

# マイクロLEDはディスプレイの次世代中核テクノロジーとなるか

クリス・チノック

個々のディスプレイピクセルと同サイズになるマイクロLEDの開発が、大々的に進行している。特に注力されているのは、これらのLEDのシンギュレーション、パッケージング、そしてディスプレイへとアセンブリする工程である。

ディスプレイ業界で多大な注目を集めているマイクロLEDは、フォトンクス業界にも大きな影響を及ぼす可能性がある。何十もの企業が、小さなLEDデバイスを作製し、多彩な手法によってそれらをアセンブリしてディスプレイを構築するためのさまざまな方法を考案している。イノベーションあふれる分野だが、非常にわかりにくい分野でもあり、明らかに優れた技術方式はまだ出現していない。本稿では、い

れか1つの方式に過度に踏み込むことなく、主要トレンドや技術方式に触れつつ、その全体像を示したいと思う。

## マイクロLEDとは

マイクロLEDという語は一般的に、LEDデバイスの発光領域のサイズを指して用いられる。ただし、どの程度のサイズをもって「マイクロ」と呼ぶかについて、明確な業界定義はなく、その定義は用途によって異なる可能性が

ある。例えば、仮想現実／拡張現実（VR/AR）メガネに対しては、10 $\mu$ m未満のマイクロLED素子が望ましい。直視型ディスプレイならば、50 $\mu$ mか100 $\mu$ mと定義されるかもしれない。それ以上のサイズは、ミニLEDという別のカテゴリーに分類されるが、こちらも、発光体サイズの範囲が明確に定められているわけではない。

さらに紛らわしいのは、多くのディスプレイメーカーが自社の極小ピッチ

表1 ISE 2020で展示されたLEDの説明と評価

| 構造                      | ISE2020で展示されたピクセルピッチ      | 最適ピクセルピッチ                      | 輝度               | 堅牢性 | 修理しやすさ       | 視野角 | 視野角に対する色精度 | 黒レベル         | 表面アーティファクト |
|-------------------------|---------------------------|--------------------------------|------------------|-----|--------------|-----|------------|--------------|------------|
| SMD トップLED              | 2.6mm                     | >2mm                           | 高                | 高   | 良い           | 狭い  | 非常に高い      | 非常に高い        | 最小限        |
| GOB (Glue On Board)     | 1.9mm                     | $\geq \approx 1.8$             | 中                | 高   | 低い           | 狭い  | OK         | 低い           | 一部あり       |
| AOB (Adhesive On Board) | 1.9mm                     | $\geq \approx 1.8$             | 高                | 高   | 低い           | 狭い  | 非常に高い      | 非常に高い        | 最小限        |
| SMD チップLED              | 1.8mm                     | <2mm                           | 中                | 中   | 良い           | 広い  | 良い         | 良い           | 最小限        |
| IMD #1                  | 3.0mm(デバイス)<br>1.5mm(光学系) | $\leq 2.3$ mm<br>$\geq 0.7$ mm | 中                | 高   | 良い           | 広い  | 良い         | 良い~<br>非常に高い | 最小限        |
| IMD #2                  | 1.8mm(デバイス)<br>0.9mm(光学系) |                                |                  |     |              |     |            |              |            |
| COB (チップオンボード)          | 0.9mm                     | <1mm                           | 中~高<br>(フリップチップ) | 高   | 低い~<br>ほぼ不可能 | 広い  | 良い         | とても良い        | 一部あり       |

のディスプレイピクセルを、使用されている発光体のサイズにかかわらず、単純に「マイクロLED」と呼んでいることだ。ディスプレイデバイスの場合、ピクセルピッチ(フルカラーピクセルの間の間隔)のほうがLED発光体のサイズよりも重要だからである。

直視型LED(DV-LED)ディスプレイの一種として最もよく知られているのが、いわゆる「ビデオウォール」である。このモジュール式ディスプレイは複数の「キャビネット」で構成されており、各キャビネットは複数の「モジュール」で構成されている。各モジュールは、赤色、緑色、青色(RGB)のLEDがドライバや電気相互接続とともに搭載された、回路基板となっている。

この数年間で、挟ピッチ(ファインピッチ)のLEDビデオウォールに向けたトレンドが明らかに進行している。ピクセルピッチは一般的に1.5mm未満



図1 ラング社がISE 2020で展示した、複数のLED技術。(画像提供:ラング社)

と定義されており、現時点の最新プロトタイプは0.4mmである。このようなディスプレイは、近距離視聴用に設計されている。ちなみに0.4mmは、65インチの4K-UHD解像度テレビのピクセルピッチに非常に近いサイズである。そのため、主要テレビブランドはこの技術に大いに関心を寄せている。

