

あなたのそばにある光デバイスおよび 著者の研究紹介

Optoelectronic devices neighboring us and
introducing related studies of the author

角田 直輝**
Naoki KAKUDA

概要

我々の身のまわりでは、至る所で光デバイスが活躍している。本稿では、2014年ノーベル物理学賞で脚光を浴び、照明の省エネルギー化の旗手としてますます応用の裾野を広げている発光ダイオード (LED) を例にとって光デバイスの紹介をした後、紫外線デバイスへの応用に期待されている酸化亜鉛 (ZnO) の成膜方法および発光特性について述べる。

1. はじめに

光デバイスは身近である。米子高専の校内や周辺を歩くだけでも、沢山使われている (図1)。夜、廊下の明かりが自動で点く (赤外線センサ)、教室のプロジェクターのリモコン (赤外線発光ダイオード (LED))、クリスマスの時期の寮 (LED)、学校の前の太陽電池など、例示に苦労しない。この中で、LED はきわめて多くの場所で用いられており、光デバイスの中でも最も身近といえる。しかしながら、LED はカラフルな明かりであるという印象程度しかもたれていないかも知れない。そこで、まずはLED を紹介する。

2. LED について

LED の発光原理はルミネッセンス (luminescence) といい、日本語で言うと「蛍光」である。電極を封入したガラス管に水素、ヘリウムやナトリウム蒸気を入れて、



図1 身近にある光デバイス。(左) 学校前の太陽光発電施設、(右) 寄宿舍管理棟の電飾。白枠内はLED素子。

圧力を下げて高い電圧を掛けると放電が生じ、発光する。この光は物質固有のもので、とびとびの波長をもつ (線スペクトルという)。この発光はボーアの原子模型によって説明される。原子内部の電子は、特定のとびとびなエネルギー状態にあり、その状態に対応する軌道を運動している。電子が外殻のエネルギー状態から内殻のエネルギー状態へと遷移するときに、ある条件 (振動数条件) を満たす光を放射する。LED は水素、ヘリウムやナトリウム蒸気と異なり固体材料であるから、エネルギー状態の様子が異なるが、上記の例で示した発光の原理と基本的に同様である。照明というと白熱電球 (豆電球など) がイメージされやすいが、白熱電球の発光原理は黒体放射といい、白熱したフィラメントから放射される光であり、発光過程に熱が生じないLED とは異なる。

LED に関するトピックとして、2014年ノーベル物理学賞を挙げる。2014年ノーベル物理学賞は、赤崎勇 (名城大学)、天野浩 (名古屋大学)、中村修二 (カリフォルニア州立大学サンタバーバラ校) の3氏に対して贈られた。3氏の研究は、青色LEDの研究開発に関するものである。LEDにはほかに赤色、緑色、黄色、赤外、紫外など様々な色のものがあるが、なぜ青色で受賞となったのか。それは、LEDの材料開発と白色照明に関係している。LEDという素子構造を作製し、はじめて発色させたという報告は1907年である²⁾。そのときの材料はSiCというものであり、色は黄色であった。1950年代には、GaAs (現在のLED材料のために広く使われている半導体基板) の結晶成長技術の向上があり、1962年には、

* 原稿受理 平成27年12月**日

** 電子制御工学科

*** 平成X年学生部

GaAsP という材料を用いた赤色 LED が報告された³⁾。これが可視領域の LED のはじまりであった。その後、1960 年代は GaP という基板の結晶成長技術が向上し、緑色 LED (1968 年) と黄色 LED (1972 年) が開発された。ここで「光の三原色」を考える。光は、赤、緑、青の 3 色ですべての色が作れる。したがって、LED においても、赤色、緑色が開発されたら、次は青色と考えるのは LED 材料の開発者共通の意志であった。1970 年～80 年当時、ZnSe, SiC, GaN などの、青色で発光するワイドバンドギャップ材料の LED 化 (p 型・n 型半導体の形成) の研究が進められていた。しかし、どの材料もそれぞれ問題点があり、青色 LED は開発・量産化されていない状況であった。この状況を打破したのが赤崎・天野・中村の 3 氏であった。3 氏の研究成果および関連企業 (特に日亜化学工業 (株) および豊田合成 (株)) の青色 LED 量産技術によって、青色 LED は 1990 年代中盤から指示板や案内標識など低輝度応用に用いられはじめ、現在に至るまで高輝度化の研究が続けられている。上記のように、青色 LED の開発によって、赤、緑、青の三原色を混色させる、または青色に蛍光体による黄色を混色させることで白色 LED が開発され、その高効率化 (低消費電力化) が進展している⁴⁾。白色光源は、多くの光源の中でも照明用途として特に重要である。さらに、前述のように白熱電球や蛍光灯とは異なり、LED は原理的に熱を生じないため、高効率な白色光源として、既存照明からの置き換えが進められている。ノーベル物理学賞の受賞理由は、“efficient blue light-emitting diodes leading to bright and energy-saving white light sources (高輝度・低消費電力白色光源を可能とした高効率青色 LED の発明)”であった。つまり、青色 LED そのものの発明よりも、高効率な白色光源を可能とした青色 LED の発明に力点が置かれた受賞理由となっている。白色 LED への置き換えの身近な例は、街灯やコンビニエンスストアの照明など長時間点灯に用いられる照明などであり、意外な例ではイカ釣り漁船の集魚灯の LED 化のようなものもある。実際、鳥取県水産試験場が LED 集魚灯の実用化検討を進めており、既存光源と遜色ない漁獲量がより少ない燃油量で得られるとの結果が得られている⁵⁾。このように、白色 LED 照明の高効率化は社会の低エネルギー化に貢献している。

