

# LED の行方

笠原 佳浩, 小林 祐介

Yoshihiro KASAHARA, Yusuke KOBAYASHI

## 1 はじめに

近年、照明分野において目覚ましい発展を見せている Light Emitting Diode(以下 LED) であるが、その開発は表現できる電磁波の波長が長いものから短いものへと進められた。この結果、青色 LED が開発され論理的にすべての色を表現することができるようになった。これに伴い、LED の研究も作り出せる電磁波の作用に目を向けることが必要となってきた。

本稿においては、その点を考慮した上で、今後の LED の行方、及び応用技術について述べる。

## 2 LED とは

### 2.1 LED の構造

LED は固体物質に電気を流すことにより発光を行う。Fig. 1 左図に LED の基本構造、Fig. 1 右図に LED の発光構造を示す。

原子核の周囲には、電子が存在できる二つのエネルギー帯が存在している。これを、伝導帯と価電子帯と呼び、電子から見てエネルギーが高いものが伝導帯、低いものが価電子帯である。また、伝導帯に電子をもつ物質が n 型半導体、価電子帯に正孔をもつ物質が p 型半導体である。

不点灯状態の LED では、電子は伝導帯に存在し、電流を流すことで価電子帯へと落下させ、正孔と結合させることができる。電子はエネルギーを放出しながら落下するため、このエネルギーが光や熱へと変化している。このときに、禁制帯の幅によって発光される電磁波の周波数が変化する。これが LED の基本的な発光原理である。

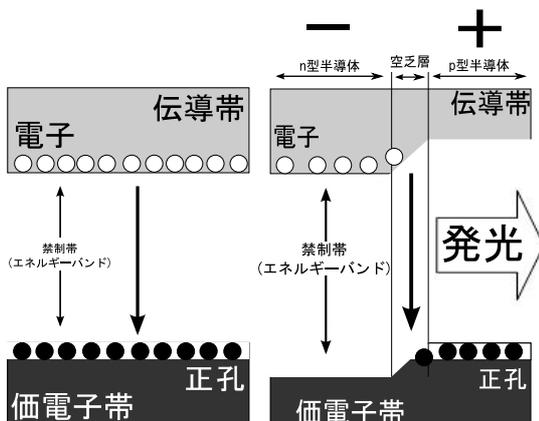


Fig.1 左：基本構造 右：電圧印加状態 (出典：自作)

n 型半導体と p 型半導体を接合させたものを、p-n 型半導体と呼ぶ。p-n 型半導体の接合部では、n 型側の電子はある程度 p 型側へと拡散する。また、同じように p 型側

の正孔についても n 型側へ拡散する。このため、p-n 型半導体の接合部では電氣的に中性であり、電子も正孔も存在しない空乏層と呼ばれる。

この状態で、p 型側に正側、n 型側に負側の電流を流すことにより、電子と正孔はそれぞれ p 型側、n 型側へと移動し、より安定な状態を求めて電子は価電子帯の正孔と結合を起こす。このように電流を流すことにより、電子及び正孔の移動をコントロールし、LED の点灯と消灯を行う。

### 2.2 LED の特徴

リモコンに代表されるような従来の低光量用途から、照明分野などの高光量用途に用いられるようになってきた LED であるが、これは、従来の光源にはなかった特徴を LED が有しているためである。以下に他の光源と比較したときの主な LED の特徴を挙げる。

- 寿命

白熱電球における寿命は主にフィラメントの断線によるものであったが、LED では素子そのものの寿命は半永久的であるため主に構成部材の劣化が原因となっている。このため、通常の LED ランプでは白熱電球の数十倍である数万時間の寿命を有している。

- 応答速度

LED では、半導体の電子と正孔の再結合による直接的な発光現象を利用している。このため、発光における応答時間が白熱電球では  $1.5 \times 10^{-1}$  秒  $\sim 2.5 \times 10^{-1}$  秒であるのに対し、LED では約  $1.0 \times 10^{-7}$  秒と高速応答が可能である。

