

第1章 マイクロディスプレイのアプリケーション、市場規模予測、課題

1.1. マイクロディスプレイ産業の全体動向

将来の成長見通しが明るいマイクロ発光ダイオード（LED）およびマイクロ有機EL（OLED）の開発と製造のために、国際間で優れた企業同士の協力が重要となって来ている。

例えば、韓国ディスプレイ産業協会は2023年6月に「2023年世界情報ディスプレイ学会（SID）レビューシンポジウム」を開催し、韓国のディスプレイ産業が進むべき方向を分析した。このイベントは、ロサンゼルスで開催されたSIDの「ディスプレイウィーク2023」の主要技術動向を分析し、それを基に先進技術を保有する国との協力策を探るために開催された。

業界関係者や専門家は、マイクロLEDやマイクロOLED市場の成長に備えて海外企業との協力の重要性を提唱している。韓国ディスプレイ産業協会の尹相振事務局長は、2027年までにマイクロLEDおよびマイクロOLED（OLEDoS）が100%以上の急速な成長率を示すと予測した。

韓国電子通信研究院（ETRI）のByun Chun-won 所長は、「国内企業が保有するマイクロOLEDパネルの市場シェア拡大のために、海外の光学・システム企業との協力を急がなければならない」と強調した。例として、台湾のインノルクス（Innolux）と米国のMagic Leap（マジックリープ）が国際協力を通じてXRデバイスの技術革新を試みていることを挙げた。

韓国光技術院（KOPTI）のKim Jung-hyun センター長は、「装置開発に重点を置いている国内のマイクロLED関連の中小企業の技術力向上のために、ドイツのメルク（Merck）、米国のブリューワーサイエンス（Brewer Science）およびダウ（Dow）などの海外材料企業との協力が必要である」と述べた。

ソウル大学の教授であるKwak Jeong-hoon も、量子ドット（QD）の基本特許の大部分を保有している米国のナノシスナ（Nanosys）や、8世代規模のQDインクジェット技術を持つパナソニックとの国際協力の必要性を提案した。

韓国と中国の企業間で、OLEDパネルの生産技術の差が縮小し、品質だけでなくコストも技術競争の要素として台頭しているという分析が提起された。韓国ディスプレイ産業協会の

イノベーションプロセス事業部長で、SID（情報ディスプレイ学会）の会長を務めたKim Yong-seok氏は、OLEDパネルの生産技術の差が2年以内に急速に縮小していると説明した。技術の差が縮まることで、高品質だけでなく低コストもディスプレイ技術競争の重要な要素となると述べた。

韓国ディスプレイ産業協会の副会長であるイ・ドンウク氏は、「韓国はフォルダブルやローラブルなどの分野で競争国に対して技術優位性を確保しているが、将来の市場で技術差は大きくない」とし、「民間のレベルで戦略的な国際協力を通じて技術および市場競争力を確保する必要がある」と強調した。

一方、中国でも企業間の協力が進んでいる。例えば、2023年6月にマイクロディスプレイメーカーのJBDの関連会社である上海显耀显示科技有限公司（Shanghai Xianyao Display Technology Co., Ltd.）に新たに株主に浙江阿里巴巴云计算有限公司（浙江アリババクラウドコンピューティング）などが加わり、同時に会社の登記資本が約5,197万元から約5,374万元に増加した。

上海显耀显示科技有限公司は2015年10月に設立され、法定代表者は李起鸣氏である。同社の事業範囲には、ディスプレイ技術の領域での技術サービス、集積回路チップの設計及びサービス、集積回路チップ及び、製品の製造などが含まれている。株主情報によれば、同社の株式は李起鸣氏、领耀控股有限公司、比亚迪股份有限公司（BYD株式会社）などが共同保有していると記載がある。

JBDは、中国内で先駆的なマイクロディスプレイメーカーとして、アリババとの協力によって技術水準の向上、市場シェアの拡大、競争力の強化を行う。同時に、アリババにはより優れた製品とサービスを提供することが可能であり、さまざまな領域での革新と発展を促進する事が可能だとしている。JBDはマイクロディスプレイの領域での両社の今後のさらなる協力と飛躍を期待する。

アリババのJBD显耀显示への出資は、次世代ディスプレイ技術への重要性と戦略的な布石を反映する。アリババ傘下のアリババクラウド、アリババダモア研究所、菜鸟网络（Cainiao Network）などの事業は、仮想現実、拡張現実、スマートグラスなどの領域に関与しており、マイクロディスプレイへの需要が非常に高い。さらに、アリババは新たな小売り、メディア、文化などの領域を積極的に探求しており、マイクロディスプレイは新しい情報伝達とインタラクションの手段として幅広い応用の可能性を持つと見ている。

1.2. スマートウォッチ向けのディスプレイパネルの開発と製造の動向

2025年は、アップルがApple Watchのトップモデルに初めてマイクロLEDを採用すると予想している。この影響で、市場調査会社のDSCCは、マイクロ発光ダイオード(LED)ディスプレイの出荷量が2023年の45万台から2024年の181万台、2025年には急増し798万台、2026年には1,354万台、2027年には1,747万台になると予測した。同じ期間の売上高は、2023年の4,400万ドルから2024年の2億1,000万ドル、2025年の7億1,300万ドル、2026年の10億8,600万ドル、2027年の13億9,500万ドルまで成長すると予想されている。

マイクロLEDディスプレイの出荷量と売上高の予測は、Apple Watchでの採用により、2025年に大幅に増加すると見られる。2025年の出荷量と売上高は、前年比でそれぞれ4.4倍、3.4倍に増加する見込みとなっている。

