきている。

簡単に言うと、QDは色を変換する。より正確には、1個のQDが短波長の光を吸収し、より長い波長の狭スペクトル光を放射する。放出された色の波長はドットのサイズによって決まるので、放出は予測でき、調整できる。より小さなドットはより短い波長を生成し、より大きなドットはより長い波長を生成する。

例えば、波長が約450nmの青色光子が3nmのQDを叩くと飽和緑色光を生成する。その青色光子が7nmのQDを叩くと、飽和赤色光を生成する。調整度合いは並外れており、ドットサイズを調整することで放出光は所望の波長の約1nm以内に調整できる。

これらの緑や赤を生成するドットをLEDが放出する青色光と合成すると、三原色の狭スペクトルピークを持つ白色光が得られる。

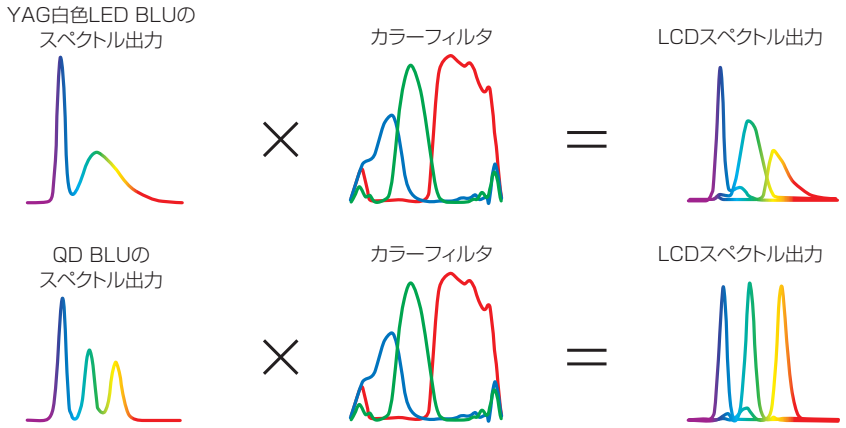


図1　従来の「白色」YAG LEDからの光がカラーフィルタを透過するとき、緑と赤は不飽和状態に見える。LEDからの光が、黄の蛍光体ではなくQDによって変換されるとき、ピークが集中していて、最終的な色は飽和状態になっている。

狭スペクトルピークが重要な理由

これら3原色の狭スペクトルピークの重要性を理解するために、光がどのように生成され、LCDで応用されるかを考えてみよう。まず、今日の従来タイプLCDバックライトユニット（BLU）の光源はLEDアレイである。これらの窒化ガリウム（GaN）ベースのLEDは、一般には青色光を放出するので、LED蛍光体、通常YAG（イットリウムアルミニウムガーネット）で処理され、白色光を生成する。

つぎに、この白色光はLCDパネルのカラーフィルタを通して光っている。このフィルタは、数千、数百万の赤、青、緑のサブピクセルからなる。これらのサブピクセルを1つ1つを透過する光を制御して個々のピクセルの色を生成させている。

一般にBLUの白色光には、3原色の赤、青、緑の波長が集中していない。それどころか、白色光にはカラーフィルタから漏れてくる非3原色波長（オレンジ、黄など）が非常に強い。結果的に、スペクトル出力は飽和していない。従来のカラーフィルタでは、例えば、赤のサブピクセルが透過する波長帯は570nm（黄、オレンジ、赤の混合）よりも広い。この混合のためにLCDは純赤色にならない（**図1**）。

一方、BLUが処理されていない（青みがかった）LEDと赤および緑のQDとを合成すると、生成される白色光のエネルギーのほとんどは3原色の赤、緑、青の波長にある。この光がカラー

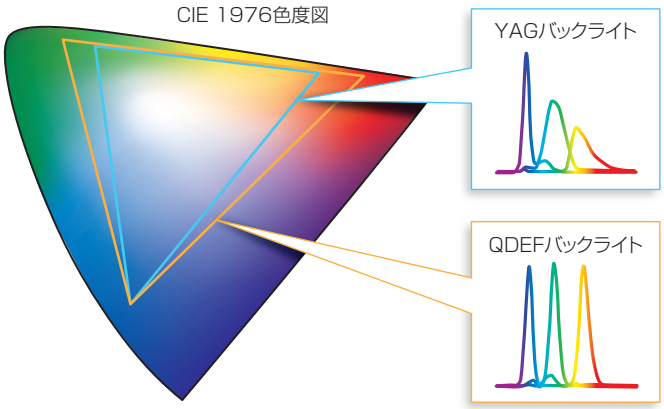
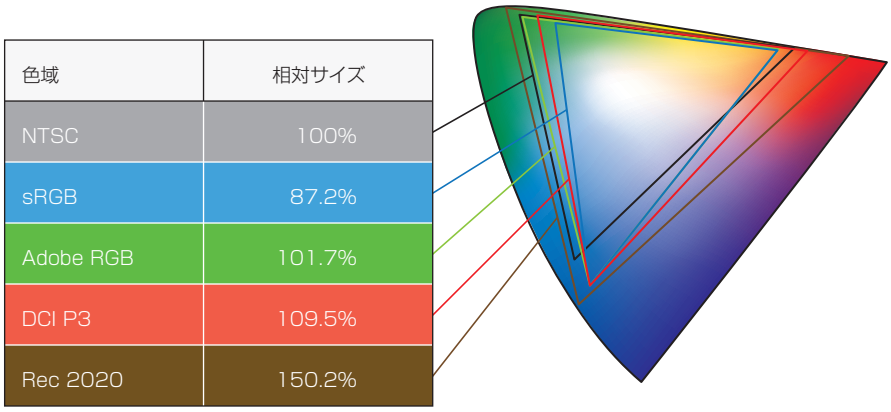


