

特別  
寄稿

## 高出力青色レーザーダイオードの開発

## Development of High-Power Blue Laser Diodes

日亜化学工業株式会社  
第2部門 LD事業本部  
主席研究員 博士(工学)長濱 慎一  
Shinichi Nagahama

## 〈概要〉

青色レーザーのレーザー加工への応用を目的に、GaN系青色半導体レーザーの高出力化の開発を行った。既存のディスプレイ用GaN半導体レーザーの技術知見を基に、素子構造の最適化、新規パッケージによる低熱抵抗化を行うことで、GaN系青色半導体レーザーにおいて1エミッタのレーザー1素子当たりの光出力として世界最高値である、11.2 Wの高出力化を達成した。加えて各種信頼性評価を行った結果、開発した青色半導体レーザーは非常に高い光出力の安定性と低い故障率が期待でき、レーザー加工用光源として十分実用に耐えうるデバイスであることを確認した。

## 1. はじめに

レーザー加工の分野において、純銅などの金属材料への吸収率の高い青色～緑色の可視光レーザーが注目されている。青色～緑色のレーザーを得るための材料、デバイス形態として、いくつか候補はあるが、Ga系材料を用いた半導体レーザーによる直接発振が、最も高効率でかつシンプルな構成であるため、近年その開発が活発化している<sup>1)~3)</sup>。Ga系半導体は、 $Al_xGa_yIn_{1-x-y}N$ からなる結晶の作製が可能であり、室温でのバンドギャップがInNの0.8 eVからAlNの6.2 eVまでと、理論的には青から緑色領域だけでなく可視光全域をカバーできる直接遷移型半導体である。1995年にこの材料で初めて電流注入によるレーザー発振(波長: 410 nm)<sup>4)</sup>が達成されて以来、デバイスとしての性能は飛躍的に向上し、Blu-ray Disc™に代表される大容量光ディスク用光源として広く普及した。近年、その発振波長帯域は青色域<sup>5)</sup>から緑色域<sup>6)</sup>へより長波長域に拡大し、プロジェクタなどのディスプレイ用光源として広く用いられている。弊社では、2000年からディスプレイ用色表示デバイスとしての青色および緑色Ga系半導体レーザーの高出力化、高効率化の開発を精力的に進めてきた。図1は、弊社で開発したディスプレイ用青色半導体レーザーの光出力と光-電力変換効率WPE (Wall-Plug Efficiency)の推移である。2006年には、光出力0.5 W、WPEが20%<sup>7)</sup>であった青色半導体レーザーの光出力および効率が、種々の効率向上のための新規要素技術を導入することで2020年には、光出力は約10倍以上の5.67 W、WPEは約2.5倍の48%まで向上していることが分かる<sup>8)</sup>。

今回われわれは、レーザー加工用光源への適用を目的に、ディスプレイ用Ga系半導体レーザー<sup>8)</sup>の技術知見を基に高出力化の検討を行った。その結果、10 Wを超える光出力の青色半導

体レーザーを開発した。本項では、高出力青色半導体レーザーの作製法および特性について報告する。

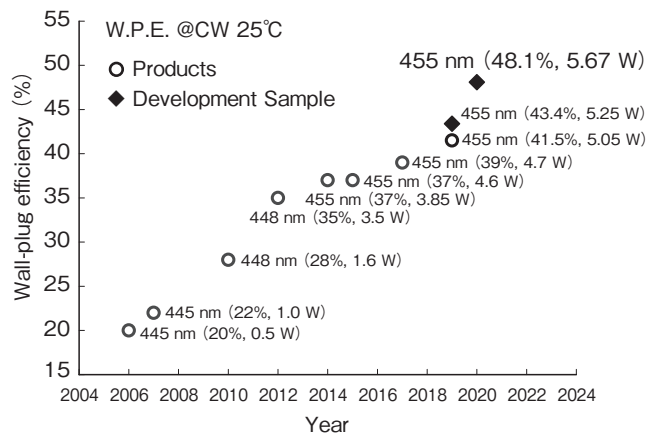


図1 青色半導体レーザーの光出力および効率の推移  
Output power and WPE improvement of blue laser diodes.

