

## 3 波長蛍光体型白色 LED の開発

### Development of White LED Fabricated by RGB Phosphor and Near Ultra-Violet LED

只 友 一 行 <sup>*1</sup>	岡 川 広 明 <sup>*1</sup>	城 市 隆 秀 <sup>*1</sup>
K. Tadatomo	H. Okagawa	T. Jyoichi
加 藤 宗 弘 <sup>*2</sup>	原 田 光 範 <sup>*2</sup>	田 口 常 正 <sup>*3</sup>
M. Kato	M. Harada	T. Taguchi

#### 要 約

InGaN 系青色 LED と黄色蛍光蛍光体から構成される白色 LED が既に実用化されているが、演色性に富み、色温度の設計幅の大きい、近紫外 (NUV: Near Ultra-Violet) -LED と赤色/緑色/青色の 3 波長型の蛍光体とを組合せて実現する白色 LED が、照明用白色 LED として期待されている。当社では、縞状の溝を形成したサファイア加工基板への結晶成長技術 (LEPS: Lateral Epitaxy on a Patterned Substrate) を開発し、NUV-LED へ応用した。更に、スタンレー電気(株)殿と共同で NUV-LED を励起光源に使った 3 波長蛍光体型白色 LED を試作した。LEPS 法の導入により、転位密度は約  $1.5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  に減少し、NUV-LED の発光出力は 15.6 mW、外部量子効率率は約 24% であった (発光中心波長 382 nm, Flip-Chip 実装, 室温, 20 mA)。この NUV-LED を用いて 3 波長蛍光体型白色 LED を作製し、発光効率 8.2 lm/W、平均演色評価数 86 ~ 90、色温度 6900 ~ 7600 K を得た (室温, 20 mA)。

**キーワード:** 窒化物半導体, 発光ダイオード, 白色, 蛍光体, 加工基板

#### Summary

White light-emitting diode (LED), which consists of an InGaN-based blue LED and yellow fluorescent phosphor is already in practical use. The white LED made by a new technology of combining the near ultra-violet (NUV)-LED and fluorescent phosphor of the three primary colors (red (R), green (G), blue (B)) is promising for use in lighting. The white LED emitting three primary colors can have the high general color-rendering index and have a variety of color temperature. MITSUBISHI CABLE INDUSTRIES, LTD. has developed the new growth technique called LEPS (Lateral Epitaxy on a Patterned Substrate with stripe grooves), and applied it to fabricate the NUV-LED. Furthermore, jointly with STANLEY ELECTRIC CO., LTD, MITSUBISHI CABLE INDUSTRIES has experimentally fabricated the white LED with RGB phosphor and the NUV-LED as an excitation light source. As a result, due to the LEPS method, the dislocation density of GaN layer has been reduced to approximately  $1.5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ , the output power of the NUV-LED was 15.6 mW, and the external quantum efficiency was approximately 24% (emission peak wavelength: 382 nm; flip-chip mounted; at room temperature; forward current: 20 mA). The properties of the white LED using this NUV-LED were as follows: the luminous efficiency of 8.2 lm/W, general color-rendering index of Ra= 86 ~ 90, and color temperature of 6900 ~ 7600 K (at room temperature, forward current: 20 mA).

Key words : GaN, LED, NUV-LED, White-LED, Phosphor, LEPS

#### 1. まえがき

近年, 化合物半導体エピタキシャル成長技術とデバイスプロセス技術, 物性評価技術の飛躍的な進歩により, AlInGaP系, InGaN系の高効率赤色, アンバー色, 緑色, 青色, 紫外 (UV), および白色発光ダイオード (LED: Light Emitting Diode) が開発されている<sup>(1)~(3)</sup>。これら高効率LEDの開発で, 従来表示用で使われていたLEDが固体照明光源として期待され始めた<sup>(4)</sup>。LEDの光放射は, 半導体のpn

接合に順方向電流を流すことにより注入されたキャリア (電子-正孔) が, 発光再結合する現象であり, 熱や放電の光とは本質的に異なっている。従って, LEDを使って作製されたLED照明光源は, 通常の白熱電球と違って手で触っても熱くなく, 安全性が高い。また, 寿命も長く, 水銀などの有害物質を含まないので地球に優しい照明光源として期待されている。

本報では, 高効率LED照明装置の実用化を目標にした国家プロジェクト“21世紀のあかり計画”の紹介を行い, サ

\* 1 情報通信事業本部 フォトニクス研究所

\* 2 スタンレー電気(株)

\* 3 山口大学

ファイア加工基板上に作製した高効率 NUV (Near Ultra-Violet) -LED [ 紫色 (Violet) -LED ] の素子特性, および試作した NUV-LED 励起 3 波長蛍光体白色 LED の素子特性について紹介する。

