

照明用白色LED

独立行政法人物質・材料研究機構
光電子技術研究所

広崎 尚 登
木村 直 樹¹・佐久間 健¹・平 船 俊一郎¹・
浅野 健一郎¹・田 中 大一郎²

White Light-emitting Diode Lamps for Lighting Applications

N. Hirosaki, N. Kimura, K. Sakuma, S. Hirafune, K. Asano & D. Tanaka

白色発光ダイオード（白色LED）は、将来、一般照明機器用途の白熱電球や蛍光灯に取って代わることが期待されている。照明用途においては、高発光効率や高演色性、さまざまな色合いなど、設置場所や用途に応じた要求がある。われわれは窒化物蛍光体を用いることで、それぞれの用途に対応する白色LEDを開発した。本稿では実現した白色LEDの特性について報告する。

White light-emitting diode (LED) lamps are expected to supersede conventional incandescent and fluorescent lamps for general lighting applications in near future. For general illuminations, there are various demands corresponding to installation locations and applications, such as high luminous efficacy, high color rendering, various color temperatures and so on. We have developed the white LED lamps which satisfy each requirement using novel nitride phosphors. In this paper, excellent optical properties of these white LED lamps are reported.

1. ま え が き

白色発光ダイオード（以下、白色LED）は、現在、携帯電話などのバックライト用途を中心に広く普及しており、近年では懐中電灯や装飾照明、机上照明など、日常さまざまな種類の白色LED照明を目にするまでになってきている。白色LEDは長寿命、水銀フリー、小型、割れにくいなどの特長から、将来、一般照明機器用途の白熱電球や蛍光灯に取って代わることが期待されているが、現在の特性は一般照明機器の用途にはまだまだ不十分であるため、今後、より一層の発光効率の向上と演色性の改善が必要である。演色性とは、光源を照明として使う場合の物体の「色」の見え方を決める性質で、照らされた物体の「色」が自然光で見た場合の「色」に近いものが、演色性の良い光源である。演色性は特に屋内用の一般照明において重要な要素であり、近年では、より演色性が高い照明が推奨されるようになってきている¹⁾。

照明用光源は、その用途に応じて、発光効率が重視される場合と演色性が重視される場合とがある。また、設置場所により、青みがかった寒色系の白色や赤みがかった暖色系の白色など、求められる白色の色合いは異なる。われわれはこれまでに黄色蛍光体と青色LED素子による高効率の電球色のLEDを開発したが²⁾、今回、蛍光体のさらなる

発光効率の改善と実装技術の改善により、より高効率の電球色のLEDを実現した。一方、演色性に対しては、黄色蛍光体に加えて緑色蛍光体と赤色蛍光体を用いることで高演色型の白色LEDを実現した。さらにこれらの蛍光体を用いることで、青みがかった寒色系の白色から赤みがかった暖色系にわたるさまざまな色合いの白色のLEDを実現した。本稿ではそれぞれの白色LEDの特性について報告する。

2. 白色LEDの方式と基本原理

白色LEDは現在、青色LED素子と蛍光体とを組み合わせた方式が主流である。図1に、この方式の一般的な構造図（表面実装（以下、SMD：Surface Mount Device）型）を示す。SMD型パッケージに青色LED素子をダイボンディングおよびワイヤボンディングし、青色LED素子を覆うように蛍光体を分散させた透明樹脂を塗布している。

蛍光体は青色光により励起されて黄色光を発光するYAG：Ce系蛍光体が最も一般的であり³⁾、青色と黄色との補色関係により、擬似白色を得ている。一般に、青色LED素子と黄色蛍光体とを組み合わせた白色LEDは、擬似白色であるため、平均演色評価数（以下、Ra）が低いという課題があり、一般照明用途には改善する必要がある。平均演色評価数とは、試験色を試料光源と基準光で照明したときの色ずれの大きさを数値化したもので、基準光で見たときを100としたものである。さらに、YAG：

