

小特集

2-4

2. 構造からみたディスプレイデバイス

## LEDフルカラーディスプレイ

中村修二

中村修二：日亜化学工業株式会社開発部

LED Full Color Display. By Shuji NAKAMURA, Nonmember (R &amp; D Department, Nichia Chemical Industries Ltd., Anan-shi, 774 Japan).

**ABSTRACT**

LEDフルカラーディスプレイには色の三原色である赤、青、緑の3色が必要である。赤色に関しては従来からGaAlAs高光度赤色LEDがあり問題はない。青色に関して1994年に2cd GaN系高光度青色LEDが製品化され、青色は窒化物LEDで問題ない。緑色に関してはGaP緑色LEDが従来からあるが、光度が0.1cdと低い。1994年に2cd GaN系高光度青緑色LEDが製品化され、緑色としてディスプレイに応用されている。緑の色純度が悪いので色純度の良い緑色LEDの開発が急務である。

キーワード：LED, フルカラーディスプレイ, GaN, InGaN, ZnSe

## 1. はじめに

今世紀中には不可能とさえいわれたカンデラクラスの高光度青色LEDが1993年に初めて発表製品化され、従来のGaP緑色LEDとGaAlAs系赤色LEDと組み合わせてLEDフルカラーディスプレイを作ろうとする動きが急に活発化してきた<sup>(1)</sup>。また1994年には2cdの窒化物系の高光度青色、青緑色LEDが相継いで発表製品化され、ますますLEDフルカラーディスプレイの動きが活発化した<sup>(2),(3)</sup>。ZnSe系では1994年に色純度の非常に良い緑色LEDが発表された<sup>(4)</sup>。ここでは材料の観点からLEDフルカラーディスプレイの現状について述べる。フルカラーディスプレイには色の三原色である青、緑、赤の3色のLEDがあれば、その混色としてすべての色を表現できる。この3色に分けてそれぞれの色のLEDの現状について述べる。

## 2. ZnSe, SiC, GaN系青色LED

従来青色LED材料の候補としてはSiC, ZnSe等のII-VI系材料, GaN等のIII-V族窒化物系材料があった。図1には主な可視光LED材料のバンドギャップエネルギーと格子定数の関係を示す。窒化物系は結晶系が六方晶系なのでa軸方向の格子定数を示している。この図を見ると窒化物系のみ格子整合する基板材料がなく、青、緑色LED材料のZnSe系、黄色のAlInGaP系、赤色のGaAlAs系は混晶の組成をうまく制御することによりGaAs基板と格子整合する。このため青色材料としては格子整合する基板があるZnSe系が主に研究されてきた。

ZnSe系青色LEDの最近の発表ではZnCdSe多重量子井戸LEDで順方向電流10mAでピーク波長489nm, 半値幅15nm, 発光出力327 $\mu$ Wを得ている<sup>(5)</sup>(表1参照)。しかし寿命に問題があり、室温連続動作で半減期が数百時間である。またピーク波長が少し長波長寄りである。フルカラーディスプレイとしては450nm回り

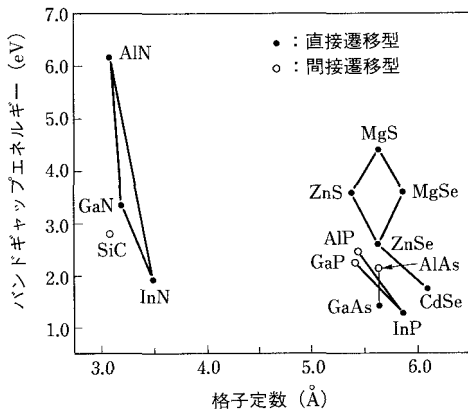


図1 主な可視光LED材料のバンドギャップエネルギーと格子定数との関係

の青色が望まれており更なる短波長化が必要である。短波長化を困難にしている原因は ZnSe 系ではバンドギャップエネルギーが大きくなる程 p 型化が困難になる傾向にあり、短波長になればなる程発光出力が極端に落ちてくるためである。このため ZnSe 系での実用的な青色LEDの実現はまだ先であると考えられる。

次に SiC は p, n 型の両伝導型が容易に制御でき早くから青色LEDの製品化が可能であった<sup>(6)</sup>。この SiC 青色LEDの特性も表1に示す。順方向電流 20 mA でピーク波長 470 nm, 半値幅 70 nm, 発光出力 10 μW, 光度<sup>(明)</sup> 10 mcd である。この光度では屋外用途には使用できず用途は限られていた。材料の特性上、SiC はエネルギーバンド構造が間接遷移<sup>(明)</sup>型であり、こ

