6

有機EL照明

鈴木 譲治[†], 田中 純一[†], 森本 満[†]

キーワード 照明, マルチフォトンエミッション, タンデム, リニア蒸発源, ゲル封止

1 ま え が き

有機EL照明は、従来の光源である電球や蛍光灯とはまったく異なり¹⁾、陽極からホール、陰極から電子が注入され、有機発光層中で再結合して失活する時に、そのエネルギーが光として放出されて発光する電界発光型の固体照明デバイスである²⁾。近年市場に浸透し始めたLED照明とは類似の発光原理を持つ。特徴は、薄型、軽量、面発光、紫外線レスで目に優しい、省電力で発熱が少ない、高演色で色再現性が良い、長寿命であるなどを併せ持っている。素子に注入する電流値を変えればそれに応じた明るさ調節ができることもあり、これらを活かした用途開発に注目が集まっている。

2011年から本格的な市販が行われるようになり、近年の性能改善は目覚ましい。現在では明るさ(全光束, lm) 50 lm ~ 190 lm, 色温度で、電球色(2,800K) ~ 昼白色(5,000K)まで、色再現性(演色性, Ra)においてもRa90以上の高演色性が実現され、形状は100mm□ ~ 280mm × 100mm程度までのパネルが発売されている^{3) 4)}。発光効率については40 ~ 50 lm/W程度まで製品として実現されており、白熱電球を凌ぎ蛍光灯に近づきつつある。発光寿命においても光束30%減で1万時間以上を実現し、蛍光灯と同等以上になってきている。発売されている有機EL照明パネルの例を図1に示す。

このように最近の性能向上は目覚ましいが、本格的な普及のためにはもう一段の性能向上とコスト低減が必須である。本稿では、最近の開発状況と課題や今後の開発の方向性などについて当社の例を中心に述べる。

2 有機EL照明パネルの性能とマルチフォトンエミッション素子

照明パネルでは輝度が数百cd/m²のディスプレイとは異なり、光量が必要なため数千cd/m²の高い輝度と、色温度の異なる白色⁵⁾が要求される。これを満足させるためには

図1 有機EL照明パネルのラインナップ例(Lumiotec)
(口絵カラー参照)

図2 マルチフォトン素子の原理

マルチフォトンエミッション素子(MPE素子またはタンデム構造素子)構造⁶⁾が最適である。本素子は有機EL素子のユニットを、正負のキャリアを発生させる電荷発生層(CGL)を介して直列に積層した構造を持つ。2段のMPE素子の例をとると、直列なので電流は1ユニット(段)分と同じでも輝度は2倍になる。このとき、電圧は2倍になるので発光効率(lm/W)は1段素子と同じである(図2)。

[†] Lumiotec 株式会社

"OLED Lighting Panel" by Joji Suzuki, Junichi Tanaka, Mitsuru Morimoto (Lumiotec Inc., Yamagata)

図3 白色MPE (Multi Photon Emission) 素子構造の例 (口絵カラー参照)

白色を得る手法として青色 (B) と黄色 (Y) の補色を使う場合と青色 (B)、緑色 (G)、赤色 (R) の3色を利用する手法がある。色温度と演色性の設計のし易さから後者の構造をとるパネルが一般的となっている。この場合、1段素子でBGR3色各々を実用的な最適強度と発光効率で発光させることは、各色のキャリアバランスを取り難く困難である。MPE素子構造を用いれば1段目をB、2段目をG+Rとすることで比較的容易に色温度、演色性、発光効率の設計ができる。また、後述するように1段目を蛍光発光のB素子、2段目を燐光発光のG+Rなど異なる材料系の素子の積層も可能であり⁷⁾、素子設計の自由度が高い(図3)。

3 輝度寿命の改善

有機EL照明パネルの実用化にあたり輝度寿命の改善は重要な課題の一つである。有機EL照明パネルの実用輝度域の寿命は駆動電流値の1.5～2乗に反比例して短くなる⁸⁾という性質があり、光量を得るために輝度を上げようとすると、駆動電流値の増大を伴うため輝度寿命が大幅に短くなるという問題があった。これについても、前述のMPE素子構造をとることにより解消できる。例えば、2段MPE素子であれば1ユニット素子と同じ電流値で2倍明るくでき、駆動電流値の増大を伴っていないため、寿命は短くならず高輝度が維持できるということになる。多段化により陽極・陰極間の抵抗値は増加するが、素子の電極間抵抗に比して陽極ITOの抵抗が相対的に低下するため、輝度の面内バラツキが低下するので、高輝度と長寿命が両立することも合わせ、大面積な照明パネルにおいては必須の技術といえる。

