

ワイドバンドギャップ半導体 発光デバイスの進展

藤田 静雄

半導体発光デバイスの 発明から応用へ

1907年にイギリスのH. J. Round氏が、SiC結晶に電圧を印加したときに発光することを発見し¹、これが発光ダイオード(LED)やレーザダイオード(LD)へと続く研究開発の起源と考えられている。その後、ソ連のO. V. Losev氏は整流ダイオードからの発光を見出し、1927年にはLEDとして論文発表している²。1954年には直接遷移型半導体であるGaAsバルク単結晶の育成が始まり、また、エピタキシャル結晶成長が盛んになり、1962年にアメリカのN. Holonyak Jr.氏が赤色LEDの開発に成功した³。しかし、その外部量子効率⁴は0.01%と低く、実用化に向けた一層の飛躍が必要であった。

当時の結晶成長技術は液相成長法であり、化合物半導体の結晶成長における化学量論的組成(ストイキオメトリ)を制御して、また、欠陥の少ない高品質の結晶を得ることが困難であった。これに対し、1969年に蒸気圧制御温度差法が東北大学の西澤潤一氏によって発案され、欠陥の少ない高品質の化合物半導体結晶が得られるようになり^{4,5}、高輝度赤色および緑色LEDの実現をもたらした。これは商品化につながり、スタンレー電気は1976年に60 mcdという当時世界一の明るさを持つ「高輝度赤色LED」の連続製造技術の開発に成功し⁶、さらに1979

年にGaP結晶を用いた「高輝度純緑色LED」(80 mcd)を発表した。その後1984年には5000 mcd赤色LED、200 mcd緑色LED、500 mcd黄色LEDが開発されるに至り、LEDを用いたディスプレイが実用化した。

LEDの開発は並行してLDの進展を生んだ。1970年に米国ベル研究所の林巖雄氏、M. B. Panish氏、ソ連のZhores Alferov氏らが、ほぼ同時期にAlGaAs/GaAsダブルヘテロ接合構造半導体LDの室温連続発振に成功した。そして、1982年にはシャープ(株)がCDプレーヤ用赤外LDを実用化し、プレーヤの生産が開始された。LDはまた光通信・光情報処理の基盤デバイスで、1977年に東京工業大学の伊賀健一氏が高出力化を可能とする“VCSEL”の提案・デバイス開発を行い、また、1982年には東京大学の榊裕之氏、荒川泰彦氏らが量子ドットレーザーを提案するなど、我が国が世界に先駆けた貢献をなしている。

ワイドギャップ半導体による 青色発光デバイスの開発

赤色、緑色LEDの開発を受け、青色LEDの開発が次の大きなターゲットとされたものの、ここに大きな困難が待ち受けていた。青色発光を実現しうる広いバンドギャップを持つ半導体材料としては、SiC、GaN、II-VI族化合物

(ZnSe、ZnSなど)が候補とされ、大きな期待を受けた研究開発が行われた⁷。SiCは古くからpn伝導性制御が可能で青色発光も見られていたが、間接遷移型のバンド構造を持つことが高輝度LEDへの応用に不利とされた。GaNとII-VI族化合物は直接遷移型であるが、大型基板がないこと、原料の蒸気圧が高く欠陥が生じやすいこと、p型伝導性制御が困難であること、など克服すべき課題が多かった。II-VI族化合物については、1983年には蒸気圧制御温度差法によりZnSeのpn接合青色LEDが示され、また、GaAsやGaP基板と格子整合することから、分子線エピタキシ(MBE)等の制御性に優れた結晶成長法によって平坦性に優れた結晶層、量子井戸構造等が実現された。1990年にMBEによるp型ZnSeの実現、1991年に青緑色LDの77Kパルス、その後連続発振、1993年にLDの室温連続発振、といった成果が連続し、多くの研究者の注目を受けることになった。しかし、その後デバイスの短寿命を克服することができず、また、1993年にGaNを用いた光度1 Cdクラスの青色LEDが商品化されたこともあり、研究規模が急速に縮小した。