れ以上の光度向上は困難であると考えられる。

窒化物系では格子整合する基板がなく、大きな格子不整合にもかかわらずサファイアが主に基板として使用されてきた。最近格子不整合の小さい SiC 基板を使用する研究も活発化している<sup>(7)</sup>。窒化物系ではサファイア基板上に低温(約 500~600°C)で AlN あるいは GaN のバッファ層を成長し高温(1,000°C)で GaN を成長すると GaN の結晶品質が飛躍的に良くなることがわかった。また p 型 GaN も 1989 年に電子線照射を用いて初めて実現し<sup>(8)</sup>、その後 1992 年に熱的アニーリングのみでも容易に p 型 GaN が得られることもわかった<sup>(9)</sup>。また p 型 GaN のアクセプタの補償機構として水素原子のパッシベーションであることも明らかにされ、窒化物系半導体で最大の懸案であった p 型 GaN の実現、p 型 GaN の補償機構の解明の両方が実現した<sup>(9)</sup>。またダブルヘテロ構造にするため必要な高品質 InGaN 膜の成長も 1992 年に初めて実現した<sup>(10)</sup>。このようにして 1993 年に InGaN/GaN のダブルヘテロ構造のLEDが発表された<sup>(10)</sup>。このLEDでは発光色が紫色発光であり視感性が低くディスプレイには不向きであった。その後、発光波長を長くする目的で Zn を InGaN 活性層に添加し、発光強度を強くする目的で Si も同時に添加し 1994 年に発光光度 2 cd の青色LEDが実現した<sup>(3)</sup>。青色発光ダイオードの構造を図2に示す。まずサファイア基板上に GaN バッファ層を低温(約 550°C)で成長し、

表1 各種赤、緑、青色LEDの比較。

発光色	材料	ピーク波長 (nm)	光度 (mcd)	出力 (μW)	外部量子効率 (%)
赤色	GaAlAs	660 (25)**	5,000	4,500	12.0
	GaP	555 (30)**	63	30	0.07
緑色	ZnCdSe	512 (10)**	4,000	2,100	4.3
	InGaN	500 (80)**	2,000	1,000	2.0
青色	SiC	470 (70)**	9	11	0.02
	ZnCdSe*	489 (15)**	500	327	1.3
	InGaN	450 (70)**	2,000	2,500	4.5

順方向電流 20 mA での測定値を示す。\* 順方向電流 10 mA での測定値を示す。\*\* 発光スペクトルの半値幅 (nm) を示す。

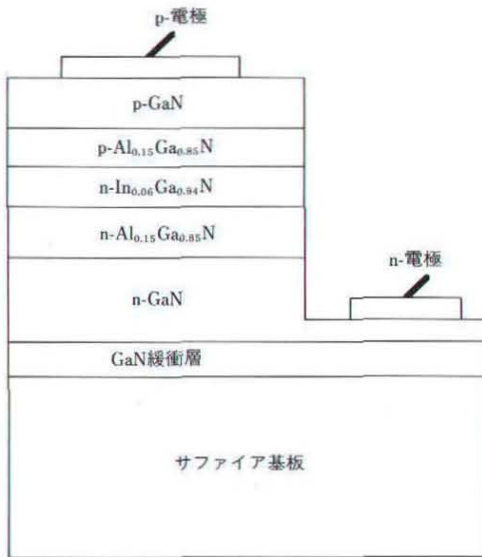


図2 InGaN/AlGaIn 青色 LED の構造

その後、高温(約1,000°C)でn-GaN, n-AlGaIn, ZnとSiドープInGaIn, p-AlGaIn, p-GaNと順次成長する。成長後、p-AlGaIn, p-GaNを低抵抗p型にするため熱的アニーリングをする。次にp-GaNの一部をn-GaNが露出するまでエッチングし、p-GaN, n-GaNにそれぞれ電極を形成する。その後リードフレームにチップを載せエポキシでモールドしてInGaIn/AlGaInダブルヘテロ構造青色発光ダイオードが完成する。この青色LEDの特性を表1に示す。順方向電流20mAでピーク波長450nm, 半値幅70nm, 発光出力2.5mW, 光度2cdである。発光出力, 発光光度とも従来のSiC青色LEDの200倍以上である。図3に青色LEDの順方向電流をパラメータとした場合の発光スペクトルを示す。電流が0.1mAではピーク波長は458nmであるが、電流を20mAに増加するとピーク波長は447nmの短波長になっており、電流の増加と共にブルーシフトする。また電流が20mAでは、InGaInのバンド間発光が385nm辺りに現れる。これは、不純物単位(Zn)に関係した発光再結合がこの注入電流域では飽和し、代わりにバンド間発光再結合が顕著になってくるためと思われる。順方向電圧は順方向電流

