

# ≡ ≡ ≡ 総 説 ≡ ≡ ≡

## 青紫色半導体レーザーの最新動向

### Recent Progress of Bluish Purple Semiconductor Lasers

山崎 史郎 永井 誠二 小島 彰 渡辺 大志 小池 正好

#### 1. はじめに

アインシュタインが誘導放出の理論を打ち立て、研究者達の執念によってレーザー光線は実現した。自然界には存在しなかった“魔法の光”が人の手によって初めて世に作り出された。

今日、光ファイバーが全世界を覆い尽くし、インターネットの通信網が私たちの身近なところまでやってきた。

光通信の要の一つが、半導体レーザーである。髪の毛のように細いガラス繊維の中を飛び交うデジタル信号を運んでいるのは赤外線レーザーである。

赤外線は目に見えない。研究者達は、目に見える光（可視光）の半導体レーザーを作ろうと血みどろの開発に取り組み、終に赤色半導体レーザーを完成した。

赤色半導体レーザーは、私達の身の回りで活用されている。レーザーポインタ、バーコードリーダー、DVD (Digital Versatile Discs) など便利なものが沢山出来た。

赤崎 勇教授（名古屋大学名誉教授）による画期的な発明である低温堆積緩衝層という非常に優れた結晶成長法<sup>1)</sup>により、サファイア基板上に平坦で高品質のGaN（窒化ガリウム）結晶が得られるようになった。これによりドーピングでのp型やn型の導電性制御<sup>2)</sup>も可能になった。

我々は、上述の基幹技術をもとに多重量子井戸構造 (Multi Quantum Well: MQW) の超薄膜多層技術を実現し、高光度青／緑色LEDの開発を成功させた<sup>3)</sup>。青色LEDの技術を更に進化発展させた究極の光デバイスとして青紫半導体レーザー (Semiconductor Lasers: LD) がある。レーザー一般の特性と歴史の概説を踏まえて開発最前線の

最新動向を紹介する。

#### 2. 半導体レーザーとは？

##### 2-1. レーザとは？

レーザーは、誘導放出による光増幅、即ち Light Amplification by Stimulated Emission of Radiationの頭文字をとったLASERが語源であり、極めて特殊な光を作り出す装置である。

自然界に存在する光（自然光）は図1（上図）のように種々の波長で不揃いな位相を有する波が集まったものである。

レーザー光は図1（下図）のように「方向、位相、波長の揃った人工の光」で極めて強烈的な（エネルギー密度が高い）、遠くまで一直線に走る（指向性が高く、ほとんど広がらない）。

レーザーは、光を発生させる材料（媒体）によって、固体レーザー、気体レーザー、液体レーザーに分類される。半導体レーザーは固体レーザーの一種である。

半導体レーザーの特徴は小型軽量、低価格、高エネルギー効率である。

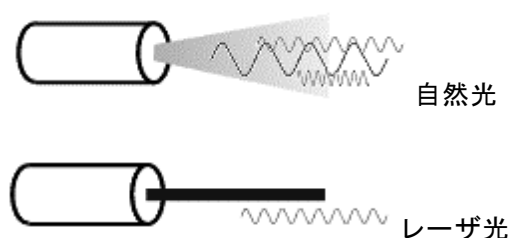


図1. 自然光とレーザー光の違い

## 2-2. 半導体とは？

半導体とは、導体と絶縁体との電気抵抗を持つ物質のことであり、例としてSi, Ge, CdS, GaAs, GaN等が挙げられる。

この半導体の構成元素を規則正しく並べた結晶中に、極微量の他元素を添加することにより、電気を運ぶ担体が電子であるn型半導体と、正孔であるp型半導体の二種類が作製可能である。