## 2. 高効率 LED 照明の開発計画(21 世紀のあかり計画)

1997年, 国連気候変動枠組条約第三回締約国会議 (COP3) において, 我が国における温室効果ガス排出量の 1990 年比 6% 削減が求められ, 地球温暖化対策として, 我が国の産業, 民生, 運輸部門における省エネルギーの推進が緊急の課題となっている。民生用のエネルギー消費量の 20% 以上を占める照明の省エネルギー技術の開発は, 省エネルギーの促進, 火力発電所などからの地球温暖化ガスの排出量の削減に極めて重要であると考えられる。このような背景の下, 現在の白熱電球, 蛍光灯を上回る発光効率を有する高効率 LED 照明光源の実用化を目的に, 現経産省の推進する国家プロジェクト “高効率電光変換化合物半導体開発” (通称, 21 世紀のあかり計画) が 1998 年に開始された<sup>(5)</sup>。新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて, 金属系材料研究開発センター (JRCM) を中心に, 13 社, 4 大学, 日本電球工業会の協力・連携の下に, 現在では下記の四つの研究開発プログラムが進められている。

- (1) InGaN 発光層を中心にした化合物半導体の発光メカニズムの解明
- (2) 青-紫外 InGaN-LED のエピタキシャル成長技術の開発
- (3) ホモエピタキシャル成長用 GaN 基板の開発
- (4) 高効率蛍光体と白色 LED の開発, および LED 照明システムの実用化

当社は, 青-紫外 InGaN-LED のエピタキシャル成長技術の開発を担当しており, サファイア加工基板を使った LEPS (Lateral Epitaxy on a Patterned Substrate) 法を開発した<sup>(6)</sup>。更に, 実装技術の開発を担当しているスタンレー電気(株)殿と協力して, LEPS 法を応用した高効率 LEPS-NUV-LED (発光中心波長  $\lambda_p$ : 382 nm, 発光出力  $P_o$ : 15.6 mW at 20 mA, 外部量子効率  $\eta_e$ : 24%)<sup>(7)-(9)</sup> および高効率 LEPS-Violet-LED ( $\lambda_p$ : 400 nm,  $P_o$ : 19.2 mW at 20 mA,  $\eta_e$ : 31%) を開発した。Fig. 1 は, LEPS-NUV-LED を励起光源に使用して試作した 3 波長蛍光体白色 LED のプロトタイプである。LED の発光効率は約 10 年ごとに 1 桁の割合で向上しており, AlInGaP-LED (アンバー色) では既に外部量子効率が 50% を超えるものが開発されている。InGaN-LED も直ぐにこの値に近づくであろう。

プロジェクト内では, (株)ジャパンエナジー殿の開発した高圧溶液成長 (HP-SG: High Pressure Solution Growth) 法により, 転位密度が  $1 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$  以下の高品質 GaN 単結晶が得られるなどの成果が上がっている<sup>(10)</sup>。また, このプロジェクトを契機にして, 世界各国で Semiconductor Lighting (半導



Fig. 1 A white LED using an NUV-LED and red/green/blue phosphors

紫外 LED を使った 3 波長型白色 LED

体照明) という新しい分野の技術開発が開始され, 半導体デバイスメーカーと照明器具メーカーとのジョイント・ベンチャー会社 (GELcore, Lumileds, Osramopto, Cree Lighting) が設立されるなど, 激しい研究開発競争が行われている。

## 3. 加工基板上への窒化物化合物半導体の成長と紫外 LED の作製

### 3.1 背景

窒化物化合物半導体 InGaN を用いた高効率青色 LED や, 青色 LED ベースの黄色発光蛍光体 (YAG:Ce) を組合わせた 20 lm/W 以上の発光効率を有する白色 LED が商品化されている。最近では, UV-LED も商品化され, 白色 LED への応用も検討されている。これらの窒化物半導体デバイスは, サファイア基板, あるいは SiC 上へのヘテロエピタキシャル成長で実現されているが, GaN とこれらの基板との間の格子定数, 熱膨張係数などの差異により, 非常に高密度の貫通転位が半導体層中に残存している。サファイア基板上に作製された初期の青色 LED の転位密度は,  $10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  に及ぶと報告されている<sup>(11)</sup>。高密度の転位が存在しているにも関わらず, 青-緑色高効率 LED が実現されている。これは, 発光層を構成する InGaN の In 組成不均一によって生じるポテンシャル揺らぎにキャリアが局在するなどのモデルで説明されている。即ち, 局在化したキャリアの拡散長が短いために, 非発光再結合中心として働く転位などの欠陥との相互作用が小さいからである。しかし, 発光波長の短い NUV (Violet) -LED では, 発光層の In

