青色 LED に YAG 蛍光体を組み合わせた光源デバイスの 光学シミュレーションによる検討

正会員 山田 健一 (三菱電機照明株式会社) 非会員 今井 康雄 (三菱電機照明株式会社)

正会員 石井 健一 (三菱電機照明株式会社)

A Study of the Light Source Device Composed of Blue LEDs and YAG Phosphor by Using Optical Simulation

Member Kenichi Yamada (Mitsubishi Electric Lighting Corporation),

Non Member Yasuo Imai (Mitsubishi Electric Lighting Corporation) and

Member Kenichi Ishii (Mitsubishi Electric Lighting Corporation)

ABSTRACT

The optical structures and luminous properties of the light source device composed of blue LEDs and YAG phosphor were examined by using optical simulation. Results showed that the reflection-type light source device had high luminous flux over 1.5 times more than the transmission-type light source device. This suggests that using light reflected from phosphor is an effective way to obtain high output from light sources composed of LEDs and phosphor.

KEYWORDS: LED, YAG phosphor, light source, optical simulation, reflection-type

1. はじめに

近年, InGaN 系材料を用いた高輝度青色発光ダイオード(LED: Light Emitting Diode)が開発され, これに YAG 蛍光体($(\text{Y,Gd})_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$)を組み合わせた白色 LED が登場し, LED は白熱電球, 蛍光灯, HID ランプに次ぐ第 4 の照明用光源として注目が集まっている。その背景には, 半導体固体光源である LED が小型, 長寿命, 水銀フリーといった特徴を有しており, さらにエネルギー変換効率改善, すなわち省エネルギー化といった観点からも期待されているからである。現在の白色 LED の発光効率は 15~25 lm/W と, 既に白熱電球を上回るレベルに達しており, 1996 年の発売以来, 大幅な効率改善がなされてきている。一方, 経済産業省が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 (21 世紀のあかり計画)」においても高効率 LED の研究開発が進められており, 今後も飛躍的な改善が期待される^{1)~5)}。一般照明用光源として LED を適用させる場合, LED は素子 1 個あたりの光出力が従来光源と比較して低く, また指向性が高いため, これをアレイ状あるいはマトリックス状に集積して高光出力化を図り, かつ均斉度を持たせた光源体とする必要がある。そこで, 著者らは青色 LED に YAG 蛍光体膜を組み合わせた光源体について検討し, YAG 蛍光体膜から得られる反射光を効率よく活用する反射型構造が高光出力を得るうえで有効であることを明らかにしてきた⁶⁾⁷⁾。一方, 「21 世紀のあかり計画」では 400nm 前後の青~近紫外域を発光波長とする InGaN 系高効率 LED と, 可視白

色光に効率よく変換する蛍光体とを組み合わせた発光方式を採用した照明用 LED 光源デバイスの開発を進めている。この開発においては光学シミュレーションによる光源デバイスの光学制御および最適化設計が必須であるが, そのためには LED からの出射光および蛍光体での波長変換光についての光学シミュレーション手法の確立とその適用が有効であると考えられる。そこで, 本研究では青色 LED に YAG 蛍光体を組み合わせた光源デバイスについて光学シミュレーション手法を用いて, その構造および発光特性についての基礎検討を行った。

2. YAG 蛍光体膜の透過・反射特性

YAG 蛍光体は 470nm 付近の青色光を励起波長域に持ち, 550 nm を中心波長とした黄色光を発光する特性を有する。青色 LED に YAG 蛍光体を組み合わせた白色 LED は, 青色 LED からの青色光と, その一部が YAG 蛍光体を励起して発光する黄色光とを混合して白色光を実現している^{1)~5)}。

本実験ではキセノンランプを光源とし, これに 470nm 付近の波長域の光を選択的に透過する光学フィルターを取り付けた径 5 mm のスポット光源 (林時計工業製: LA-250Xe) から得られる青色光 (光出力: 6 mW) が市販の InGaN 系青色 LED の発光に近似するものと想定し, このスポット光源を用いて YAG 蛍光体膜の透過・反射特性値を求めた。図 1, 図 2 にスポット光源の配光特性および分光放射束をそれぞれ示す。

図 3 に YAG 蛍光体粉末 (化成オプトニクス製: P46-Y3) を厚さ 0.3mm のシリコンゴムに 10~60wt % の範囲で所定濃度に含有させて作製した各 YAG 蛍光体膜に, スポット光源から得られる青

本論文の一部は平成 13 年度照明学会全国大会で山田健一が講演した。

図1 スポット光源の配光特性

Fig. 1 Luminous intensity distribution property of the spot light source.

図2 スポット光源の分光放射束

Fig. 2 Spectral radiant flux of the spot light source.

