

## 発光ダイオード(LED)

名城大学 理工学部 岩谷 素顕

### 1. はじめに

発光ダイオード(LED)は、省エネルギーで環境負荷の少ない高効率固体光源であり、照明用光源やディスプレイ用バックライトなど光源革命の担い手として、その応用分野は急速に拡大している。その中でも、高効率青色LEDを発明された、赤崎勇博士、天野浩博士、中村修二博士が2014年ノーベル物理学賞を受賞され、一般の社会からも本分野に対しての注目は急速に高まっている。LEDは、発熱が少なく省電力(高効率)、小型、堅牢、長寿命、高速応答性、低環境負荷、低電圧直流駆動、不要な波長の光を出さないなど、ほかの光源に比べて優れた特長をもった固体発光素子である。図1に実際の青色LEDチップの写真を示す。青色LEDは小型(通常0.3mm～1mm角)であるという特長がある。また、どこにでもつけられることや、量産化によって非常に低コスト化が容易である。

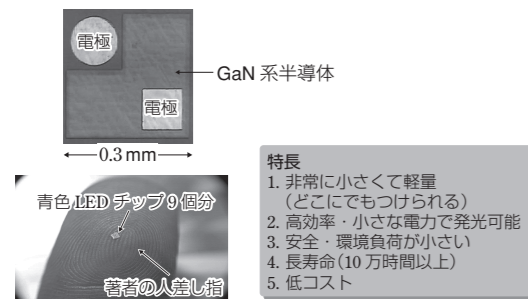


図1 青色LEDチップの特長

LEDは1960年代から市販されてきたが、その市場規模が急拡大したのは青色LEDが市販されてからである。1989年に赤崎・天野両博士の名古屋大学の研究グループからGa<sub>2</sub>N(窒化ガリウム)系青色LEDが発明された<sup>1)</sup>。さらに中村博士と日亜化学工業(株)のグループからInGa<sub>2</sub>N(窒化インジウムガリウム)を発光層に用いることによって高輝度化がなされ<sup>2)</sup>、1993年12月に日亜化学工業(株)から青色LEDが販売された。その後、交通信号や表示灯、イルミネーションなどへの利用が一気に加速した。

特に、図2に示すように、青色LEDと黄色蛍光体を組み合わせることによって白色を出すことが可能となった。このことからLED照明やディスプレイ応用につながり、市場の爆発的な急拡大につながった(2014年現在、LEDの市場規模は1兆円/年に到達している)。白色LEDは急速に高性能化が進み、既存の白熱電球や蛍光灯に代わる新しい省エネルギー光源として照明技術の革新が始まりつつある。本稿では、青色LEDの原理や仕組み、応用分野などの現状、さらには今後の展開に関して紹介する。

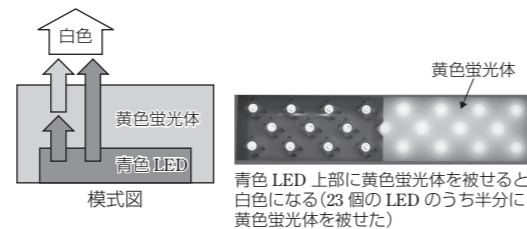


図2 現在市販されている白色LEDの原理図

### 2. 発光素子の歴史

旧約聖書の最初の一節にはThe God said “Let there be a light” (神は“光あれ”と言った)と書かれている。このように、光は人類社会にとってなくてはならない最も重要な要素である。図3に人類がこれまで活用してきた光をまとめる。人類が最初に活用できた光は炎であった。既に石器時代には炎を使って灯りを得ていたことは様々な遺跡から明らかであり、その後19世紀まではこの炎を効率よく利用することが進められ、たいまつやろうそく、ガス灯など、化学反応、酸化反応を利用する方法など、徐々に発展していった。1878年にジョセフ・スワンにより白熱電球が発明され<sup>3)</sup>、その後トーマス・エジソンによって実用レベルに引き上げられたことで<sup>3)</sup>、人類は電気エネルギーを用いて光を得ることが可能になった。白熱電球は、真空中に存在するフィラメントに電流を流し、フィラメントを高温状態にすることで、熱輻射による光を得る方法である。したがって、原理的には炎と同じように熱を伴う発光であり、エネルギー変換効率は低い。