また素子構造だけでなく、材料メーカーを中心に有機材料自体の性能向上にも取組まれており、高性能な材料の探索が続けられている。発光層材料はもちろんのこと、輸送層材料など周辺材料も含め、総合的なアプローチがなされている。その結果、特に赤色、緑色領域では、高効率かつ長寿命な燐光材料が開発されてきている。しかし、波長の短

図4 白色パネル(4,000K)の輝度寿命(L社)

い青色領域では、まだ実用的な燐光材料は実現できておらず今後の開発が期待される。

現状では、青色に蛍光材料、緑色、赤色に燐光材料を使用し、MPE構造を適用することで、4,000Kの白色で初期輝度3,000cd/m²、光束30%減寿命が12,000時間の照明パネルが実現できている(図4)。

4 発光効率の改善

発光効率 (lm/W) の改善は省エネ化の観点から重要な課題である。このためには駆動電圧の低減を図るとともに、単位電流あたりの光束 (lm/A) を増加させる必要がある。

素子の低電圧化を実現するためには、電子およびホールといったキャリアの移動度が高い電荷輸送材料を適用することが効果的である。また電極ならびに隣接する有機層からのキャリア注入障壁を低減するために、イオン化ポテンシャル (Ip) や電子親和力 (Ea) といったエネルギーレベルについて、各材料間にて整合を図る必要がある。当社の製品パネルについては、これらを考慮したデバイス設計を実施している。

一般的に駆動電圧の理論下限値は、発光材料のバンドギャップによっておよそ決まるが、有機材料自体のキャリア移動度はシリコンなどの無機半導体材料に比べ数桁低い

図5 光取出し構造

ことから、有機層の膜厚を薄膜化することによっても、ある程度の低電圧化は可能である。しかしこの場合はパネルのショート確率が高くなり、結果として製品歩留まりの低下に繋がることもある。この事象に対する解決策として、前述したMPE構造が挙げられる。

具体的には、低電圧化のために各ユニットの膜厚を発光効率や寿命に影響を及ぼさない程度にまで極力薄くし、それらのユニットを複数段積層してMPE化を行う手法である。これにより、各ユニットの駆動電圧を低下させつつ、有機層全体を厚膜化させることが可能となる。結果、MPE化しても比較的低電圧な素子と高歩留まりの両立が実現可能となり、有機EL照明パネルの量産においてその恩恵は大きい。

一方で、単位電流あたりの光束を増加させる方法としては、光取出し効率の改善が重要な技術となる。有機膜内にて発生した光は、以下のモードに大別できる⁹⁾。

- (1) 外部モード：外部に光（光束）として取出せる放射成分
- (2) 基板モード：ガラス基板内に留まる非放射成分
- (3) 薄膜モード：有機膜内にて損失する非放射成分

(2)は、ガラス内に入射した一部の光が、大気との屈折率差による臨界角の影響により、外部へ放射されない現象である。対策として基板表面へピラミッドやマイクロレンズ形状を付与した光学フィルムを導入することが有効である。当社の製品パネルにはフィルムメーカーと共同開発した光学フィルムを採用しており、光学フィルムおよびデバイス構造の双方から構造最適化を行うことで、パネル特性の

改善を図っている。

(3)については、素子内部にての干渉の影響や素子とガラス基板との屈折率差による臨界角の影響によりガラス基板中へ放射されない成分や、陰極表面におけるプラズモン損失などによるロス分であり、その割合は全体の50%程度と非常に大きい^{10) 11)}。改善策として、パネル構造に散乱性を有する光取出し構造を付与することで、これらの成分を外部へ取出す方式について検討が進められ、一部実用化されている（図5）。当社においても次期製品パネルでの適用に向けた開発を進めている。

5 白色の設計

有機EL素子の構造設計を行う場合、発光部から反射電極（陰極）界面までの距離が波長以下と短いことから、干渉効果についての考慮が必要となる。正面方向への発光を強調する場合には、発光点から反射電極までの光学距離 d を $\lambda/4$ とすると良い。しかし、全光束（ I_m ）を重視する照明用途に対してこの干渉条件は必ずしも最適ではなく¹²⁾、また前述した光学フィルムの併用を前提とした場合、フィルムの効果を極大化させるために広角成分を増大させる配光設計を取る必要がある。これらの効果を検証するために、緑色蛍光素子において干渉条件を変えたデバイスの作製を行い、特性を評価した結果を図6に示す。