図2　QD採用のバックライトを持つディスプレイで生成される色域は、従来の白色YAG LEDバックライトを持つ同じディスプレイで生成される色域よりも約50%大きくできる。



色域	相対サイズ
NTSC	100%
sRGB	87.2%
Adobe RGB	101.7%
DCI P3	109.5%
Rec 2020	150.2%

図3　CIE 1976色度図と比較した種々の色域。

フィルタを透過すると、LCDが生成するピークは3原色の波長に集中しており、色彩が一層鮮やかな、より大きな色域が効率的に作れる[1]。

その結果、QDディスプレイはより大きな色域を生み出すことができ、これは従来の白色YAG LEDで生成する色域よりも50%大きい(**図2**)。

色域概説

色域という用語は、色パレットを説明するために用いられている。色パレットは、標準的な、もしくは所定のディスプレイが表示する色の範囲を含む。色域は、自然現象によって生成される色の範囲を説明するためにも用いることができる。

色域は画像やビデオのエンコーディングに関係しているので、一般に赤、緑、青の3原色を規定する。全ての他の色はこれらの3原色の混合によって創られる。1つの例として全米テレビジョン放送方式標準化委員会(NTSC)の標準がある。これは1950年代にカラーテレビ向けに定められた。現代のHDTV向けの標準はRec. 709で、これはカラーモニタ用の標準赤-緑-青(sRGB)色域である(**図3**)。

多くの場合、ディスプレイの色域は標準色域との関連で説明される。例えば、ほとんどのLCD TVの色域はRec 709標準の約100%程度、古いNTSC標準の87%(CIE 1976色空間を例に比較。より古い1931年色空間では、ほとんどのLCD TVの色域はNTSC標準の約72%)。次世代のUHD TVは、Rec 2020になる予定であるが、これはNTSC標準の150%になる。他の機器、タブレットやノートブックなどの色域は著しく小さい。

現在、メーカーは、QD、OLEDあるいは特殊カラーフィルタを用いてより大きな色域のディスプレイを造ることができる。これらのディスプレイの色域は通常、Adobe RGBもしくはDigital Cinema Initiatives DCI P3標準で表される。Adobe RGBは印刷媒体と密接に関係しており、一方DCI P3はビデオ制作との関連がより強い。Adobe RGBはでは緑の範囲がわずかに広いが、sRGB標準と比べるとDCI P3は増強版赤と緑の色域が広い。

QDをLCDに組み込む

QDの耐久性は、熱、酸素および水蒸気にさらされると影響を受ける。これらの感度は、QDをLCD製造に組み込むための方針作成に役立った。

1つのアプローチでは、QDは「レール」というガラスチューブに封入し、ディスプレイの側面に沿って並んだLEDの前にそれを直接設置する。青い光がこのレールを叩くと、一部は赤と緑の光に変換され、一部は透過され、赤、緑、青の3原色が生成される。このアーキテクチュアの問題点は、ドットがLEDからの高熱とフラックスにさらされることである。この点は、ドットの効率と寿命に影響をあたえる[2]。レールによって別の機械構成部品が増える。これはディスプレイの端に沿って置かなければならないので、デザインの柔軟性に影響をあたえる。ベゼルエリアが限られているので実質的にディスプレイサイズを小さくすることができない。最後に、この方法は現在のディスプレイ製造工程の再構成を必要とする。