濃度が小さいために In 組成揺らぎが小さくなり、キャリアの拡散長が長くなるために転位などの欠陥が非発光中心として強く働き始める。従って、従来の高密度の転位の存在下では高効率 NUV ( Violet ) -LED は実現されておらず、素子の信頼性向上のためにも転位密度の低減が望まれている。近年、この転位密度の低減技術として ELO ( Epitaxial Lateral Overgrowth ) 技術が開発され<sup>(12)-(20)</sup>、最近では基板表面に縞状の溝加工を施した加工基板を使った新規な E L O 改良技術が開発されている<sup>(6)-(9)(21)-(23)</sup>。

我々の開発した LEPS 法は、縞状の溝加工を施したサファイア基板を使うが、SiO<sub>2</sub> などの選択成長用のマスク材料を一切使わず、結晶成長プロセス途中で外部に基板を取り出すこと無く、一回の MOVPE ( Metal-organic Vapor Phase Epitaxy ) 成長で高品質 GaN 膜が得られる特徴を有している。

### 3.2 加工基板上に作製した LED の特性

Fig. 2 に LEPS-LED の断面模式図を示す。ここでは、縞状の溝を 11 $\bar{2}0$  GaN 方向と平行に形成したサファイア加工基板を用いた。基板加工は、標準的なフォトリソグラフィ技術と反応性イオンエッチング ( RIE ) で行なった。加工基板のリッジの幅、溝の幅、溝の深さは、それぞれ 3  $\mu$ m、3  $\mu$ m、1.5  $\mu$ m とした。LED 構造のエピタキシャル成長は常圧横型 MOVPE 装置で行い、低温成長 GaN バッファ層 ( 27 nm 厚 )、n-GaN : Si ( 6  $\mu$ m 厚 )、n-Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N : Si ( 50 nm 厚 )、MQW ( Multi-Quantum-Well、4 層 -3 nm-InGaN 井戸層 / 10 nm - InGaN 障壁層 )、p-Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N : Mg ( 50 nm 厚 )、p-GaN : Mg ( 100 nm 厚 ) を順次成長した。

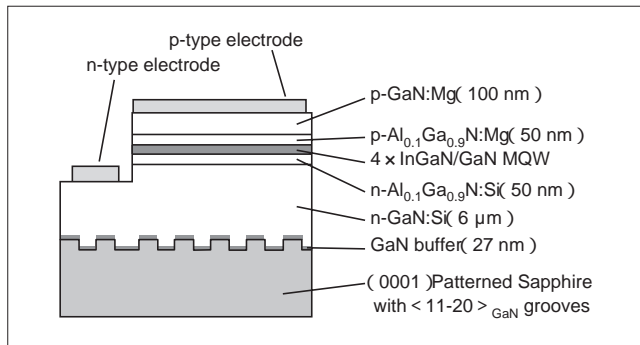


Fig. 2 Schematic diagram of the LEPS-LED fabricated on the patterned sapphire substrate  
加工基板上に作製した LEPS-LED の断面模式図

LED チップは、p- 高反射率電極の形成、p- 層の部分的なエッチング除去、n- 電極の形成などを経て、最終的に 350  $\mu$ m  $\times$  350  $\mu$ m に分割した。これらの LED チップは、Au-Sn 合金を使って Si サブマウント上に基板側を上にして固着した ( Flip-Chip 構造 : FC )。FC-LED は、リードフレーム上に実装し、エポキシ樹脂により封止して砲弾型の LED ランプとした ( LEPS-LED )<sup>(6)-(8)</sup>。サンプルは、発光中心波長  $\lambda_p$  : 382 nm の LEPS-NUV-LED ( サンプル A ) と  $\lambda_p$  : 400 nm の LEPS-Violet-LED ( サンプル B ) の二種類を作製した。

両サンプルの特性を Table 1 にまとめて示す。サンプル A の発光出力は 15.6 mW ( 外部量子効率  $\eta_e$  : 24%、@ 20 mA ) であり、サンプル B の発光出力は 19.2 mW (  $\eta_e$  : 31%、@ 20 mA ) に達した。サンプル B の方が高効率であるのは、前述の In の効果が働くためと、活性層中の井戸層と障壁層のバンドギャップ差が大きくなりキャリアの閉じ込めが強くなるためである。カソードルミネッセンス ( Cathode Luminescence ) によって観測される暗点を計数して求めた転位密度は、LEPS-NUV-LED では約  $1.5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  であり、通常のサファイア基板上に成長した NUV-LED の約 1 / 3 に減少している。高効率の LED を実現した最大の理由はこの転位密度の低減である。

