

世界初の新規 GaN 基板上純緑色レーザ開発 II

足立 真寛*・京野 孝史・塩谷 陽平
 秋田 勝史・上野 昌紀・住友 隆道
 徳山 慎司・池上 隆俊・片山 浩二
 中村 孝夫

The World's First True Green Laser Diodes on Novel Semi-Polar {2021} GaN Substrates II — by Masahiro Adachi, Takashi Kyono, Yohei Enya, Katsushi Akita, Masaki Ueno, Takamichi Sumitomo, Shinji Tokuyama, Takatoshi Ikegami, Koji Katayama and Takao Nakamura — True green InGaN-based laser diodes (LDs) on novel semi-polar {2021} free-standing GaN substrates, lasing under pulse operation at wavelengths long as 531nm, were successfully demonstrated for the first time. Room temperature continuous-wave operation at 520nm was also achieved by improving the epitaxial layers and applying a ridge-waveguide structure. The threshold current and voltage were 95 mA (7.9 A/cm²) and 9.4 V, respectively. This paper reports the lasing properties of these true green laser devices.

Keywords: GaN, green laser, laser diode, semi-polar plane

1. 緒言

前稿の「世界初の新規 GaN 基板上純緑色レーザ開発 I」では、緑色レーザ発振に直結した新規面方位上のエピタキシャル結晶層の特長として、{2021}半極性面では緑色レーザ (Laser diode: LD) に必要な高 In 組成 InGaN 活性層が非常に均一であることや、高発光効率につながるピエゾ電界低減効果について報告した。本稿では、さらにデバイス構造を作製することで、1) GaN 系半導体 LD として世界最長波長である純緑色 531nm での室温パルス発振、2) 緑色 LD の室温連続 (Continuous Wave: CW) 発振を実現させた技術開発、3) 緑色 LD の室温 CW 発振特性、を報告する。

振に必要な注入電子数、すなわち発振しきい値電流 I_{th} が、高くなる短所を有する。これは、電極幅を狭めても、図 1 (a) のように面内方向に電流が拡散してしまい、電流密度を高めることが出来ないためである。このため、 I_{th} は大きくなり、LD で発生するジュール熱 (動作電流 $I^2 \times$ 素子抵抗 R) により LD のダイオード接合温度が高くなるため、レーザ発振を持続することが困難となる。このため、実用化に必須な CW 発振は極めて難しくなる。この短所を克服したデバイス構造が、②の屈折率導波型 LD である。

2. LD 構造の特徴

LD の素子構造の概略を説明する。LD 構造は、大別すると以下の 2 種類の構造となる⁽¹⁾。

①利得導波 (ゲインガイド) 型

②屈折率導波 (リッジ) 型

表 1 にそれぞれの特徴を示す。

利得導波型 LD は、図 1 (a) に示すように、LD 構造の最も簡易なものであり、プロセス加工が簡便で工程数も少なく迅速に結果が得られる長所を有する。反面、レーザ発

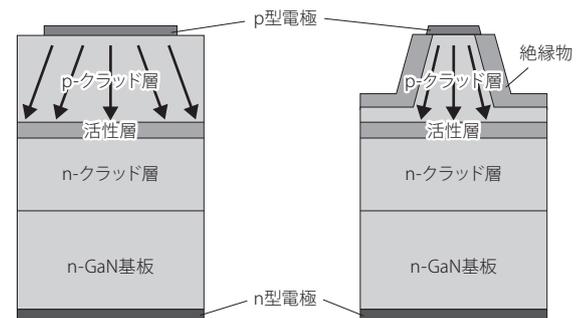


図 1 (a) : 利得導波型 LD

(b) : 屈折率導波型 LD

表 1 LD 構造の特徴

LD 構造	レーザ発振の律速因子		プロセス 工程数	特 徴	
	薄膜結晶	プロセス加工		長 所	短 所
①利得導波型	○	△	少	プロセス容易、工程数：少	I_{th} ：大、CW 発振困難
②屈折率導波型	○	○	多	I_{th} ：小、CW 発振容易	プロセス複雑、プロセス工程数：多