1 応用電子技術研究部

2 応用電子技術研究部グループ長

Ce系蛍光体には、赤みがかった暖色系の白色を実現することはできないという課題もある。このため、従来、暖色系の白色の用途には、YAG：Ce系蛍光体と赤色蛍光体とを混合したものをを用いた白色LEDが使用されているが、発光効率が不十分であるという課題がある。

3. 窒化物蛍光体とその発光特性

これらの課題を解決するため、新規開発された窒化物蛍光体を用いて白色LEDを開発した。窒化物の蛍光体はその合成が困難であったため、研究の歴史が浅く、現在精力的に新物質探索が実施されている途上にあるといえる⁴⁾⁵⁾。窒化物・酸窒化物の蛍光体は窒素が結合に関与するため、現行の酸化物や硫化物・酸硫化物系などの蛍光体に比べ、耐久性の面で優れており、可視光励起が可能であるという特徴がある。中でも緑色で発光する β -SiAlON：Eu 蛍光体⁶⁾（以下、緑色ベータサイアロン蛍光体）や黄色で発光する $\text{Ca-}\alpha$ -SiAlON：Eu 蛍光体⁷⁾（以下、黄色アルファサイアロン蛍光体）、赤色で発光する CaAlSiN_3 ：Eu 蛍光体⁸⁾

（以下、赤色カズン蛍光体）は、紫外光から青色光まで広い励起帯域で高效率に励起可能であるため、白色LED用途に適している。

図2に、蛍光分光光度計（日立製作所製 F-4500）で測定したこれら蛍光体の発光スペクトルを示す。励起波長は450nm（青色）である。比較として、YAG：Ce系蛍光体（ $(\text{Y,Gd})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ：Ce 蛍光体）の発光スペクトルも合わせて示す。励起波長は460nm（青色）である。発光強度は、YAG：Ce系蛍光体のピーク発光強度を1とした相対値で示している。いずれの蛍光体もブロードな一つの発光ピークを有しており、発光強度は既存の蛍光体に比べて十分高い。特に、黄色アルファサイアロン蛍光体は、発光ピーク波長が585～590nmと、YAG：Ce系蛍光体よりもやや長波長であるため、青色LED素子と組み合わせることにより、高效率で赤みがかった暖色系の白色を実現することができる。

4. 窒化物蛍光体を用いたLEDの色度

前節で述べたように、緑色ベータサイアロン蛍光体、黄色アルファサイアロン蛍光体、赤色カズン蛍光体は、青色光で高效率に励起されるため、青色LEDと組み合わせることにより、様々な色合いをもつ高效率のLEDを得ることができる。このとき、青色光が蛍光体によって色変換される割合は、塗布する蛍光体分散樹脂の量を調整することによって制御することが可能であり、それにより、所望の色度を得られる²⁾。

図3に、緑色ベータサイアロン蛍光体、黄色アルファサイアロン蛍光体、赤色カズン蛍光体、青色LED素子の色度座標を示す。これらを用いることで、この4点を結ぶ四

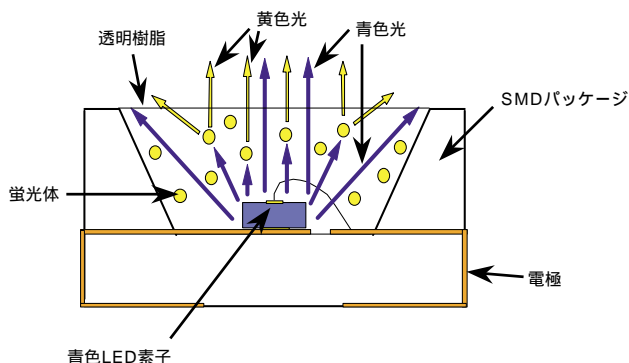


図1 SMD型白色LEDの一般的な構造
Fig. 1. Schematic of a SMD type white LED.

