

2次元ミニLEDバックライトユニットの新しい光学設計

ベンジャミン・ジェイコブズ

マイクロレンズアレイは、ミニLEDによって均一で高輝度のディスプレイを実現するための効率的な手段である。

2次元ミニLEDバックライトアーキテクチャのイノベーションに支えられて、液晶ディスプレイ(LCD)設計は現在、100万対1のレベルのコントラスト比を実現する有機EL(OLED)ディスプレイを含む、自発光式ディスプレイと同等のコントラスト性能を達成することが実証されている。また、ディスプレイモデルによっては、有機ELデバイスでは問題となることの多いバーンインを引き起こすことなく、1000nitを超える連続的なピーク輝度レベルも達成する。こうしたコントラストと輝度の向上は、複数の電子機器に改善をもたらしている。

そのメリットは有望だが、厚さと効率の要件を満たす、均一性に優れた2次元ミニLEDバックライトの製造には、複数の課題が残っている。本稿では、バックライト設計時の検討項目について説明し、マイクロレンズアレイ(MLA)技術によってこの新しいアーキテクチャを改良する方法を紹介する。

課題への対応

新しい2次元ミニLEDバックライトの設計を評価するにはまず、従来のLCDバックライトとの違いを理解する必要がある。市場に提供されている一般的なLCDバックライトは、バックラ

イトユニットの一端に沿って並べられたLED列で構成されている。LEDの光は、ライトガイド(導光体)に導かれる。これらのエッジ発光ディスプレイは一般的に、単一の光拡散フィルムをクロス輝度向上フィルム(crossed brightness enhancement film:xBEF)と併用することによって、光を視聴者へと導く(図1)。光拡散フィルム(ダウンディフューザ)は、ライトガイドからの滑らかで均一な光出力を確保し、xBEFは発光の視野角を狭めて出力強度を高める。これらは費用対効果の高い成熟した技術だが、エッジ発光のLCDは、有機ELディスプレイのようなハイダイナミックレンジ(High Dynamic-Range:HDR)で高コントラストのコンテンツを生成することはできず、顧客が求める輝度レベルを効率的に達成することはできない。

2次元ミニLEDバックライトユニット(2D BLU)は、PCBに接合されたLEDアレイで構成される。LEDは、個別または数個単位でオン/オフ、または特定の輝度になるように調整することが可能である。設計によっては、数百から数千もの局所的な調光ゾーンを設けて、LCDのコントラスト性能を制限する本質的な欠点を解決することができる。パネルの個々の液晶セルが、オン/オフスイッチとして動作する。しかし、このスイッチは完全にオフにすることができないため、光漏れが生じる。その結果、暗い色や黒色が適切に再現されず、コントラスト比は比較的低くなってしまふ。

