コストの低下と品質の向上をもたらす、新しいLEDアーキテクチュアと蛍光体技術

ジュリアン・キャリー

フリップチップ型のLEDアーキテクチュアは、間違いなくパッケージ部品に浸透する。サファイア基板を上に配置するこの構造を、新しい蛍光体技術と組み合わせることによって、光品質を高め、コストを低下させることができる。

業界アナリストらがもう数年前から予測してきたように、この1年間で固体照明（SSL：Solid State Lighting）は幅広い分野で採用が進み、普及率は確実に増加した。道路照明や駐車場への設置に加えて、小売や娯楽業界から商業および工業分野にいたるまでの広範な用途で採用されている。また、各種技術が組み込まれ、応用分野と導入範囲は急速に拡大している。それでも、光品質と部品コストはLED業界が未だ抱える問題であり、新しいチップアーキテクチュアや蛍光体塗布手法は、その両方の問題に対して効果をもたらすことができる。

実際、SSLに対する需要の高まりから、業界では、サプライチェーン全体にわたって品質を高め、コストを引き下げ、製造の複雑さを緩和することを同時に達成する必要性に迫られている。こうした圧力に対処するために、チップ作製手法の全範囲にわたって新しいLED製造技術が開発されている。新世代の半導体資本設備の投入に加えて、プロセス工学が改良され、高度な材料が開発されている。このような背景の下、米インテマティクス社（Intematix）は、製造コストを引き下げ、複雑さを緩和しつつ、光品質を高めるために、より堅牢で効率の高い蛍光体材料と、蛍光体塗布方法の開発に取り組んでいる。

図1　サムスン社はStrategies in Light 2014のカンファレンスにおいて、同社のLEDフリップチップ型アーキテクチュアを発表した。

成形済みの蛍光体フィルム

革新的な新技術のひとつとして、蛍光体が成形済みのポリマーフィルムシートやガラスタイルとして製造されている。同社では、LEDチップの発光面に直接塗布することのできる光学セラミック材料の使用についても研究を進める予定である。このような新しい製造技術は、将来的にはLEDチップのウエハレベルパッケージ（WLP：Wafer Level Packaging）を可能にする。WLPを採用すれば、冗長なパッケージ工程をなくすことでチップ製造コストを引き下げるとともに、LEDチップの発光効率、信頼性、品質をすべて同時に改善することができる。究極的には、これらの技術を改良された製造システムやプロセスと組み合わせることによって、性能のばらつきが2等色標準偏差（SDCM: Standard Deviation of Color Matching、または2ステップのマクアダム楕円：MacAdam ellipse）の範囲内に収まる白色LEDチップを製造し、ビニング工程をなくすことができる可能性がある。

まだ開発段階ではあるが、これらの製造手法は現在、フリップチップ型のLEDアーキテクチュアに対して試験されている。フリップチップ型構造では、陽極と陰極の両方の接点がチップの背面にある。**図1**に、均一な発光面を持つ韓国サムスン社（Samsung）のフリップチップ型LEDを示す。サムスン社は同アーキテクチュアを、Strategies in Light 2014カンファレンスの基調講演で発表した（http://bit.ly/1kXzh1e）。

実際、フリップチップ型の構造をとることによって、通常のワイヤボンディングによるラテラルチップ構造よりも平面状の発光面が得られ、新しい蛍光体塗布手法が適用しやすくなる。加えてフリップチップは、業界においてますます一般的な手法になりつつある。準大手の製造企業までもがそのメリットを認識し、フリップチップの製造を増加させている。

フリップチップ型アーキテクチュアとWLP

今日のSSL技術業界で最も広く採用されているLEDチップアーキテクチュ

アはやはり、いわゆるラテラルチップと呼ばれる構造である。この構造では、LEDを構成する材料層の積層の一番下に基板がある（**図2**）。フリップチップには、設計と製造を簡素化する多数の利点がある。まず、電極接点が背面にあるため、ラテラル構造のLEDにおいて上部にある電極との接続に必要となるワイヤボンドが不要である（**図3**）。これによって、製造プロセスの1つの工程全体をなくすことができる。さらに、ワイヤが故障点になる可能性について、もはや心配する必要はなくなる。

フリップチップは、チップ効率も向上させる。チップ表面に電極がないため、より広い面積での発光が可能になる。チップ表面全体が、光に対する「ウィンドウ」となる。

このウィンドウにより、蛍光体材料をチップ上に直接載せることができる。このようにして、チップの平面状の表面全体が使用可能になる。ここで蛍光体材料は、LED製造のパッケージ工程か、ウエハレベルか、またはその間の過程で塗布することができる。

フリップチップ型アーキテクチュアにより、大きなポリマーシートやガラスシート、またはセラミック板に製造される蛍光体プリフォームにおいて、1 SDCMの範囲内という均一性基準を正確に満たすことができる。さらに、このような蛍光体を、LEDチップに前述の2つの異なる方法で塗布することができる（**図4**）。