次に、1926年にドイツのエドムント・ゲルマーらによって蛍光灯が発明された<sup>3)</sup>。蛍光灯は水銀ガスの放電で得られた紫外光を蛍光体で白色光に変換するものであり、発熱量は白熱電球に比べ低く、効率が非常に高い。エネルギー変換効率はLEDに比べて低いが、安価であるため広く普及している。しかしながら、有害な水銀ガスを用いていることから環境に問題があり、今後はLED照明に置き換わっていくと考えられている。

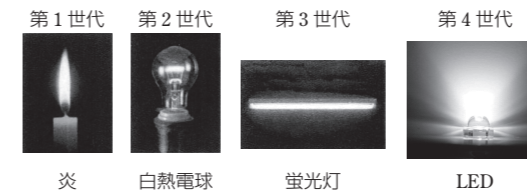


図3 人類がこれまで活用してきた光

LEDは固体材料に電流を流すことによって発光する。固体材料からの発光現象は1907年にラウンドによってSiC(炭化ケイ素)に金属針を立てて電流を流すと、発光することが確認されたのがはじまりである<sup>4)</sup>。当時は、発光原理は不明であったが、その後の量子力学や半導体工学分野の発展によって、その動作原理は電気エネルギーを直接光エネルギーに変換する素子であり、発熱を伴わない発光であるという特長を有していることが分かった。他の手法が発熱を伴う発光であることから、LEDは白熱電球や蛍光灯に比べ、高効率発光が可能である。また、半導体という固体材料からの発光であるため、一般的に長寿命である。特に、青色LEDに用いているGa<sub>2</sub>Nは共有結合性が強く、化学的に安定であるため、その寿命は10万時間(約10年)と長い。

照明器具の発光効率は、一般に消費電力(1W:ワット)当たり、どれだけの光(lm:ルーメン)を出すかで表すランプ効率(lm/W)を用いる場合が多い。

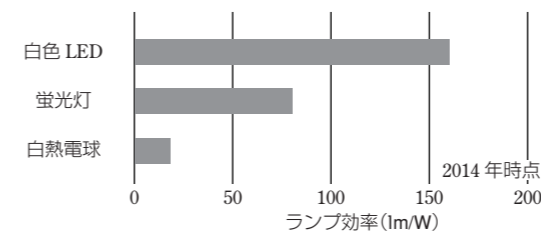


図4 白熱電球・蛍光灯・白色LEDの効率比較

白色LEDのランプ効率は図4のように白熱電球や蛍光灯のそれに比べ約6倍および約2倍高い<sup>5)</sup>。例えば、1000lmの光量を得るためには白熱電球では55W程度の電力が必要であるが、白色LEDでは6W程度で済む。一般に、人類が使用している電力のうち15%が照明によるものであるため、全ての白熱電球が白色LEDに置き換わることで約10%程度の電力を削減できるので、省エネルギーデバイスの切り札としてその普及は急速に進んでいる。

### 3. LEDの動作原理と開発経緯

次に、LEDの動作原理について説明する。現在実用化されているLEDは、半導体pn接合ダイオードである。半導体材料は、一般的に構成原子が周期的に規則正しく配列している。周期的に並んだ原子核と各原子の電子軌道間の相互作用により、電子が存在できるエネルギー帯(許容帯)と存在できないエネルギー帯(禁制帯)が形成されている。一般に、半導体では電子が詰まった一番上の許容帯を価電子帯、禁制帯を挟んで価電子帯の上にある空の許容帯を伝導帯と呼ぶ。半導体結晶は構成元素に対して、不純物をppm以下にすることが必須な技術であり、それによって特異な電気伝導性を持つことが可能である。

この高純度な半導体結晶中に、微量の不純物を添加(ドーピング)して熱平衡状態における価電子帯の電子を減少させて正孔(プラスの電荷)を生じさせたものをp型半導体、伝導帯に電子を生じさせたものをn型半導体という。このp型半導体とn型半導体を原子的に接触(接合)したものをpn接合と呼ぶ。pn接合を形成すると、正孔と電子がそれぞれn型層、p型層に向かって拡散し、n型領域では正に帯電した不純物原子が空間電荷として残り、p型領域では負の空間電荷が残ってエネルギー帯の位置がずれるため、接合部界面ではバンドが傾斜する。この接合界面に形成される空間電荷層のことを一般に空乏層と呼ぶ。空乏層は抵抗が高いため印加電圧はほぼこの部分に加わる。pn接合に順方向電圧を印加するとn型層から電子が、p型層から正孔が空乏層に注入される。

その電子と正孔が空間的に出会うと、伝導帯の電子は価電子帯に遷移する。これが再結合と呼ばれる現象である。電子は禁制帯幅に相当するエネルギー

を失うが、これを光として放出する場合を発光再結合という。量子力学では光のエネルギー  $E$  [J] は次の式で表される(プランクの式)<sup>6)</sup>。