これら二種類の半導体を組み合わせることにより、整流作用を持つpn接合ダイオードや、増幅作用を持つnpn型トランジスタが作製可能である。

## 2-3. 半導体レーザーとは？

pn接合ダイオードの順方向に電流を流すと、電子が伝導帯に上がり、その電子が再び価電子帯に落ちて正孔と結合する。その際、その半導体のバンドギャップエネルギーに相当する波長の光が発生する。その光を外部に取り出したのが発光ダイオード (Light Emitting Diode : LED) である。

半導体レーザーも、発光ダイオードと同じくpn接合ダイオードであるが、前述の「方向、位相、波長の揃った人工の光」にするためには、以下の3要件が必要不可欠である。

### 1) 反転分布

熱平衡状態にある半導体においては、電子はエネルギーの低い安定な価電子帯に詰まっている。光の照射や順方向電流により、電子はエネルギーの高い伝導帯に励起される。伝導帯に励起された電子数が価電子帯にある電子数を上回り、価電子帯に多くの正孔がある強励起状態を反転分布という。

半導体レーザーでは順方向電流を流すことによって反転分布を実現できる。

### 2) 光共振器

光共振器は通常2枚の平行鏡からなるファブリーペロ構造で構成される。反射鏡面は結晶のへき開、または、ドライエッチングにより形成される。

### 3) 高い光利得

レーザー発振が起こるためには、光利得が光損失と釣り合う必要がある。

光損失には、反射面から透過率分の光が外に放出される反射損失と、光共振器を構成する半導体の吸収による吸収損失がある。

この二つの損失に打ち勝つ光利得を得るため、活性領域の半導体は、発光再結合効率の高い直接遷移型バンド構造を持つ必要がある。

## 2-4. 半導体レーザーの歴史

半導体レーザーのアイディアは、1957年東北大学の渡辺・西沢両教授によりはじめて提案された。

1962年に最初のレーザー発振が $-196^{\circ}\text{C}$ においてGaAsで確認された。実用的見地から重要なのは、1970年におけるソ連のAlferovらと米国ベル研究所の林らによるGaAs-AlGaAsダブルヘテロ構造を用いた室温連続発振の達成である。

その後、半導体レーザーは各方面からの多大な努力により著しい発展を遂げ、現在では代表的な光エレクトロニクスデバイスの1つとして多くの分野で実用されている。

## 3. レーザの応用

### 3-1. 光通信

光通信は高度情報処理社会を構築するための基幹技術として、近年急速に拡大してきた。図2に示すように光通信は、光源、伝送媒体 (光ファイバ)、検出器の3つの要素から構成されている。光源には小型で高速直接変調が可能な半導体レーザーが用いられている。現在、光通信に適応されている半導体レーザーは、 $0.8\mu\text{m}$ 帯のAlGaAsレーザーと $1.3, 1.5\mu\text{m}$ 帯のInGaAsPレーザーの赤外線レーザーである。

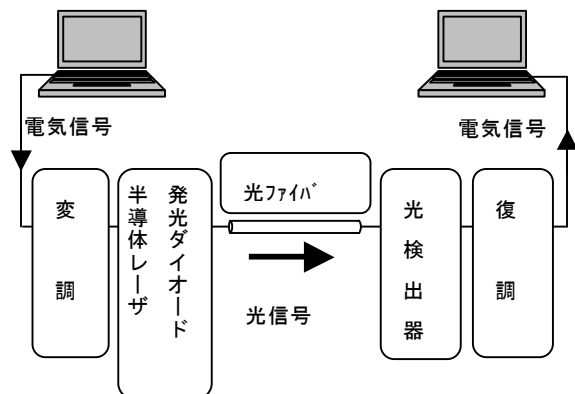


図2. 光通信概略図

### 3-2. レーザプリンタ

レーザプリンタ装置の基本構成を図3に示す。レーザプリンタは、レーザ光によって印刷情報を光導電体書き込み、電子写真方式によって印刷画像を得る印刷装置である。光源に半導体レーザを使用することにより、高速・高解像の印字が可能、感光紙のような特殊な用紙を必要としない等の優れた性能を持つ。