Table 1 Comparison of two LEPS-LED samples ( A and B ) at a forward current of 20 mA  
2 種類の LEPS-LED ( サンプル A と サンプル B ) の 20 mA 通電時の特性比較

	サンプル A	サンプル B
発光中心波長	382 nm	400 nm
駆動電圧 $V_F$	3.4 V	3.4 V
発光出力 $P_o$	15.6 mW	19.2 mW
外部量子効率 $\eta_e$	24%	31%

Fig. 3 にサンプル A ( LEPS-NUV-LED ) の発光出力 (  $P_o$  ) と外部量子効率 (  $\eta_e$  ) の注入電流依存性を示す。一般的に、青色 InGaN-LED の外部量子効率は低電流域で高く、10 mA を越えて注入電流が増加するに伴って低下するが、Fig. 3 に示す LEPS-NUV-LED の外部量子効率は低電流域では若干低いものの、10 mA を越えてもほぼ一定である。発光出力は 50 mA までほぼ線形に増加し、50 mA の電流注入で 38 mW が得られている。

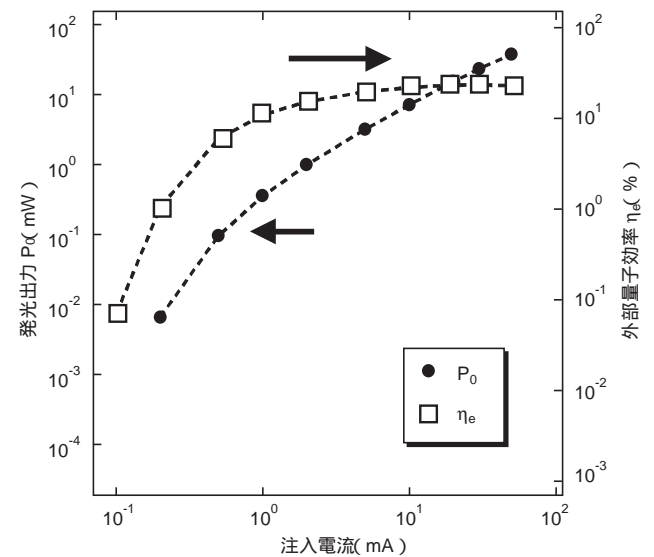


Fig. 3 Output power (  $P_o$  ) and external quantum efficiency (  $\eta_e$  ) of the LEPS-NUV-LED ( sample A ) as a function of the forward current  
LEPS-NUV-LED の発光出力 (  $P_o$  ) と外部量子効率 (  $\eta_e$  ) の注入電流依存性

Fig. 4 に LEPS-NUV-LED の室温におけるエレクトロルミネッセンス (EL: Electro-Luminescence) スペクトルの注入電流依存性を示す。20 mA の電流注入時のピーク波長と半値全幅 (FWHM: Full-Width at Half Maximum) は、それぞれ 382 nm, 100 meV であった。50 mA の電流注入時には熱発生に起因していると推測される僅かな長波長シフトが観測されるが、20 mA までは全く波長シフトは観測されない。

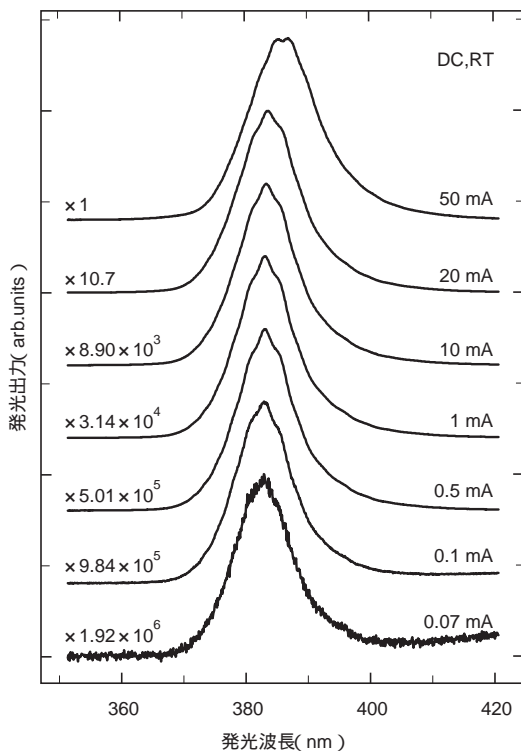


Fig. 4 Electro-luminescence spectrums of the LEPS-NUV-LED (sample A) as a function of the forward current  
LEPS-UV-LED の発光スペクトルの注入電流依存性