正面設計は $d = \lambda/4$ に設定し、設計Aは全光束値が最大となる距離を、設計Bはフィルムによる光取出し効率が最大となる距離をそれぞれ光学シミュレーションにより算出

図6 素子の配光特性と干渉設計 (口絵カラー参照)

表1 干渉設計の相違による発光効率の特性差

全光束測定値 (緑色単色素子)	光学フィルムなし		光学フィルムあり		光学フィルムによる アップ率	
	EQE (%)	光源の光束 (lm/m ²)	EQE (%)	光源の光束 (lm/m ²)	EQE	光源の光束
正面設計	6.2	7,001	8.1	9,182	1.31倍	1.31倍
設計A	7.1	8,238	9.5	10,921	1.34倍	1.33倍
設計B	4.5	5,695	8.4	9,742	1.87倍	1.71倍

し、デバイス化を行った。

図6 (a) に素子単体の配光特性を示す。正面設計は0°～20°の範囲にて最も輝度が高く、一方で設計Aは30°以降の角度にてやや発光成分が増えていることが読取れる。それに対し設計Bは輝度の絶対値こそ低いものの、45°～60°付近にピークを有しており、広角成分が多く含まれていることが確認された。

これらに光学フィルムを適用した際の配光特性を図6 (b) に示す。設計Aでは全角度において正面設計を上回る特性が得られ、設計Bでは光取出し効率が大幅にアップすることを確認した。表1に特性一覧を示すが、光学フィルム使用時には、正面設計に対し設計A, B共に外部量子効率(EQE), および光束 (lm/m²) において良好な特性が得られた。

一方で白色発光素子の光学設計を考えた場合、白色光は単色光に比べスペクトルのバンド幅が広いことからコヒーレンス長は短くなるものの、干渉の影響を受けることから上記と同様の設計思想を踏襲できる。しかし、層を構成する各材料の屈折率は波長分散を有するので、複数の波長成分が混在している白色光では、すべての波長に対して一元的に最適な光学距離を決定することは困難であることに注意を要する。

当社では、素子の設計自由度が高いMPE構造をベースにした光学膜厚の計算を行い、白色の各構成波長に対して整合性を有する膜厚の設計を行っている。その際にパネルの演色性や視野角依存性(パネルを見る方向によって色調

が変化する現象)といった照明光源に必要な特性についても考慮することで、実用的な性能を確保している¹³⁾。

6 製造プロセス

有機EL照明パネルの構造、製造プロセスとも近年スマートフォンなどで広く使用されている有機ELディスプレイと類似のものである。最も大きな違いは、パネル全体を1画素で構成する場合が多く、ディスプレイのように多数の微細な画素を形成しなくて良いことと、その個々の画素を独立に駆動するための複雑な回路(TFT基板やドライバIC)が不要であることである。ただし、MPE構造をとり多数の有機層やCGL層が必要であるので、膜厚の制御や光干渉の制御を精密に行う必要がある。

当社の例では、素子形成において、量産に適した「リニア蒸発源搭載インライン成膜装置」を用いて、2009年8月から現在まで開発試作や生産にフル稼働してきた。有機発光層の成膜においては、3種類の材料を共蒸着ができるような蒸発源配置となっている¹⁴⁾。MPE構造の素子を効率良く製造するために、リニア蒸発源を有機層の層数数十個並べた装置である。インライン装置として、世界でも初めてのシステムであるが、安定した稼働に成功している(図7)。

一方、有機EL素子は水分や酸素に弱いので、素子を外気とは隔離する必要がある。通常2枚のガラス板で素子を挟み込む構造をとり、有機EL素子を形成した基板ガラスの上に封止ガラスを低露点の窒素中で貼り合わせる必要がある。一般的には高価な掘込みガラスにシール状の吸湿剤を貼り付けたキャップ内部を窒素で充填する方法で封止が行われる。

当社の封止においては、高価なキャップガラスを用いず平板ガラスを使用し、伝熱性が良いゲル材料に吸湿性を持たせこれをサンドイッチした、ゲル充填封止を採用している。本工法はLCDにおけるODF(One Drop Fill: 液晶滴下注入)プロセスが応用できるなど量産性も良い(図8)。

図7 量産ライン概念図(リニア蒸着源インライン装置)(口絵カラー参照)