屈折率導波型LDは、上記電流の拡散を物理的に阻止したもので、すなわち図1 (b) に示すように、電流経路以外の結晶を彫り込んだ構造である。この彫り込み（リッジ加工）は一般にドライ・エッチングにより作製されるが、活性層にダメージが入らないように注意しなければならない。また、彫り込んだ側面には、レーザ光が閉じ込まるように低屈折率の絶縁物で埋め込む必要がある。このように、屈折率導波型LDは、レーザ発振を律速する因子にプロセス技術が関与し、また、プロセス加工が複雑となるため工程数が増すといった短所を有する。しかし、動作電流を低減できるため、CW発振のためには、必須のデバイス構造と言える。

緑色LD開発では、開発時間を短縮するため、これまで述べたレーザ構造の特徴を考慮し、まず①の利得導波型LDによって、結晶成長からプロセス工程、評価まで短時間で行い、緑色レーザ発振の薄膜結晶成長技術、特に活性層の最適化に注力した。これと平行して②の屈折率導波型LDプロセスを確立し、パルス発振を達成した後、このLD構造に移行しCW発振の開発を目指した。

3. レーザ・ダイオード作製

{20 $\bar{2}$ 1}面自立Ga \bar{N} 基板上にレーザのエピタキシャル層構造を作製した。Ga \bar{N} 基板はハイドライド気相成長(HVPE)法によって作製した⁽²⁾。Ga \bar{N} 基板はn型導電性を有し、その転位密度は $1 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ 以下である。エピタキシャル層の成長は有機金属気相成長(OMVPE)法によって行った。Ga \bar{N} 基板上にn型Ga \bar{N} を成長した後、n型InAlGa \bar{N} クラッド層、n型InGa \bar{N} 光ガイド層、発光層、p型AlGa \bar{N} 電子ブロック層、p型InGa \bar{N} 光ガイド層、p型InAlGa \bar{N} クラッド層、p型Ga \bar{N} コンタクト層を順に成長した。発光層はInGa \bar{N} を井戸層とする多重量子井戸(MQW)構造で構成されている。

エピタキシャル層を成長した後、表面にp型電極、裏面にn型電極をそれぞれ形成した。利得導波型LDは、ストライプ幅 $10 \mu\text{m}$ の共振器を蒸着及びフォトリソグラフィ法で作製した。屈折率導波型LDは、ストライプ幅 $2 \mu\text{m}$ の共振器を、ドライ・エッチング、蒸着とフォトリソグラフィを組み合わせて作製した。いずれのLDの共振器長とも $600 \mu\text{m}$ とし、共振器端面には誘電体多層反射膜を形成した。反射率は、レーザ光が射出される前面は80%、後面は95%とした。

作製したレーザチップは、 5.6mm の銅製ステムを台座とし、窒化アルミニウム(AIN)放熱材の上に、金-スズ(AuSn)ハンダで実装した。

4. 純緑色531nm室温パルス発振

利得導波型LDを作製することで前稿で報告したエピタキシャル層の特性改善を進め、純緑色531nm室温パルス

発振(パルス幅: 500ns 、デューティ比: 0.5%)を実現した。図2 (a) に、純緑色531nm室温パルス発振のスペクトル、図2 (b) に、発振時のレーザの写真を示す。世界で初めて得られたGa \bar{N} 系LDとして最長波長の531nm発振は、前稿に示したSHGレーザの発振波長である532nmと同等である。Ga \bar{N} 系LD半導体レーザは発光層の組成などで発振波長を制御可能であるが、この結果はプロジェクタ用光源等に適用する際に重要な純緑色520-530nm帯をカバーしており、製品に最適な波長のレーザを提供できることを示している。

このLDの発振しきい値電流 I_{th} は 924mA (15.4kA/cm^2)、発振しきい電圧 V_{th} は、 23.3V であった。 V_{th} が高い理由は、薄膜結晶構造および電極作製条件が最適化されていないためである。この I_{th} 、 V_{th} では発熱が大きく、CW発振は難しい。