#### 4. 紫外 LED 励起 3 波長蛍光体型白色 LED

##### 4.1 背景

照明用の白色 LED 光源は、Table 2 に示すように基本的には二つの方式で実現される<sup>(24)</sup>。一つは 1 種類の青色あるいは UV-LED を使う方式 (one chip 型) であり、一つは光の三原色である赤色、緑色、青色 (R/G/B)、または補色関係の青色と黄色の LED を同時に点灯させる方式 (multi-chips 型) である。前者の方式は、最近一つの発光層から多色発光する LED 素子も報告されているが、LED を蛍光体の励起光源として使い、蛍光体からの発光を利用する方式が中心である。1 種類の素子しか使わないので、駆動回路の設計が容易になるなどの利点がある。青色 LED ベースの YAG:Ce 蛍光体を組み合わせて使う白色 LED が既に実用化されているが、我々は高効率 NUV (Violet) -LED と R/G/B 3 波

Table 2 Comparison of white LEDs

#### 白色 LED の実現方法の比較

方法	励起源	発光材料 / 蛍光材料	発光原理
LED one chip	多波長発光活性層	InGaN-MQW	発光波長の異なる井戸層を多重化した活性層から直接白色光を得る。
	青色 LED	InGaN / YAG:Ce	青色 LED 光で蛍光体 (黄色発光) を励起。LED の青色光と蛍光体の黄色光で白色光を得る。
	紫外 ~ 紫色 LED	InGaN / RGB 蛍光体	紫外 ~ 紫色 LED 光で蛍光体 (R,G,B 発光) を励起。蛍光体からの発光だけで白色光を得る。
LED multi-chips	青色 LED + 黄緑色 LED 青緑色 LED + 橙色 LED	InGaN, GaP, AlInGaP	補色関係の 2 色を一つのパッケージに実装。
	青色 LED + 緑色 LED + 赤色 LED	InGaN, AlInGaP	三原色の LED を一つのパッケージに実装。

長型蛍光体の組合せで実現する白色 LED を開発している。この 3 波長蛍光体白色 LED は、演色性に富んだ白色が実現できるだけでなく、指定の色温度に自由に対応できる特徴があり、照明光源の表現力が格段に向上する。

##### 4.2 白色 LED の試作

Table 3 に、ここで検討した R/G/B 各蛍光体 (化成オプトニクス (株) 製) の代表組成と蛍光の色度座標値を示す。これら蛍光体の励起スペクトル (200 ~ 400 nm) と蛍光スペクトル (400 ~ 800 nm) を Fig. 5 に示す。各蛍光体の励起スペクトルは、380 nm で励起された時の蛍光強度を 100 として規格化されている。蛍光スペクトルは、380 nm で励起した時のものである。この図から特に赤色蛍光体の励起効率の波長依存性が大きく、波長の短い NUV-LED の方が励起効率の点で有利であることが分かる。しかし、最近では励起効率の波長依存性の少ない新しい蛍光体も開発されつつある。LED の発光効率の高い 400 nm 前後で励起効率が高く、波長依存性の小さい蛍光体の開発が望まれる。

Table 3 Characteristics of phosphors used in this study

#### 紫外励起蛍光体の特性

品名 (略称)	組成	x	y
赤色: P22-RE3	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> S : Eu	0.660	0.332
緑色: P22-GN4	ZnS : Cu, Al	0.262	0.585
緑色: LP-G3	(Ba, Mg) Al <sub>10</sub> O <sub>17</sub> : Eu, Mn	0.131	0.611
青色: LP-B1 (SCA)	(Sr, Ca, Ba, Mg) <sub>10</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> C <sub>12</sub> : Eu	0.154	0.155
青色: LP-B4 (BAM)	(Ba, Mg) Al <sub>10</sub> O <sub>17</sub> : Eu	0.145	0.070

Fig. 6 は、試作した評価用白色 LED の構造図である<sup>(26)</sup>。Flip-Chip 構造で実装した LEPS-NUV-LED を励起光源とした。蛍光体は R: P22-RE3, G: P22-GN4, B: LP-B1 を使用し (色度座標上の位置を Fig. 8 に示す)、予め 382 nm の波長で励起されて白色発光するように混合したものを、紫外線反射膜を形成したガラス基板上に塗布形成し、分割して蛍光体チップとした。この蛍光体チップを LEPS-NUV-