2023年初めには、外国メディアなどを通じてアップルが早ければ2024年のApple WatchにマイクロLEDを採用できると報じられたが、韓国内業界では2024年は時期尚早との観測も出ていた。

DSCCは、LGディスプレイがマイクロLEDのApple Watch用バックプレーンラインを小規模に構築しているが、ラインの稼働は2024年後半になる可能性があると予測した。マイクロLEDを採用するApple Watchの発売の予想時期は2025年となっている。

さらにTrendForceはそのリリース時期が2025年第2四半期から2026年第1四半期に延期されたと述べた。Appleは最初にApple WatchシリーズのトップエンドのUltraモデルにマイクロLEDを適用し、その後、応用範囲を拡大する予定と見られる。

Apple Watchを含むマイクロLEDウェアラブル製品は、2025年に420万台の出荷を開始し、2026年には790万台、2027年には1,050万台に達すると予測されている。マイクロLEDディスプレイの出荷量の製品別内訳では、2025年からウェアラブル製品が1位を占めることが予想されている。

アップルは、2022年にApple Watchのトップモデルとして1.99インチの有機ELディスプレイを搭載したApple Watch Ultraモデルを799ドルで発売した。この製品のバッテリー寿命は60時間である。アップルは、現在のApple Watch Ultra用の有機ELディスプレイをマイクロLEDに変更すると予想されている。ただし、現在のApple Watch Ultra用の有機ELパネルの価格と比較し、マイクロLEDはコストをコントロールする事が重要となる。

1.3. VR・AR・MR 向けディスプレイパネル・光学系の開発と製造の動向

全体動向

マイクロ OLED、シリコン上の OLED (OLEDoS)、およびマイクロ LED などのパネル技術は、消費者向けのアプリケーションやメガネ不要の 3D 技術として積極的に開発されている。これらの技術は、パネル技術に関する台湾の DIGITIMES Research の最新の調査によれば、2030 年までに AR/VR アプリケーションの主流となることが予想されている。

医療、自動車電子機器、小売業、教育などの新興アプリケーションからのパネルへの需要も、AR/VR アプリケーションへの需要とともに拡大する見込みとなっている。競争が激しいパネル市場で生き残るためには、こうしたビジネスの機会に対応することが重要となってくる。

マイクロ OLED は、主に VR ヘッドマウントディスプレイ (HMD) に採用されると予想されている。一方、2030 年以降ではマイクロ LED が主に AR HMD で使用されると見られる。

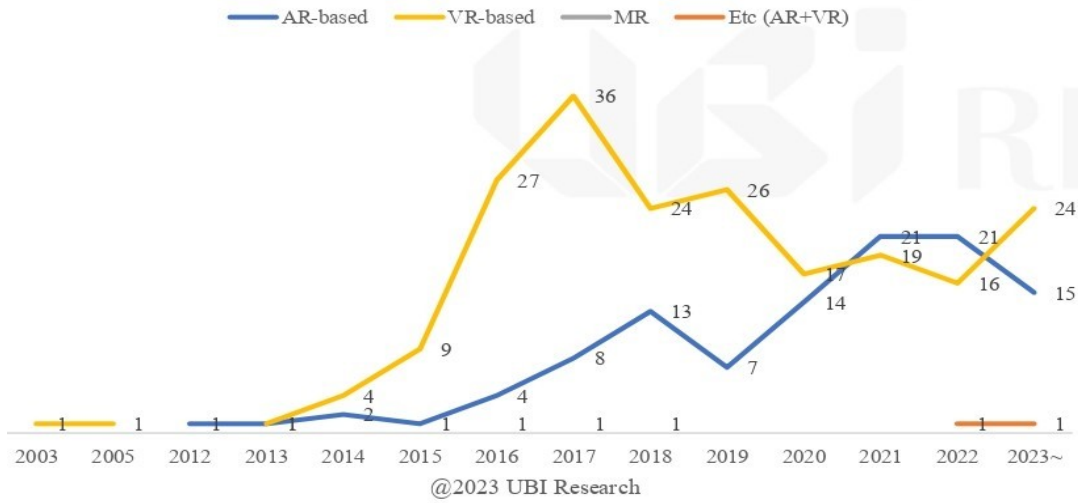
Google、ソニー、HTC などの企業はすでに AR/VR HMD をリリースしていたが、これらのアプリケーションは Facebook がメタバースを発表し、社名を Meta に変更するまで注目を集めていなかった。DIGITIMES Research の調査によると、Meta の VR HMD は現在も世界の VR HMD 出荷量の約 80% を占めていると記載されている。

まだディスプレイ技術が成熟していないため、量産に入った AR HMD は現実と仮想の画像の融合において期待に遠く及ばない。AR HMD の販売は現在 VR HMD と比べてはるかに少ないが、長期的には AR HMD には成長の可能性が高いと DIGITIMES Research は指摘する。

UBI リサーチによれば、2013 年から 2017 年にかけて VR 分野は急成長を遂げた。特に 2015 年から 2016 年にかけて VR 分野は約 200% 増加した。一方、AR 分野の場合は、2015 年から順調に増加している。これは、近年では VR よりも拡張現実の分野で AR が台頭してきていることの象徴と見ることができる。一方、MR 産業は、2016 年頃から立ち上がり、2018 年まで進行していたが、まもなく停止し、最近になって 2022 年から研究が再開された。国別では、米国と中国の企業で製造された AR・VR・MR デバイスの製品モデル数が多い。