図3 YAG 蛍光体膜の透過・反射特性

Fig. 3 Transmission and reflection properties of YAG phosphor layers.

色光を照射した際の透過・反射光の放射束を示す。なお、このときに得られる反射・透過光は青色光と黄色光の2成分のみであることから、380～500nmの波長域を青色光成分、501～780nmの波長域を黄色光成分と定義し、それぞれの放射束を表している。図3に示したように、透過光についてはYAG 蛍光体含有量の増加に伴って青色光の放射束が低下し、代わりにYAG 蛍光体で変換された黄色光が得られることが確認される。しかしながら、この黄色透過光の放射束はYAG 蛍光体含有量が20wt %までは上昇が確認されるが、さらにYAG 蛍光体含有量を増加させてもそれに伴って放射束は上昇せず、飽和状態になることが分かる。一方、反射光についてはYAG 蛍光体の増加に伴って青色光の放射束は

表1 YAG 蛍光体含有量に対する透過・反射光の色度座標と発光色
Table 1 Chromaticity coordinates and colors of transmitted and reflected lights correspond to each YAG phosphor layers contained 10～60wt%.

YAG 蛍光体含有量	透過光		反射光	
	色度座標 (x, y)	発光色	色度座標 (x, y)	発光色
10wt %	(0.17, 0.13)	青	(0.23, 0.22)	青みの白
20wt %	(0.29, 0.31)	白	(0.26, 0.26)	白
30wt %	(0.38, 0.43)	黄みの白	(0.28, 0.29)	白
40wt %	(0.43, 0.50)	黄	(0.30, 0.32)	白
50wt %	(0.45, 0.52)	黄	(0.31, 0.33)	白
60wt %	(0.47, 0.52)	黄	(0.31, 0.33)	白

大きく変化せずにはほぼ一定であるが、黄色光の放射束は連続的に上昇し、YAG 蛍光体含有量が50～60wt %程度で飽和状態になることが確認される。

表1にYAG 蛍光体含有量に対する透過・反射光の色度座標および発光色をそれぞれ示す。透過光では、その発光色がYAG 蛍光体含有量の増加に伴って青色～白色～黄色と順次変化するのに対し、反射光では、その発光色が青みの白色～白色に変化する程度であり、いずれの条件においても白色光が得られることが分かる。そこで、光学シミュレーションに導入するYAG 蛍光体膜の透過・反射特性値の選定に際しては、透過型光源デバイスモデルの場合にはYAG 蛍光体含有量が20wt %のものを、反射型光源デバイスモデルの場合にはYAG 蛍光体含有量が50wt %のものをそれぞれ採用し検討を行った。

3. LED 光源デバイスモデル

図4に透過型光源デバイスモデル図を示す。外寸122×122×36.5mmのケース底面に青色LEDをマトリクス状に4×5個装着した基板を配置した。青色LEDからの出射光が前面に設けた100×100mmのYAG 蛍光体膜および拡散板を透過して外部に発光する構造となっている。

図5に反射型光源デバイスモデル図を示す。外寸122×122×36.5mmのケース内に120°のV字型反射板とその上面にYAG 蛍光体膜を設けており、ケースの両側に青色LEDを各10個装着した

図4 透過型光源デバイスモデル図

Fig. 4 Modeled diagram of the transmission-type light source device.

図5 反射型光源デバイスモデル図

Fig. 5 Modeled diagram of the reflection-type light source device.

アレイ状基板を内側に向けて45°の角度で配置した。青色LEDからの出射光がYAG蛍光体膜および反射板を介し、前面に設けた100×100mmの拡散板を透過して外部に発光する構造となっている。

透過型および反射型の各光源デバイスモデルにおいて光学シミュレーションを実施する際に必要な各種構成材料（YAG蛍光体膜以外）の透過・反射特性値は、試作した実機モデルについてC光源を基準として実測した値を適用させた。また、本シミュレーションにおける青色LEDの光源設定は、YAG蛍光体膜の透過・反射特性値を求める際に使用したスポット光源から得られる青色光を青色LEDの出射光と想定したため、このスポット光源の光出力および配光特性をそのまま導入し、その際の光線本数は1000本（LED1個あたり）とした。

4. 光学シミュレーション手法

光学シミュレーションはモンテカルロ法による光線追跡形照明計算ソフト（Optical Research Associates製：Light Tools）を使用して実施した。なお、本シミュレーションでは、一般に照明量決定に支配的な2次光までを計算の対象とし、その際の基本計算量は放射束（W）である。

