

## 青色LEDの効率解析

### Energy Efficiency Analysis of Blue LED

牛田 泰久 \*1

#### 1. はじめに

青色LEDは、液晶バックライトの光源として、大きな役割を果たし、爆発的に普及した。近年では、照明分野でも普及が進み、その重要性は高まる一方である。この普及の要因の一つは、発光効率の高さであった。LEDは電力を光に変換する素子である。入力された電力に対して得られる光の量の割合を発光効率と呼び、LEDの性能の指標としている。現在、一般的な青色LEDの発光効率は60%を超え、研究段階では80%以上の変換も可能となってきている。一方で、この効率を決定している青色LEDの発光・非発光のメカニズムは必ずしも明確にわかっておらず、更なる効率向上の為には、理論的な解釈が待たれている。

本報告では、豊田合成で実施してきた青色LEDの効率解析の手法を紹介する。

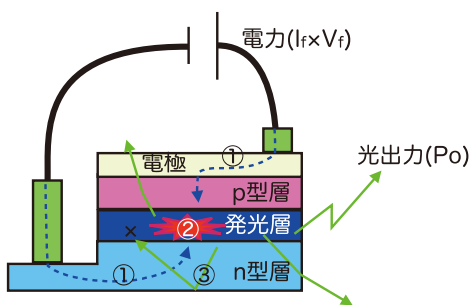


図-1 LEDの構成図

#### 2. LEDの効率

青色LEDの構造は、p型層、n型層に挟まれた発光層からなるGaN系半導体と、電流を流すための電極（金属・透明電極）からなる（図-1）。

LED内で電力を光に変換する過程には、キャリア輸送、発光、光伝播の3つのステップがある。

それぞれのステップにエネルギーを失う（ロス）要因が存在する。ゆえに、ステップ毎に効率が存在する。以下に簡単に紹介する（図-2）。

第1のキャリア輸送のステップは、電極から入力された電子を発光層へ輸送するステップである。その経路となる材料の抵抗などにより、無駄なエネルギー消費が発生する。このステップでのエネルギー効率を駆動効率（DE）と定義する。

第2の発光ステップは、発光層へたどり着いた電子の持つエネルギーが光へ変換されるステップである。結晶欠陥や電子間の相互作用、電子が発光層から漏れてしまうオーバーフローと呼ばれる現象など、発光につながらないエネルギーの消失（ロス）が存在する。ここでの効率は内部量子効率（IQE）と呼ばれている。

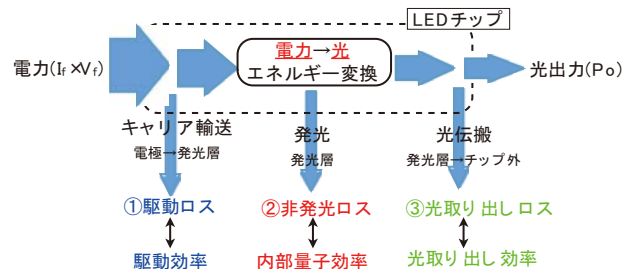


図-2 LEDのエネルギー変換過程

\*1 Yasuhisa Ushida オプトE第1技術部 オプトE開発室

最後の光伝播ステップは、発光層で変換された光が、チップの外へ伝播するステップである。このとき、光の伝播経路である材料（結晶自身や金属）で光吸収が発生する。この効率を光取り出し効率（ $C_{ext.}$ ）と呼んでいる。

理論的には、前述した、3ステップの各効率を用い、LEDに入力された電力に対して、LEDから出力される光の量の割合である発光効率（WPE）を次のように示す。

$$WPE = DE \times IQE \times C_{ext.} \quad \text{式-1}$$

また、一般的に使用される外部量子効率（EQE）は次式で定義される。

$$EQE = IQE \times C_{ext.} \quad \text{式-2}$$

実験的事実からの見積もり方法は、次の式で見積もることができる。それぞれ、電流値  $I_f$ 、電圧値  $V_f$ 、光出力  $P_o$ 、発光波長  $\lambda$  としたとき、次式で与えられる。

$$WPE = \frac{P_o}{I_f \times V_f} \quad \text{式-3}$$

$$EQE = \frac{P_o}{I_f \times hc/\lambda} \quad \text{式-4}$$

理論的、実験的双方からの見積もりの式からは、内部量子効率IQE及び光取り出し効率  $C_{ext.}$  の分解は不可能である。現在までに学術的知見から、様々なモデルが提案され、実験事実を解釈する試みがなされてきた。しかしながら、現在のところ、内部量子効率（IQE）、光取り出し効率（ $C_{ext.}$ ）の分解はできていない。従ってLEDの効率低下の根本原因に深く迫ることができず、技術開発は多方面に展開され、手当たり次第というような状況になる。

### 3. 目的

LEDの製造工程は、n型、発光層、p型の半導体を結晶成長するプロセスと、その半導体に電流を流すための電極を形成するプロセス、及び、その後ウエハを分離し、LEDにする分離プロセスで成り立っている。それぞれのプロセスにおける工夫や改善が、LEDの発光効率を向上させてきた。これら3つのプロセスに対する工夫・改善は、前述した3つの効率と深く関係している。結晶成長プ