図表 1-3-1 AR・VR・MR デバイスの世界的な新製品モデル数の変化

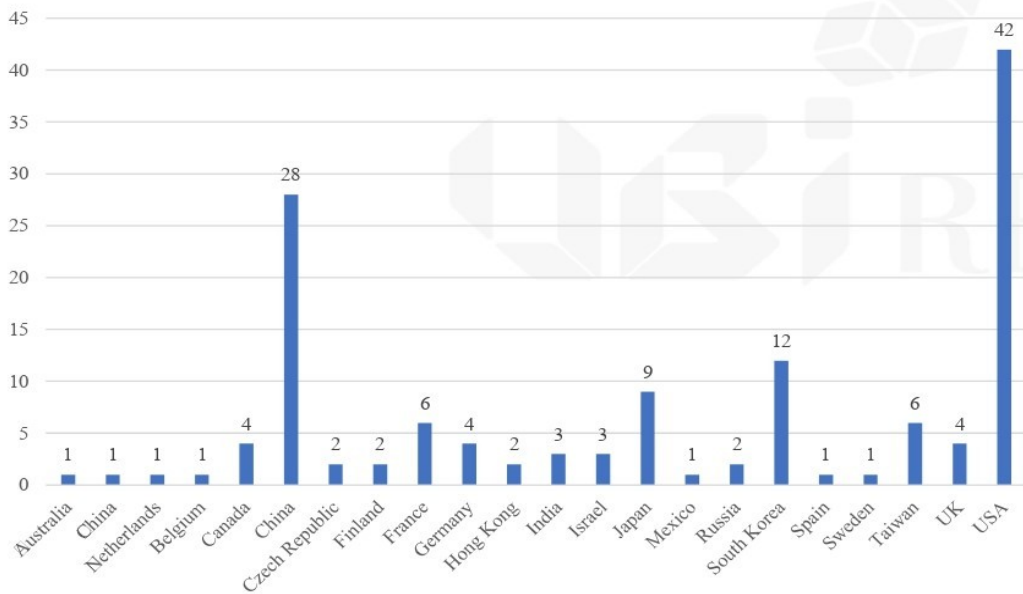
AR & VR Hardware Release Status by Year (2003 ~ present)



出典：UBI リサーチ

図表 1-3-2 AR・VR・MR デバイスの国別の製品モデル数

Number of AR & VR Hardware Companies by Country



出典：UBI リサーチ

図表 1-4-1 Fraunhofer のマイクロ LED



Microdisplays.

出典：Fraunhofer FEP

「マイクロディスプレイは発光型、反射型、透過型、走査型などが存在する。Fraunhofer はヘッドアップディスプレイを備えたスマート眼鏡を提供している。VR は視聴者を 3D 環境に没入させる。AR は現実世界の表示を補完または修正する。目の前のディスプレイはヘッドマウントされることもある。VR および MR 向けのビデオ透視、AR 向けの光学透視、コンテキストに応じた情報表示などに完全に没入することが出来る。

マイクロ LED とマイクロ OLED の期待について見ていくと、自動車や航空の HUD、LiDAR (Light Imaging、Detection、Ranging)、ホログラフィックディスプレイなど、一部のアプリケーションは現時点では達成できていない。技術、デバイス、アプリケーションなどの公共および産業研究開発資金が数年間必要となる。地域、国家、および EU のバリューチェーン/主権の確立はマイクロエレクトロニクスで可能となる。将来的には高輝度、高解像度、新しいフォームファクター、および拡張された分光放射および検出範囲を見据えている。Fraunhofer はデバイス/技術評価、研究開発、技術移転/ライセンス供与、アプリケーションなどの分野において、産業との協力を求めている。」と述べた。

オランダのMorphotonicsの共同創設者兼CTOであるJan Matthijs ter Meulen氏は、自動車向けの大面積ナノインプリントについてプレゼンテーションを行った。Morphotonicsの主要な特長は、大面積のナノインプリント技術です。彼らは新しい視覚体験のためのナノスケール表面カスタマイズの需要に対応している。

「Morphotonicsは、どんなデバイスにも任意の光学部品を備えた大面積ナノインプリントソリューションを提供しています。自動車アプリケーション向けの大面積インプリントも可能であり、3Dディスプレイ、アンチグレア、HUDなどが該当します。また、大量生産される小型光学製品もあります。これらは幅広いアプリケーション範囲で利用できます。光の管理機能を向上させることで、より効率的な車内照明が実現できる。

また、ピクセルレベルのビーム整形/コリメーションも可能です。Morphotonicsは、対応したインプリントのための専用のPortis X-NILを開発しています。これにより、ピクセルピッチの小さなマイクロLEDベースのディスプレイをMLA測定で向上させることが可能となる。同社は、自由形状のマイクロ光学部品を製造するためのパイロットラインを欧州に所有する。大面積のナノインプリントは、自動車向けディスプレイのデザイン、機能、コストを向上させることが可能となる。対応した大面積インプリントは2023年以降に利用可能となる。」と述べた。

PHABULOuSからは、「フリーフォームマイクロオプティクス製造におけるヨーロッパのワンストップショップであり、プロトタイプからパイロット製造、大量生産までのイノベーションと生産サイクルを加速できます。PHABULOuSは、ヨーロッパのRTO（研究技術機関）と産業界を統一し、フリーフォームマイクロオプティクスの設計と製造のためのパイロットラインにすることを目指している。現在、Forviaとともにヘッドライト、Seisenbacherとともに車内照明、Swarovskiとともにデコラティブ照明、Maicrooledとともにディスプレイを開発している。」との説明が行われた。