図6に透過型光源デバイスにおける1光線の流れを示す。青色LEDからの出射光はYAG蛍光体膜に到達し、その際に①波長変換される透過光（Yt1）、②波長変換されない透過光（Bt1）、③波長変換される反射光（Yr1）、④波長変換されない反射光（Br1）の4種類の光が発生する。透過型光源デバイスの場合には、このときに発生する2種類の透過光（Yt1、Bt1）を受光面で1次光として捉えた。一方、YAG蛍光体膜を反射した光（Yr1、Br1）は基板で反射されて再度YAG蛍光体膜に到達し（Yr2、Br2）、波長変換される透過光（Yt2-1）および波長変換されない透過光（Yt2-2、Bt2）がそれぞれ発生する。従って、これらのYAG蛍光体膜に再度到達した際に発生する透過光（Yt2-1、Yt2-2、Bt2）を受光面で2次光として捉えた。

図7に反射型光源デバイスにおける1光線の流れを示す。反射型光源デバイスの場合には、青色LEDからの出射光がYAG蛍光体膜に到達した際に発生する4種類の光（Yt1、Bt1、Yr1、Br1）のうち、2種類の反射光（Yr1、Br1）を受光面で1次光として捉えた。また、YAG蛍光体膜を透過した光（Yt1、Bt1）は反射板で

図6 透過型光源デバイスにおける1光線の流れ

Fig. 6 A ray tracing model of the transmission-type light source device.

図7 反射型光源デバイスにおける1光線の流れ

Fig. 7 A ray tracing model of the reflection-type light source device.

反射されて再度YAG蛍光体膜に到達し（Yr2、Br2）、透過型光源デバイスの場合と同様に3種類の透過光（Yt2-1、Yt2-2、Bt2）がそれぞれ発生することから、これらを受光面で2次光として捉えた。

5. 光学シミュレーション結果

表2、表3に透過型および反射型の各光源デバイスモデルにおける光学シミュレーション結果をそれぞれ示す。また、図8、図9にはこれらの結果より得られた各光源デバイスモデルの分光放射束をそれぞれ示す。本シミュレーション結果より、透過型光源デバイスモデルでは青色光成分が9.65mW、黄色光成分が12.46mWの放射束が得られ、これを光束に換算すると5.9lm程度であり、その際の発光色は色度座標で $x=0.29$ 、 $y=0.31$ を示す白色光であることが推測された。これに対して、反射型光源デバイスモデルでは青色光成分が11.01mW、黄色光成分が20.07mWであり、光束で9.1lm程度、色度座標で $x=0.32$ 、 $y=0.34$ を示す白色光であることが推測された。従って、反射型光源デバイスモデルでは透過型光源デバイスモデルと比較して1.5倍以上の高光束が得られることが確認され、光学シミュレーション結果からも反射型構造が高光出力化に有効であることが分かった。しかしながら、光出力120mW（6mW×20個）の青色光に対して得られる放射束は反射型光源デバイスモデルにおいても31lm程度であり、70%以上の大きな光学的エネルギーロスが発生することが明らかである。それゆえ、青色LEDやYAG蛍光体膜などの構造配置的な改善を試みることで光源デバイスのさらなる高光出力化が図れるものと考えられ、本シミュレーション手法の活用によるその最適化設計が今後の課題である。

表2 透過型光源デバイスモデルにおける光学シミュレーション結果
Table 2 Optical simulation results of the transmission-type light source device model.

成 分	放射束
青色透過1次光(Bt1)	9.4mW
青色透過1次光(Yt1)	12mW
青色透過2次光(Bt2)	0.25mW
黄色透過2次光(Yt2-1)	0.31mW
黄色透過2次光(Yt2-2)	0.15mW
青色光放射束(Bt1+Bt2)	9.65mW
黄色光放射束(Yt1+Yt2-1+Yt2-2)	12.46mW
全放射束(Bt1+Bt2+Yt1+Yt2-1+Yt2-2)	22.11mW

表3 反射型光源デバイスモデルにおける光学シミュレーション結果
Table 3 Optical simulation results of the reflection-type light source device model.

成 分	放射束
青色反射1次光(Br1)	11mW
青色反射1次光(Yr1)	20mW
青色透過2次光(Bt2)	0.011mW
黄色透過2次光(Yt2-1)	0.026mW
黄色透過2次光(Yt2-2)	0.043mW
青色光放射束(Br1+Bt2)	11.011mW
黄色光放射束(Yr1+Yt2-1+Yt2-2)	20.069mW
全放射束(Br1+Bt2+Yr1+Yt2-1+Yt2-2)	31.080mW