## 2. 高出力青色半導体レーザーの作製

図2は、開発した高出力青色半導体レーザーチップの構造概念図である。 $Al_xGa_yIn_{1-x-y}N$ 結晶によって構成し、発光層としてはInGaN多重量子井戸層を用いた。基板に高品位自立C面Ga系基板を用いることで、基板と同等の低い転位密度のエピタキシャル層を成長させることが可能である。また、C面Ga系基板は劈開性を有しているため、レーザー素子の共振器端面は基板を劈開することで容易に作製することが可能である。レーザー素子構造は、一般的な屈折率導波型のリッジストライプ構造で、リッ

ジストライプの外側を誘電体絶縁膜で覆うことで、水平横方向の屈折率差を設けて横モードの制御を図っている。1エミッタで10 W以上の光出力を得るために、リッジストライプ幅を90 μmに設定した。これは半導体レーザ特有の破壊モードである光学損傷COD (Catastrophic Optical Damage) による故障が発生しないように、レーザの出射端面幅を広げて光密度を低減しつつ、一般的なデリバリーファイバであるコア径100 μmの光ファイバへの結合を考慮した。一方で、垂直横モードの制御には、キャリアをInGaN多重量子井戸発光層内部に、光をガイド層内部にそれぞれ分離して効率的に閉じ込める分離閉じ込め構造SCH (Separate-Confinement Heterostructure) とした。

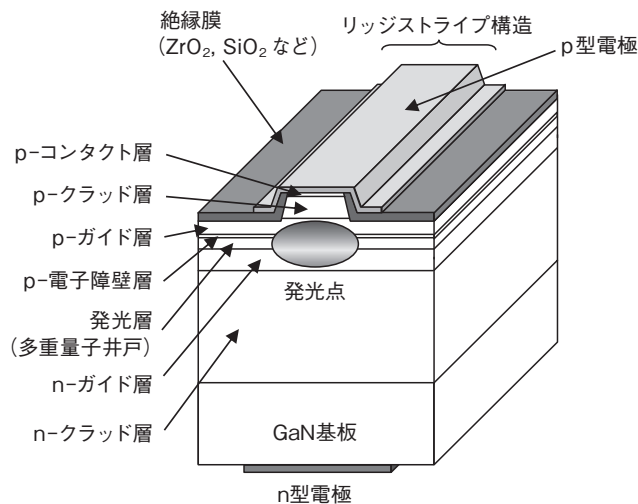
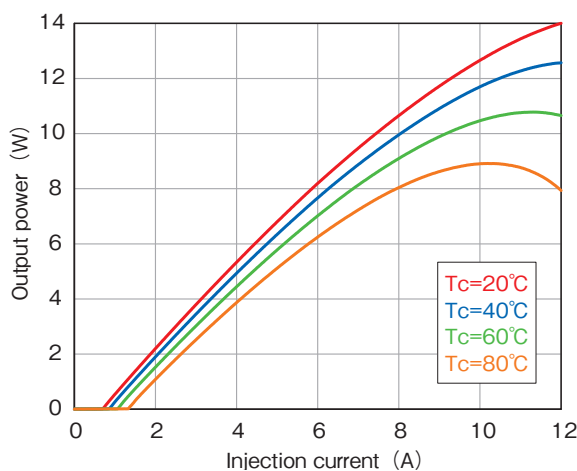


図2 青色半導体レーザの構造概念図  
Schematic structure of a blue laser diode.

半導体レーザを実装するパッケージに関しては、通常ディスプレイ用途では外形寸法がφ9 mmのTO-CANパッケージが多用される。このパッケージは小型化を優先した設計であるため排熱抵抗が高く、光出力が10 W以上の高出力半導体レーザを駆動する場合、ジャンクション温度の上昇が問題となる。半導体レーザ素子の温度上昇は光出力や寿命の低下といった悪影響



を及ぼすことから、熱抵抗を低減した新規パッケージであるSLP (Side Lead Package)を開発した。図3にSLPの外観図を示す。SLPは銅材料を用いたメタルパッケージであり、パッケージ上面リッドをシーム溶接することで、気密封止を行う。外形寸法は、幅6.9 mm、奥行き6.0 mm、高さ6.55 mmであり、給電リードピンをパッケージ側面に配置することで、パッケージ底面からの排熱をしやすい構造となっている。このSLPを用いた青色レーザの熱抵抗値は2.3 K/Wであり、現在商品化されているディスプレイ用青色LD (φ9 mmのTO-CANパッケージの熱抵抗5.6 K/W) と比べ、大幅に低減させた。