台湾のAUOの製品マネージャーであるWilliam Liu氏は、マイクロLEDディスプレイが超高級車やスポーツ車で急速に普及していることについてプレゼンテーションを行った。

「AUOはセンタースタックディスプレイの自動車ディスプレイ市場シェアが18%ある。AUOはいくつかのマイクロLEDディスプレイを提供しています。利点としては、フリーフォームが可能で、新しいディスプレイ形式やシームレスなデザインが実現できること、直射日光下でも読みやすいこと、広い視野角、無機材料による最高の耐久性、高い透過率、鮮やかな色彩が挙げられる。

マイクロLEDは、明るさの減衰や色の変化なしで最大の視野角を持つ。したがって、プレミアムな視野角を提供します。AUOのALEDは究極の自動車ディスプレイであり、高輝度、長寿命、最高の光学特性や透明性などの特徴を持つ。」と説明した。

図表 1-4-2 自動車用ディスプレイ



出典：AUO

PorotechのVPであり、台湾担当のDisplay & HeadであるDr. Kunal Kashyap氏は、マイクロディスプレイの究極の解決策であるDynamic pixel tuning (DPT) について紹介した。DPTでは、単一ウェハーからの同じピクセルを使いフルカラー、チューナブルカラーディスプレイの実現を可能にし、複雑な製造プロセスを排除し、色の均一性を達成する事が出来る。

Porotechは、英ケンブリッジ大学のスピンアウト企業であり、15年以上の研究開発経験と70以上の特許及び、特許出願を有しています。同社は世界初となる、ネイティブ赤色InGaNマイクロディスプレイを作成した。InGaNベースの青色と緑色、及びAlInGaP赤色も使用されている。

Porotechは、DPTを提供することで、モノリシックなRGBマイクロLEDビジュアルディスプレイへのパラダイムシフトを実現する。ピクセルあたりの解像度を4倍にすることが可能となる。同社は世界初の「オールインワン」フルカラーマイクロLEDディスプレイを発

第2章 マイクロ OLED と材料・製造装置の動向

2.1. マイクロ OLED ディスプレイの動向

アップルが2023年6月に公開したVisionProのソニーのOLEDoSパネル2枚に、2,300万個（2枚の合計）のピクセルが搭載されていると発表しました。OLEDoSパネル1枚あたりのピクセル数は1,150万個になります。このOLEDoSが正方形の形状であると仮定すると、解像度は3,390×3,390程度をサポートしています。4K（3,840×2,160）解像度のピクセル数は829万4,000個であり、VisionProのOLEDoSの解像度は4Kを上回るレベルと推定される。VisionProのOLEDoSのサイズは公開されていないが、1インチから1.5インチ程度と仮定すると、画素密度は3,000 ppi 後半から4,000 ppi の間と推定される。

ソニーのOLEDoS（OLEDon Silicon）の生産能力は、年間90万台が上限と推定される。OLEDoSは、拡張現実（XR）デバイスに使用できる代表的なマイクロディスプレイである。ソニーのOLEDoSは、アップルが2023年のWWDCで発表したミックスリアリティ（MR）ヘッドセット「VisionPro」にのみ供給される。

現在、ソニーのOLEDoSの生産ラインを年間フル稼働させたと仮定すると、アップルの2024年のVisionProの出荷量は数十万台にとどまると予想されています。過去のソニーの年間OLEDoS生産量は、四半期で最大10万～20万台であったと報じられていた。

中国の企業であるSeeYaなどもOLEDoSの生産ラインを持っているが、ソニー以外の企業が直ちにアップルにVisionPro用のOLEDoSを供給する可能性は低い。VisionProは基本価格が3,499ドル（約50万円）と高額な製品であり、消費者が使用する製品で不良（フィールド不良）が発生すれば、アップルにとって致命的な打撃となり得る。このためにVisionProのOLEDoSの開発プロジェクトには実績のあるソニーのみが参加したと見られている。

アップルは、2世代目のVisionProモデルからは、どのような方法でOLEDoSを生産するか、また、どの企業が生産するかを検討している。アップルは今後の市場拡大を見据えて、ソニーにOLEDoSの生産能力を拡大するよう要求したが、ソニーが拒否したと報じられている。

その為、アップルが2世代目のVisionProモデルの生産量を年間100万台以上に増やすためには、新しいOLEDoS（OLEDon Silicon）のサプライヤーを見つける必要がある。ソニーが2世代目のモデルにOLEDoSを供給しても、アップルは二重供給元を確保するために他の企業が必要となる。LGディスプレイはOLEDoSの生産ライン投資を計画しているが、具体

的な動きはまだ無い。

サムスンディスプレイが開発中の RGB（赤・緑・青）方式の OLEDoS も関心が集まっている。アップルが今回公開した VisionPro には、白色発光ダイオード（WOLED）とカラーフィルター（CF）を組み合わせた'WOLED+CF'方式の OLEDoS が採用されています。RGB方式の OLEDoS は RGB OLED サブピクセルによって光と色を両方表示できるため、明るさの点で優れる。アップルも RGB方式の OLEDoS に関心を持っているとされている。今後、サムスンディスプレイの RGB方式の OLEDoS の開発状況がアップルの将来の VisionPro 製品仕様にも影響を与えると予想されている。