図8 ゲル封止構造

7 最近の製品化の状況

有機EL照明パネルの性能が着実に向上してきている中、演色性など照明光源としての特性にも着目したパネル開発がなされ、薄型拡散面光源としての特徴を活かした適用事例が増えてきている。

最近の国内の実用例としては、高演色性、発熱が小さい、紫外や赤外の有害光線を持たないといった特徴から、美術館や博物館での使用例が出てきている。図9に東京国立博物館にて国宝の展示に使用された例を示す。従来とは異なる照明としてデザイン領域でも注目されており、多くの照明器具が提案されているが、斬新なデスクライトとして使用された例を図10に示す。

現状、美術館や博物館、デザイン照明など比較的限られた用途での製品化が主であるが、今後の性能向上、コスト低減により、一般照明用途を含めた広範な平面照明への展開が期待される。

図9 博物館の展示ケース照明(東京国立博物館, 2013年)
(口絵カラー参照)

また、有機ELならではの特徴を生かした試作品も多く提案されてきている。通常、アルミ膜などを用いる金属電極をITOなどで透明電極化して、非点灯時には透明な照明や、樹脂基板や極薄のガラス上に有機EL素子を形成した曲がる照明などである。まだ課題は多いが、既存の照明に

図10 デスクライト(Feel Lab, 2013年)
(口絵カラー参照)

は無かったあかりを提供できるという点で新しい価値を創造する期待がある¹⁵⁾。

8 む す び

徐々にではあるが有機EL照明の実用化が始まりつつある。当社は、小規模量産可能な生産工程と製造技術を確立し、更なる高歩留り化、高信頼化に向けた活動を継続している。また、高効率化、長寿命化など性能改善への取組みも継続的に行っている。数年後には、これら技術の集大成となる本格量産ラインを構築し、本格的な次世代照明の普及期に対応する予定である。

今後は、当社独自のマルチフォトンエミッション(MPE)素子技術を駆使し、「高輝度・高効率・長寿命・優しいあ

かり」をキーワードに、更なる改善に向けて努力していく。有機EL照明を通して、より快適な人に優しい照明空間が提供できると確信しており、加えて今後の省エネルギー社会に貢献していきたい。

(2013年9月5日受付)

〔文 献〕

- 1) 照明学会：“新・照明教室光源（改訂版）”（2005）
- 2) 筒井哲夫監修：“有機ELハンドブック”，pp.349-361（2004）
- 3) 堀 恵一ほか：“三菱重工技報”，49，1，pp.50-55（2012）
- 4) 鈴木謙治：“有機EL討論会第15回例会予稿集”，S2-2（2012）
- 5) JIS Z 9112：“蛍光ランプの光源色および演色性による区分”
- 6) 城戸淳二ほか：“第49回応物秋季予稿集”，27p-YL-3（2002）
- 7) T. Komoda, et al: "SID2011 Digest", 72, 1, pp.1056-1059（2011）
- 8) 古川慶一ほか：“Konica Minolta Technology Report”，9，pp.58-63（2012）
- 9) 三上明義：“有機EL技術開発の最前線”，p.13（2009）
- 10) 竹添秀男ほか：“省エネ型有機発光デバイスの開発”，月刊ディスプレイ16，7，pp.34-38（2010）
- 11) A. Mikami and T. Goto: "SID2012 Digest", 51, 1, pp.683-686（2012）
- 12) 筒井哲夫監修：“有機ELハンドブック”，pp.203-228（2004）
- 13) 高村 誠ほか：“三菱重工技報”，49，4，pp.107-112（2012）
- 14) 小笠原ほか：“三菱重工技報”，46，1，pp.33-35（2009）
- 15) 日経エレクトロニクス，2013年6月24日号，pp.43-49（2013）

鈴木 謙治 1977年，NEC(株)入社。1997年より、有機ELディスプレイの開発・量産にかかわる。2001年、サムスンNECモバイルディスプレイ(SNMD)設立にともない出向。2003年、(財)山形県産業技術振興機構・有機エレクトロニクス研究所に出向し、有機EL照明パネルの開発に従事。2009年より、Lumiotec(株)にて勤務。

田中 純一 2004年、(財)山形県産業技術振興機構・有機エレクトロニクス研究所へ入所。有機ELパネルにおけるデバイス構造の開発に従事。2009年、Lumiotec(株)入社。有機EL照明パネルの開発に従事し、現在に至る。

森本 満 1996年、ローム(株)入社。1998年より、有機ELディスプレイの開発・量産にかかわる。2009年、Lumiotec(株)に出向。有機EL照明パネルの開発に従事し、現在に至る。