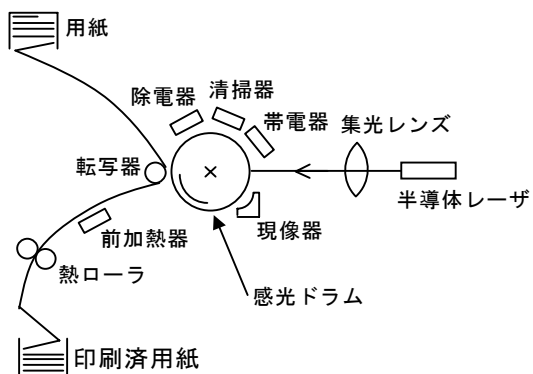


図3. レーザプリンタ装置の基本構成図

### 3-3. 光ディスク

レーザ光は集光することにより波長程度の微小スポットに絞り込むことが可能で、光ディスクはこの集光ビームを利用して情報の書き込み、読み出しを行う光情報機器である。図4に示すように情報はディスク上に形成された1μm程度のピット（穴）の配列として記録され、情報の記録再生には1~2μm程度に集光されたレーザ光が用いられる。光ディスクは、再生専用型（CD, DVD）、追加記録型（CD-R, DVD-R）、可逆記録型（CD-RW, DVD-RW）に分類される。

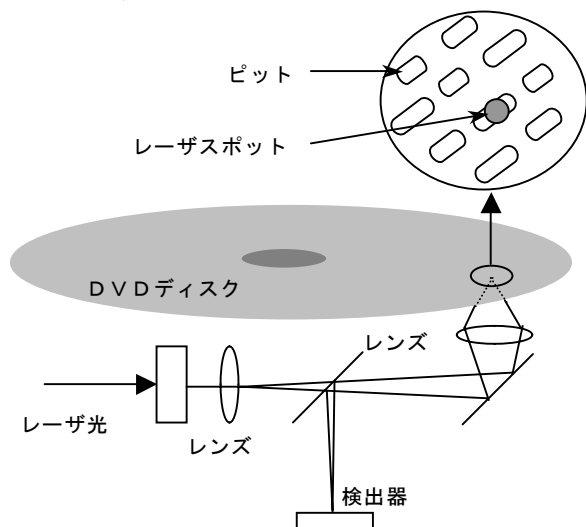


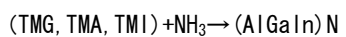
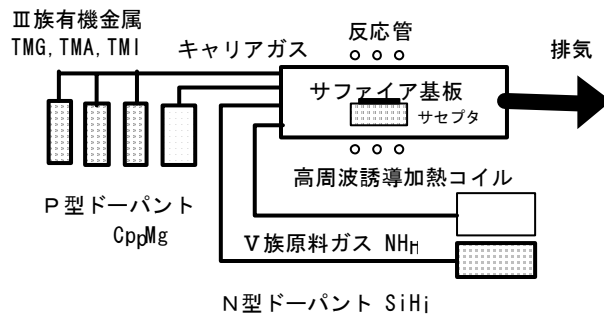
図4. 光ディスクシステム概略図

## 4. 青紫色レーザ

### 4-1. 結晶成長

青紫色レーザは、青色LEDや緑色LEDと同じGaN系半導体で作られている。

GaN系半導体は図5に示す有機金属気相成長法（Metal Organic Vapor Phase Epitaxy : MOVPE）という方法で結晶成長される。



- TMG : トリメチルガリウム
- TMA : トリメチルアルミニウム
- TMI : トリメチルインジウム
- CpMg : シクロペンタジエニルマグネシウム

図5. 有機金属気相成長法による結晶成長

原料には、III族原料としてTMG, TMA, TMIという有機金属原料と、V族原料としてアンモニア（NH<sub>3</sub>）を使用する。p型、n型不純物原料としてそれぞれ有機金属Cp<sub>2</sub>Mg、シランガスSiH<sub>4</sub>を供給し、Mg, Siを不純物として添加する。