サムスンディスプレイは、米国の RGB OLED 企業である eMagin を 2023 年 5 月に買収した。サムスンディスプレイは、短期的には"WOLED+CF" OLED を開発し、長期的には"RGB" OLED を開発して、アップルに納入する計画を立てている。

eMagin も自社ウェブサイトを通じてサムスンディスプレイとの最終的な合併契約を締結したと発表した。買収額は 2 億 1,800 万ドル（約 2,900 億ウォン）であり、買収後の株価は 1 株あたり 2.08 ドルとなり、前日の終値 1.89 ドルに 10%のプレミアムが加えられた。

シリコン基板上に有機 EL（OLED）を蒸着する OLEDoS 技術は、大きく二つの方式に分かれる。一つはホワイト（W）-OLED にカラーフィルター（CF）を形成する'WOLED+CF'方式であり、もう一つは RGB ピクセルを同じ層に隣接して蒸着する'RGB'方式の OLEDoS である。WOLED+CF 方式は WOLED を白色光源として使用し、RGB カラーフィルターで 3 色を実現する。

RGB方式の OLEDoS は、ファインメタルマスク（FMM）などのマスクを使用して RGB ピクセルを蒸着するため、カラーフィルターなしで光と色を両方とも OLED で実現することが可能だ。ただし、RGB方式の OLEDoS を使用してユーザに没入感を与えるためには、RGB サブピクセルを高密度に蒸着する必要があり、技術的な難易度は高い。

eMagin は、シリコンマスクを介して RGB サブピクセルを直接蒸着する独自の OLEDoS 技術の効率性と製品寿命が、WOLED+CF 方式よりも優れていると強調してきた。現在、商業化されている OLED の中で、スマートフォンなどの小型 OLED ディスプレイは発光層の蒸着に FMM を使用し、他の大型 OLED ディスプレイや WOLED+CF 方式の OLEDoS はオープンメタルマスク（OMM）のみを使用している。

eMagin は WOLED+CF 方式と差別化するために、自社の技術に「dPd」（direct patterned）という商標を付けました。eMagin は米国で唯一の OLEDoS 企業であり、シリコンバックプレーン技術を保有していると述べている。2022 年 8 月に、韓国の釜山で開催された国際情

報ディスプレイ学術大会（IMID）で、eMaginの最高執行責任者（COO）である Amal Ghosh 氏は、「拡張現実（AR）・仮想現実（VR）デバイス市場では、ディスプレイ技術とともに、光学、コンテンツ、価格などが主要な課題である」と述べた。

サムスンディスプレイの米国のRGBオレドス企業であるeMaginの買収に関しては、RGBオレドス技術を独占しようという意図とともに、米国政府を相手に「ディスプレイは戦略的資産である」という点を強調することを期待する観測が出ている。eMaginは米国国防省に対して軍事用のRGBオレドスを供給している。中国ではBOEが軍事用のオレドスを開発中である。

サムスンディスプレイの社長兼最高経営責任者である Joo Sun Choi は、買収の戦略的な意義を強調し、「XR（拡張現実）デバイスが将来的に大きな成長の可能性を持つと予想しており、eMaginのこの領域の技術は、サムスンがより多くの顧客に革新的な製品を提供し、XR関連事業を強化することができる。」と述べている。

複数の業界専門家によると、サムスンディスプレイがeMaginを2,900億ウォンで買収したことに関しては、R（赤）、G（緑）、B（青）のオレドス（OLEDoS: OLED on Silicon）用シャドーマスク技術と特許の確保という見方が主流となっている。

RGBオレドスを使用してXRデバイスに必要な3,000ppi（Pixels Per Inch）以上のディスプレイを実現するには、RGBサブピクセルを密に成膜するシャドーマスク技術を先に確保する必要がある。RGBオレドスにおいて、シャドーマスク技術は最大の課題となる。

eMaginは、半導体の露光プロセスでパターンニングするシリコン基板ベースのシャドーマスクを使用している。eMaginは、スマートフォンの有機ELディスプレイ（OLED）などに使用されるファインメタルマスク（FMM: Fine Metal Mask）を使用していないことを明らかにしている。金属材料ではなく、基板と同じ熱膨張のシリコン材料の微細なマスク（Fine Mask）を使用する。

eMaginは、米国国防省に対して軍事用のRGBオレドス製品を納入する。シリコン基板ベースのシャドーマスクは、従来のFMMとは異なり、洗浄後の再利用は困難な為、コストは上昇するが、RGBオレドスを作ることができるという点は実証されている。航空宇宙及び、軍事用の製品では、価格よりも性能が優先される。

第3章 マイクロ LED 及びマイクロ LED 向け材料・製造装置の動向

3-1. マイクロ LED ディスプレイの動向

市場動向

マイクロ LED ディスプレイ技術は、従来の LED 構造をミクロン (μm) スケールまで小型化し、サファイア基板を除去して使用する。ディスプレイ上にマトリックス状に配置された小さな LED はピクセルごとに制御され、低消費電力で高輝度、解像度、高彩度を実現し、高度な表示性能を実現する。

マイクロ LED テクノロジーのプロトタイプは、2012 年に発表されたソニーの Crystal LED ディスプレイである。超高解像度で表示できる 55 インチ ディスプレイの製造には 622 万個のマイクロ LED が使用された。しかし、このディスプレイは単一の LED を移載することによって製造されており、これには非常に時間とコストがかかり、マイクロ LED ディスプレイの製造上の課題になっている。

最近の 2~3 年間では、大型テレビや商業向けディスプレイがマイクロ LED の大きな応用分野となり、市場の期待も高まりましたが、製造コスト面でその期待には及ばない結果となった。

