

LED（発光ダイオード）からLD（半導体レーザー）へ —未来の光源としての期待—

名城大学理工学部材料機能工学科 教授 竹内 哲也

1. はじめに

2014年ノーベル物理学賞が、赤崎勇先生、天野浩先生、そして中村修二先生の高効率青色発光ダイオード（Light Emitting Diode：LED）の発明に対して贈られたことは未だ記憶に新しい。現在、この青色LEDと蛍光体を組み合わせた白色光源は至る所で利用され、省エネルギー社会実現の一翼を担っている¹⁾。

近年、LEDを凌駕する光源として期待されているのが半導体レーザーであり、レーザーダイオード（Laser Diode：LD）とも呼ばれる。本資料では、このLDにおける未来の光源としての可能性について紹介する。まず、LDの有する特徴を、LEDとの発光原理の違いを示しながら説明する。続いて、LDが利用されている応用先、そして今後利用が期待されている応用先を紹介する。さらに、筆者らが名城大学で進めているLDに関する研究成果について説明する。

ところで、筆者らは、高校生に向けてLEDを用いた模擬講義・実験も行っている。この機会に、その様子も紹介させていただく。

2. LDの特徴

LDとLEDで大きく異なる点は、電気エネルギーを光エネルギーに変換する際に、光を積極的に利用しているか、いないか、であろう。LEDの発光原理は、花火でみられる炎色反応に近い。炎色反応では、金属原子内の電子が熱エネルギーを受け取って高いエネルギー準位に移動し、その電子がもとの低いエネルギー準位に戻る際に、受け取った熱エネルギーを光エネルギーとして放出する。LEDでは、電源と接続することで、半導体内の低いエネルギー準位の電子がLEDから取り出され、電源にて電気エネルギーを受け取る。そのエネルギーの高い電子が半導体内に注入され、半導体内の高いエネルギー準位から低いエネルギー準位へと遷移することで電気エネルギーに相当する光エネルギーが放出される。これが発光として観察され、この光の放出を「自然放出」と呼ぶ（図1(a)）。

一方、LDでは、対向する一組の鏡が発光部の両側に配置されている（素子に作り込まれる）。この一組の鏡は共振器と呼ばれ、発光部より放出された自然放出光は、対向配置された鏡で反射し、共振器内を周回する。すなわち、この発光部を含む共振器内にしばらく溜まるこ

とになる。LEDでの自然放出では、“自然”に電子が高エネルギー準位から低エネルギー準位へと遷移するが、共振器内の発光部のように、高いエネルギーを有する電子だけでなく、光も多く存在する場合、その光が、次の電子の遷移を“誘導”する。この電子の遷移に伴う光の放出を「誘導放出」と呼ぶ(図1(b))。つまり、ひとつの光が入射光となって、次の光の放出を誘導し、この現象が連鎖反動的に生じるとレーザー動作として観測される。

このように、レーザーにおける発光原理は共振器を用いて光を積極的に利用することによって得られる。誘導により次々と発光することから、注入電流量が多い場合でも光への変換効率が高いことが特徴である。さらに、誘導放出された光は、誘導した光と同一の性質を有する、つまり、波長、位相、そして進行方向など、全ての特性が揃っている。このようにレーザーでは、自然界には存在しない、極めて制御された光を発生させることが可能である。そして、この制御された光は、すでに様々な分野にて利用され、また、その応用分野のさらなる拡大が期待されている。

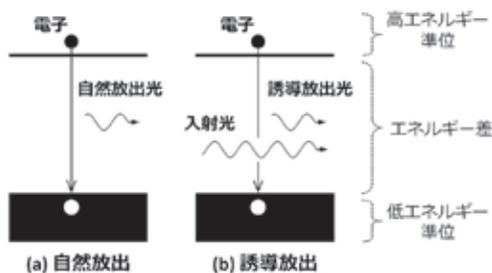


図1 自然放出と誘導放出

3. LDの応用先

LDは我々の社会に広く浸透しており、最も代表的な例は、1.3～1.5 μm という長い波長帯で動作するLDと光ファイバー、受光素子を組み合わせた光通信システムである。今では大陸間を結ぶ地球規模で設置され、大容量高速通信が可能である。筆者が大学を卒業した頃(1989年)に、光ファイバーによる海底ケーブル(当初、約4千回線分の能力)が利用され始めた。当時の国際電話は音声に遅延が生じて会話しづらく、相手との距離を如実に感じたが、今では、その容量は約8億回線相当にまで増強され、そのような遅延は全く感じない。そして、今や通信の主流は、インターネットなどのデータ通信である。この光通信システムは各家庭にまで入り込み、オンデマンドなどの大容量コンテンツを自宅で気軽に楽しむことが可能になっている。