サファイア基板をカーボン・サセプタ上にセットし、高周波加熱により800~1100℃の高い温度に上げて結晶成長させる。

### 4-2. レーザ層構成

図6にレーザの層構成を示す。GaNには基板がなく、通常基板としてサファイア基板を使用している。しかしサファイアとGaNとは結晶構造が異なるため、サファイア基板上に成長させたGaNには多くの欠陥が発生する。この欠陥を低減するためにサファイア基板上にマルチバッファ層を成長させ、さらにその上にレーザ構造を成長させる。

レーザ構造は、GaInN/GaN 多重量子井戸構造MQWを採用し、GaInN/GaNガイド層、AlGaNクラッド層からなる分離閉じ込め（Separate

Confinement Hetero-structure : SCH) 構造<sup>4)</sup>になっている。この構造により光とキャリアを活性層へ有効に閉じ込めることが可能である。

縁体であるため、プラス電極、マイナス電極はどちらも結晶成長面に形成されている。

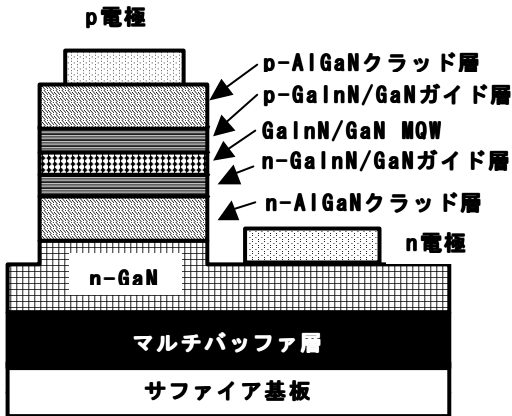


図6. GaN青紫色レーザ 層構成

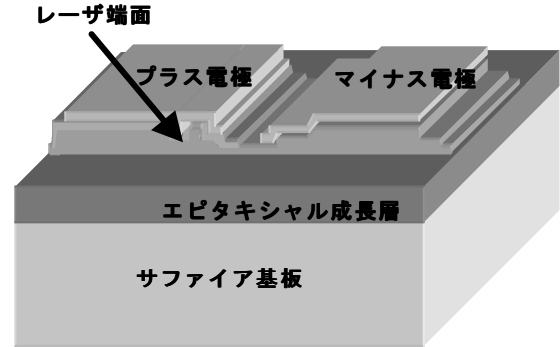
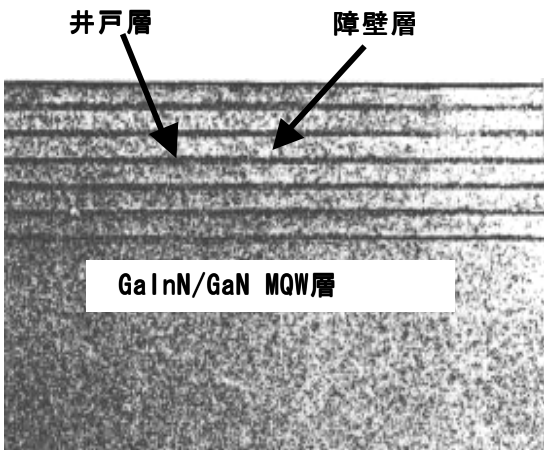


図8. 作製されたレーザチップ

4-3. MQW

MQWは、GaInN 井戸層とGaN障壁層との周期構造からなる。MQW層断面の透過電子顕微鏡写真 (Transparent Electron Microscopy: TEM) を図7に示す。井戸層、障壁層の厚さは数nm(10<sup>-9</sup>m)という、原子層が数層並んだ程度の薄さである。