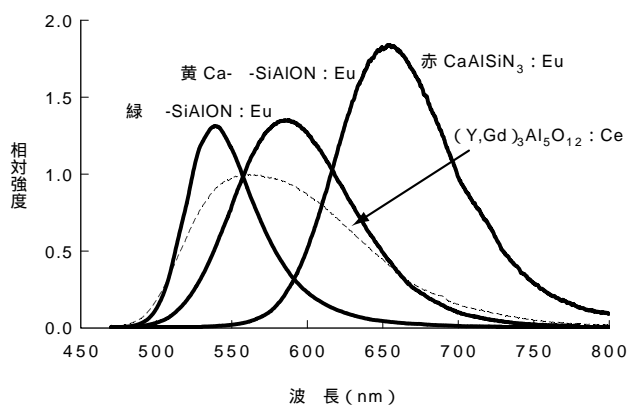


図2 緑色ベータサイアロン蛍光体、黄色アルファサイアロン蛍光体、赤色カズン蛍光体、YAG：Ce系蛍光体の発光スペクトル
Fig. 2. Emission spectra of β -SiAlON：Eu phosphor, $\text{Ca-}\alpha$ -SiAlON：Eu phosphor, CaAlSiN_3 ：Eu phosphor and $(\text{Y,Gd})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ：Ce phosphor.

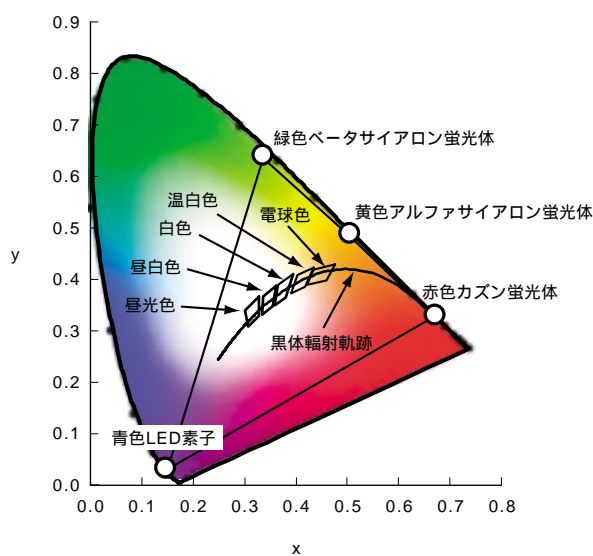


図3 緑色ベータサイアロン蛍光体、黄色アルファサイアロン蛍光体、赤色カズン蛍光体、青色LED素子の色度範囲
Fig. 3. Color space achieved by LED lamps using the nitride phosphors on CIE1931 diagram.



図4 窒化物蛍光体と青色LED素子により試作した様々な色合いのLED

Fig. 4. Decorative various color LED lamps by the nitride phosphors and a blue LED.

角形の領域の色度範囲にあるLEDが実現可能である。図中の5個の四角形は、JIS規格⁹⁾に定められた白色光源色の色度範囲であり、左側から右側に向かって、「昼光色」・「昼白色」・「白色」・「温白色」・「電球色」に分類されている。蛍光体の配合比率を変え、蛍光体の量を適切にすることにより、「昼光色」から「電球色」にわたる様々な色合いの白色のLEDを実現することも可能である。さらに、配合比率を適切にすることで、同じ色度においてもより演色性が高い白色LEDを実現することが可能である。図4に、これらの蛍光体と青色LED素子により試作した様々な色合いのLEDの写真を示す。これらのカラフルなLEDは、装飾照明やネオンサインなどとして利用することが可能である。