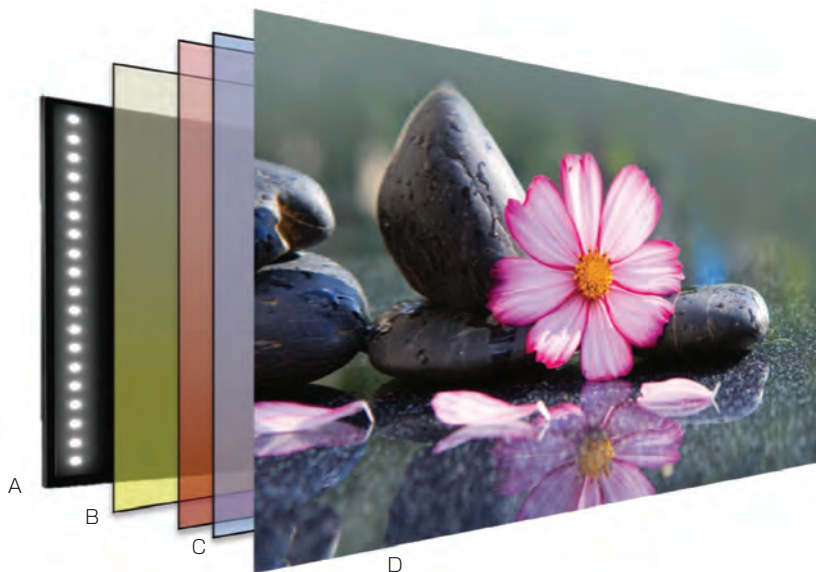


図1 エッジ発光バックライトユニットの構成階層。最背面の(A)はエッジ発光ライトガイド、(B)はダウンディフューザ(黄色)、(C)はxBEF(赤色と青色)、最前面の(D)はLCDパネル(本稿の図はすべてブライトビュー・テクノロジーズ社提供)

この光漏れの問題を回避するために、2D BLUは、バックライトの特定ゾーンを調光またはオフにすることにより、液晶セルがオフの場合に漏れ出す光がほぼ残らない状態にする。これによって実際に近い黒色や暗い色が再現され、コントラスト比は劇的に向上する。

2D BLUにおいて、アレイを構成する個々のLEDは点光源として機能し、均一の光出力を生成するにはこれらを隠蔽する(平準化する)必要がある。また、スマートフォン、タブレット、ノートPCなどの携帯端末や、電気自動車向けのディスプレイは、薄くて電力効率も高くなければならない。2D BLUには、コストが低く、広く普及している青色LEDが採用される場合が多く、青色LEDには、LCDを適切に動作させるために、一部の青色光を赤や緑に変換することによって白色光を生成するためのフィルムが必要である。図2は、2D BLUのフィルムスタック構成例を示したものである。スタックの最背面にLEDアレイが配置され、その上に、LEDを隠蔽するためのフィルム、色変換フィルム、xBEF、LCDパネルの順に積層される。

この新しいアーキテクチャは、ディスプレイ設計に胸躍る機会をもたらすものだが、LEDを隠蔽するための現行の光拡散フィルムとは異なる方法が必要である。

2D BLUの設計時検討項目

高性能2D BLUディスプレイを実現するには、以下に挙げる複数の項目とトレードオフを設計過程において検討しなければならない。

間隔(ピッチ)：2D BLUでは、LEDが正方形のマトリクスアレイ状(チェッカーボードパターン)に配置される。LEDの間隔は、設計によって変える

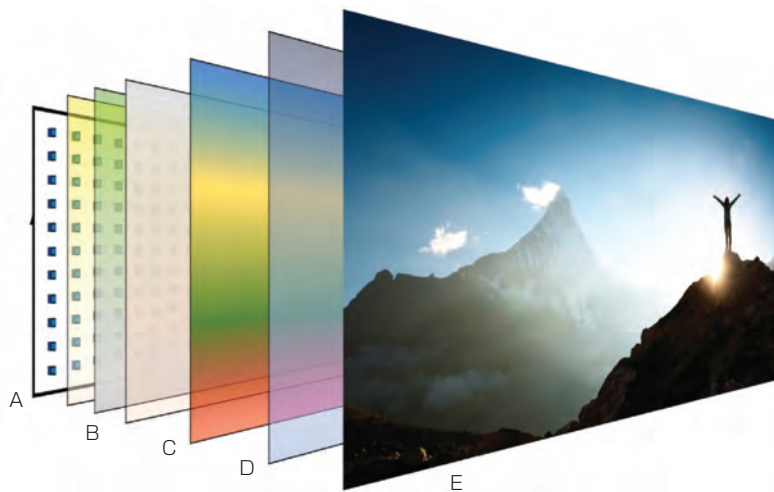


図2 2D BLUの構成階層。最背面の(A)はLEDアレイ、(B)はMLA(黄色、緑色、淡い茶色)、(C)は色変換フィルム(マルチカラー)、(D)はエッジムラ補正フィルム(青色)、xBEF(この図では省略されている)、(E)はLCDパネル