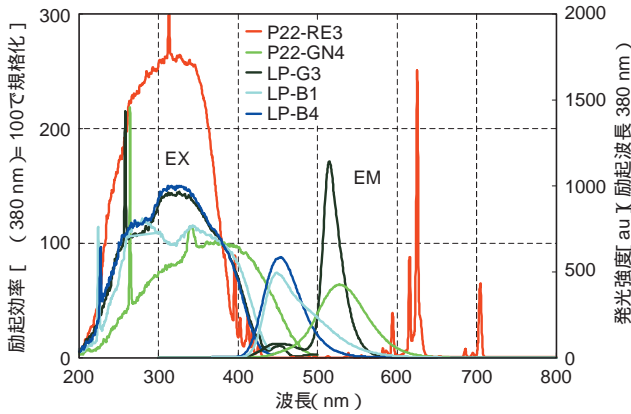


Fig. 5 Excitation spectrums and photo-luminescence spectrums of phosphors used in this study  
**近紫外域で励起可能な蛍光体の励起スペクトルと発光スペクトル**

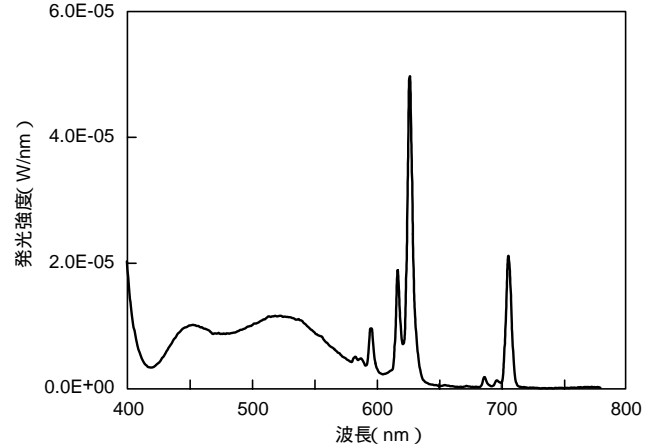


Fig. 7 Luminescence spectrum of a white LED  
**試作した白色 LED の発光スペクトル**

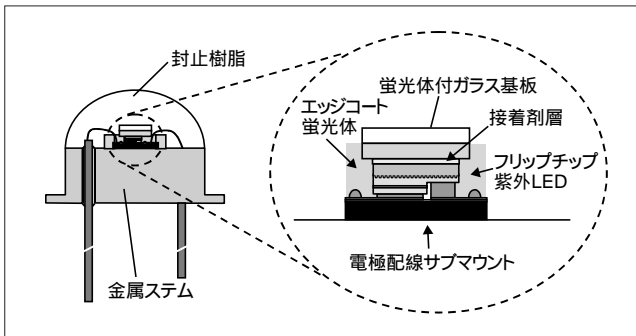


Fig. 6 Schematic diagram of white LED using LEPS-NUV-LED and R/G/B phosphors  
**評価用白色 LED の素子構造図**

LEDの上部に貼り付け、同時にLEDチップの側面からの放射光を可視光変換させる目的で、側面にも混合蛍光体をコーティングした。金属ステムに実装した後、エポキシ樹脂で封止し、3波長蛍光体型白色LEDとした。

Fig. 7 に試作した 3 波長蛍光体型白色 LED の典型的な発光スペクトルを示す。400 nm 帯と 500 nm 帯のブロードなピーク、626 nm、706 nm に代表される幅の狭いピークは、それぞれ蛍光体 LP-B1、P22-GN4、P22-RE3 からの発光である。この白色 LED の特性を Table 4 に示す。配合 1 と 2 は蛍光体の配合比が異なっているだけである。発光効率は 8.2 lm/W であった。演色性については 3 波長蛍光体型の特性が生かされており、蛍光体の配合比に応じて平均演色評価数  $R_a = 86 \sim 90$  と 3 波長型蛍光灯と同等の値が得られている。色度、色温度に関しては、R/G/B の各蛍光体の混合比で任意に調整可能であるが、発光効率を向上させるためには蛍光体の材料開発、塗布方式の最適化などによる蛍光体変換効率の改善が必要である。

Fig. 8 は、LEPS-NUV-LED を励起光源とした 3 波長蛍光体型と、青色 LED ベースの YAG : Ce 蛍光体型の二種類の

白色 LED の色度座標上の、0.5 mA から 50 mA まで注入電流量を増加させた時の軌跡を示している。青色 LED ベースの白色 LED は、注入電流量の増加に伴い色度が大きく変化している。これは、注入電流の増加に伴って青色 LED の発光波長が変化し、YAG : Ce 蛍光体の励起効率の変化、結果として青色と黄色の色バランスの変化を引き起こすからである。これに対して、3 波長蛍光体型の白色 LED の色度変化は僅かである。この理由は、以下のように説明される。