DV-LEDディスプレイは、輝度、ダイナミックレンジ、色域、視野角、黒レベルなどにおいて、液晶ディスプレイ(LCD)や有機ELディスプレイ(OLED)の性能に匹敵し、勝る場合も多い。最大の欠点は、価格である。DV-LEDディスプレイの主なコスト要因の1つが、RGB LEDである。LED発光体を小さ

| 説明   | 最適用途  | 備考  |
|--|---|---|
| RGB LEDを、エポキシ樹脂(色付け可能)を充填したプラスチック筐体にワイヤボンディングし、PCBにはんだ付けする。  | 広角視野が限定された、ピクセルピッチが大きめの用途                         | ピクセルピッチが大きいと、はんだパッドを大きくすることができ、堅牢性が高まる。   |
| RGB LEDを、エポキシ樹脂(色付け可能)を充填したプラスチック筐体にワイヤボンディングし、PCBにはんだ付けして、シリコンまたはエポキシ樹脂の薄膜でコーティングする。                      | 近距離視聴用で、LED画面をさわられる可能性が高い場合(公共スペースやクリエイティブユーザー向け) | 被膜によって堅牢性は高まるが、修理しやすさが低下し、(被膜の厚さのばらつきによって)黒レベルにばらつきが生じる。  |
| RGB LEDを、エポキシ樹脂(色付け可能)を充填したプラスチック筐体にワイヤボンディングし、PCBにはんだ付けする。LEDパッケージの間にエポキシ樹脂を塗布する。                         | 近距離視聴用で、LED画面をさわられる可能性は低いが高堅牢性が求められる場合            | 堅牢性と光学的外観は、SMDトップLEDとGOBの間の妥協点になる。  |
| RGB LEDを、エポキシ(色付け可能)またはシリコンの中に入れて、デバイスの下のはんだパッドにワイヤボンディングしてから、PCBにはんだ付けする。                                 | 複ピクセルピッチの小さい近距離視聴                                 | 上面だけでなく、デバイスの周囲全体から発光する。  |
| 複数のRGB LED(一般的は1つのパッケージに4つのRGB[4-in-1])を、エポキシ(色付け可能)またはシリコンの中に入れて、デバイスの下のはんだパッドにワイヤボンディングしてから、PCBにはんだ付けする。 | ピクセルピッチの小さい近距離視聴用で、高い堅牢性が求められる場合                  | 機械的なピクセルピッチは実際のピクセルピッチの2倍となり、堅牢性が高くなる。一般的にコモンカソード駆動向けに設計される。はんだ付けの足が多いほど、堅牢性は高まる。                   |
| RGB LEDを、デバイスの下のはんだパッドにワイヤボンディングするか、フリップチップとしてPCBまたはバックプレーンに直接実装する。LEDモジュールを、エポキシまたはシリコンの薄膜でコーティングする。      | ピクセルピッチが小さく、解像度が非常に高い、近距離視聴用                      | 黒色領域が大きなマイクロLEDに適している。メーカー各社から、複数の改良点のうちの1つに対して最適化されたソリューションが提供されているが、すべてを同時に最適化するソリューションは提供されていない。 |

(提供:ラング社とインサイト・メディア社)

くすれば、必要なLEDデバイス材料が少なくなり、大幅なコスト削減につながる。もう1つの主なコスト要因は、LEDをパッケージングして、モジュール回路基板上にアセンブリする工程である。

LEDは従来的には、エピタキシャルウエハから切断され、表面実装パッケージ上に配置されて、ワイヤボンディングされ、エポキシまたはシリコン樹脂で封止される(これをSMDチップLEDと呼ぶ)。これらのLEDをプリント回路基板(Printed Circuit Board: PCB)上にアセンブリする方法のバリエーションとして、GOB(Glue On Board)やAOB(Adhesive On Board)と呼ばれるものがある。コストの削減やピクセルピッチの縮小を目指す、さらに新しい方法もいくつか考案されており、SMDチップLED、IMD(Integrated Matrix Device)、COB(チップオンボード)などと呼ばれている。独Lang社(Lang AG)は、オランダのアムステルダムで2020年2月11～14日に開催された展示会ISE 2020で、デ

バイスサイズや製造方式が異なるこれらすべての方法を、並べて展示した。図1は、その小規模なデモの写真で、表1は、各方法の構造や長所/短所をまとめたものである。

LEDのサイズにはかなりの幅があるため(しかも、ディスプレイメーカーは通常、これを公表しない)、Lang社はこれを明記していなかった。しかし、長さまたは直径は100～300 $\mu\text{m}$ の範囲にあるようなので、マイクロLEDまたはミニLEDに分類される(どちらに分類されるかは、マイクロLEDの定義に依存する)。