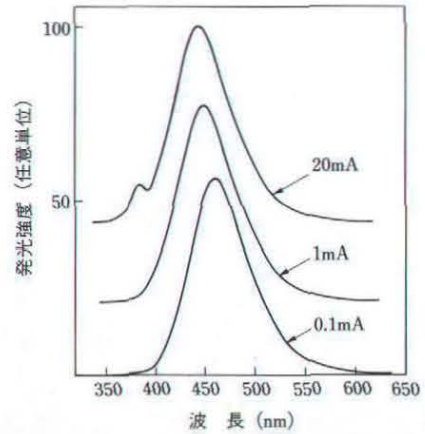


図3 InGaIn/AlGaIn 青色 LED の順方向電流をパラメータとした場合の発光スペクトル



図4 実際に発光している状態の InGaIn/AlGaIn 青色 LED

20mAで3.6Vである。寿命は数万時間である。図4には実際に発光している状態のInGaIn/AlGaInダブルヘテロ構造青色LEDを示す。

### 3. GaP, ZnSe, GaN系緑色LED

従来はGaPが緑色LED材料として使用され

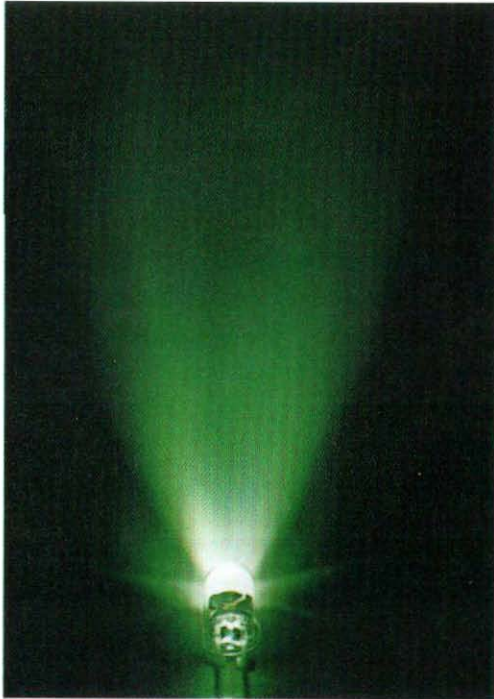


図5 実際に発光している状態の InGaN/AIGaN 青緑色 LED

てきた。しかし発光光度は 100 mcd 前後と低く、しかもピーク波長が 555 nm であり、緑というよりも黄色に近い色である (表 1 参照)。このためディスプレイに GaP 緑色を使用した場合鮮やかな緑色を出すことが不可能であった。これは GaP のエネルギーバンド構造が間接遷移型であり高光度化が難しく、バンドギャップエネルギーが小さくこの波長が限界に近いためである。このためバンドギャップがもっと大きく、エネルギーバンド構造が直接遷移<sup>(IIIb)</sup>型で、短波長化、高出力化が可能な ZnSe 系、あるいは窒化物系での緑色 LED の実現が切望されていた。

ZnSe 系では ZnCdSe/ZnSse の多重量子井戸を活性層にしたピーク波長 512 nm、半値幅 10 nm、発光光度 4 cd と緑色 LED としては色純度のすばらしい緑色 LED が発表された (表 1 参照)<sup>(4)</sup>。問題は寿命で室温連続通電で数百時間である。このためレーザダイオードの開発と合わせて ZnSe 系では劣化対策が実用化への最大

の課題である。

窒化物系では前述の青色 LED で述べた InGaN/AIGaN ダブルヘテロ構造で InGaN 活性層の In 組成比のみを増加して波長を 450 nm から 500 nm まで長くした青緑色 LED が 1994 年 4 月に発表製品化された<sup>(2),(3)</sup>。発光出力は 20 mA で 1 mW、光度は 15 度の指向特性をもつレンズ形状で 2 cd である。この青緑色 LED は主に交通信号機への応用を考えて開発された。既に青緑色 LED は 1994 年 7 月より道路交通信号機に使用されており寿命、信頼性は実用上問題ないと考えられる。図 5 に実際に発光している状態の青緑色 LED を示す。

