

# 立方晶InGaNを材料とする 赤色マイクロLED

マーティン・ラム

AR/VR分野によって、マイクロLED技術の次のフェーズが促されると考えられるが、カラーエミッタの性能を増強するための、既存の方法で製造可能な新しい材料ソリューションが必要である。

拡張現実 (AR) / 仮想現実 (VR) の分野に対する関心の爆発的な高まりを受けて、市場では既に、それを実現するための重要なハードウェア、コンポーネント、材料を対象とした開発活動が進められている。最先端のユーザーエクスペリエンスを備えた、費用対効果の高いヘッドマウントディスプレイを実現できるかどうか、AR/VR分野で成功するための中心要素であるため、その基盤技術に対する投資が近年加速し

ているのは、当然の成り行きである。

検討されている技術には、液晶ディスプレイ (LCD)、有機発光ダイオード (Organic Light Emitting Diode : OLED)、ミニ/マイクロLEDなどがある。アイルランドのリサーチ・アンド・マーケット社 (Research and Markets) の2021年の予測によると、マイクロLEDの市場機会はAR/VR分野によって拡大されて、81%の年平均成長率 (CAGR) で2027年には210億ドル規

模に達する可能性があるという。それでも、同市場はまだ初期段階にあり、マイクロLEDの利用は現在、少数のハイエンドなアプリケーションに限定されている。

デバイスの小型化による性能の向上幅は、縮小していく可能性がある。既存のデバイスレベル技術よりも高い性能を実現しつつ、既存の製造ラインにはめ込むことが可能な、抜本的方法が必要かもしれない。マイクロLED



の製造方法を、完全に商用レベルにまで拡大することができれば、AR/VR分野に対して最適な組み合わせの属性が提供される。マイクロLEDの技術上の障害を克服することに成功した者が、AR/VRディスプレイ市場を掌握することになる。

本稿では、窒化ガリウム(GaN)の一般的に使用される六方晶相ではなく、立方晶形状からLEDを作製することによって、小型カラーエミッタの効率と性能を改善する、潜在的ソリューションについて解説する。

## 小型LEDの効率の課題

マイクロLEDディスプレイの開発者の主な問題点は、小型LEDの効率が低いことである。ここでまず、定義を明らかにしておこう。マイクロLEDは100 $\mu\text{m}$ 未満のエミッタ(発光体)で、ミニLEDは100~300 $\mu\text{m}$ 、従来型の大面積LEDには、300~1000 $\mu\text{m}$ のサイズのものが存在する。

標準的な高効率の大面積LEDは通常、2つの材料系から作製される。青色と緑色のエミッタは一般的に、複数層の六方晶の窒化インジウムガリウム(h-InGaN)合金から作製された、ダイオード構造を使用して製造される。赤色デバイスは、複数層の立方晶のアルミニウム/インジウム/ガリウム/リン(AlInGaP)合金からなる構造から製造される。

大面積の青色と赤色のデバイスは内部効率が高く、それぞれ約90%と60%だが、緑色エミッタの効率は、約20~30%である。デバイスのサイズが約5 $\mu\text{m}$ まで縮小すると、この効率は著しく低下する。青色エミッタの効率は約40%に低下し、これは十分な値だが、緑色と赤色はせいぜい数%にまで低下する。実際、現時点の最先端の