ISEにおいて、中国アオト社(AO TO:奥拓電子)は、最先端の0.4mmピッチ、DV-LEDのマイクロLEDビデオウォールを展示していた。フリップフロップCOB方式がおそらく、PCBバックプレーンに採用されている。このプロトタイプはシングルチップだが、マルチインワンのIMD方式を採用した0.4mmプロセスをまもなく商用化する予定だと、アオト社は述べている。このIMDパッケージは、図2のような

外観になる可能性がある。

LEDの各RGBセットの間の距離が0.4mmであるため、LEDのアクティブ径は約70 $\mu\text{m}$ で、一部の定義でマイクロLEDの上限とされる100 $\mu\text{m}$ よりも小さい。また、LEDのアクティブ領域が小さくなるほど、周囲の黒色領域が大きくなることにも注意してほしい。これにより、ディスプレイの黒レベルとコントラストが高まる。ソニーのビデオウォールである「Crystal LED」は、ピクセルピッチが1.2mmで、発光体サイズは約100×35 $\mu\text{m}$ と考えられているため、黒占有率が99%の卓越した性能を誇るディスプレイとなっている。

Lang社は、主にステージ演出用に機材をレンタルする顧客を対象にディスプレイソリューションを提供する企業である。ISEでの同社の展示は、さまざまなパッケージング及び製造方式によって得られる画質の違いが把握できるように設計されていた。Lang社が特に強調していたのは、中国シリコンコア社(SiliconCore)の「LISA」ディスプレイだった。接着性シリコンの薄い層で全体を覆い、フリップチップデバイスの上に黒色接着剤を用いた、シングルフリップチップ方式が採用されている(図3)。このディスプレイには、ピクセルピッチ0.83mm、輝度2000nitsのマイクロLEDが使用されている。

テレビブランドも、マイクロLED技術に多大な関心を寄せている。ラスベガスで1月7～10日に開催されたCES 2020では、韓国サムスン社(Samsung)が「The Wall」という同社のマイクロLEDベースのディスプレイシリーズを拡大した他、2020年の市場投入を目指す、多種多様なプロトタイプが他社からも出展されていた(表2)。

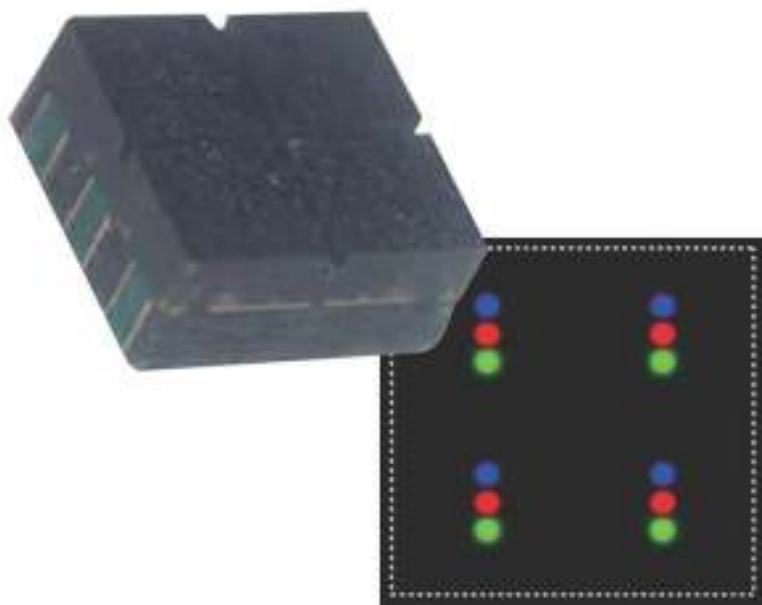


図2 4-in-1のIMD。(画像提供:インサイト・メディア社)

表2 CES 2020に出展されたマイクロLEDディスプレイの概要

| ブランド                                 | マイクロLEDダイレクトディスプレイ   |
|--------------------------------------|--|
| サムスン社                                | 75、88、93、110、146-4K<br>150、292-8K                            |
| 韓国LGエレクトロニクス社                        | 145インチ、4K、48モジュール、<br>発光体サイズ:50 $\mu$ m未満                    |
| 中国TCL社                               | 132インチ、4K、1500nits   |
| 中国コンカ社(Konka)                        | 236インチ、8K、2000nits、0.68mmピッチ<br>118インチ、4K、2000nits、0.68mmピッチ |
| 中国レイヤード社(Leyard) /<br>米プラナー社(Planar) | 216インチ、8K、0.6mmピッチ<br>135インチ、4K、0.7mmピッチ                     |