最初の手法では、成形済みの蛍光体をウエハレベルで塗布することができる。LEDウエハの製造過程において、個々のLEDチップはすべて、ウエハ上で互いにつながっている。ダイのシンギュレーション（ウエハを切断して個々のチップに分離すること）を行う前に、フィルム、ガラス、またはセラミックの蛍光体プリフォームがウエハ全体の上に配置される。これによって、各チップ上に蛍光体の「カバー」のようなものが形成される。続いてウエハは、上面に蛍光体が塗布された個々のLEDチップに切断され、これによって、LED「白色」チップとも呼ばれるものが製造される。このLEDは、パッケージサイズが最小限となる。光抽出を高めるために、構造の側面には白色の反射コーティングが施される。

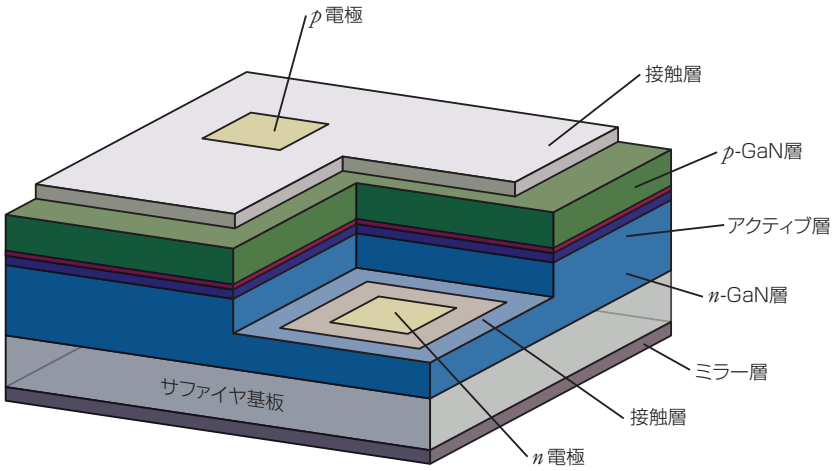

図2　従来のラテラル構造のLEDチップアーキテクチュアにおいて、電極は積層の上部にあり、パッケージレベルでのワイヤボンドを必要とする。

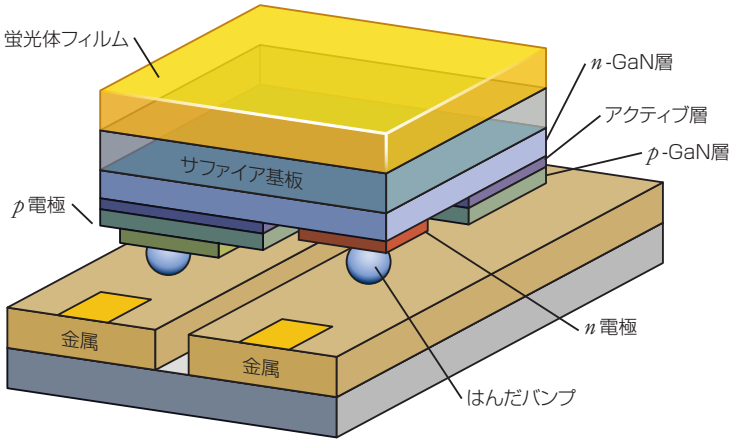

図3　フリップチップ設計では、エピタキシャル工程の後にLEDが上下逆向きになり、基板が発光面として使用され、電極接点は背面にあるためにパッケージに直接接続可能となる。

ビニングの必要性

このWLP手法には、現在提供されている一般的なエミッタやCOB（Chip On Board）に勝る多数のメリットがある。発光効率や均一性の向上とコストの低下を目的として、バルク処理はこの方向へと移行しつつある。この手法によって、ビニング工程が大幅に縮小するか、あるいはもはや不要となり、業界における製造効率が新たなレベルへと引き上げられるという理想的な状況がもたらされる可能性がある。

ビニングは現在、必須の工程である。各LEDウエハには通常、波長が不均一な領域が存在するためだ。LEDメーカーは、製造したLEDチップをさまざまな波長ビンに分類し、それぞれの許容性能範囲を満たすLEDのみを光源メ

ーカーが選択できるようにしつつ、全体的な製造歩留まりと、各ビン範囲の使用率を最大限に高めようとしている。ビニングは、時間とコストのかかる非効率的な工程である。LEDの製造に必須の有機金属気相成長法(MOCVD:Metal Organic Chemical Vapor Deposition)反応炉が、次の世代へと移行し、ウエハ内とウエハ間の波長の均一性が改善されれば、ビニング処理は大幅に軽減される可能性がある。