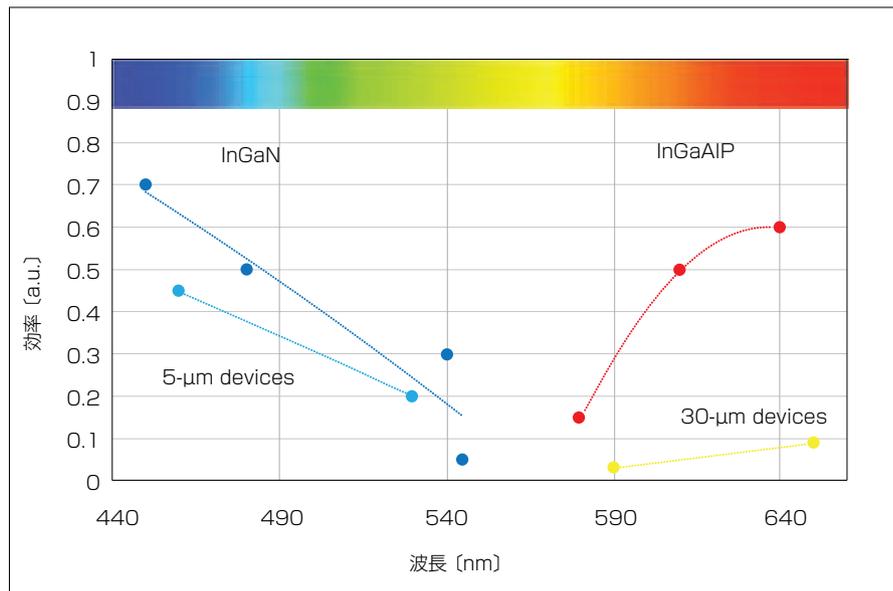


図1 窒化物系LEDとリン化物系LEDの効率と波長の関係(本稿の図はすべて、クボス・セミコンダクターズ社提供)

小型赤色エミッタの効率は、約1~2%である。図1はこの制約を示したものである。

効率が高くなれば、構造が改善され、ヘッドマウントディスプレイの電力要件に関する懸念は緩和される。ディスプレイが適切に機能するために必要な発光量によって、バッテリーサイズの要件と寿命が決まる。また、大量のエネルギーが熱として失われる場合は、より大きなヒートシンクが必要となり、それが、AR/VRディスプレイのフォームファクタの縮小を妨げることになる。従って、緑色と赤色の小型LEDの効率の低下に対処することが、AR/VR分野における機会を意欲的な市場参加者のために解き放つことにつながる。

## 2種類の材料系によるマイクロLED製造の間の相違点

フルカラーディスプレイの場合、赤色、緑色、青色のマイクロLEDは、人間の目のスペクトル感度に満足のいく程度に合致することと、使い物になる程度の効率を持つことが必要であ

る。最初の検討項目は、次の2点である。

1. さまざまなスペクトル領域において許容できる基本効率を備えるLEDが実現できる、材料系とデバイス設計を選択する。
2. その効率に対するデバイスのサイズ縮小の影響を理解して管理することにより、求められる小型エミッタを製造する。

従来のh-InGaN材料系によって、非常に効率の高い青色LEDの製造が可能である。サイズの縮小はエミッタ効率に影響を与えるが、その影響を適切に緩和することによって、実用に耐える効率(初期バージョンで約5~10%)を備える青色マイクロLEDを製造することができる。

より長い波長を実現するために必要となる材料組成の変更によって、デバイスに物理的な影響が生じる。六方晶の結晶構造の基本特性も、それに寄与する要因の1つである。h-InGaN系は、原理上は、可視スペクトル全体を網羅

するエミッタを製造するように操作することが可能だが、より長い可視波長に対して、h-InGaNによって作製されたあらゆるサイズのLEDから十分な効率を絞り出すには、より多くの処理が必要になる。

一方、AlInGaP系については、効率の高い大面積の赤色と黄褐色のLEDの製造が、この材料によって可能である。しかし、発光波長が緑色領域になると、材料特性の基本的な物理限界が原因で、効率は大きく低下する。同じ理由に基づき、スペクトルの青色側に対応するのは不可能である。2つの異なる材料系を使用して、ディスプレイに必要な色範囲に対応するのは、理想的方法ではないが、AlInGaP系に、赤色デバイスに対応できる可能性があることは間違いない。とはいえ、この材料で小型LEDを製造する場合は、サイズ縮小の影響の管理が、h-InGaN系の場合よりも難しい課題となる。

この課題を克服することは可能だが、大きなAlInGaPデバイスが示す高い効率が、デバイスのサイズが縮小すると数%にまで低下することが、経験上明らかになっている。また、AlInGaPに

h-GaNとc-GaN\*の主な特性

特性	h-GaN	c-GaN
内部電界	あり	なし
バンドギャップ	3.4eV	3.2eV
STPで熱力学的に安定	はい	いいえ

\*c-GaNデバイスのほうがバンドギャップが小さいことは、より長い波長における効率を改善するための重要な要素である(表提供:クボス・セミコンダクターズ社)