- 小型、軽量

LED は半導体素子の発光を用いた明かりであるため、小型・軽量であり、デザイン性に富んだ設計が可能となる。

- 対環境性

従来の照明では、蛍光灯における水銀のような有害物質を含んでいるものもあったが、LED ではそのような有害物質を含んでいない。そのため環境保全には有用な照明といえる。

- 耐衝撃性

LED ではガラス管は全く用いていないため振動や衝撃に強いという特徴を有している。そのため、移動媒体等の振動や衝撃を受けやすいものへの応用が可能である。

### 2.3 LED の欠点

主な LED の欠点として熱の問題がある。前項において LED の寿命は構成部材の劣化が原因であることは述

べたが、この劣化は熱によって大幅に加速される。式 (1) に LED の寿命を表す式を示す<sup>1)</sup>。

$$L = A \exp\left(\frac{E_a}{KT}\right) \quad (1)$$

A: 定数,  $E_a$ : 活性化エネルギー,  
K: ボルツマン定数, T: ジャンクション温度  
式 (1) より, ジャンクション温度が高くなると LED の寿命が短くなることがわかる。つまり, LED 内部の温度が高いとき, LED の寿命は短くなる。

上記のことより, 発光強度を上げるため過度に電流を印加すれば, 内部抵抗の電力損失の比率が著しく増大し, LED の寿命を大きく縮めることになる。これより, LED では設計の段階から熱による作用を考慮し, さらには使用環境などを考慮に入れる必要がある。

### 3 色と LED の関係

近年, LED が多く用いられてきている背景には, 前項における LED 固有の特徴が大きく寄与している。また, 1993 年に青色 LED が開発されたことも大きく関係している。これは, 青色 LED を用いることにより論理的には無限大の色を表現できるようになったためである。本項では青色 LED の開発を踏まえて LED と色について述べる。

#### 3.1 色と波長

色はもともと特定の波長をもつ電磁波である。この特定の電磁波が人間の目に入ってきたときに初めて色として認識される。Fig. 2 に LED 開発の歴史, Fig. 3 に色と波長の関係を示す。

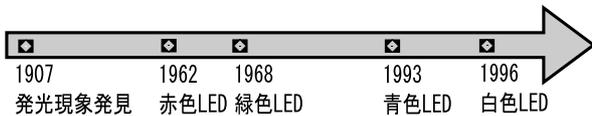


Fig.2 LED 開発の歴史 (出典: 自作)

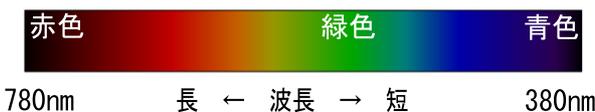


Fig.3 色と波長の関係 (出典: 参考文献<sup>2)</sup> より引用)

Fig. 2, Fig. 3 より LED では色の波長が長いものから開発されてきたことがわかる。これは, 光のエネルギーは波長の逆数 (振動数) に比例することが原因である。つまり, 赤色の波長が約 700nm であるのに対し, 青色の波長が約 450nm であるため, 青色を発光させるためには赤色の約 1.5 倍のエネルギーが必要となる。このエネルギーの問題が青色 LED の開発を遅らせた。

ここでの高いエネルギーを持った半導体とは, 禁制帯の幅が広い半導体のことであるが, これらの半導体を生成しようとするとき格子定数の違いから低品質結晶構造となり十分な発光効率を確保することができない。つまり, 格子定数の近い材料を使用し高品質結晶構造を得る必要があった。この問題に対し青色 LED では, 微量な不純物を混ぜることや緩和層を生成することにより解決した。

### 3.2 白色 LED

人間の目は『赤色』『緑色』『青色』を選択的に感じ取ると言われている<sup>2)</sup>。つまり, この 3 色の組合せであらゆる色を人間の脳は認識している。