6. おわりに

本研究では、青色光に対する YAG 蛍光体膜の反射・透過特性値を求め、YAG 蛍光体膜で波長変換される光と波長変換されない光とをそれぞれ分けた光学シミュレーション手法を試みた。そして、本シミュレーション手法により青色 LED に YAG 蛍光体を組み合わせた光源デバイスの発光特性が推測できることが明らかとなった。また、透過型構造の光源デバイスモデルに比べ、YAG 蛍光体膜の反射光を活用する反射型構造の光源デバイスモデルにおいて高光出力が得られることが実証された。従って、本シミュレーション手法により蛍光体変換方式の LED 光源デバイスにおける光学制御および最適化設計が可能であることが確認され、その活用が照明用 LED 光源デバイスの開発において有効であるものと考えられる。なお、照明用 LED 光源デバイスの開発には光学制御だけでなく、LED を集積した際に生じる発熱による光出力低下についても解決していく必要がある⁸⁾、著者らは LED 集積光源の放熱制御についても検討を行っている⁹⁾¹⁰⁾。さらに、LED 光源を居住空間に適用したときの人間への生理的、心理的影響を含む環境適合性についての知見はほとんど得られておらず、著者らはこの点も重要課題として検討を行っている¹¹⁾。

本研究は「高効率電光変換化合物半導体開発（21世紀のあかり計画）」の一環として、新エネルギー・産業技術総合開発機構および財団法人金属系材料研究開発センターから委託を受けて行われたものである。

図8 光学シミュレーション結果より得られた透過型光源デバイスモデルの分光放射束
Fig. 8 Spectral radiant flux of the transmission-type light source device model estimated by optical simulation results.

図9 光学シミュレーション結果より得られた反射型光源デバイスモデルの分光放射束
Fig. 9 Spectral radiant flux of the reflection-type light source device model estimated by optical simulation results.

参 考 文 献

(1) 宮崎和人：LED 開発動向とその応用，照学誌，81-7，pp.558-562（1997）。

(2) 向井孝志：LED の動向，照学誌，83-7，pp.447-450(1999)。

(3) 山下勝己：照明市場開拓を見据え，白色 LED に参入メーカ相次ぐ，日経エレクトロニクス，743，pp.41-48（1999）。

(4) 田口常正：LEDs（レズ）照明による“21世紀のあかり”研究，月刊ディスプレイ，6-3，pp.1-5（2000）。

(5) 坂東完治，幸田滋嗣，小橋正毅，西岡敏也，阪野顕彰，永峰邦浩，阪井一彦，荒井清隆，清水義則：白色 LED 光源，第 286 回蛍光体同学会講演予稿，pp.17-24（2001）。

(6) 山田健一，村井卓生，今井康雄，石井健一：青色 LED に YAG 蛍光体を組み合わせた光源体の検討，照学全大，p. 229（2000）。

(7) 山田健一，今井康雄，石井健一：蛍光体変換 LED 光源デバイスの構造および発光特性の検討，電気関係学会関西支部連大，p.S56（2000）。

(8) 田村哲志，瀬戸本龍海，田口常正：InGaN 白色 LED の照明への応用，照学全大，p.205（1999）。

(9) 今井康雄，石井健一，明道成：LED の冷却による高出力化の検討，照学全大，p.206（1999）。

(10) 石井健一，今井康雄，山田健一，村井卓生：LED 照明用光源の高出力化の検討，電学全大，pp.514-517（2000）。

(11) 日比野治雄，白井陽平，山田健一：LED 集積光源が及ぼす視覚的ストレスの影響－視覚的ストレスの心理物理学的測

定一，照学全大，p.207（2001）。

（受付日2002年1月10日／採録日2002年3月1日）

山田 健一（正会員）

三菱電機照明(株)器具技術部照明技術課

1974年1月8日生まれ。1998年3月芝浦工業大学大学院工学研究科工業化学専攻修士課程修了。同年4月三菱電機照明(株)入社。現在，「高効率電光変換化合物半導体開発（21世紀のあかり計画）」に従事。日本化学会，日本セラミックス協会，無機マテリアル学会，電気化学会，蛍光体同学会，応用物理学会，日本光学会，日本照明委員会各会員。

今井 康雄（非会員）

三菱電機照明(株)器具技術部照明技術課

1968年10月21日生まれ。1991年3月湘南工科大学工学部電気工学科卒業。同年4月三菱電機照明(株)入社。現在，「高効率電光変換化合物半導体開発（21世紀のあかり計画）」に従事。

石井 健一（正会員）

三菱電機照明(株)器具技術部照明技術課

1951年11月26日生まれ。1975年3月電気通信大学電気通信学部機械工学科卒業。同年4月三菱電機(株)入社。1989年4月三菱電機照明(株)設立に伴い出向。現在，「高効率電光変換化合物半導体開発（21世紀のあかり計画）」に従事。