基づく赤色マイクロLEDの製造はまだ、開発途上にある。効率の課題が克服できたとしても、異なる材料系を単一のディスプレイに組み込むのは、最適なソリューションではない。

### 現行手法

h-InGaNは誕生してからの30年間で、LED性能を急速に向上させてきたため、マイクロLEDに関する取り組みの大半が、この材料を対象としている。

前述のとおり、h-InGaN LEDの効

率が長波長領域で著しく低下する理由は、材料科学者とLED開発者によって十分に理解されている。大きな内部電界が、六方晶の結晶構造の非対称性によって特定方向に生じる。この電界は、デバイスのサイズに関係なく、LEDの活性領域を形成する量子井戸(Quantum Well: QW)全体に広がる。この電界は、QW内の電子と正孔を分離して、発光に必須の過程である放射的再結合の確率を低下させる。この状況は、QWのインジウム含有量を増加させると、さらに悪化する。インジウム含有量の増加は、緑色、黄褐色、赤色など、より長い波長での発光が求められる場合に必須である。さらに都合の悪いことに、これらの内部電界によって、採用できるQWの幅が制限されるため、より長い波長を実現するためにデバイス設計者が利用できる手段がさらに制約されることになる。

この障害を回避することを目的とした取り組みのほとんどが、結晶構造をデバイスに対して回転させることによって、QW内の放射的再結合過程に干渉しない方向に電界を移動させることを目指している。h-InGaN LEDの層構造に一般的に採用されるよりも大き

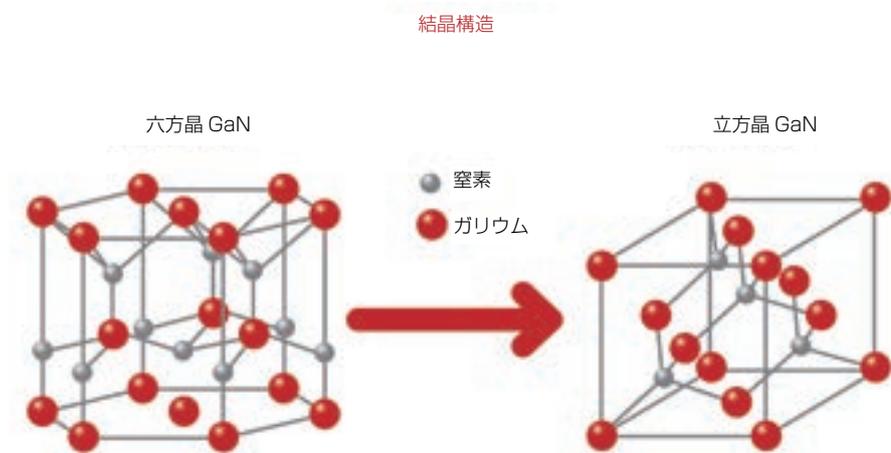


図2 六方晶GaNと立方晶GaNの結晶構造の比較

な角度で、結晶面に平行に表面が切断された基板上で、構造を成長させるといものである。

残念ながらこの回転手法は、内部電界に対して有効であるものの、従来の成長方向には一般的に現れない欠陥が成長層に現れるため、その問題に対処することが必要になる。このトレードオフの管理は難しく、この種の手法ではこれまでに、緑色、黄褐色、赤色のh-InGa<sub>N</sub> LEDの効率を、ほんの数%改善する程度の成果しか得られていない。市場の行き詰まりを打破するには、より抜本的な変更を加えた手法が不可欠である。

### 立方晶構造は解決策か

材料科学者とLED開発者は、LED構造の基礎を成すInGa<sub>N</sub>合金が、立方晶構造(c-InGa<sub>N</sub>)にも結晶化可能であることを、かなり以前から理解している。図2に2つの構造を比較して示す。