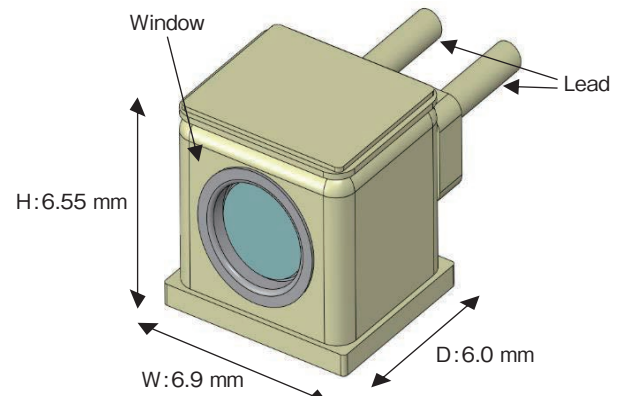


図3 SLPの外観図  
Schematics drawing of SLP.

### 3. 高出力青色半導体レーザの特性

#### 3.1. 高出力青色半導体レーザの基本特性

図4に、高出力青色半導体レーザの典型的な光-電流特性(L-I特性)および電圧-電流特性(V-I特性)の温度依存性を示す。連続波CW (Continuous Wave) 駆動の下、SLPケース底面の温度を変化させて測定を行った。L-I特性の温度依存性から、ケース温度が80°Cの高温になっても注入電流が10 Aまでスロップ効率( $\eta_s = \Delta L / \Delta I$ )の著しい低下は見られず、特にケース温度が40°C以下の駆動時では、非常に良好な温度特性を示してい

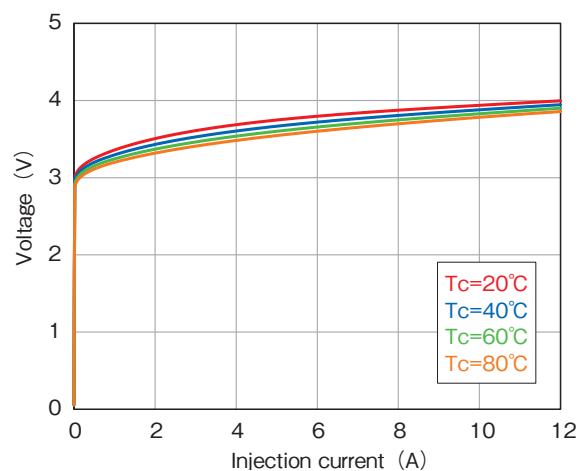


図4 青色半導体レーザのL-I, V-I特性  
Typical L-I and V-I characteristics of a blue laser diode.

ることが分かる。室温、定格電流値 ( $I_{op}=8.5\text{ A}$ ) での光出力は  $11.2\text{ W}$  であり、その時の WPE は  $33.8\%$  であった。レーザーチップの最適化および低熱抵抗 SLP の導入により、 $11.2\text{ W}$  の高い光出力値が得られた。われわれの知る限りにおいて、GaN 系青色半導体レーザーの 1 エミッタのレーザー 1 素子当たりの光出力としては、世界最高の光出力である。

図 5 に、青色半導体レーザーの典型的なスペクトルを示す。ピーク波長は  $465\text{ nm}$  で、縦モードはマルチモードで発振しておりスペクトルの包絡線の帯域は約  $2\sim 3\text{ nm}$  程度である。青色帯域 ( $465\text{ nm}$ ) でレーザー発振するように、発光層である InGaIn 量子井戸層の In 組成比を制御した。

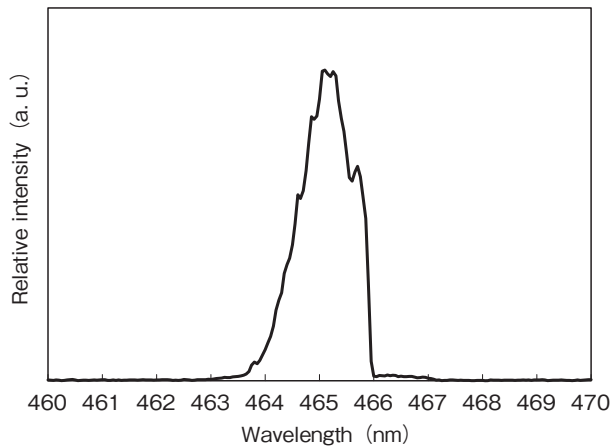


図 5 青色半導体レーザーの波長スペクトル  
Wavelength spectra of the blue laser diode.