ロセスは内部量子効率に、電極形成プロセスは駆動効率と光取り出し効率に、チップ分離プロセスは光取り出し効率と深い関係がある。それぞれの効率を分離し、解析することで、どのプロセスに力を入れて開発をすればよいか自明になる。市場・顧客のニーズにいち早く応えるために、最短・最大効率の開発を実行することが事業継続に重要となる。

我々は、LEDの効率を出来る限り単純に解析し、3つの効率を分離する手法の開発に取り組み、一定の結果を得たのでここに報告する。最も重要なキーワードは、測定サンプルの工夫である。

### 4. 試料作成

解析は可能なかぎり単純な考え方で実施したい。そのために必要な工夫は、LED内での発光分布の均一化である。例えば、LEDチップ内の発光に分布がある場合、電流を多く流している場所と少ない場所が混在していると考えられる。部位毎に電流密度の異なる非常に複雑な電流回路を考えなくてはならなくなる。実際のLEDの発光分布を図-3に示す。黒いところが、電極である。左図は、従来からある一般的なLEDの例である。LED内で明るい部位と暗い部位が共存している。これは部位毎に電流密度が異なることを示唆している。こうした試料を用いた解析には、少ない電流で駆動するダイオードと高い電流で駆動しているダイオードの並列回路を考える必要があり、さらに電流値を変化させた場合の発光分布の変化をも考慮する必要があり、解析は複雑となる。われわれは、この問題に対処する技術を確立しており、都度改善を繰り返してきた。図-3右図の様に、均一な発光をさせることができています。この技術に関するレビューは、豊田合成技報2011 Vol.53. p.16を参

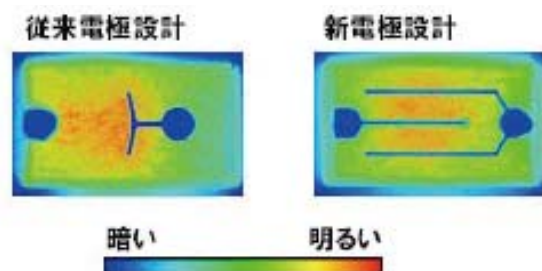


図-3 LEDの発光分布

照されたい。発光分布の均一化の工夫が、次に示すような解析の単純化に大きく貢献した。

## 5. 解析手法

前述した3つの効率を定量的に分解するため、LEDの電流 $I_f$ -電圧 $V_f$ 特性及び、光出力 $P_o$ と発光効率WPEの電流密度 $J$ 依存性の測定結果を解析した。以下に、簡単に示す。

### 5-1. 電流-電圧特性の解析

LEDは、ダイオードであり、電流密度 $J$ と電圧 $V$ の関係は、一般的に次式で示される。

$$J = J_0 \left( e^{\frac{eV}{\eta k_b T}} \right) \quad \text{式-5}$$

ここで、 $J_0$ ：飽和電流密度、 $e$ ：電気素量、 $\eta$ ：ダイオード理想係数、 $k_b$ ：ボルツマン係数、 $T$ ：温度(K)である。実際のLEDは、**図-4左図**に示すような、ダイオードに直列( $R_1$ )及び並列( $R_2$ )に抵抗が並んだ簡単な回路を仮定することで、電流 $I_f$ と電圧 $V_f$ の関係を説明する事が出来るはずである。しかしながら、従来のLEDチップでは、前述したような電流密度の分布によって複雑な回路となり、単純な回路では実験値を説明することができなかった。

LEDチップの電流・電圧特性を**図-4右**に示す。均一に発光していない場合(▲)では、シミュレーション(点線青)とは一致しなかったが、均一な発光を得たチップ(●)は、シミュレーション(点線赤)と良い一致を示す。解析には**図-4左図**の単純な回路を仮定し、以下のパラメータを使用した。 $R_1 = 6\Omega$ ,  $R_2 > 6M\Omega$ 。

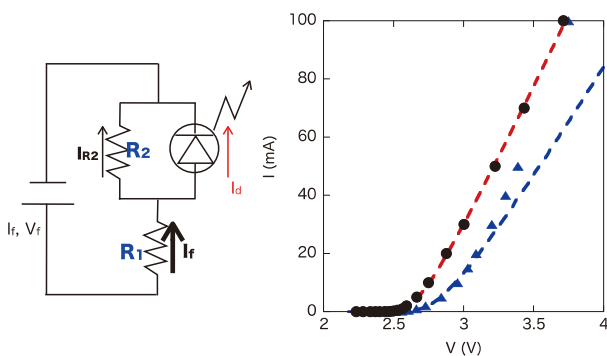


図-4 LEDの回路(左)と電流電圧特性(右)