立方晶構造には、通常の六方晶構造と比べて、以下のような潜在的メリットがある。

- ・ c-InGa<sub>N</sub>は立方晶構造で、より対称性が高いため、h-InGa<sub>N</sub> LEDにおいて、波長を長くすると効率が著しく低下する原因となる内部電界が全く存在しない。これによって、より広いQWを使用してさらに長い波長を実現するという、h-InGa<sub>N</sub>デバイスでは不可能だったことが可能となるのである。駆動電流の増加によってスペクトルのずれも低減されることが期待される。
- ・ h-GaNのバンドギャップが3.4eVであるのに対して、c-GaNは3.2eVで、この材料を採用するデバイスからのベースライン発光の波長が、インジウムを添加する前で既に、より長く

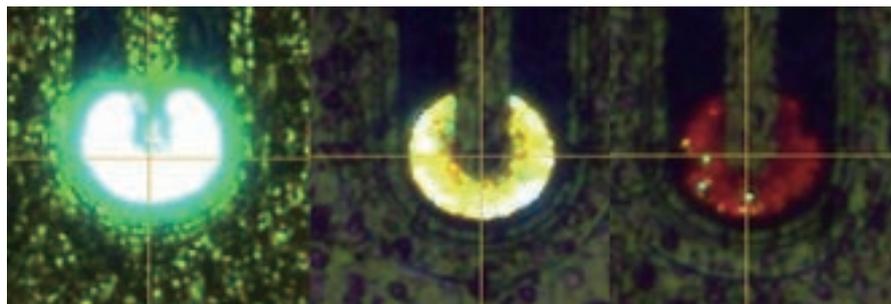


図3 MOCVDを使用して作製された、クボス社の立方晶InGa<sub>N</sub> LED。緑色、黄褐色、赤色の発光スペクトルが示されている

なることを意味する。従って、所定の波長の実現に必要なインジウム含有量は、h-InGa<sub>N</sub>デバイスよりも少なくなる。この材料系でより広いQWが採用できることも、さらなるメリットである(表参照)。

- ・ c-GaNはh-GaNよりも、達成可能な正孔の移動度と最大濃度が格段に高い。導電性の高いp型層を生成する能力は、高い電流密度でLEDを正しく動作させるために不可欠なものである。

最近まで、c-InGa<sub>N</sub>系はあまり注目されていなかった。h-InGa<sub>N</sub>の応用で急速な進歩が得られたことと、純粋なc-InGa<sub>N</sub>層の確実な作製、製造、実用化がこれまで困難だったことが、その理由である。h-InGa<sub>N</sub>の進歩が停滞期に達したことで、立方晶系に対する関心が再燃した。

英ケンブリッジ大(University of Cambridge)からスピノフした、英クボス・セミコンダクターズ社(Kubos Semiconductors)は、c-InGa<sub>N</sub>構造を使用する、信頼性と拡張性に優れた製造方法を確立している。この方法では、業界標準の有機金属化学気相成長

(metalorganic chemical vapor deposition : MOCVD)装置とシリコン基板を使用する。直径150mmの基板上での成長が実証されており(図3)、c-InGa<sub>N</sub>の使用によって、より高効率な長波長のLEDが作製可能であるという予測を裏付ける初期結果が得られている。これは、赤色、緑色、青色LEDを、同一のMOCVD反応炉の中で、1つの材料系から製造する可能性を提起するものである。それが可能になれば、モノリシックなc-InGa<sub>N</sub>のRGBピクセルアレイの実現に向けた道筋が開く。

QW発光効率を最適化する作業がまだ残っているが、スペクトルの緑色、黄褐色、赤色領域において十分な基本効率を備えるLEDの製造に、立方晶系InGa<sub>N</sub>が検討できることを裏付ける、有力な証拠が存在する。また、デバイス面積を縮小した場合のh-InGa<sub>N</sub> LEDの堅牢性を、立方晶の形状で維持することができれば、この材料は、AR/VRディスプレイ市場の機会を解放し、赤色マイクロLEDの飛躍的進歩になる可能性がある。

著者は、本稿で説明したLEDの作製手法を確立した、クボス・セミコンダクターズ社を代表している。

#### 著者紹介

マーティン・ラム(MARTIN LAMB)は、英クボス・セミコンダクターズ社(Kubos Semiconductors)の会長。英国ミルトン・ケインズ在住。40年間にわたって化合物半導体材料業界に携わってきた経験を持つ。