青色半導体レーザーの FFP (Far Field Pattern), NFP (Near Field Pattern) を、図 6 および図 7 それぞれに示す。図 6 において、エピタキシャル面に対し垂直方向 (b) つまり垂直横モードはシングルモード発振しているため、ビーム強度はガウシアン分布に近い形状となるが、水平方向 (a) つまり水平横モードはマルチモード発振しているため、矩形に近い強度分布となっている。ビーム広がり角をピーク強度の  $1/e^2$  となる角度と定義すると、垂直方向は  $44^\circ$ 、水平方向は  $10^\circ$  である。また図 7 の NFP の強度分布から、発光点サイズは垂直方向が約  $1\ \mu\text{m}$ 、水平方向がレーザーチップのリッジストライプの幅に相当する約  $89\ \mu\text{m}$  であり、特に水平方向の光強度はほぼ均一に発光していることが分かる。リッジストライプ構造のレーザー素子構造を採用し、水平方向に任意の屈折率差を設け安定した高次モードでの発振を維持させることで、水平方向の NFP 強度が均一になるよう設計している。NFP の不均一な分布は、光強度が局所的に高い箇所での突発的な COD を誘発し、短時間でのレーザーの故障に繋がる。高い信頼性を確保するためには、均一な分布の NFP 制御は重要な技術のひとつである。

### 3.2. 高出力青色半導体レーザーの信頼性

GaN 系半導体レーザーの主たる劣化モードとして、摩耗劣化と突然劣化の 2 つのモードがある。摩耗劣化に関しては、一般的な発光デバイスと同様の劣化モードで、素子のジャンクション温度で加速されるアレニウスモデルによる寿命予測が可能である。摩耗劣化による光出力劣化を測定するために、青色半導

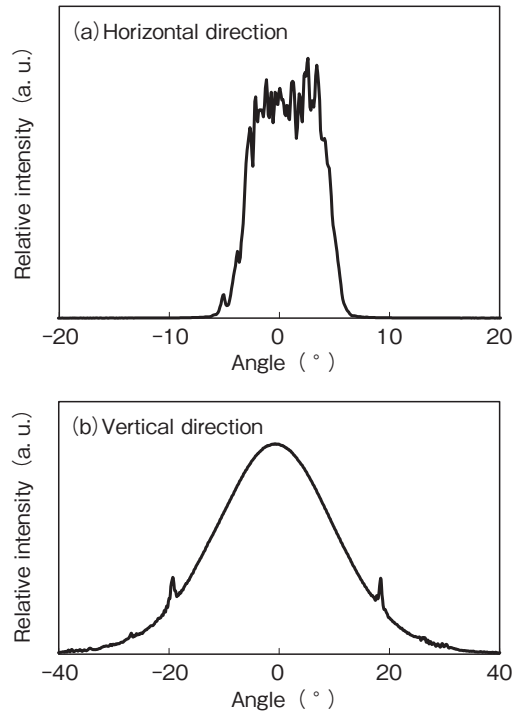


図 6 青色半導体レーザーの FFP (a) 水平方向 (b) 垂直方向  
FFPs of the blue laser diode (a) Horizontal direction and (b) Vertical direction.