ことができる。LEDの数が少ないほどコストは抑えられるが、より多くのLEDをバックライトに使用する場合と同等の性能は得られない。

LEDの種類：LEDに分布ブラッグ反射器(Distributed Bragg Reflector: DBR)を適用することにより、ランバート反射(DBRなしの場合)ではなく、光をLEDの側面に向けることができる。反射器をLEDアレイの背面にも使用すれば、光出力の指向と再利用をさらに促進することができる。DBRはさまざまな材料で構成可能で、さまざまな反射特性を持ち、それがスタックを構成するフィルムの性能に影響を与える。

パッケージとカプセル化：LEDアレイにはベアダイが用いられ、PCB上で直接カプセル化されるか、従来のパッケージLEDの形式で製造される。LEDパッケージ方法は、LEDを隠蔽性能に影響を与える可能性がある。

色：バックライトには青色LEDが使われる場合が多いが、(チップスケールパッケージの)白色LEDが採用される場合もある。青色LEDには色変換フ

ィルムが必要だが、白色LEDにはそれが不要である。現在提供されている2種類の色変換フィルムは、量子ドットと蛍光体である。

色のエッジムラ：2次元ミニLEDディスプレイは、ディスプレイの縁周辺で色が不均一になる可能性があり、それは画像や動画の色品質に影響を与える。フィルムまたはソフトウエアによってそれを補正することが可能で、ベゼルレスのLCDへの移行が進む中で、この補正は必須である。

BLT：BLT (Blue Layer Transmission: 青色レイヤー透過)フィルムは、LEDアレイからの青色光の透過と、色変換フィルムからの赤色と緑色の反射を強化するものである。これによって、バックライトのコストと厚みは増加するが、性能は改善される。

厚み：ディスプレイの厚みは、BLUの設計によって異なり、LEDの間隔、種類、カプセル化などの項目に依存する。

コスト：おそらく最も重要な検討項目である、2D BLUディスプレイのコストは、LEDの個数、LEDの種類(青

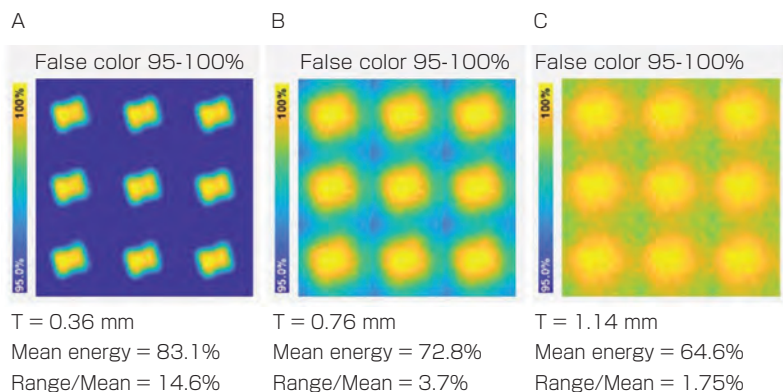


図3 2D BLU上のポリメトリックフィルムの比較。Aは厚さ0.36mm、Bは厚さ0.76mm、Cは厚さ1.14mmの105°のポリメトリックディフューザを使用した場合である。フィルムが厚くなるほど、LEDを隠蔽する能力は高まるが、効率が低下する

色か白色か、DBRを適用するか否か)、厚み、フィルムの選択、カプセル化、PCBがリジッドかフレキシブルかなど、複数の項目に依存する。

BLUの構成要素は互いに依存する。1つの要素を変更すると、他の要素の性能とコストに有意の影響が生じる可能性がある。構成要素の相互依存性を考慮して設計時検討を行い、LEDを隠蔽するための最適なソリューションを判断する必要がある。設計の組み合わせは無数に存在するため、2D BLU毎に、フィルムスタックに対する何らかのカスタマイズが必要である。

従来のポリメトリックディフューザによってLEDを隠蔽する方法

エッジ発光LCDでは、ポリメトリックディフューザまたはシンプルなコーティングディフューザ(フィルムにコーティングを施したものを)、均一なバックライトを生成するためのダウンディフューザとして使用する場合がある。ポリメトリックディフューザは、エッジ発光ディスプレイに適しており、LED照明を隠蔽する目的に広く利用されている。しかし、このディフューザは2D BLUにはあまり適していない。