しかし, Fig. 3 には『黒色』と『白色』は存在していない。これは『黒色』と『白色』が例外的な色であることを示している。まず『黒色』についてであるが, これはいっさいの光がない場合に黒色と認識される。しかし『白色』については, 『赤色』『緑色』『青色』がすべて混ざった場合に白色と認識される。次に白色 LED を得るための 3 つの方法を示す。

#### 方法 1 青色 LED + 黄色蛍光体

青色 LED と, 青色の光が当たると黄色を発光する蛍光体を用いた方式である (Fig. 4)。黄色は赤色と緑色の混合色であるため, そこに青色の光を加えることで白色を作り出す。しかし, この方式では赤色, 緑色の発光色を混ぜているわけではないため, 肉眼では少し青白く見える。

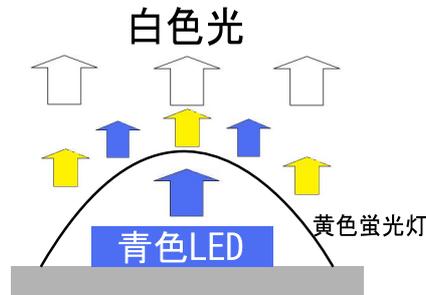


Fig.4 青色 LED + 黄色蛍光体による白色 LED (出典: 参考文献<sup>2)</sup> より引用)

#### 方法 2 近紫外 LED + RGB 蛍光体

方法 1 における青白くなる問題を解決するため, 蛍光体に人間には見ることができない紫外線を用いた方式である。この方式では, 波長が 350nm ~ 400nm の近紫外 LED と, 紫外線が当たると赤色, 緑色, 青色を発光する蛍光体を用いている (Fig. 5)。しかし, この方式では方法 1 に比べきれいな白色を作り出せるが, 紫外線を全て蛍光体に当てているため発光効率が問題となる。

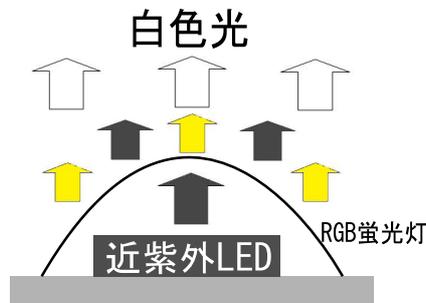


Fig.5 紫外 LED + RGB 蛍光体による白色 LED (出典: 参考文献<sup>2)</sup> より引用)

### 方法3 赤色, 緑色, 青色LED

方法2における発光効率の問題を解決するためにこの方式では, 赤色, 緑色, 青色のすべての色をLEDにより発光させている (Fig. 6). この方式ではLEDでRGBすべての色を発光しているため, 白色だけではなく様々な色を表現することが可能である. しかし, この方式では各色LEDの輝度バランスが重要になり, 制御が難しい.

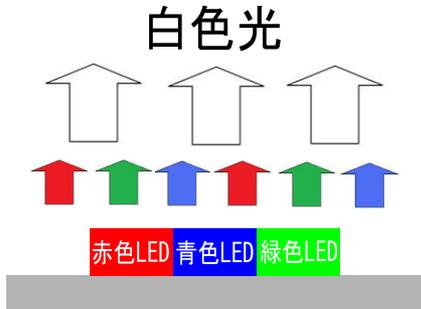


Fig.6 赤色, 緑色, 青色LEDによる白色LED(出典: 参考文献<sup>2)</sup>より引用)

## 4 LEDの今後

これまでLEDでは, 低光量用途から高光量用途へ, そして波長の短い方へと開発が行われてきた. しかし, 青色LEDが開発され, 理想的には無限大の色を表現できるようになったため, 今後はLEDの色の作用と構造的な開発両面に目を向けるべきである.