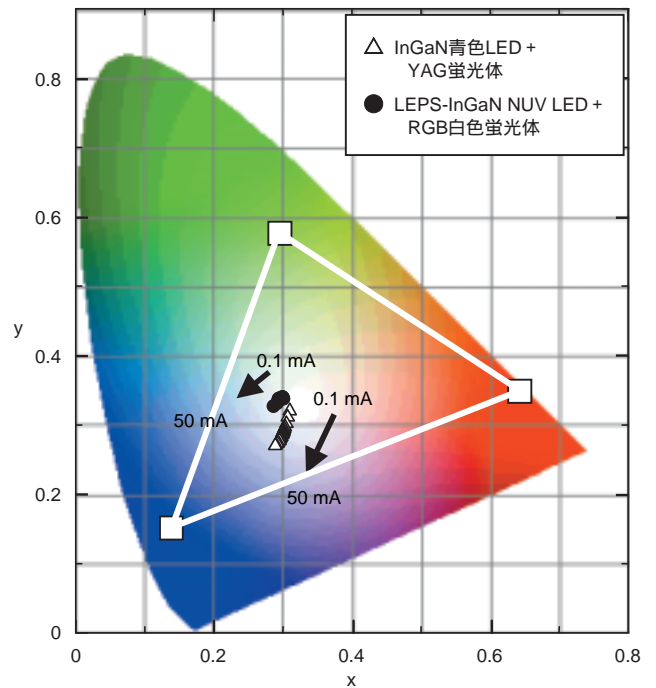


Fig. 8 Injection current dependence of chromaticity coordinates (x, y) of white LEDs  
**青色 LED + YAG 蛍光体の白色 LED と LEPS-NUV-LED + 3 波長型蛍光体の白色 LED の色度の注入電流依存性**

Table 4 Characteristics of white LED based on LEPS-NUV-LED

## 白色LEDの特性

項目	配合1	配合2
駆動電圧 [V]		3.4
順方向電流 [mA]		20
発光効率 [lm/W]		8.2
蛍光体変換効率 [%]		12.2
色度座標 x	0.304	0.290
色度座標 y	0.340	0.339
色温度 [K]	6900	7644
平均演色評価数 Ra	86	90

Fig. 4 に示したように NUV-LED の発光波長の注入電流依存性は小さい。従って、蛍光体の励起効率が変化しないために、発光強度は注入電流に比例して強くなるが、色度は極めて安定している。これは、NUV-LED を励起光源とした 3 波長蛍光体白色 LED の大きな特徴である。

## 5. むすび

当社で開発したサファイア加工基板上への結晶成長技術(LEPS), LEPS-NUV( Violet )-LED への応用, 更に LEPS-NUV-LED を励起光源に使った 3 波長蛍光体白色 LED の試作結果について紹介した。LEPS 法の導入により, 転位密度は約  $1.5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  に減少した。LEPS-NUV-LED の発光出力は 15.6 mW, 外部量子効率は約 24% であった(発光中心波長 382 nm, Flip-Chip 実装, 室温, 20 mA)。この LEPS-NUV-LED を用いて作製した 3 波長蛍光体白色 LED では, 発光効率 8.2 lm/W, 平均演色評価数 86 ~ 90 を得た(室温, 20 mA)。今後の結晶成長技術の向上, 蛍光体材料技術の向上により, 半導体照明は必ず実用化すると考えている。

## 謝 辞

本研究の一部は, 経済産業省 / 新エネルギー・産業技術総合開発機構 / (財) 金属系材料研究開発センター (METI / NEDO / JRCM) によって遂行されている「高効率電光変換化合物半導体開発」の援助を受けて行なわれたものである。関係各位に感謝致します。また, サンプルを詳細に評価して頂いた山口大学の工藤広光博士に感謝致します。

## 参考文献

- (1) Nakamura, S., Senoh, M., Iwasa, N., Nagahama, S. Jpn. J. Appl. Phys. 34. 1995, L794.
- (2) Mukai, T., Yamada, T., Nakamura, S. Jpn. J. Appl. Phys. 37. 1998, L1358.
- (3) Mukai, T., Nakamura, S. Jpn. J. Appl. Phys. 38. 1999, 5735.
- (4) P. Schlotter, R. Schmidt, J. Schneider. Appl. Phys. A 64. 1997, 417.
- (5) 「高効率電光変換化合物半導体」提案書。(財) 金属系材