この新しいアーキテクチャを最大限に活用して、許容できる光均一性を実現したり、厳しい性能要件(特に厚みと効率)を満たしたりすることができないためである。

2D BLUにおいてLEDを隠蔽するには、拡散性が高くで厚みのあるポリメトリックディフューザが必要である。ディフューザが薄すぎるとムラが生じ、ディスプレイ全体で輝度が不均一となり、個々のLEDが視覚的に判別できる状態(平準化されていない状態)になる。図3は、3つの異なる厚さの105°のポリメトリックディフューザを使用した場合の、LED隠蔽性能を示したものである。ポリメトリックフィルムは、LED基板の上に直接配置し、その上に色変換フィルムとxBEFを重ねた。厚さが0.36mmの場合、LEDははっきりと判別することができ、range/mean(輝度の較差[最大値と最小値の差]/平均値、最も明るい点と最も暗い点の差)は14.6%だった。厚さを1.14mmにすると、range/meanは1.75%という、より許容可能なレベルに低下する。しかし、平均エネルギー(輝度)が64.6%に低下し、この効率レベルでは、多くの2D BLUの設計仕様に対して許容できない。

この測定は、ミニLED基板の構成と設計に大きく依存することに注意してほしい。測定値は相対的なものであり、直接比較のみを目的に使用されている。

前述のとおり、2D BLUではLEDが正方形または長方形のアレイ状に並べられる。しかし、ポリメトリックフィルムは光を放射状に拡散するため、過剰な拡散によってホットスポットが生成される可能性がある。LEDを十分に隠蔽するためにポリメトリックフィルムを厚くすると、隣接するLEDの光が重なり合うようになるため、最適な均質光拡散構造を実現するのは難しい。

マイクロレンズアレイによってLEDを隠蔽する方法

マイクロレンズアレイ(MLA)は、カスタム設計された光学系を使用して、さまざまな用途に向けて光のステアリングと整形を行うもので、2D BLUにおいてLEDを隠蔽する目的に対しても、ポリメトリックディフューザよりも有効である。MLAは、ポリエチレンテレフタレート(PET)やポリカーボネートフィルムなどの光学的に透明な基板の上または中にエンボス、エッチング、または成形加工されたミクロンサイズのレンズで構成されている。米ブライトビュー・テクノロジー社(BrightView Technologies)のMLAは、デジタルでグレースケールのリソグラフィシステム上に作成されたエンボス加工ツールを使用して、ロールツーロール方式の量産プロセスによって製造されている。そのレンズ設計は、2次元LEDアレイを効率的に隠蔽して、高い均一性とゼロ光学距離を実現するように、調整可能である。MLAは、ビーム整形、イメージ分割、

フィルムの厚さという3つの手段によって、これを達成する。

MLAは、明確なビーム形状を生成可能で、実質的にLEDの発光特性を覆して、ゼロ次光をLEDの間の暗い領域にステアリングする。例えば、ランバート特性を持つLED光源を、2次元LEDアレイの形状に合わせて作られた特殊な形状のレンズを使用して、異なる対称性を持つさまざまな強度プロファイルに整形することができる。

イメージ分割は、1個のLEDのプロファイル分割して複数の光の点をシミュレーションすることにより、1個のLEDを、近くに配置された複数の光源として作用させて、より高いLED集積密度を光学的に達成するものである。MLAのレンズ形状によって、光がどのように分割されるかが決まる。

ポリュメトリックフィルムと同様に、厚さがLED光の拡散と隠蔽の最適化において重要な役割を担う。ビーム拡散は、フィルムの厚さに比例する。従って、適切なフィルム厚さを選択して、ホットスポットの生成につながる可能性のある、過剰拡散と拡散不足を防ぐことが重要である。一般的に、LEDアレイのピッチが広いほど、厚いフィルムが必要になる。