(提供:インサイト・メディア社)

こうした技術のすべてに課題が残っており、それがその高い価格に影響を与えている。例えば、ほとんどのDV-LEDディスプレイで、LEDはやはり、パッケージの中またはPCBの上にワイヤボンディングされる。フリップチップデバイスは、すべてのワイヤボンディングを不要とするが、LEDエピウエハの表面を平らにして、n接点とp接点を同一レベルにする必要がある。そうすることで、デバイスをひっくり返してPCBに直接はんだ付けすることができる。

ワイヤボンディングされたマルチインワンのIMDや、シングルフリップチップのLEDは現時点で提供されてい

るが、まだ非常に一般的というわけではない。フリップチップのIMDはまだ、プロトタイプとしてしか提供されていない。

個々のダイまたはIMDのシンギュレーションにも問題がある。ダイの分離にレーザを使用すると、エッジが粗くなって黒レベルが低下する恐れがある。また、エポキシ被膜の厚さにばらつきがあると、ディスプレイ上の黒レベルにばらつきが生じてしまう。加えて、悪いLEDは製造工程で取り除いて置き換える必要があるが、その処理は可能な場合もあれば、ほぼ不可能な場合もある。

ラング社のLED及びディスプレイ担

当ディレクターを務めるベンジャミン・ヴァルベール氏(Benjamin Valbert)は、「COBに取り組む、LEDビデオウォールのメーカーは、それぞれ何らかの独自プロセスによってコストと性能を最適化している。各社がそれぞれ一部のパラメータ集合を最適化しているが、すべてを最適化した企業はまだないというのが現状だ。しかし、そのほとんどがすでに解決可能であるという事実は、COBの将来に対する確信を与えてくれる」と述べた。

## 次世代マイクロLED製造技術の開発

DV-LEDディスプレイの1つの基本的な問題は、エピウエハ上のLEDピッチは非常に小さいが、DV-LEDディスプレイ上のピッチには大きな幅があることだ。現行のマストランスファー技術では、1個から数十個のLEDチップを一度に転送できる。液晶や有機ELディスプレイに対してコスト面で互角とするには、転送レートを毎秒数百万個に引き上げる必要がある。そのため、多くのイノベーションが現在、この部分に集中的に注がれている。

最も一般的な方法は、スタンプトランスファーと呼ばれるもので、数千個のマイクロLEDを一度に取り上げて、ピクセルピッチの異なる別の基板に転

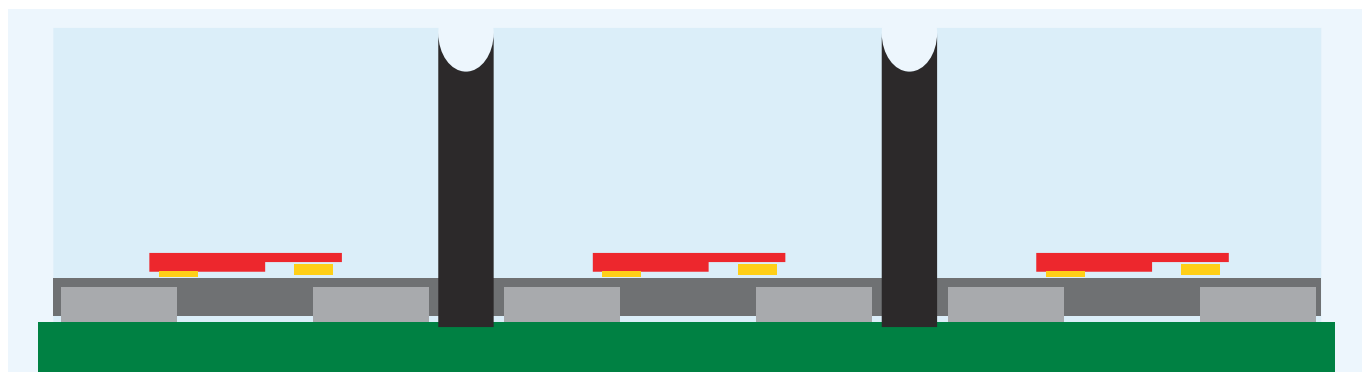


図3 LISAディスプレイの構造。(画像提供:ラング社)



送することができる。もう1つの方法は、レーザパルスを用いてLEDをキャリア基板からディスプレイ基板に転送するものである。これらやその他の方法は、専有的な知的財産とみなされるため、その詳細が公開されることは決していない。