### 5-2. 光出力, 発光効率の電流密度依存性の解析

前述した、3つのステップでの効率を見積もるために、どのようなエネルギーロスを仮定するか重要である。

キャリア輸送ステップでは、電子の輸送( $R_1$ の経路)に必要なエネルギーや、リークパス( $R_2$ の経路)を通過する電子は、光に変換されないエネルギーロスと考えられる。先ほどの電流-電圧特性の解析で見積もった $R_1$ ,  $R_2$ の値を利用し、その抵抗成分のエネルギーロスを次式の様に定義する。

$$R_1 \times I_f^2 + R_2 \times I_{R_2}^2 \quad \text{式-6}$$

発光ステップでは、発光層へ到達した電子のエネルギーの光への変換に関するエネルギーロスを考慮する必要がある。このエネルギーロスは電流依存性を示すことがわかっており、ロス量を $f(I_d)$ と定義する。詳しく解析することで、発光メカニズムや、エネルギーロスのメカニズムが見えてくる。様々なメカニズムが提案されているが、現時点で実験を十分説明できるモデルはない。

光伝播ステップでは、発光層で変換された光が、チップ内の材料(金属や結晶)に吸収されることによるエネルギーロスを考える。この場合、発光層で発生した光の一定の割合で減衰すると仮定し、係数 $C_{ext.} (\leq 1)$ との積で表す。

入力したエネルギーから、3種のエネルギーロス成分を差し引いた残りが、光出力として検出される。このモデルによると、光出力 $P_o$ は次式の様に定義される。

$$P_o(mW) = ((I_f \times V_f - (R_1 \times I_f^2 + R_2 \times I_{R_2}^2) - f(I_d)) \times C_{ext.}) \quad \text{式-7}$$

先に見積もった、 $R_1$ ,  $R_2$ の値を用い、式-3, 式-7をそれぞれ用い実験結果をフィッティングする事で $f(I_d)$ ,  $C_{ext.}$ を求めた。結果を**図-5**に示す。実験結果(●)とシミュレーション結果

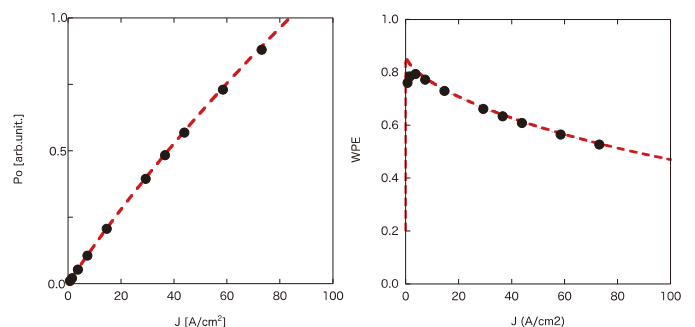


図-5 LEDの光出力(左)と発光効率(右)

(破線)は良い一致を示している。ここで、 $C_{ext.}=0.87$ が求められた。

フィッティングにより求められたパラメータ及び、式-1, 式-3, 式-7より所望の電流密度での3つの効率を分解する事が出来る。たとえば、 $20\text{A}/\text{cm}^2$ 駆動時の各効率を見積もると次の様になる。内部量子効率87%, 光取り出し効率87%, 駆動効率97%。それぞれの効率を分解し、数値化することに成功した。

LEDチップの電流-電圧特性および、光出力・発光効率の電流密度依存性の測定結果があれば、3つ効率を分離した解析ができるという簡単な解析手法を構築した。今回割愛したが、内部量子効率を低下させている要因  $f(I_d)$  に関して更なる解析をすすめており、効率低下メカニズムに関してノウハウが構築されつつある。この解析を基に、内部量子効率の向上を加速させている。

## 6. まとめ

LED内での電流の分布を均一化させる技術を用い、簡便にLEDチップのエネルギー収支を解析する手法を見いだした。解析を実施できるようになったことで、より緻密でピンポイントな開発を推進できる環境を整えた。

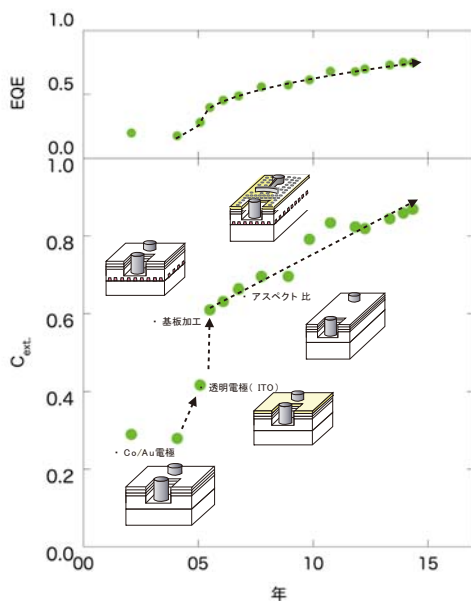


図-6 光取り出し効率の改善と外部量子効率

液晶バックライト向けLEDの光り取り出し効率の向上の例を図-6に示す。近年急速な改善を実施してきた。今後、照明などの市場拡大に伴いLEDに求められるニーズ(性能, 使用電流, 価格, 販売時期)もますます広がり、開発はさらに困難で広い範囲に拡大することが予測される。今回紹介した解析を基に、更なる効率的な技術開発を推進し、ニーズにいち早く応えることで、LEDの発展に貢献していきたい。

著者



牛田泰久