料研究開発センターホームページ,

<http://www.mocn.ne.jp/check1/2ctlight/b-21ctlight.html>

- (6) Okagawa, H., Jyouichi, T., Ohuchi, Y., Tsunekawa T., Tadatomo, K. Ext. Abstr. 61th Fall Meet.2000, Japan Society of Applied Physics and Related Societies, 5p-Y-6.
- (7) Tadatomo, K., Okagawa, H., Ohuchi, Y., Tsunekawa, T., Imada, Y., Kato, M., Taguchi, T. Jpn. J. Appl. Phys. 40. 2001, L583.
- (8) Tadatomo, K., Okagawa, H., Ohuchi, Y., Tsunekawa, T., Jyouichi, T., Imada, Y., Kato, M., Kudo, H., Taguchi, T. phys. srat. sol. ( a ) 188,. 2001, 121.
- (9) 岡川広明, 大内洋一郎, 常川高志, 只友一行, 加藤宗弘. LEPS 法を用いた高出力紫外 LED の開発. 三菱電線工業時報. (98), 2001, p.92-96.
- (10) Inoue, T., Seki, Y., Oda, O., Kurai, S., Yamada, Y., Taguchi, T. J. Crystal Growth, 229. 2001, 35.
- (11) S. D. Lester, F. A. Ponce, M. G. Craford, D. A. Steigerwald: Appl. Phys. Lett. 66. 1995, 1249.
- (12) Kato, Y., Kitamura, S., Hiramatsu, K., Sawaki, N. J. Crystal Growth, 144. 1994, 133.
- (13) X. Li, A. M. Jones, S. D. Roh, D. A. Turnbull, E. E. Reuter, S. Q. Gu, S. G. Bishop, J. J. Coleman. Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 395. 1996, 943.
- (14) Usui, A., Sunakawa, H., Sakai, A., Yamaguchi, A. Japan J. Appl. Phys. 36. 1997, L899.
- (15) T. S. Zheleva, O-H. Nam, M. D. Bremser, R. F. Davis. Appl. Phys. Lett. 71. 1997, 2472.
- (16) O-H. Nam, M. D. Bremser, T. S. Zheleva, R. F. Davis. Appl. Phys. Lett. 71. 1997, 2638.
- (17) D. Kapolnek, S. Keller, R. Vetury, R. D. Underwood, P. Kozodoy, S. P. DenBaars, U. K. Mishra. Appl. Phys. Lett. 71. 1997, 1204.
- (18) Matsushima, H., Yamaguchi, M., Hiramatsu, K., Sawaki, N. Proc. 2nd Int. Conf. on Nitride Semicond. Tokushima, 1997, p.492.
- (19) K. Linthicum, T. Gehrke, D. Thomson, E. Carlson, P. Rajagopal, T. Smith, D. Batchelor, R. F. Davis. Appl. Phys. Lett. 75. 1999, 196.
- (20) Kidoguchi, I., Ishibashi, A., Sugahara, G., Tsujimura, A., Ban, Y. Jpn. J. Appl. Phys. 39. 2000, L453.
- (21) C. I. H. Ashby, C. C. Mitchell, J. Han, N. A. Missert, P. P. Provencio, D. M. Follstaedt, G. M. Peake, L. Griego. Appl. Phys. Lett. 77. 2000, 3233.
- (22) T. Detchprohm, Yano, M., Sano, S., Nakamura, R., Mochiduki, S., Nakamura, T., Amano, H., Akasaki, I. Jpn. J. Appl. Phys. 40. 2001, L16.
- (23) A. Strittmatter, S. Rodt, L. Reigmann, D. Bimberg, H. Schroder, E. Obermeier, T. Riemann, J. Christen, A. Krost. Appl. Phys. Lett. 78. 2001, 727.
- (24) 田口常正. 平成 13 年度照明学会 第 34 回全国大会, 講演

論文集 p.283

- (25) 原田光範, 加藤宗弘, 岡川広明, 常川高志, 城市隆秀, 只友一行, 田口常正. 平成 13 年度照明学会 第 34 回全国大会. 講演論文集. p.287.



只友一行 (ただとも かずゆき)  
情報通信事業本部 フォトニクス研究所 光半導体グループ  
光半導体デバイスの研究・開発に従事  
応用物理学会, 日本結晶成長学会, 照明学会, Material Research Society 会員



岡川広明 (おかがわ ひろあき)  
情報通信事業本部 フォトニクス研究所 光半導体グループ  
光半導体デバイスの研究・開発に従事  
応用物理学会 会員



城市隆秀 (じょういち たかひで)  
情報通信事業本部 フォトニクス研究所 光半導体グループ  
光半導体デバイスのプロセスの研究・開発に従事



加藤宗弘 (かとう むねひろ)  
スタンレー電気株式会社 技術研究所  
白色 LED の研究・開発に従事



原田光範 (はらだ みつのり)  
スタンレー電気株式会社 技術研究所  
白色 LED の研究・開発に従事



田口常正 (たぐち つねまさ)  
山口大学 工学部 教授, 工学博士  
光半導体デバイスの研究・開発に従事, “21 世紀のあかり” プロジェクトリーダー  
応用物理学会, 電気学会, 電子情報通信学会 会員