2D BLU設計に応じて、多様なフィルムスタック構成が考えられる。1つの例は、LEDアレイの上に3枚のMLAからなるスタックを配置してLED点光源を隠蔽し、その上に色変換フィルム、xBEF、LCDパネルの順に重ねた構成である。色変換フィルムをLEDのすぐ上に配置して、その上にMLAフィルムスタックを重ねる場合もある(さらにBLTが追加される場合もある)。微細構造を色変換フィルムに直接パターンニングして、機能を追加することもできる。

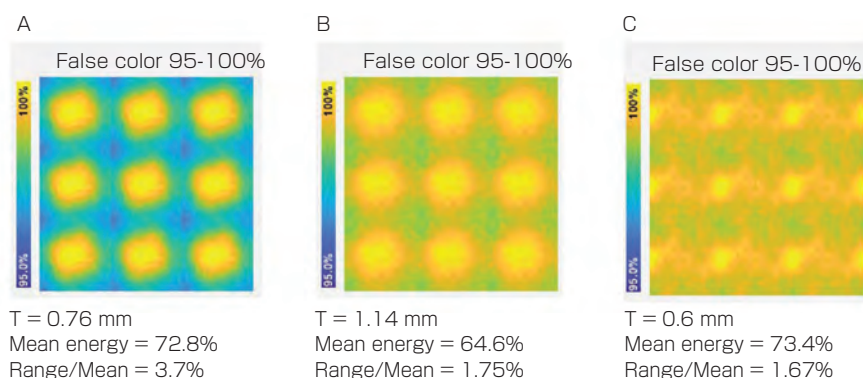


図4 ポリュメトリックフィルムとMLAフィルムスタックの直接比較。Aは厚さ0.76mm、Bは厚さ1.14mmの105°のポリュメトリックフィルムをBLUに適用した場合で、Cは3枚のフィルムからなるMLAスタックを同じBLUに適用した場合である

ポリュメトリックフィルムとMLAフィルムの比較

MLAは、ビーム整形とイメージ分割を利用することにより、2D BLUにおけるLED隠蔽性能を、従来のポリュメトリックディフューザと比べて改善することができる。図4は、ブライトビュー社のMLAスタックと、2種類の厚さのポリュメトリックディフューザを直接比較した結果である。厚さ0.76mmのポリュメトリックディフューザの平均エネルギーは約73%だった(A)。しかし、range/meanは3.7%と高く、個々のLEDは画像の中で容易に判別できる状態である。(B)はポリュメトリックフィルムの厚さを1.14mmにした場合で、range/meanは1.75%に改善されており、隠蔽性能が良好であることが示されている。しかし、平均エネルギーは64.6%に低下し、効率が許容レベルを下回っている。これらの結果を、(C)のMLAフィルムスタックと比較した。(C)は、厚さ0.6mmで、平均エネルギーは73.4%、range/meanは1.67%となっており、

MLAフィルムスタックは薄さを維持しつつ、LED隠蔽性能と効率の両方で、ポリュメトリックディフューザを上回ることを示している。

結論

2D BLUにより、LCDでバーンインを引き起こすことなく、有機ELディスプレイに匹敵するコントラスト比を実現できるようになった。また2D BLUは、より高いピーク輝度を生成して、輝度レベルを維持することも可能である。しかし、2D BLUのアーキテクチャは、薄く、効率と費用対効果が高く、均一性に優れたバックライトの生成に、複数の新たな課題をもたらす。MLAは、従来のポリュメトリックディフューザよりも洗練された、制御可能な光管理によって、これらの課題に対処し、新しいBLUの可能性を最大限に引き出す技術である。

ブライトビュー・テクノロジーズ社は、本稿で紹介したような光学技術の開発と供給を手掛けている。

著者紹介

ベンジャミン・ジェイコブズ(BENJAMIN JACOBS)は、ノースカロライナ州ダーラムを拠点とする光学ソリューション企業である米ブライトビュー・テクノロジーズ社(BrightView Technologies)のエンジニアリングプログラムマネージャー。