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

ここで、 $\lambda$  [m] は光の波長、 $c$  [m/s] は光の速さ、 $h$  [J·s] はプランク定数である。この式より、再結合にもなって放出するエネルギーが大きくなると、それによって放出される光の波長は短くなる。したがって、LED から放出される光は、半導体材料の持つ禁制帯のエネルギー幅に依存する。発光素子用半導体としては図5に示す13族と15族の化合物で構成されたものが半導体の性質を示し、発光特性に優れている。半導体材料の禁制帯のエネルギー幅は一般に周期律表の上にある原子を用いると大きくなり、周期律表の下側にある材料を用いると小さくなる傾向がある。

一般に人間の目は赤色・緑色・青色に対して反応する3種類の神経で色の識別を行っていることから、この3色を光の3原色と呼ぶ。各色を組み合わせたときに、どのような色になるかを座標を用いて表したものを色度図という。色度図は1931年に国際照明委員会(CIE)が策定した国際表示法である。この図を見ると、例えば光の3原色である赤色・青色・緑色を適当な光強度で組み合わせると白色や他の色が表現できることが分かる。また、先述のように青色LEDと黄色蛍光体を組み合わせると白色が実現できることも、色度図から分かる。

図5に示したように、15族のリンもしくはヒ素を用いたAlGaAs系材料やAlGaInP系材料では、波長の長い赤色や橙色は実現できるが、波長の短い青色は実現できない。一方、窒素の化合物であるAlGaInN系材料は混晶の組成(Al, In, Gaのモル比)を変化させることによって紫外線から可視光全領域、さらには赤外線まで放出することができる。可視光LEDは1962年にホロニャックらによってGaAsP(ヒ化リン化ガリウム)を用いた赤色LEDが発明され<sup>7)</sup>、その後GaP(リン化ガリウム)を用いた黄緑色LEDなどが1960年代に実用化された。その一方で、青色LEDは1960年代後半から盛んに研究されていたが、実用化レベルの高輝度青色LEDはその後約20年実現されなかった。

先述のように、青色は光の3原色であると同時に

12族	13族	14族	15族	16族
	B ホウ素	C 炭素	N 窒素	O 酸素
	Al アルミニウム	Si ケイ素	P リン	S 硫黄
Zn 亜鉛	Ga ガリウム	Ge ゲルマニウム	As ヒ素	Se セレン
Cd カドミウム	In インジウム	Sn スズ	Sb アンチモン	Te テルル
Hg 水銀	Tl タリウム	Pb 鉛	Bi ビスマス	Po ポロニウム

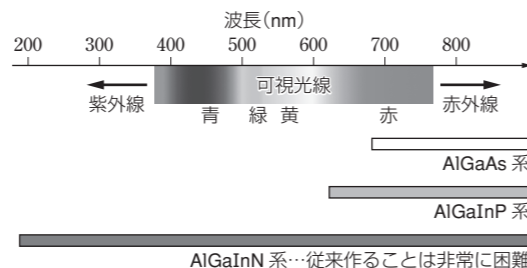


図5 発光材料に用いる元素および各材料で実現できる光の波長。青色LED用材料としてはAlGaInN系が用いられる

黄色蛍光体を使うことによって白色が出せる。したがって、LEDが第4世代の光となるためには必須の光である。半導体結晶は原子が規則正しく配列しており、高性能なLEDを実現するためには、その配列が全く乱れなく作製されていることが不可欠であるが、青色LEDの材料となるGaNやInGaInはそのような半導体結晶を得ることが困難であった。また、先述のように高性能なLEDを実現するためにはpn接合を実現することが不可欠であるが、GaNやInGaInのp型伝導を得ることは非常に難しく、また禁制帯幅が広い半導体では、p型もしくはn型のどちらかが実現できないという理論予測した学術論文も存在し、1970年代後半にはGaNを用いた青色LEDを研究しているのは赤崎博士のグループのみになってしまった。

赤崎博士は、そのような状況下でもしGaNの高品質結晶(原子が規則正しく配列した結晶)が実現できれば、pn接合も実現できると信じ研究に打ち込んだ。そしてその問題を打破したのが、赤崎博士および当時大学院の学生であった天野博士らが開発した低温バッファ層技術である。この手法は、通常GaInは1000℃程度で結晶を作製するのが最適であると言われて長年その付近で結晶が作製されてきた。両博士は、図6に示すように、サファイア基板上に低温(500~600℃)で堆積した窒化アルミニウムの