### 4.1 色の作用から見るLEDの行方

LEDを用いると様々な波長の光を発生させることができるため, 明かりとしての利用法に限らず, 多岐にわたる利用方法が考えられる. その中でもここでは可視光通信及びLED殺菌を紹介する.

#### ● 可視光通信

これまでの無線通信は波長が0.1mm以上の電波や赤外線が用いられてきた. これは波長が長く, 減衰が少ないためである. しかし, これらの通信では人体へ悪影響を及ぼすため送信電力を上げることが難しいとされてきた. また, 病院などでは精密機器への影響から無線機器の使用は禁じられている. このような問題を解決するために送信機にLEDを用いた可視光通信が考えられた.

LEDを用いた可視光通信を行うには, LEDが発する光に伝送情報を変調する必要がある. 変調方式には, 電波と同じく振幅変調(ASK), 周波数変調(FSK), 位相変調(PSK), パルス変調(PPM)が存在しているが, 可視光通信にはパルス変調(PPM)が用いられている. これは, 周波数変調(FSK), 位相変調(PSK)においては光の周波数帯域が電波の帯域よりも高いため, 光の周波数や位相を信号に対応して変調させることが難しい. また, 振幅変調(ASK)に関しても太陽光などの背景光の影響から実用が難しい. このため可視光通信にはパルス変調(PPM)が

主に用いられている. パルス変調(PPM)におけるキャリアをFig. 7に示す.

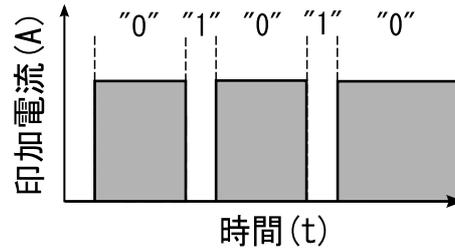


Fig.7 パルス変調(出典: 参考文献<sup>3)</sup>より引用)

Fig. 7では, LEDを照明用途に用いることを考慮し逆変調となっている. つまり, 本来電圧を印加すべきところとは逆に電圧を印加しているのである. これにより, 照明用途と平行しながら通信への利用も可能になる.

また, 1997年よりLEDが交通信号機に導入され始めていることを受けて, 可視光通信コンソーシアムでは2008年4月「交通信号機サブプロジェクト」を立ち上げ, 可視光通信機能を備えた交通信号機の実用化を検討している. さらに「交通信号機サブプロジェクト」では, 2009年3月にLED信号機から約160m離れた場所での受信実験も成功を収めている<sup>4)</sup>.

まだまだ, 通信速度, 通信距離, 外乱交, 振動などで課題の多い技術であるが, この技術が実用化されると, 交通信号機から情報を受信しながらの, 自動車運転などが可能となると考えられる.

#### ● LED殺菌

近年, 紫外線LEDを用いた殺菌方法が提案されている. 3.1で述べたが, LEDは波長の短いものへと開発が進められてきた. これにともない, 2008年7月には独立法人理化学研究所, 松下電工が共同で独自の深紫外線LEDの開発に成功した. この深紫外線LEDでは, 波長が280nmの紫外線を取り出すことができる. 波長が260nm~280nmの紫外線はバクテリアなどを直接殺菌することができるだけでなく, 汚染物質の高速分解などへの応用も可能となっている<sup>5)</sup>.

これらのことにより, 今後はLEDを用いた小型殺菌機器, 及び殺菌作用を有したLED照明などが開発, 実用化されてくると考えられる.

### 4.2 LEDの構造的な行方

今現在, 低光量用途においては蛍光灯よりも発光効率の良いLEDであるが, 高光量用途においては蛍光灯に比べて発光効率が悪い. そのため, 耐久性, デザイン性, 省電力性, 環境性の観点からLEDを照明やバックライトに用いるケースは増えてきているが, 家庭内照明にLEDを導入するにはまだ至っていない. 今後本格的にLEDを家庭用照明用途等に用いるのであれば, 発光効率を上げる必要がある (Fig. 8).