別の応用例は、CDに端を発する光メモリーである。筆者が中学生の頃に、CDプレーヤーなるものが発売され、その数年後に実際に手にすることができるようになり始めた。それまでのレコード盤と針の直接接触によるアナログ技術から、CDと波長780 nmの赤外LDの非接触によるデジタル技術への移行は極めて大きなインパクトがあった。その後、レーザー光源の波長を短くすることで、集光によるスポットサイズのさらなる微小化が可能になり、データ容量はCDの0.7 GBからDVD(波長650 nm赤色LD)の4.7 GB、そしてblu-ray(波長405 nm紫色LD)の25 GBへと発展した。

上述した応用では、主にレーザーの同波長、同位相(コヒーレンシーという)という特性が利用されている。現在では、この特性に加えて、高効率化や短波長化などが推し進められ、照明、ディスプレイ、エネルギー、加工、そして環境分野などの新しい分野での応用が期待されてい

る。以下に、その具体例を挙げる。

LDを利用した車載用ヘッドライトが、すでに一部実用化されつつある。レーザー光の高い直進性を利用することで、数100m先まで照らすことができ、夜間の交通事故を大きく減らすことに貢献すると思われる。

さらに、もともと小型であるLDを用いることで眼鏡に据え付けられる超小型プロジェクタが実現し、デジタル機器で唯一大型化が進んでいるディスプレイも小型省電力化が大幅に進むであろう。

また、さらなる高効率化が進めば、そのビームの直進性により、レーザー光をエネルギーとしてケーブルレスで送電する光無線給電が期待されている。災害時の孤立集落への緊急送電、あるいはドローンや電気自動車への無線給電の一手法として注目を集めている。

さらに、高効率化と高出力化が実現すれば、デスクトップサイズのレーザー加工機も視野に入ってくる。現在は、炭酸ガスレーザーなどの大型レーザーを用いているため、装置サイズは大きいですが、小型であるLDで可能になれば、いわゆる3Dプリンタと肩を並べるデスクトップ型加工機として、多品種少量生産という要求に答えられる生産設備として発展していくと考えられる。

最後に、これまでに実用化されたLDで最も短い波長は370nm付近であるが、これを270nmまで短波長化できれば、照射するだけでウイルスや菌を死滅させることが可能なLDとなり得る。空港や駅など不特定多数の人が行き交う場所で、そのレーザー光を広範囲にスキャンすることで容易に殺菌が実現する。

上記のような応用は、省エネルギー社会のみならず、安心・安全な社会を実現するための応用であり、こうした応用分野へ適用できる新しいLDの実現が望まれている。

4. 名城大学におけるLDの研究開発

名城大学では、1995年に電流注入による青色領域での誘導放出を世界で初めて実証し、2004年には、世界最短波長（当時：350.9nm）LDを実現した。最近では、LDの高効率化と高付加価値化を求めて、紫色領域で発光する面発光レーザーの研究を遂行している。面発光レーザー（図2（a））は、半導体ウエハ面に対し垂直方向（通常のLD（図2（b））はウエハ面に対し平行方向）に光を放射する。上述した共振器が縦方向、すなわち鏡がウエハを挟んで上部と下部に存在し、光が薄いウエハ内を上下に周回する構造である。1977年に東工大の伊賀健一先生によって発明されたLDであり、青色LEDと同様、日本発の技術である。面方向に光が放出される、共振器が薄いことから、消費電力が低く、ビーム形状が真円であり、二次元にアレイ状に多数配置することが可能などの付加価値を備え、上述した応用では、二次元アレイ光源によるアダプティブヘッドライトや網膜走査型ディスプレイ、さらに可視光通信やプラスチックファイバ用光源として期待される。

blu-ray用光源として紫色LDが実現したにも関わらず、紫色面発光レーザーがなかなか実現しなかった最大の理由は、共振器上下部の反射鏡、とくに下部の反射鏡を発光部と同じ半導体で形成する技術が未熟だったためである。そこで、半導体結晶による反射鏡形成を避け、誘電体などの異なる材料による反射鏡を利用した手法が試みられてきた。ただし、この方法では、高い反射率が容易に得られるものの、素子全体を形成する工程が煩雑にならざるを得ない。筆者の恩師でもある赤崎先生の教えは、「良いデバイスは良い結晶から」である。青色LEDの実現は赤崎先生および天野先生の低温堆積バッファ層による高品質窒化ガリウム半導体結晶の