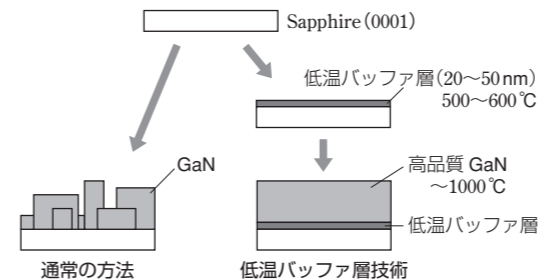


図6 GaN系青色LEDを実現するためのブレイクスルーとなった低温バッファ層技術の概略図

薄膜層を介して窒化ガリウムを積層するという画期的な方法を用いることによって、高品質な結晶を実現可能であることを発見した<sup>8)</sup>。この技術は、後に低温バッファ層技術と呼ばれ、現在市販されている青色LEDには必須の技術として用いられている。

さらに、両博士はこの高品質結晶に微量なマグネシウムを添加し、さらに電子線を照射することによってp型伝導が実現できることを発見された<sup>1)</sup>。そして、1989年に世界初のpn接合型窒化ガリウム系青色LEDが発明された<sup>1)</sup>。これらの多くのブレイクスルーを経て、中村博士らは、1989年から窒化ガリウムによる青色LEDの開発に携われ、窒化ガリウムにおいてp型伝導がなぜ実現できなかったのかのメカニズムの解明、さらには電子線照射に変えて熱処理という量産性に適した方法を開発された<sup>9)</sup>。さらに、1990年に当時NTTに在籍していた松岡博士(現:東北大学)らによってGaIn上に高品質InGaInを作製する技術が報告された<sup>10)</sup>。その技術を最適化することで高品質InGaIn結晶が中村博士らによって実現され、それを用いることで青色LEDの高輝度化が実現し、日亜化学工業(株)から青色LEDが販売され現在に至っている。

#### 4. LEDの今後の期待

既に述べてきたように、GaIn系LEDの性能は開発当初から急速に発展している。1989年にGaIn系青色LEDが発明後、多くの研究者・技術者・学生の貢献によって、青色LEDさらにはそれを用いた白色LEDの性能は急速に向上している。図7は研究室レベルでの白色LEDのランプ効率のロードマップである。これを見て分かるように、白色LEDが実用化された1996年当時に比べて、白色LEDは約30倍以上の効率の向上が達成されている。また、

2014年現在でのランプ効率は250lm/Wまで到達している。今後、さらなるブレイクスルーによってこれが増大していくことが期待されている。

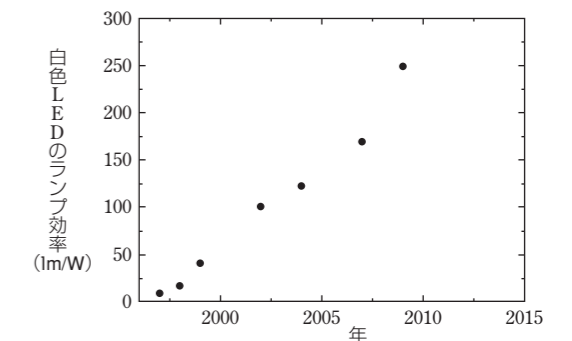


図7 白色LEDのロードマップ

#### 参考文献

- 1) H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu, and I. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys. 28, L2112 (1989).
- 2) S. Nakamura, T. Mukai and M. Senoh, Appl. Phys. Lett. 64, 1687 (1994).
- 3) 城阪俊吉『エレクトロニクスを中心とした年代別科学技術史(第5版)』日刊工業新聞社, 2001年.
- 4) H.J. Round, Electr. World, 49, 308 (1907).
- 5) [http://www.led.or.jp/led/led\\_efficiency.htm](http://www.led.or.jp/led/led_efficiency.htm)
- 6) M. Planck, Annalen der Physik 4, p. 553 ff (1901).
- 7) N. Holonyak and S. F. Bevacqua, Appl. Phys. Lett. 1, 82 (1962).
- 8) H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda, Appl. Phys. Lett. 48, 353 (1986).
- 9) S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh and N. Iwasa, Jpn. J. Appl. Phys. 31, L139 (1992).
- 10) T. Matsuoka, H. Tanaka, T. Sasaki and K. Katsui, Inst. Phys. Conf. Ser., 106,141 (1990).