5. 窒化物蛍光体を用いた白色LEDの発光特性

5.1 高効率型電球色LEDの発光特性

黄色アルファサイアロン蛍光体を使ってSMD型の白色LEDを作製した。基本構造は図1の通りである。図5および表1に、LEDの発光スペクトルと発光特性を示す。色度座標は(0.428, 0.395)と、JIS規格⁹⁾に定められた電球色の範囲のLEDが得られている。相関色温度は3,080Kである。Raは57と一般的な蛍光灯より若干低い値であるが、高演色性を求めない用途、例えば、屋外照明などにおいては問題ないレベルである。一方、消費電力に対する光束(明るさ)を示す視感効率、動作電流20mAにおいて50.4lm/Wと、電球色の白色LEDとしては大変高い効率を実現した。この値は以前²⁾に比べて40%向上しており、一般的な電球の3倍以上と大変高い値である。

5.2 高演色型白色LEDの発光特性

図6に、緑色ベータサイアロン蛍光体、黄色アルファサイアロン蛍光体、赤色カズン蛍光体と青色LED素子により作製した、昼光色・昼白色・白色・温白色・電球色のSMD型白色LEDの色度座標と相関色温度を示す。各白色の範囲の色度が得られている。図7に、各SMD型白色LEDを9個ずつ並べたLEDモジュールの写真を示す。青

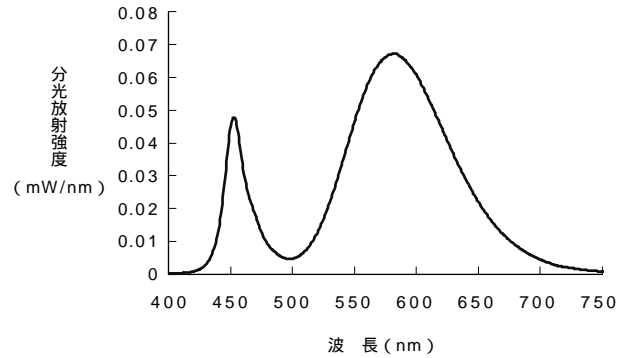


図5 高効率型電球色LEDの発光スペクトル

Fig. 5. Emission spectrum of a high efficacy type warm-white LED lamp.

表1 高効率型電球色LEDの発光特性

Table 1. Properties of a high efficacy type warm-white LED lamp.

色度座標	x	0.428
	y	0.395
相関色温度 (K)		3,080
視感効率 (lm/W)		50.4
平均演色評価数 (Ra)		57

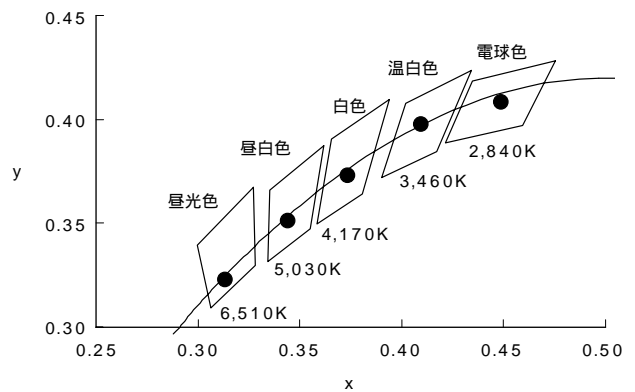


図6 高演色型白色LEDの色度座標と相関色温度

Fig. 6. Chromaticity coordinates and correlated color temperatures of high color rendering type white LED lamps.



図7 高演色型白色LED

Fig. 7. High color rendering type white LED lamps.

みがかった寒色系の白色から赤みがかった暖色系の白色まで様々な色合いの白色が実現できている。

図8および表2に、作製したLEDの発光スペクトルと発光特性を示す。発光スペクトルについては、昼光色・白色・電球色のものについて示す。色によって、緑色ベータ

表 2 高演色型白色LEDの発光特性
Table 2. Properties of high color rendering type white LED lamps.