チップコストの低減のロードマップが明確になってきてから、コストは年率 30% 以上で減少する見込みとなり、製造コストの減少率は 2024 年から 2025 年にピークを迎えると予想される。しかし、市場調査企業の TrendForce は大型ディスプレイ市場におけるマイクロ LED の開発については慎重な姿勢を見せる。これは、プロセスでの収率とコストの関係、コスト構造の分布とブランドメーカーとの関係という 2 つの側面を分析したことによる結論である。

TrendForce の Eric Chou の分析によれば、マイクロ LED のコスト構造は、チップ以外のバックプレーンなどの他の部品からも成り立っている。つまり、チップのコスト削減だけでは総生産コストの低下には十分ではない。例えば、サムスンの The Wall は、多数のモジュールとキャビネットで組み立てられた大型マイクロ LED ビデオウォールで、12.7 インチの LCD LTPS バックプレーンが使用されている。LTPS の製造プロセスはシンプルだが、バックプレーンにはサイド配線などの複雑なプロセスが必要です。現在、このようなプロセスは収率が低く、メーカーにとって課題となり、高コストにつながっている。

次に、総合的なコスト構造の分布があります。TrendForce によれば、マイクロ LED のコス

ト構造は5つの部分で構成されている。チップ（28%）、転写・リペア（39%）、バックプレーン・ドライバ（19%）、成形・ブラックマトリックス・組み立て（11%）、電源・ケース・コントローラー（3%）となる。

Eric氏は、転写とリペア、成形とブラックマトリックス、組み立てのコスト比率が合計50%以上であり、これらの2つの部分はブランドメーカーが担当していると説明した。つまり、学習曲線と生産収率の経験を考えると、新興ブランドが大型マイクロLEDディスプレイ市場に参入するには高いハードルが存在する。これまで、韓国を除く他のメーカーは一定の時間を要して経験を積む必要がある。必要な経験を蓄積する後に、事業の拡大に進むことが可能となる。

しかし、小型のマイクロLEDディスプレイ分野は期待を上回る進展を見せています。例えば、最近では、Apple Watchに関するニュースが続いている。Eric氏の見解では、2015年の本格的な生産以来、Apple Watchの新バージョンは主にサイズ、明るさ、表示領域、消費電力などの革新に焦点を当てており、これらはマイクロLEDの特性と非常に合致している。

さらに、アップルの公開された特許は、今後の新製品にフレキシブルなディスプレイとセンサーを適用する傾向があることを示す。世界中の多くの国が高齢化問題に直面しており、消費者は健康状態のモニタリングの需要を増している。マイクロLEDとセンサーを統合したウォッチ製品は、生体モニタリングの精度を向上させ、機能を豊富にすることが可能である。この特許は、マイクロLED及び、Apple Watchのようなウェアラブルデバイスにおいて用いられる事が期待される。

TrendForceの市場調査によると、アップルは2024年にApple Watchをリリースする予定ですが、他のブランドは2023年下半期に約1.4インチのマイクロLEDスマートウォッチを発売する予定。Eric氏の推定では、マイクロLEDが正式にスマートウェアラブルデバイス市場に参入する始まりを示す可能性がある。

さらに、ARデバイスはマイクロLEDに適した市場である。現在、ほとんどのメーカーはoptical waveguide技術を選択してスリムなデザインと透明効果を実現しているが、optical waveguideの光の透過率は1%未満である。光エンジン技術に関しては、マイクロLEDは明るさと信頼性でマイクロOLEDを上回る性能を持っている。そのため、MetaとPlessey、GoogleとRaxium、OPPOとJBDなど、世界中の多くのメーカーがマイクロLEDの採用を加速するために協力してマイクロLEDの企業連合を結成している。

マイクロLEDはARディスプレイ分野で繁栄する未来を迎えているが、全色表示効果、赤色

マイクロLEDのEQE、チップ材料と構造の選択、大量転写と検査技術、バックプレーンとドライバICアーキテクチャなど、ARディスプレイの要件を満たすためには多くの技術的な障壁を乗り越える必要が存在する。

自動車ディスプレイへのマイクロLEDの応用も将来的には期待されている。Eric氏によれば、マイクロLEDの自動車ディスプレイ市場での潜在能力は、透明性や、折り曲げ、伸縮性など、ディスプレイに対する車両用のニーズが見出される。近年の展示会からは、PlayNitride、AUO、Innolux、TianmaなどのパネルメーカーがマイクロLEDの自動車向けの透明ディスプレイの広範な潜在能力を展示している。プレミアム製品であるとしても、高級自動車は価格が高いため、将来的にはマイクロLEDの製造コストは車の全体的な高価格によって相殺されることが期待される。

全体として、マイクロLEDの成長は比較的に順調に進展している。将来においても、マイクロLEDは年々ポジティブな成長を維持することが予想されている。

TrendForceの2023年マイクロLED自己発光ディスプレイのコスト分析と開発トレンド分析レポートによると、2023年においても大型ディスプレイ向けがマイクロLEDチップ産業の主な成長エンジンとなり、市場規模は2022年の1,400万ドルから2023年には3,200万ドルに上昇する見込みである。2024年には、ウェアラブルデバイスが量産化されることで別の成長エンジンに切り替わる。