#### 4. GaAlAs 系赤色 LED

赤色 LED は従来より GaAlAs 高光度赤色 LED が実用化されており問題はないと考えられる。今日では外部量子効率 10% を越えている。またピーク波長 660 nm、半値幅 25 nm と色純度も非常に良い (表 1 参照)。

#### 5. LED フルカラーディスプレイ

前述した InGaN 青色、ZnCdSe 緑色、GaP 緑色、InGaN 青緑色、GaAlAs 赤色 LED を載せた色度図を図 6 に示す。GaP 緑色、GaAlAs 赤色、ZnCdSe 緑色 LED はスペクトルの半値幅が狭く色純度が良いのでほぼ外側の三角形の線上に位置する。InGaN 青、青緑色 LED はスペクトルの半値幅が広く色純度が悪いので少し内側に位置する。これらの青、緑 (青緑)、赤色 LED の位置する点を結んでできる三角形で囲まれる領域の範囲の色がその 3 色の LED を使ってディスプレイとして表せる色範囲となる。これをみると ZnCdSe 緑色 LED を使用すると色範囲が広がるが、前述したように ZnSe 系 LED はまだ実用化されていない。現在実用化されている LED のみでフルカラーディスプレイを作るとすると 2 種類となる。それは赤色と青色に関してはそれぞれ GaAlAs、InGaN で同一であり、緑のみが違う 2 種類となる。一方が従来の GaP 緑色 LED を使用する場合は、他方



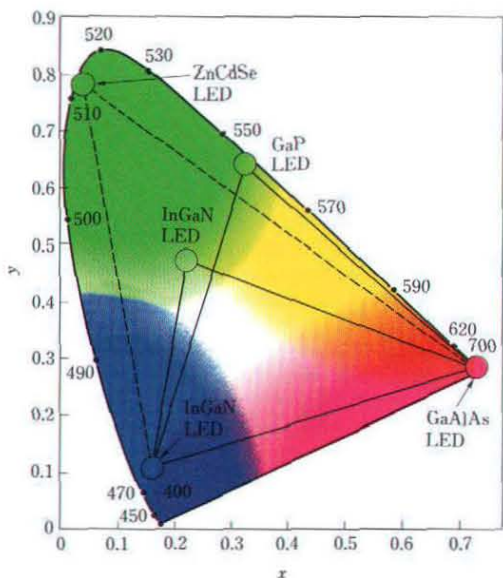


図6 InGaN 青色, ZnCdSe 緑色, GaP 緑色, InGaN 青緑色, GaAlAs 赤色 LED を載せた色度図 色度図とは  $x, y$  座標で色範囲を表したもので一番外側の三角形上の位置が単一波長からなる色の領域である。外側から中心に向う程単一波長の色ではなくなりほかの色と混ざってくる状態となる。スペクトルでいうならスペクトルの半値幅が広くなることを意味する。三角形の左端が紫色、右端が赤色、上端が緑色領域となる。

が InGaN 青緑色 LED を使用するディスプレイとなる。

### 6. GaP 緑色 LED を使用するフルカラーディスプレイ

この場合表現できる色範囲は色度図に示しているようになり、純粋の緑色が表現できない。最も大きな問題は緑色の光度が 100 mcd 前後と他の赤色 5 cd, 青色 2 cd と比べて極端に小さいことである。このため緑色の光度をかせぐため 1 画素当りの緑色のチップ数あるいは緑色 LED ランプ数を増やさないとフルカラーディスプレイの輝度の色バランスが取れなくなる。このため 1 画素当りのサイズが大きくなりディスプレイの解像度が悪くなる。また全体的に消費電力が大きくなり熱の発生が問題となっている。

### 7. InGaN 青緑色 LED を使用するフルカラーディスプレイ

色範囲は色度図に示しているが、問題は黄色が出にくいことと、鮮やかな緑色も表現できないことである。InGaN 青緑色 LED をディスプレイの緑色として使用する最大のメリットは高輝度であることである。赤色 5 cd, 青色 2 cd, 緑色 2 cd とすべての色が 2 cd 以上となる。このため屋外で使用可能な非常に高輝度なフルカラーディスプレイができることである。また 1 画素当り各色 1 個のチップ、あるいは 1 個のランプで輝度バランスが取れ、GaP 緑色を使用した場合に比較して非常に高解像度、高輝度のフルカラーディスプレイができる。この一例の写真を図 7 に示す。この場合は 1 画素が InGaN