このような理想的な状態を目指して、メーカーはまず、均一な青色LEDウエハの製造を開始するはずである。蛍光体によって変換される波長は2～2.5nm、つまり1 SDCMの範囲内となる。蛍光体フィルムも1 SDCMの範囲内の均一性を持ち、ウエハ全体の上に配置される。ウエハはその後、個々のLEDチップに切断される。この工程を経たチップはすべて、互いに2 SDCMの範囲内となる。そうすれば、各チップは基本的に均一であるため、チップをさらに分類(ビニング)する必要はなくなる。このプロセスは同業界を目標状態へと導くものだが、これを実現したと主張できるようになるまでには、この技術にまだかなりの改良を加える必要がある。

シンギュレーション後の蛍光体プリフォームの適用

2つ目の手法では、ウエハのシンギュレーション後に蛍光体プリフォームを塗布する。実際のウエハは、波長が必ずしも完璧に均一ではない。ウエハ上には、望ましい波長から数ナノメートルずれたチップが生成される、多様な領域が存在する。ここで、2つの候補の中から適用する処理を選択することができる。つまり、上述のように蛍光体をウエハ全体に塗布するか、または個々のLEDをサブビニングすることができる。ウエハのシンギュレーションを行う際に、個々のチップが試験され、波長によって分類される。チップはその後、同じ波長のチップを含むビンタイルに選別と配置される。これによって基本的に、個々のチップからのテストデータに基づく新しいウエハと、均一なビンタイルが作製される。

ウエハが分割され、LEDチップが実質的に適切なビンタイルに転送された後、ビンタイル上のLEDチップのサイズに完全に一致するような形状に、蛍光体プリフォームを必要に応じて切断する作業が行われる。セグメント化されたこのプリフォームを、形状が適切に合致するビンタイルに塗布することで、非常に均一性に優れた2 SDCMの白色LEDチップを製造しつつ、従来のパッケージ手法のコストをなくすことができる。

ビンタイルへの選別と配置を行うこの処理によって、効率が高まり、ビニング処理が軽減され、コストが低下する。しかし、実際にはこれが、メーカーにとってのデメリットとなる可能性もある。蛍光体は特定の波長に対して敏感であるため、メーカーは、チップ波長の典型的な範囲に合わせて、蛍光体の成形済みシートの在庫を増やさなければならない。現行の製造プロセスでは、LEDパッケージを手がけるメーカーは蛍光体材料を保管し、それを各ビンタイルに対して異なる割合で混合する。一方、ウエハレベルで塗布を行う場合、必要になるのは所望の色を実現する1種類のフィルムだけである。それにもかかわらず、この選別と配置処理を行うためにメーカーは、異なるビンタイルに対応する各色の成形済みフィルムを冷凍保管しなければならなくなり、在庫数は爆発的に増加する。このプロセスの採用拡大に伴い、保管物流管理が対処すべき技術的課題の1つになる。

以上から、本稿の冒頭で述べたフロントエンド工程(FEOL:Front End Of Line)の改良によって、大きな効果が得られる可能性があることが明らかになる。ウエハ内およびウエハ間の均一性が高まれば、選別と配置処理への依存度を大幅に低減させることができる。メーカーは、在庫管理単位(SKU:Stock Keeping Unit)数を減少させることが可能になる。また、サプライチェーン全体にわたる製造の複雑さが緩和され、価格が低下する。

ポリマー製とガラス製の蛍光体プリフォームの比較

前述のように、蛍光体プリフォームは、フィルムとガラスの両方で開発されている。フィルムはポリマー媒体であり、インテマティクス社では、リモート蛍光体を開発する取り組みの副産物として、このような成形済みの蛍光体を開発するための技術と能力を得た。これらのフィルム、またはガラス製プリフォームは、さまざまな蛍光体作成手法によって製造可能で、任意のチップ波長において顧客が求める光品質を実現する。

ただし、ガラス製プリフォームの製造は、ポリマー製のものよりも困難である。蛍光体材料をガラスに添加する処理は、ポリマーフィルムを対象とするよりも本質的に難しく、今後のさらなる開発が求められる。それでも、ガラスは屈折率が高いために効率がさらに高く、チップとSSLパッケージの発光効率をさらに高めることができる。インテマティクス社は、蛍光体ポリマーフィルム媒体を用いた蛍光体プリフォーム製造が、2014年末までに業界で見られるようになると考えている。ガラス製プリフォームによる製造が開始され