2026年を見据えると、技術的なボトルネックとコスト管理がさらに改善されることで、ARディスプレイや自動車向けディスプレイは急速な成長の段階に入り、マイクロLEDチップの需要を促進すると予想されている。コストが大幅に低下すると、スマートフォンにもマイクロLEDが使用される可能性がある。総合的に見て、TrendForceはマイクロLEDチップの市場規模が14億4,400万ドルに達し、年平均成長率(CAGR)が146%になると予測しています。このように、マイクロLEDは将来有望な展望を持っている。

このような予測に基づき、中国での投資も進行している。湖南省娄底市の経済開発区においては、半導体ディスプレイ用の新素材産業園が建設を開始した。この産業園は180エーカーの敷地を占め、湖南藍芯マイクロエレクトロニクステクノロジー有限公司によるマイクロLED表示チップと湖南奥藍新材料科技有限公司によるマイクロLED表示モジュールの2つのプロジェクトで構成されている。総投資額は60億元(1,200億円)で、建設期間は10ヶ月であった。稼働後には年間50万個のマイクロLED表示チップと6.6万平方メートルのマイクロLED表示モジュールを生産し、1,600人の雇用が増加する見込み。

このプロジェクトの開始により、主に鉄鋼新素材および機械製造を中心とする娄底の「材

料バレー」産業が光電表示チップおよび新素材の分野に急速に進出して、「供給チェーン」に重要な一歩を踏み出すことにもなる。

ディスプレイ製品の動向

マイクロ LED ディスプレイ技術は、革新的なアプリケーションを生み出す可能性がある。マイクロ LED は他のディスプレイより軽く、薄く、さまざまな材料と統合できる可能性がある。現在、多くの企業が AR/VR デバイス、自動車アプリケーション、ウェアラブル用のマイクロ LED ディスプレイに取り組んでいる。

ディスプレイ業界のカンファレンスである SID DisplayWeek 2023 が5月末にロサンゼルスで開催された。SID では以下のようなマイクロ LED の展示があった。

Display Week 2023 では、LG ディスプレイは12インチでピクセルピッチ $40\mu\text{m}$ の 100 ppi のフルカラー伸縮可能なマイクロ LED ディスプレイを展示した。自動車スタイルのボタンをカバーする動作するタッチバージョンのデモを行った。

このディスプレイは最大20%まで伸縮することができる上、LG によれば、高い柔軟性と耐久性、信頼性を備えており、近々商品化される可能性がある。新しいディスプレイは、「コンタクトレンズに使用される特殊なシリコンで作られた非常に弾力性のあるフィルム型基板」上に製造されている。

図表3-1-1 LG ディスプレイのフルカラーかつ伸縮可能なマイクロ LED ディスプレイ



出典：Micro LED info

3-2. マイクロ LED の集積技術動向

集積技術の全体動向

製造工程の観点から見ると、マイクロ LED ディスプレイの集積技術は、移送実装、接合実装、成長集積の3つのカテゴリーにまとめることが出来る。

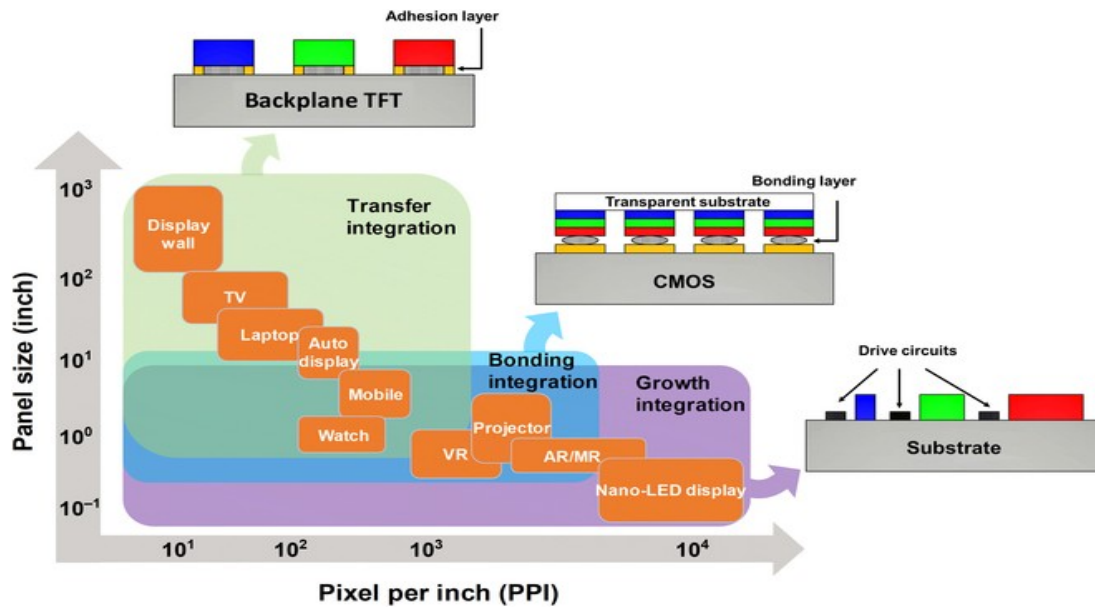
移送実装 (transfer integration) は、ワイヤボンディングまたは金属接続を使用してパッケージ内に複数の分離されたデバイスを実装する。マイクロ LED ディスプレイ技術では、転写実装工程ではマイクロ LED ダイをレシーバー基板に移送して、その後に電気的な相互接続を行う。

接合実装 (bonding integration) は、従来の半導体デバイスにおける一般的な集積化実装である。ウェーハボンディングは、マイクロ LED ディスプレイシステムの実装されたデバイスまたは材料に使用する事ができる。フリップチッププロセスを通じて実現されるモノリシックハイブリッドは、高解像度のマイクロ LED ディスプレイを実現する。