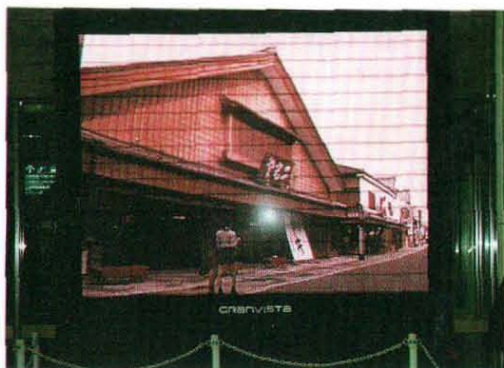


図7 2 cd の InGaN 青、青緑色 LED と高光度 GaAlAs 赤色 LED を使用した高輝度 LED フルカラーディスプレイ面輝度は 1,500 cd/m<sup>2</sup> 達成。256 階調 (2.56 m × 1.92 m, 128 インチ, 1,677 万色) 表示で大阪上本町に 1995 年 1 月 10 日設置。

青色 1 個, InGaN 青緑色 1 個, GaAlAs 赤色 LED 1 個からなる. それぞれの LED のランプの直径は 3 mm である.

## 8. 今後の課題

このように従来実現できなかった, 屋外で使用可能な高輝度, 高解像度のフルカラーディスプレイが InGaN 青, 青緑色 LED の実用化により初めて可能となった. LED はサイズが極端に小さくできないので, ディスプレイとしてはどうしても大きくなり 50 インチクラス以上の大型ディスプレイとして今後利用されるものと思われる<sup>(1)</sup>. 問題点としては緑色の色表現範囲が小さいので色純度の高い, ピーク波長で 510~520 nm 当りの緑色 LED の開発が課題となる. ZnSe 系では色純度の良い緑色が発表されているが, 信頼性に問題があり実用化には至っていない. 窒化物系では活性層である InGaN の In 組成比を増加してバンド間発光で光る緑色 LED ができれば半値幅 10~20 nm の非常に色純度の良い緑色が得られる可能性がある. 今後の研究の進展を望みたい.

### 文 献

- (1) 中村修二: "青色発光ダイオード, ダブルヘテロ構造で 1 cd 実現", 日経エレクトロニクス, 602, pp.93-102 (1994-02).
- (2) 中村修二: "実現した青色の高輝度発光ダイオード", 日経サイエンス, 24, pp.44-55 (1994-10).
- (3) 中村修二: "InGaN/AIGaN 発光ダイオードの現状

- と性能向上", 光学, 23, pp.701-708 (1994).
- (4) 中山典一: "高輝度緑色発光ダイオードを開発, LED によるフルカラーディスプレイ実現に大きく前進", DIGIC, 33, pp.40-43 (1994-10).
  - (5) Eason D., Ren J., Yu Z., Hughes C., El-Masry N. A., Cook J. W. and Schetzina J. F.: "Blue & green light emitting diode structures grown by MBE on ZnSe substrate", Proc. MBE-VIII, pp.335-336 (Aug. 1994).
  - (6) Koga K. and Yamaguchi T.: "Single crystals of SiC and their application to blue LEDs", Prog. Cryst. Growth Charact., 23, pp.127-151 (1991).
  - (7) Morkoç H., Strite S., Gao G.B., Lin M.E., Sverdlov B. and Burns M.: "Large-band-gap SiC, III-V nitride and II-VI ZnSe-based semiconductor device technologies", J. Appl. Phys., 76, pp.1363-1398 (1994).
  - (8) Amano H., Kito M., Hiramatsu K. and Akasaki I.: "p-type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation", Jpn. J. Appl. Phys., 28, pp.L2112-L2114 (1989).
  - (9) Nakamura S., Iwasa N., Senoh M. and Mukai T.: "Hole compensation mechanism of p-type GaN films", Jpn. J. Appl. Phys., 31, pp.1258-1266 (1992).
  - (10) Nakamura S., Senoh M. and Mukai T.: "p-GaN/n-InGaN/n-GaN double-heterostructure blue-light-emitting diodes", Jpn. J. Appl. Phys., 32, pp.L8-L11 (1993).
  - (11) 中村修二: "輝度を 100 倍改善した青色 LED, フルカラーのディスプレイが可能に", 日経マイクロデバイス, 106, pp.99-103 (1994-04).



なかむら しゅうじ  
中村 修二

昭 52 徳島大・工・電子卒. 昭 54 同大学院修士課程了. 同年日亜化学工業(株)入社. 以来, 化合物半導体の結晶成長, 赤外 LED, 窒化物系発光デバイスの研究に従事. 現在, 同社開発部主幹研究員. 工博.

1994 年度日経 BP 技術賞電子部門賞, OEC 特別賞, 応用物理学会賞(論文賞)受賞.