図2 面発光レーザーと端面レーザー

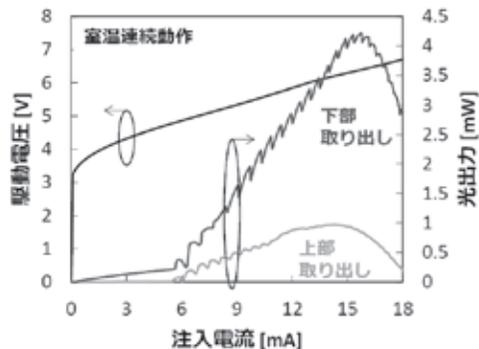


図3 面発光レーザーと端面レーザー

実現から始まった。我々は、この教えに従って半導体結晶だけで高反射率を実現する反射鏡の検討を進めてきた。結晶成長条件および反射鏡構造の地道な最適化により、99%を超える反射鏡が半導体結晶だけで実現した。さらに、その反射鏡を下部反射鏡として利用することで、2017年時点での世界最高出力4.2mWとエネルギー変換効率5%を実証した(図3)。発振波長は410nmである(図4)。一方で、マウスなどに利用されている赤外光を放出する面発光レーザーでは、エネルギー変換効率60%以上が実証されており、それと同等の性能実現に向けたさらなる改善が期待されている。

こうした研究活動を進める一方、高校生にも、半導体結晶が光り輝く魅力とともに、科学技術の興味深さを改めて認識してもらうために、高校に出向いて模擬講義および模擬実験を行っている(図5(a))。実験内容は、研究室で結晶成長したLEDウエハをこちらで用意し、そのウエハをガラス切りやピンセットなどの簡単な工具で、自らの手で加工、電極形成し、直後に乾電池により電流を流して発光させる、という内容である(図5(b))。乾電池を繋ぐと、ウエハにおいて電流が流れた部分のみ青く発光することを直接観察することができる。このような活動を行うことで、少しでも科学技術に興味をもってもらい、次世代を支える技術者創出のきっかけになれば幸いと考えている。なお、この模擬実験は名城大学が提唱している基本戦略

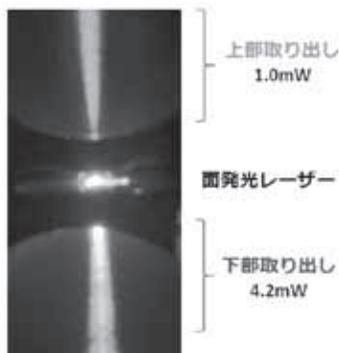


図4 面発光レーザーが動作している様子

MS-26の一環としても遂行されており、実験に必要な部材の費用を名城大学が捻出していることを付記しておく。



(a) 模擬講義の様子



(b) 発光するウエハ

図5 模擬講義と発光するウエハの様子

謝辞

日頃より共同で研究を進めて下さっている名城大学赤崎先生、上山先生、岩谷先生に感謝致します。ここで紹介した研究成果は、松井健城君（博士）をはじめとする多くの名城大学大学院の学生の実験により得られたものです。また、その成果の一部は、文科省私立大学研究ブランディング事業（2016 - 2020）、基盤研究 A（17H01055）、新学術領域研究（16H06416）の支援を頂きました。

参考文献

- 1) 板東完治, 「LED の技術とその応用について」工業教育資料 366 号

5. おわりに

本資料では、高効率青色 LED を凌駕し、未来の光源として期待される青色レーザーダイオードについて記載した。LED と比較しながら、LD の発光原理、特徴をわかりやすく説明した。続いて、その原理に基づく LD の特性を活かした応用について、すでに実用化された例、今後期待される例に分けて紹介した。さらに、名城大学で進めている紫色面発光レーザーの開発状況について、赤崎先生の教えに沿った方針で進めることで、世界最高性能を実証したことを紹介した。