これに対し、GaNによる青色LEDは急速な関心を集めるようになり、その基盤をなした新規物理の発見、解明、創出が2014年のノーベル物理学賞につながったのである。図1に青色LEDの基本構造を示す。これはバンドギャッ

プが青色に対応するInGaNに電子-正孔を閉じ込めて高効率の発光を実現しようとする、基本的なダブルヘテロ(double hetero)構造である。LEDを実現するために重要な要素技術として、(i) サファイア基板上に結晶性が優れたGaN層を成長する技術、(ii) p型層を得るためのドーピング技術、(iii) 高効率の発光を得るために高品質InGaN発光層を実現する技術、があげられる。(i) については、AlNバッファ層を導入するという赤崎勇氏のアイデアを元に、低温成長により天野浩氏がこれを実証したものである。(ii) については、天野氏がアクセプタドーピングの実験中に、電子線励起によるアクセプタの活性化を発見したことがきっかけとされている。(iii) については、青色発光に寄与す

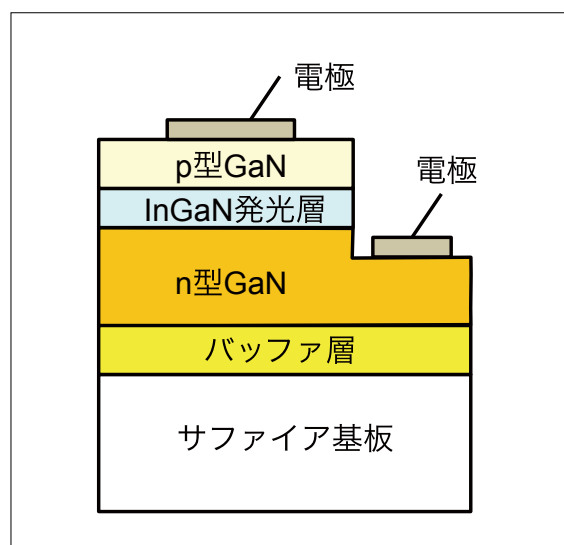


図1 サファイア基板上GaNをベースにした青色LEDの基本構造。

PROFILE

藤田 静雄 (ふじた しずお)
京都大学大学院工学研究科光・電子理工学教育研究
センター教授
専門：先進機能電子材料・プロセス・デバイス



る高品質のInGaN発光層を、two-flow成長法によって実現可能という物理を発見した中村修二氏の成果とされている。さらに中村氏は、将来の商品化に効果的な技術として、(i) に対してGaNバッファ層を用い、(ii) に対してN₂雰囲気中での熱処理を採用した。これらにより青色LEDの実用的な生産プロセスが確立し、大量生産への道が拓けることになった。

青色LEDをベースとして白色LEDが実用化されたことは、照明の革命を起こしたと言われる大きな波及効果をもたらした。ノーベル物理学賞の受賞理由として“for the invention of efficient blue light-emitting diodes which has enabled bright and energy-saving white light sources”とされていることは、莫大な省エネルギーを達成した、地球への貢献を高く評価さ

れているためと言えよう。

ワイドギャップ半導体 発光デバイスの今後

GaNとInNの混晶であるInGaN、あるいはAlNとの混晶であるAlGaInは、それぞれGaNに比べて小さい、あるいは大きいバンドギャップを持つ。これにより紫外から赤外まで任意の発光波長を持つLEDが実現できることが示唆される。図2は各種LEDの発光波長と外部量子効率の関係をもとめたものである⁸。InGaN発光層を用いた波長440 nm付近のLEDが最も高い発光効率を持つ一方で、緑色領域および紫外領域において発光効率が低くなる。ここにはさまざまな不明な物理や克服すべき課題が多く含