成長集積 (growth integration) は、システムを構成する材料がすべて同じ基板上で成長 (成膜) することを意味する。マイクロ LED ディスプレイ用の実装モジュールは完全なモノリシックプロセスを経ている。成長集積は、水平または垂直形式の均一または異種デバイスの両方を含む。選択的なエピ削除 (SER) および選択的な領域成長 (SAG) は、マイクロ LED ディスプレイの成長集積での2つの手法である。

上記3つの実装技術の異なるプロセス条件は、それぞれ独自の構造的特性とアプリケーションの領域を持つ。次図は、一連のマイクロ LED アプリケーションシナリオと、その特性的な表示領域 (パネルサイズ) とピクセル密度 (ppi) をまとめたものである。図には、上記の3つの実装タイプで準備されたマイクロ LED ピクセルの模式図が示されている。

図表 3-2-1 マイクロLEDディスプレイの主な応用シナリオとその特徴的なディスプレイ領域とピクセル密度。挿入図は、移送実装、接合実装、成長集積によって製造されたマイクロLEDサブピクセルの対応する模式図



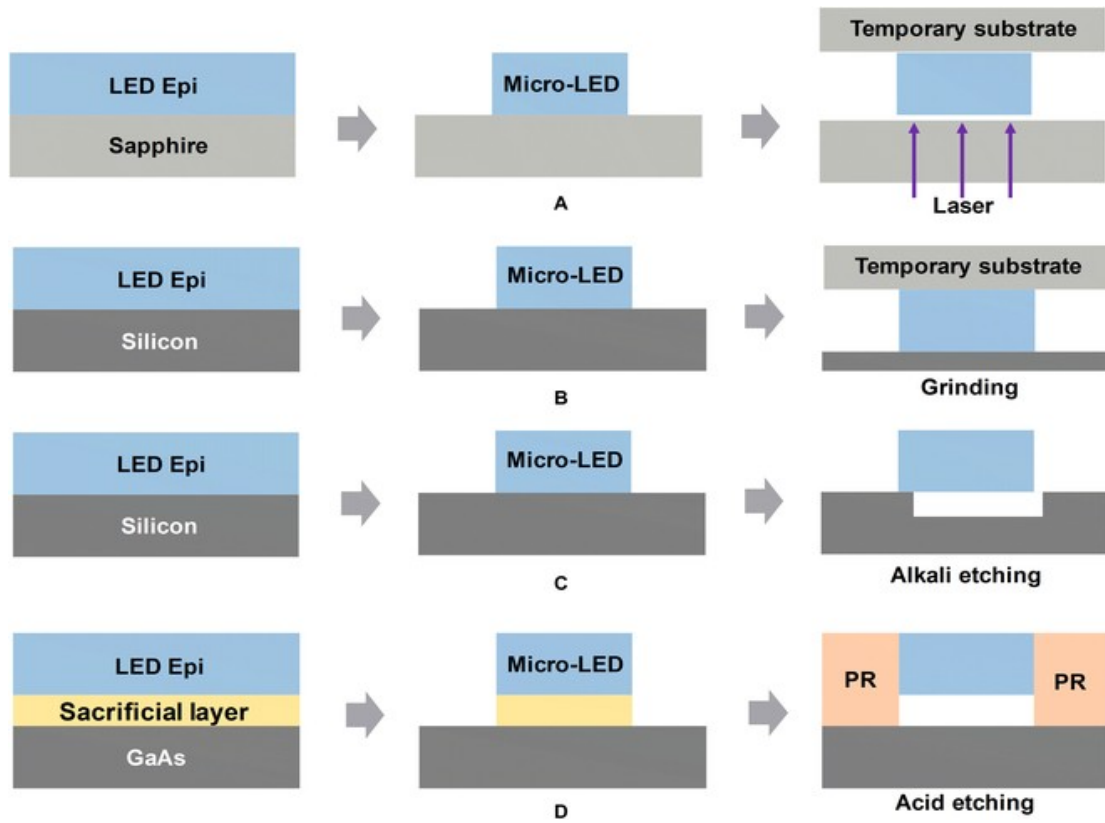
出典 : Integration Technology of Micro-LED for Next-Generation Display

マイクロLEDの移送実装 (transfer integration)

一般的に、GaN ベースのマイクロLEDはシリコンやサファイア基板上に成長させて製造し、AlGaInP ベースのマイクロLEDはGaAs 基板上に成長させる。成長させる基板の厚みは数百 μm であることが一般的である。この厚みは、移載されたマイクロLEDの電気的相互接続と熱管理に問題を引き起こす可能性があり、基板を剥離するか除去することが、ほとんどのピッキングおよび移送プロセスの前提条件となる。また、対応する材料の物理的および化学的性質を考慮し、基板リリース技術の選択を行う必要がある。

次図に、異なるドナー基板で使用される一般的な基板リリース技術を示す。一般的に、マイクロLEDの下地の基板は物理的および化学的にリリースされる。物理的な方法にはレーザーリフトオフ (LLO) や機械的な研削技術があります。化学的な方法には酸またはアルカリのウェットエッチングがある。

図表 3-2-2 (A) レーザーリフトオフ (LLO)、(B) 機械研削、および(C) アルカリ、(D) 酸性溶液を使用した化学エッチングによる基板のリリースのプロセスの模式図



出典：Integration Technology of Micro-LED for Next-Generation Display