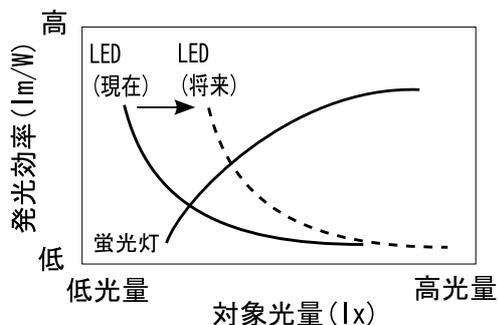


Fig.8 LED の将来 (出典：参考文献<sup>4)</sup> より引用)

Fig. 8 では LED が高光量分野において発光効率を上げる必要があることを示している。ここで考えられるのが LED に用いる材料を変更することである。

従来 LED の材料は主にアルミニウム (Al), ガリウム (Ga), 砒素 (As) による化合物が用いられてきた。しかし、近年ではダイヤモンドが LED に用いられようとしている。本来、ダイヤモンドは絶縁体であるため電気を通さないが、2005 年産業技術総合研究所が微量の不純物を加えることにより半導体化させることに成功している。これに伴い、2006 年頃からダイヤモンド (C) を用いた LED の研究が行われ始めた。ダイヤモンド LED は、大電流を印加しても発光効率が増加し続ける、高温に強いという特徴を有している。

また近年では、2009 年 3 月産業技術総合研究所がダイヤモンドを用いた LED の開発に成功している。このダイヤモンド LED では、波長 235nm の深紫外線を取り出すことができ、Blue-Ray の数倍の高密度な記録用光デバイスへの応用も可能である<sup>6)</sup>。コストが高い、大型化が難しいなどの問題を抱えているダイヤモンド LED であるが、今後注目すべき半導体材料であると考えられる。

## 5 まとめ

従来、LED 表示灯などでのみ用いられてきた LED であるが、作り出せる波長帯域が広がったことにより応用分野は無尽大の可能性を秘めている。将来、家庭の照明が通信、殺菌など様々な役割を果たすことができるようになると思われる。

## 参考文献

- 1) LED 照明推進協議会 <http://www.led.or.jp/>
- 2) LED 照明ハンドブック, 大谷義彦 著, Ohmsha 出版, 2006.
- 3) 慶應義塾大学 中川研究室 <http://www.nkgw.ics.keio.ac.jp/>
- 4) 可視光通信コンソーシアム (VLCC) <http://www.vlcc.net/>
- 5) 独立法人 理化学研究所 <http://www.riken.jp/>
- 6) Tech-on - 産総研がダイヤモンド LED を開発 - <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20090325/167688/?ST=device>
- 7) 可視光通信の世界 LED で拓く「あかりコミュニケーション」, 中川正雄 著, 工業調査会出版, 2006.
- 8) 発光ダイオードとその応用, 小山稔, 奥野保男, 柏原鳳一郎 著, 産業図書株式会社出版, 1990.
- 9) 高輝度 LED 材料のはなし, 一之瀬昇, 田中裕, 島村清史, 新谷昭, 上村俊也, 大谷昇, 大島祐一, 戸田健司 著, 日本工業新聞社出版, 2005.
- 10) 東芝ライテック株式会社 <http://www.tlt.co.jp/tlt/index-j.htm>

- 11) LED マニア <http://ledmania.blog59.fc2.com/>
- 12) 広島県立総合技術研究所 水産海洋技術センター <http://www2.ocn.ne.jp/~hfes/>
- 13) 財団法人 KDDI エンジニアリング・アンド・コンサルティング <http://www.kec-jp.org/>
- 14) ITmedia - ダイヤモンドが LED に? シリコンを超える未知のチカラ - <http://www.itmedia.co.jp/enterprise/articles/0612/27/news002.html>