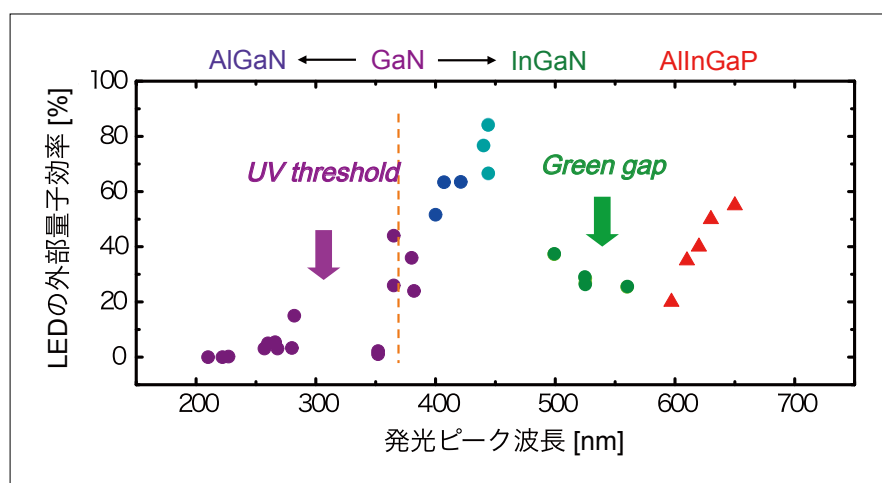


図2 各種波長のLEDについての発光効率（外部量子効率）。
赤色LEDはGaN系半導体ではなく、AlInGaPを用いたものである。

まれており、中村氏、天野氏ともに「すべての波長で効率100%のLEDを目指すことが次の仕事」と語っておられた。赤崎氏、天野氏は加圧下で結晶成長を行う技術を開発し、これにより高品質の結晶を得ることが一つの方法として研究を進めておられる。また、高

出力の白色LEDの実現にとっては、図1のようにサファイア基板を用いて電流を横に流す構造ではなく、導電性のGaN基板を用いて電流を縦に流す構造が望ましいが、大面積で高品質のGaN基板が必要になる。中村氏と天野氏は、この基板の開発にも注力した研究を進めておられる。このように、発光デバイスの今後の進展はさらに広範に広がることが予想される。

さらに、今回の三名の受賞者がなしえた成果は、今後、照明に留まらない大きな波及効果につながることに注目すべきである。青色LEDの開発は、半導体としてのGaNのポテンシャルを明らかにした。そしてそれがいまやLEDにとどまらない波及効果をもたらすことが明らかになり、この分野の国際会議では1,000名以上の参加者を集める広大な学術分野を形作ることになった。すなわち、GaNの応用分野は照明の分野に留まらず、今後、電力制御のためのパワーデバイス、超高効率太陽電池、光触媒などへの広がりを見せ、環境負荷の少ない社会の創成に大きく寄与して行くと期待される。青色LEDを生み出した三氏の成果は、今後の地球のいのちに貢献してゆくと言っても過言ではないであろう。

参考文献

- [1] H. J. Round, *Electrical World* **49**, 308 (1907).
- [2] V. Losev, *Telegrafi ya i Telefoniya bez Provodov* **44**, 485 (1927), cited in N. Zheludev, *Nat. Photonics* **1**, 189 (2007).
- [3] ゼネラル・エレクトリック・カンパニー, GE reports, 2012年8月15日.
- [4] J. Nishizawa, Y. Okuno, and H. Tadano, *J. Cryst. Growth* **31**, 215 (1975).
- [5] J. Nishizawa, K. Suto, and T. Teshima, *J. Appl. Phys.* **48**, 3484 (1977).
- [6] 新技術開発事業団委託開発「発光ダイオードの連続製造技術」1972年10月～1976年4月.
- [7] 藤田茂夫, *応用物理* **54**, 40 (1985).
- [8] 藤田静雄, *応用物理* **82**, 836 (2013); 京都大学川上養一教授の提供による.