数nm厚の結晶成長層を積層

図7. MQW層の透過電子顕微鏡写真

4-4. レーザチップ

結晶成長させたウェハを加工し、図8に示すようなチップを作製する。サファイア基板は絶

4-5. 反射ミラー面

レーザの光共振器を形成する反射鏡面はドライエッチング (Reactive Ion Beam Etching : RIBE) により加工されている。MQW層内でできた光を光共振器内に閉じ込めておくために、反射鏡面の反射率は高くなければならない。このためには端面の凹凸を極力なくさなければならない。

図9にRIBEにより形成したGaInNからなる反射鏡面のSEM写真を示す。10~15nmという極めて平坦な反射鏡面が得られている。GaInNの屈折率は2~3であるため、凹凸のない面であっても反射率は30%程度である。この反射鏡面に、さらにSiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>の多層膜コーティングを行ない、反射鏡面の反射率を90%以上まで高めている。

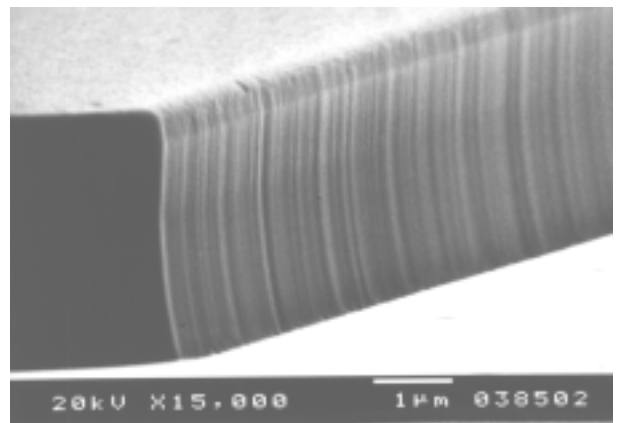


図9. RIBEによる反射鏡面のSEM写真

#### 4-6. 放熱設計

レーザ発振を得るためには、チップに電流を流す必要がある。しかし電流を流すことにより、チップは発熱し温度上昇が起こるためレーザ寿命が短くなる。このためチップをヒートシンクに取り付け放熱する必要がある。サファイア基板は絶縁体であり、基板側をヒートシンクに取り付けても熱伝導が悪い。そこで、図10のように結晶成長層側をヒートシンクに取り付け（ジャンクションダウン方式）、放熱を良くしている。

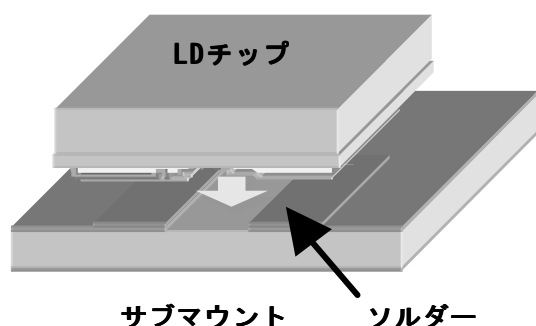


図10. レーザ・チップのヒートシンクへのダイボンディング

#### 4-7. 最新開発動向

青紫色レーザは次世代DVD用光源として期待

されている。

光ディスク応用ではレーザ光をコリメートレンズにより絞り、ピット部に照射する。この絞ったビーム径は

$$d = \lambda / 2 NA$$

λ：レーザ波長

NA：レンズ開口数

で表され、レーザの波長が短いほど小さく絞り込むことができ、小さいピットに照射することが可能となる。高密度化するにはレーザビームを小さく絞る必要があり、波長405nmの青紫色レーザを使うと、30GBまでDVDの記録密度を上げることが可能となる。

最新の報告データを表1に示す。

DVD読み出し対応では豊田合成を含め各社において既に2000時間を越える寿命が得られている。

DVD書き込み対応では30mW出力で15000時間の寿命データも報告されている。

#### 5. 今後の課題

これまでは、サファイアという異質の基板上に成長させており、GaN結晶には欠陥や歪が内在している。これをなくすことでデバイス特性をさらに向上させることが可能である。このためには基