3M社で開発したシステム、3M QDEFでは、QD導入は別の機構になる。このアプローチでは、高熱やフラックス

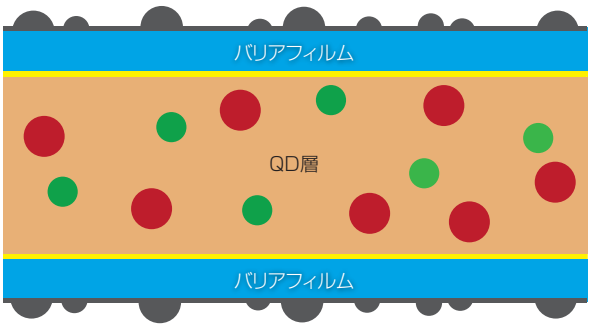


図4 3M QDEF構造:2つのバリアフィルムスタックとポリママトリックスにQDが分布したフィルム。

条件下にさらされることが少なくなる。フィルムを現在の製造工程に組み込むことは比較的簡単である。

このシステムは、3層スタックとなっている。上のバリアフィルム、ポリマにQDを分布した中間層、それに下のバリアフィルム(**図4**)。QDの量と赤いドットに対する緑の比率は、ディスプレイの色仕様、BLU内の光の再利用度、カラーフィルタの特性、それにフィルム全体の厚さの影響を受ける。

バリアフィルムは、柔軟性、透明性、透過性の点で重要なイノベーションである[3]。これは、結合した厚さ(現在の構造)がわずか55μmの超薄層でできている。貼り合わせると、これらの層は水蒸気と酸素に対する障壁を形成する。これは従来のパッケージグレードバリアフィルムよりも非浸透性は数ケタ大きい[4]。このバリアの水蒸気移行率は20℃で1×10^{-3}g/m^2/日であり、光学的に透明で柔軟性がありながら、このレベルの保護能力を提供している。これはまた、ガラスと比べて薄く、軽量、柔軟であり、衝撃耐性が高い。

QDは、sRGB達成において従来のYAG LEDやカラーフィルタよりも最大15%高効率である。QDを採用したディスプレイは、より透過性の高いカラーフィルタ(例えばCF65)を用いてsRGB色域を表現できるため、この改善が得られている。所望のディスプレイ輝度を達成するために必要なBLUからの光は少なくてよいので、エネルギー消費が減り、ポータブル機器ではバッテリーの動作時間が延びる。

さらに大きな色域(例えば、Adobe RGBやDCI P3)では、QDのエネルギー的利点はなおさら際立つ。これらの大きな色域を表現するための、LCDにとっての代替法は、より飽和レベルの高い、透過性の低いカラーフィルタを使用することになる。このようなフィルタが阻止する光はさらに多くなるので、ディスプレイには一段と高輝度のバックライト照明が必要になり、エネルギー消費はさらに増加する。

飽和カラーフィルタを使うディスプレイと比較すると、一般的なカラーフィルタ(例えばCF72)を搭載したQDディスプレイは、より大きな色域を表現する際のエネルギー効率が最大50%向上する。

加速寿命試験から、3M QDEFの耐久性は業界の要求条件を上回っていることが示されている。標準テスト(温度サイクルと高湿を含む)を受けて、3M QDEFは寿命2万～3万時間で、白色点ドリフトからの一般的な故障が現れることが示された。次世代の3M QDEFは、ほとんどのコンシューマアプリケーションで寿命7万時間以上が見込まれている。

次は何か？

近い将来、QDを採用したディスプレイの大量普及が期待される。LCD電話、タブレット、特にテレビ体験が変わり、より現実的に、視線を包み込むような没入型になる。この間に、QD(レールと3M QDEF)を使用する現在のメカニズムが改良される。バックライト板にドットをコーティングするような、他の方法が開拓されることはほぼ確実である。

究極的には、QD技術は、新しくて刺激的な方法でコンテンツに影響をあたえる。映像作家、映画制作者、その他のコンテンツ創作者は、この拡張色域を使って、われわれの周囲の世界をより正確に反映し、新しい効果を作り出し、感情やアイデアを、想像力をかき立て刺激するような仕方で表現するようになると考えられる。

参考文献

(1) A. Lathrop. "Color as a key differentiator," IHS/SID 2013 Business Conference, Vancouver, BC, Canada(2013).

(2) S. Coe-Sullivan, W. Liu, P. Allen, and J. S. Steckel, "Quantum dots for LED downconversion in display applications luminescence and display materials, devices, and processing," ECS J. Solid State Sci. Technol., 2, 2, R3026-R3030(2013).

(3) F. B. McCormick, "Barrier films for displays, lighting, & flexible electronics," Printed Electronics USA, Santa Clara, CA(2013).

(4) J. Chen, V, Hardev, and J. Yurek, "Quantum-dot displays: Giving LCDs a competitive edge through color," SID Information Display, 2-7(2013).

(5) J. Van Derlofske and K. Hanley, "Quantum dot enhancement film(QDEF): High color gamut LCDs for improved visual quality," Intel Ecosystem Symposium, Taipei, Taiwan (2013).

著者紹介

ジョン・バン・ダーロフスケとアート・ラスロップは3M社の光学システム部に属する。
Maplewood, MN　e-mail: osdconsumerelectronics@mmm.com　URL: www.3m.com

LFWJ