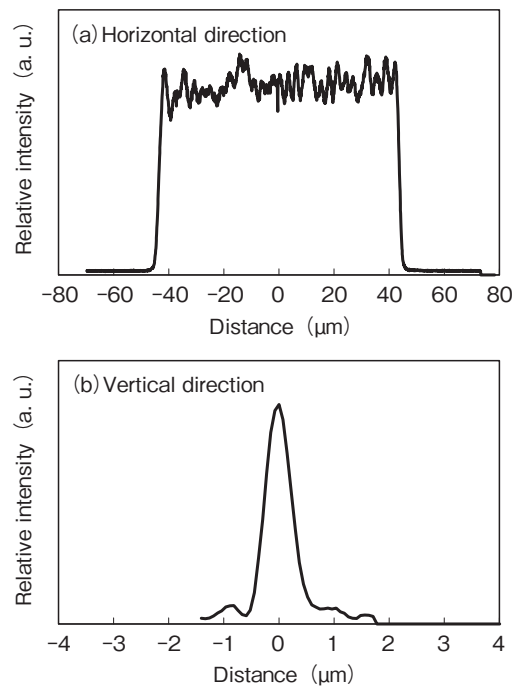


図 7 青色半導体レーザーの NFP (a) 水平方向 (b) 垂直方向  
NFPs of the blue laser diode (a) Horizontal direction and (b) Vertical direction.

体レーザーの信頼性試験を行った結果を図 8 に示す。試験は、CW、定電流駆動 ACC (Auto Current Controller) でレーザーを駆動させて、光出力の経時変化を 4000 時間モニターした。図 8 において、(a) は定格条件 (電流  $=8.5\text{ A}$ 、ケース温度  $=40^\circ\text{C}$ )、(b) は定格電流の温度加速条件 (電流  $=8.5\text{ A}$ 、ケース温度  $=60^\circ\text{C}$ )、(c) は注入電流の電流加速条件 (電流  $=10.5\text{ A}$ 、ケース温度  $=40^\circ\text{C}$ ) である。すべての試験条件において、4000 時間駆動後

の出力低下が初期値の1～2%に留まっており、非常に高い安定性が得られた。定格条件内の駆動においては、光出力劣化割合は非常に小さく、ACC駆動における光出力は安定している。

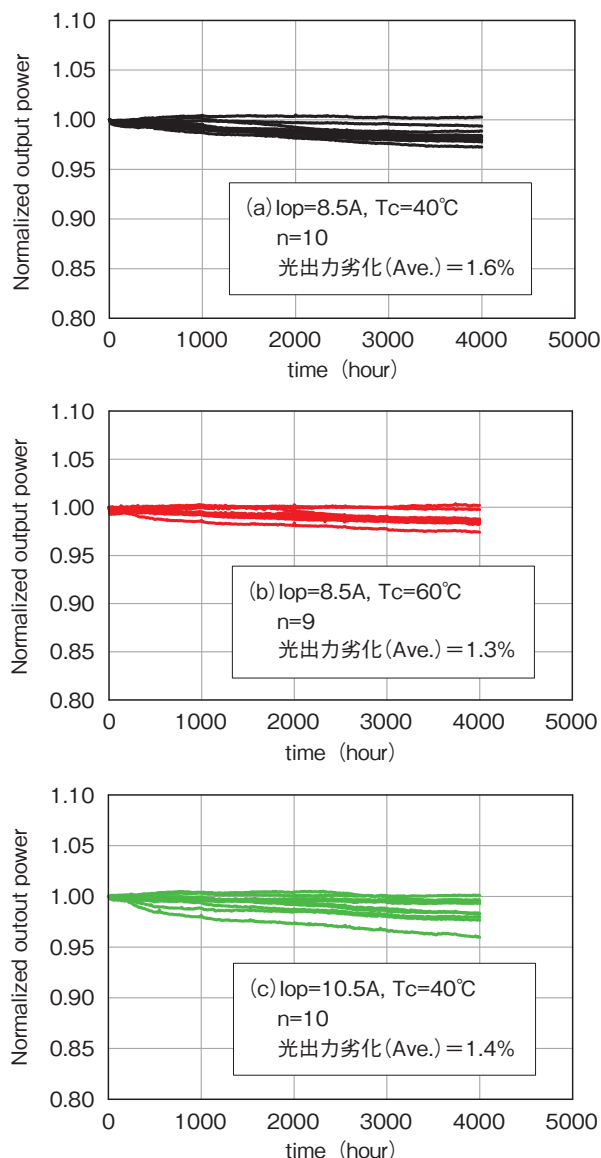


図8 青色半導体レーザの信頼性試験  
Lifetime tests of blue laser diodes.