項 目	昼光色	昼白色	白 色	温白色	電球色
色度座標	x	0.313	0.344	0.373	0.449
	y	0.323	0.344	0.370	0.408
相関色温度 (K)	6,510	5,030	4,170	3,460	2,840
演色評価数	Ra	82	83	83	85
	R9	97	97	88	96
	R15	98	99	95	99
視感効率 (lm/W)	32	32	27	29	25

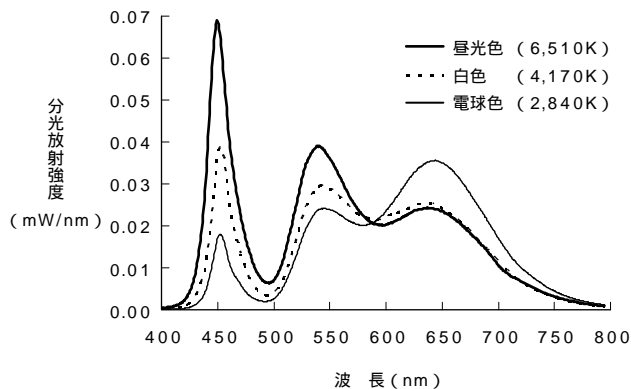


図 8 高演色型白色LEDの発光スペクトル
Fig. 8. Emission spectra of high color rendering type white LED lamps.

サイアロン蛍光体の発光を示す540nm付近のピークと、赤色カズン蛍光体の発光を示す650nm付近のピークの比率が変化しており、蛍光体の配合比率が変わっていることを確認することができる。一方、発光特性は、いずれのLEDもRaが80以上と高く、さらにYAG：Ce系蛍光体などによる従来の白色LEDが苦手としていた、赤色に対する演色評価数R9や、一般照明用として大変重要であると考えられる日本人の肌色に対する演色評価数R15も大変高い。また視感効率も25～32lm/Wと、一般的な電球の2倍という高い値が得られている。

6. む す び

黄色アルファサイアロン蛍光体と青色LED素子により、高効率の電球色LEDを開発した。視感効率は、3,080Kにおいて50.4lm/Wと、一般的な電球の3倍以上の非常に高い値を実現した。また、緑色ベータサイアロン蛍光体、黄色

アルファサイアロン蛍光体、赤色カズン蛍光体と青色LED素子により、様々な色合いの高演色型白色LEDを開発した。平均演色評価数は、すべての色合いの白色において80以上を達成した。

参 考 文 献

- 1) ISO 8995 : 2002 , CIE S 008/E : 2001 : Lighting of Indoor Work Places , Joint ISO/CIE Standard
- 2) 佐久間ほか：サイアロン蛍光体を用いた白色LED，フジクラ技報，第108号，pp.1-5，2005
- 3) K . Bando , K . Sakano , Y . Noguchi and Y . Shimizu : Development of High-bright and Pure-white LED Lamps , J . Light & Vis. Env. , 22 , No.1 , pp.2-5 , 1998
- 4) 上田恭太：窒化物および酸窒化物蛍光体の合成と光学特性，固体物理，35，pp.401-409，2000
- 5) 上田恭太：窒化物・酸窒化物が広げる白色LEDの可能性 - 白色LED用窒化物・酸窒化物蛍光体の動向 - ，化学と工業，第57巻，第11号，pp.1187-1190，2004
- 6) N . Hirosaki , R.-J . Xie , K . Kimoto , T . Sekiguchi , Y . Yamamoto , T . Suehiro and M . Mitomo : Characterization and properties of green-emitting β -SiAlON : Eu²⁺ powder phosphors for white light-emitting diodes , Appl . Phys . Lett. , 86 , p.211905 , 2005
- 7) R.-J . Xie , N . Hirosaki , K . Sakuma , Y . Yamamoto , and M . Mitomo : Eu²⁺-doped Ca- β -SiAlON : A yellow phosphor for white light-emitting diodes , Appl . Phys . Lett. , 84 , pp.5404-5406 , 2004
- 8) 上田ほか：第305回蛍光体同学会講演予稿集，pp.37-47
- 9) JIS Z 9112-1990「蛍光ランプの光源色及び演色性による区分」