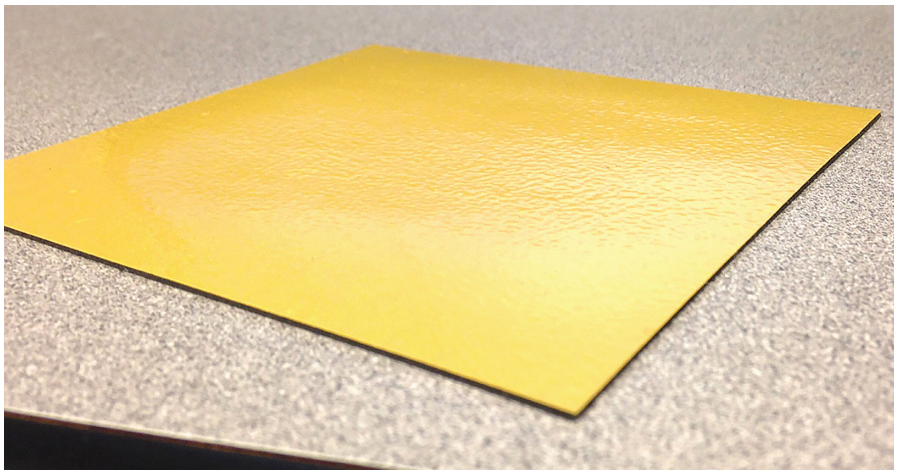

図4　蛍光体プリフォームは、シンギュレーション工程の前、またはウエハ分割後に、ウエハ全体に塗布することができる。

るのはそれよりも少し先になるが、それでもフリップチップ型のアーキテクチュアのみを対象として、2015年初頭までに開始される可能性がある。

光学セラミック蛍光体変換材料

同社が実証しているように、光学セラミック蛍光体材料は、蛍光体材料をLEDチップの発光面に直接塗布するための第3の技術的手法である。ポリマーやガラス製のプリフォームとは異なり、スポットライト照明、プロジェクション、自動車のヘッドライトといった、高い光束密度が求められる用途において著しい効果を発揮する。

光学セラミック変換材料には、熱の観点からいくつかの利点がある。まず、これらの材料は熱伝導率がかなり高く、熱をすばやく放散させることができる。これによって動作温度が引き下げられ、通常は光源の変換効率が高まる。この技術を採用するSSL光源は、エネルギー効率が高くなるか、LEDチップを高い電流密度で駆動して光出力を高めることができる。同じ特性によって、光源の経時的な熱安定性も大幅に高くなり、したがってシステムの信頼性が向上する。全般的に動作温度が低いことから、特に光束密度の高い応用分野において、蛍光体材料が熱ダメージによって茶色く変色する可能性はかなり低くなる。

セラミック変換材料は、黄色、緑色、白色を発光するように作成することができる。白色座標は、欧州委員会(ECE: European Commission for Europe)がヘッドライトに対して定める仕様を満たすため、特殊ガラスや特殊材料のグローバルメーカーである独ショット社(Schott)によると、セラミック材料は車載用途に適しているという。

現時点では、セラミック蛍光体の最大のデメリットは、コストが高いことである。これまでに、セラミックスとして調査および開発された化学系物質の数はごく限られている。また、セラミック蛍光体を作成するには、ガラスやフィルムの蛍光体には不要な、粉末の製造以外のセラミック処理工程が必要になる。これらの追加工程のために、メーカーはセラミック処理装置に投資する必要が生じ、それによって製造コストが増加する。このようにコストが余分にかかることから、光学セラミックの蛍光体材料が近い将来、熱の影響を非常に受けやすいか、高い光束密度が求められる応用分野以外の分野に採用されることはなさそうだ。自動車のヘッドライトなどの分野では、他では得られないこの技術のメリットに、コストの問題を上回る価値がある。

ポリマー製プリフォームを採用するワイヤボンドチップ

インテマティクス社は、フリップチップには確かにメリットがあるものの、技術の成熟に伴って2015年にその製造が同市場に占める割合は、わずか25%程度にとどまるとも考えている。つまり、市場の75%は引き続き、ラテラルチップや、ワイヤボンディングを使用するチップが占めることになる。市場の大きな部分を占めるこのセグメントを無視してはならない。ポリマーフィルムの手法は、チップ上にラミネートすればワイヤボンドのLEDに適用できる可能性がある。これを行うには、既にワイヤボンドされて動作する状態のチップ上に、ポリマーを塗布する必要がある。ワイヤボンドに影響を与えることなくそのままの状態を維持するために、材料はソフトジェル状にする必要がある。技術の進歩に伴い、インテマティクス社は、ワイヤボンドチップといった、フリップフロップ型アーキテクチュア以外にもこの手法を拡張することを目指している。

全般的に、これらの新しい製造技術は、ビニング処理を軽減すると同時に、製造コストの削減、光品質の向上、効率の改善をもたらす大きな可能性を秘めており、究極的にはLED光源製造工程の簡素化を促進すると、インテマティクス社は考えている。

著者紹介
ジュリアン・キャリー(JULIAN CAREY)は、米インテマティクス社(Intematix)のLED蛍光体担当シニアマーケティングディレクター。

LEDJ