次に、開発した青色半導体レーザの突然劣化について述べる。GaN系半導体レーザの突然劣化の主たる要因はCODである。CODは半導体レーザ特有の現象で、端面パッシベーション膜劣化、キャリアの表面再結合、端面近傍での光吸収による温度上昇などの原因で発生する。CODが発生するまでの時間をCOD寿命と定義すると、COD寿命は端面の光密度に強く依存する。これまでのわれわれの知見から、GaN系青色半導体レーザのCOD寿命は、経験則的に端面の光密度のべき乗に比例することが分かっている。図9のグラフは、ディスプレイ用青色半導体レーザ<sup>8)</sup>の知見を基に、開発した青色半導体レーザのCOD寿命を見積もったものである。図9において、横軸は端面光密度、縦軸はCOD寿命を示している。今回開発した青色半導体レーザの端面光密度が約14 MW/cm<sup>2</sup>であることから、

ここから見積もられたCOD寿命の平均値は約13万時間であった。レーザ加工機への搭載を考慮すると、フィールドで青色半導体レーザのCODが発生し故障する確率は極めて低いと思われる。

レーザ加工用光源においては、レーザ発振器として発振出力の高い安定性と低い故障率が要求される。今回得られた信頼性試験結果から、開発した青色半導体レーザは非常に高い光出力の安定性と低い故障率が期待でき、レーザ加工用光源として十分実用に耐えうるデバイスであると考えられる。

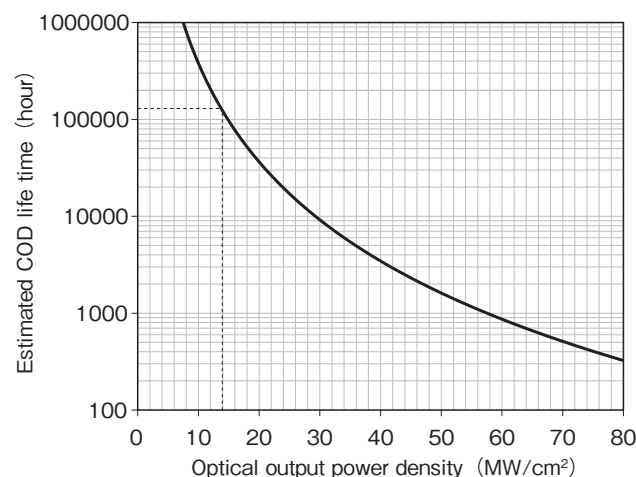


図9 青色半導体レーザCOD寿命と端面光密度の関係  
Relationship between COD lifetime and optical output power density on the edge facet of blue laser diodes.

#### 4. まとめ

レーザ加工機への搭載を目的に、GaN系半導体材料を用いて青色半導体レーザの高出力化の開発を行った。エピタキシャル膜および素子構造の最適化を行い、熱抵抗を低減した新規パッケージであるSLPに実装することで、光出力11.2 W、WPE 33.8%の高光出力かつ高効率の青色半導体レーザを実現した。合わせて今回開発した青色半導体レーザに対して信頼性試験を実施した結果、レーザ加工用光源として、十分実用に耐えうるデバイスであることを確認した。青色半導体レーザを用いた銅材などの難加工材へのレーザ加工の応用は、現在始まったばかりである。今後さらなる高出力化、高効率化を図ることで、青色半導体レーザのレーザ加工への応用を加速させてゆきたい。

#### 参考文献

- 1) Y. Ishige, et. al, Proc. SPIE 11668 (2021) 116680M.
- 2) H. König, et. al, Proc. SPIE 11262 (2020) 112620Q.
- 3) S. Nozaki, et. al, Proc. SPIE 11262 (2020) 112620S.
- 4) S. Nakamura, et. al, Jpn. J. Appl. Phys. 35, (1996) L74-L76.
- 5) S. Nagahama, et. al, Appl. Phys. Lett. 79, (2001) 1948-1950.
- 6) T. Miyoshi, et. al, Appl. Phys. Exp. 2, (2009) 062201-062203.
- 7) T. Miyoshi, et. al, SID Digest (2006) 1915-1917.
- 8) Y. Nakatsu, et. al, Proc. SPIE 11280, (2020) 112800S 1-7.