3. 酸化亜鉛 (ZnO) を用いた光デバイス応用

当研究室はデバイス応用として、特に光デバイス応用に向けた材料の基礎研究に取り組んでいる。現在は ZnO を試作・評価している。この ZnO の利点は、(1) 亜鉛が

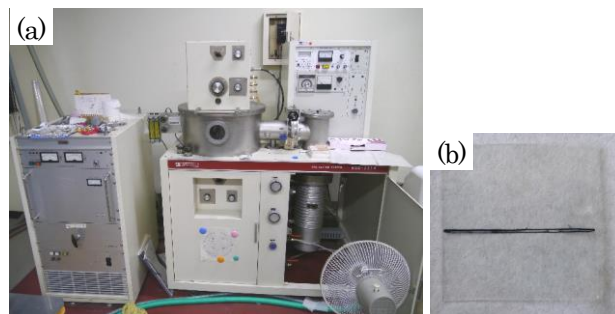


図2 反応性高周波スパッタリング装置 (島津製作所製)
(a)、ガラス基板上に成膜した ZnO 薄膜 (b)。黒線の上側は ZnO が成膜されているが下側はされていない。

豊富に産出されるため安価である、(2) ヒトへの適合性が高い (例えば、顔料などにも用いられる、(3) セラミックのため耐熱性が高いなどあり、光デバイス応用としては、(1) 室温で 3.37 eV のバンドギャップエネルギーをもつ直接遷移型半導体である、(2) 他酸化物半導体と比較しても大きな励起子束縛エネルギー (60 meV) をもっている、(3) 可視光 (波長約 400 – 約 800 nm) に対して透明であることなどが挙げられ、紫外線 (波長約 400 nm 以下) の LED、センサや透明導電膜への応用に期待されている。

以下は、反応性高周波スパッタリング装置 (図 2(a)) を用いた ZnO 薄膜 (図 2(b)) の成膜方法である。まず、ロータリーポンプと油拡散ポンプを組み合わせる容器を 10^{-3} Pa 台まで真空引きし、純度 99.9% の Ar ガス (8.0 ml/min) および 99.9% の O_2 ガス (1.5 ml/min) を容器内に導入する。この希薄真空中において、高周波電源 (電力 100 W) によって基板—ターゲット間でグロー放電を生じさせ、Ar 原子がイオン化する。放電により得られた高い運動エネルギーをもちながら Ar イオンが ZnO ターゲットに衝突し、掘られた ZnO 分子が O_2 と反応しながら基板に蒸着される。このような成膜方法により、スパッタリングは基板の面積化に対応しやすく、産業的に広く用いられている。

ガラス基板上的 ZnO 薄膜の室温フォトルミネッセンス (PL) スペクトルを図 3 に示す。フォトルミネッセンスは日本分光 FP-6500 を用いた。励起光源は Xe ランプ (電力 150 W) で、フィルタにより波長 220 nm の紫外線のみを試料に励起した。最も強い発光ピークを示した 409 nm 付近は ZnO の基礎吸収端に一致する。そのほかにも 468 nm、546 nm、607 nm などにピークがあり、紫色～黄色で発光することが分かった。これらはバンド・不純物間遷移、ドナー・アクセプタ対再結合、励起子再結合など様々な発光メカニズムによるものと考えられる。目下当研究室で立ち上げを進めている極低温 PL を用い

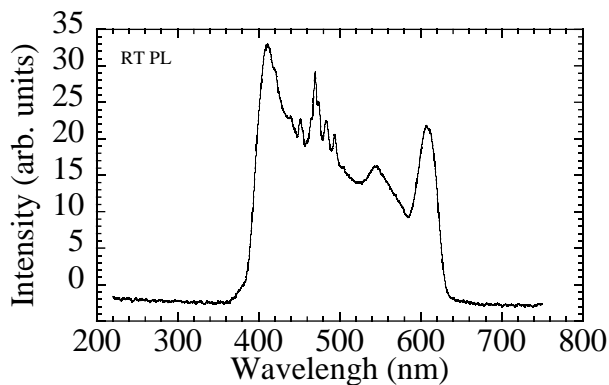


図3 ZnO 薄膜の室温 PL スペクトル。

て温度依存性および励起光強度依存性を検討し、ZnO の発光メカニズムを明らかにしていくつもりである。

4. まとめ

光デバイスは身近にある。その中でも LED は、案内板、照明、電飾などに用いられていて、最も身近であるといえる。LED の原理はルミネッセンスに基づくものであり、黒体放射を原理としている白熱電球とは異なり、発光に熱が関与しないため省電力である。2014 年のノーベル物理学賞の受賞理由は、“高輝度・低消費電力白色光源を可能とした高効率青色 LED の発明” に対してであった。次に本研究で試作・評価を進めている ZnO の光デバイス応用への検討を紹介した。

謝辞

ZnO の PL 評価について、長岡技術科学大学物質材料工学課程 小松啓志助教の協力をいただきましたことを御礼申し上げます。

参考文献

- 1) http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/, 2015 年 12 月 4 日閲覧。
- 2) Round H. J. : “a note on carborundum”, *Electrical World*, **19** (1907) 309.
- 3) Holonyak Jr N. and Bevacqua S. F. : “Coherent (visible) light emission from Ga(As_{1-x}P_x) junctions” *Appl. Phys. Lett.* **1** (1962) 82.
- 4) http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2014/advanced-physicsprize2014.pdf, 2015 年 12 月 4 日閲覧。
- 5) <http://www.pref.tottori.lg.jp/secure/334156/h23report.pdf>, 2015 年 12 月 4 日閲覧。