次に懸念される問題は、歩留まりである。マストランスファーは非常に高速でなければならないだけでなく、配置が非常に正確でなければならない。マイクロLEDのサイズがますます小さくなるにつれて、それをピックアップして正確に配置する能力はますます難しくなる。欠陥が検出された場合に、修復プロセスが完了するまでの時間が、最初のマストランスファー時間よりもはるかに長いという状況を避けることは可能だろうか。しかもこれは、機械的／電気的歩留まりのみの問題にすぎない。

エンドユーザーが求める性能を実現するには、すべてのLEDの輝度と波長も、一定範囲内に収まっていなければならない。これが、LEDウエハのメーカーによるLEDの作製方法の改良を促す要因となっている。はるかに優れた均一性と層制御が可能で、ほとんどのウエハが品質管理ガイドラインの範囲内に収まるようにすることのできる、新しいMOCVD(有機金属気相成長法)装置が、現在提供されている。従来のGaN(窒化ガリウム)ベースの青色／緑色LEDは、基板サイズが2～6インチのサファイアエピウエハ上に成長させることによって作製される。コストを抑えるには、ウエハサイズが大きいほうが望ましい。そこで、GaN on Siliconのエピウエハも、緑色や青色のマイクロLEDの成長に用いられている。現時点のサイズは8インチだが、今後12インチにまで大口径化が

進む可能性がある。

こうした要件の多くは、何らかのマストランスファー工程の前に、マイクロLEDをウエハレベルで完全に特性評価する方法が必要であることを指し示している。メーカー各社はこのニーズにも取り組んでいる。

画像を作成するには、これらすべてのLEDを信号で駆動する必要もある。DV-LEDでは、LEDをPCB上に実装し、多数のドライバチップを使用して信号を送信する。次世代DV-LEDはおそらく、ガラス基板上に実装され、各ピクセル位置にTFTを用いた、アクティブマトリックス駆動方式が採用されるだろう。これにより、各マイクロLEDがよりきめ細かく制御可能となり、液晶ディスプレイで既に利用されている、TFTをガラス基板上に形成する構造が活用できるようになる。

最後に、ディスプレイにはRGB LEDが必要であるため、上述の改良と手法はすべて、RGBウエハに3回適用する必要がある。

## モノリシック型のマイクロLED

ここまでは、マイクロLEDを直視型ディスプレイに利用することのみを議論してきた。マイクロLEDにより、プロジェクター、AR/VR、ヘッドアップディスプレイ(HUD)に利用される、非常に高密度のマイクロディスプレイを実現することも可能である。この場合の主な相違点は、エピウエハ上のピクセルピッチがそれらの用途のニーズに合致しているため、マストランスファー工程が不要であることだ。

ただし、フルカラーディスプレイになると、難易度は高くなる。(プロジェクターや、おそらくはHUDを含む)一部の用途に対しては、赤色、緑色、青色の3つの個別の高密度マイクロ

LEDと、プリズムを組み合わせたX-Cubeによって、ディスプレイを構成し、DLP(Digital Light Processing)や、LCOS(Liquid Crystal On Silicon)マイクロディスプレイをなくすことができる。このようにして構成されたディスプレイは、他のものよりもコンパクトで高性能になる。

しかし、AR/VRの場合は、シングルディスプレイのほうが望ましく、色変換が必要になる。ここでの概念は、高密度の青色マイクロLEDを作成し、ディスプレイの3分の2に赤色と緑色の量子ドットをパターンニングするというものである。これらの量子ドットは青色光を吸収し、緑色または赤色の波長で再放射する。このような量子ドット材料の $\mu\text{m}$ 単位でのパターンニングにリソグラフィが利用できることが企業各社によって既に示されているため、この概念は実現可能だが、多くのエンジニアリング課題が残っている。

これらのモノリシック型のマイクロLEDは、バックプレーンも異なり、CMOSシリコンである場合が多い。CMOSシリコンには、ディスプレイの駆動に必要なアクティブマトリックス駆動回路が含まれているためである。

マイクロLEDは、性能は魅力的だが、コストがまだ高い。しかし、そうしたエンジニアリング問題の解決を目指す取り組みは非常に活発で、コストが高いという問題は数年のうちに解消される可能性が高そうだ。今後10年間で、マイクロLEDは最も主要なディスプレイ技術の1つになると筆者は予測しているため、この分野から目を離さずについてほしい。

### 著者紹介

クリス・チノック(Chris Chinnock)は、米インサイト・メディア社(Insight Media)の社長兼オーナー。e-mail: [chris@insightmedia.info](mailto:chris@insightmedia.info)  
URL: [www.insightmedia.info](http://www.insightmedia.info)