表1. 各社における青紫色LDの報告データ

##### DVD読み出し対応

メーカー	I <sub>th</sub> (mA)	I <sub>op</sub> (mA)	発振波長(nm)	寿命 (hour)
A	40	45 @5mW	405	>10000 @5mW 25°C <sup>5)</sup>
B		33.3 @5mW		2000 @5mW <sup>5)</sup>
C	86	90 @3mW	410	5000(推定) @3mW 25°C <sup>6)</sup>
D		30 @3mW		2500 @3mW <sup>5)</sup>

##### DVD書き込み対応

A	23	42 @30mW	405	15000 @30mW 60°C <sup>7)</sup>
B	50	85 @30mW	404	1000 @30mw 50°C <sup>8)</sup>

板としてGaNを使う必要がある。

現在のGaN基板作製法は、サファイア基板やGaAs基板上にHVPE (Hydride Vapor Phase Epitaxy) 法という成長法により200~300  $\mu\text{m}$ の厚膜GaNを成長後基板を除去し、GaN基板を得ている。しかしここでも異質の基板を使っていることで欠陥をなくすことはできていない。GaN基板上にレーザ層構成を結晶成長させる際にも、横方向成長技術 (Epitaxial Lateral Overgrowth : ELO) を使い部分的に低欠陥化している。GaN基板の低欠陥化技術が今後重要になってくる。

## 6. まとめ

赤崎 勇教授 (名古屋大学名誉教授, 現名城大学教授) による画期的な研究成果を事業化する中で、高光度青色/緑色LEDの製品化に成功した。これらの研究基盤、開発体制、生産技術を更に拡大するためのターゲットとして青紫色半導体レーザがある。

DVD市場も既に立ち上がり、記録密度の向上が切望されている今が、青紫色半導体レーザの製品化に最高のタイミングである。

## 謝辞

青紫色レーザの開発を遂行するにあたり、御指導頂いた赤崎教授に深く感謝致します。また、科学技術振興事業団、豊田中央研究所 デバイス部、分析部の多大なご支援に対し深く感謝致します。

最後に、青紫色レーザの開発に共に従事したオプトE事業部第1技術部LP1Gの皆様の努力に敬意を表します。

## 参考文献

- 1) H.Amano, N.Sawaki, I.Akasaki and Y.Toyoda : Appl.Phys.Lett. Vol.48(1986) 353.
- 2) H.Amano, M.Kito, K.Hiramatsu, N.Sawaki and I.Akasaki : Jpn.J.Appl.Phys. Vol.28(1989) L2112
- 3) M.Koike, N.Shibata, S.Yamasaki, S.Nagai, S.Asami, H.Kato, N.Koide, H.Amano and I.Akasaki : Mater.Res.Symp. Vol.395 (1996) 889
- 4) M.Koike, S.Yamasaki, S.Nagai, Y.Tezen, S.Iwayama, A.Kojima, T.Hiramatsu, T.Umezaki, M.Itoh, H.Yamashita, M.Ohashi, A.Kimura, M.Sato and K.Ohguchi : Proc. I.W.N. (2000) 886
- 5) 日経メカニカル No. 564 (2001.9) 82
- 6) 小池 日本真空協会2001年10月研究例会 予稿集
- 7) S.Nagahama, N.Iwasa, M.Senoh, T.Matsushita, Y.Sugimoto, H.Kiyoku, T.Kozaki, M.Sano, H.Matsumura, H.Umemoto, K.Chocho and T.Mukai : Proc.SPIE 4287, (2001) 42
- 8) T.Tojyo, T.Asano, M.Takeya, T.Hino, S.Kijima, S.Goto, S.Uchida and M.Ikeda : Jpn.J.Appl.Phys. Vol.40, (2001) 3206