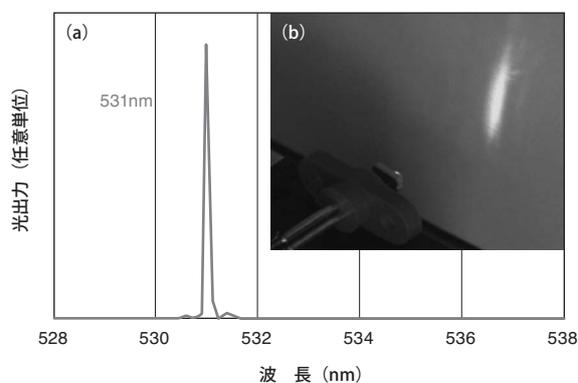


図2 531nm室温パルス発振⁽³⁾
(a) スペクトル、(b) 発振の写真

5. 緑色パルス発振から連続発振

5-1 連続発振条件 LDは、高温になるほど I_{th} が上昇し、一般に 100°C 程度で発振しなくなる。LDからの発熱の上限は素子からの発熱と放熱能力との兼ね合いで決まる。実用上重要な室温CW発振達成には、① I_{th} 、 V_{th} 低減による発熱の抑制、②発生した熱の放熱、を同時に行う必要がある。①の発熱はジュール熱なので電流と電圧の積、すなわちLDへの投入電力で表される。②の放熱は、LDを半田でサブマウントに実装したときの熱抵抗で表わされる。他機関からの報告も踏まえ、発熱量を 1W 以下に抑えることがCW発振達成の目標となる。パルス発振時のデータからCW発振実現のため、 $I_{th} < 100 \text{mA}$ 、 $V_{th} < 10 \text{V}$ 、熱抵抗 $< 30^\circ\text{C/W}$ を目標とした取り組みを行った。なお高放熱実装については社内で保有する通信用LDの技術を活用することで熱抵抗 $27 \pm 5^\circ\text{C/W}$ を実現した。

5-2 連続発振条件検証 CW発振条件 $I_{th} < 100$ mA、 $V_{th} < 10$ V を実現のため、屈折率導波型LD構造を適用し I_{th} の低減を、エピタキシャル層の改善で V_{th} の低減を図った。このCW発振条件の検証のため、高放熱実装を行った屈折率導波型LDについて、通電条件に対する I_{th} の詳細な検討を行った。図3に屈折率導波型LDにおける発振しきい値電流 I_{th} のデューティ比（通電パルス幅／パルス周期）依存性を示す。低いデューティ比では $I_{th} = 77$ mAであったが、デューティ比の上昇により I_{th} は増加傾向を示した。これは、LDからの発熱で素子温度が上昇したことに起因している。デューティ比100%（CW動作）の I_{th} を線形近似から推定すると約90mAで、目標とする100 mA以下と見積られた。またLDの発振波長のデューティ比依存性を測定した結果、デューティ比0.1から30%までは発振波長は変化しなかった。また、デューティ比を80%まで増加させても波長シフト量は1nm程度であった。これは発熱の抑制と放熱の促進が十分機能していることを示しているとともに、このLDにおいてCW発振条件に達していることを示している。

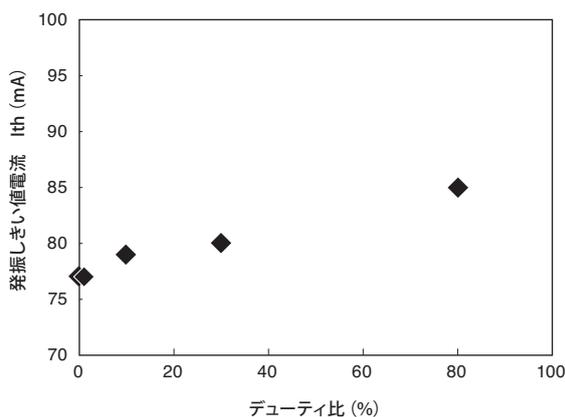


図3 発振しきい値電流のデューティ比依存性

5-3 緑色520nm室温CW発振 緑色帯で結晶成長技術と屈折率導波型LDの作製技術を改善し、さらに前記放熱技術を組み合わせることにより、緑色LDの室温CW発振を達成した。発振波長の設計値は、応用例の一つであるレーザープロジェクトにおいて、CIE色度座標で面積最大すなわち色再現性をもっとも良好となる520nmとした。

図4(a)に、屈折率導波型緑色LDの室温CW動作における発振スペクトルを示す。520nmでのレーザー発振が実現されている。図4(b)に、この緑色LDの電流-光出力特性を示す。 I_{th} は95 mA (7.9 kA/cm^2)、スロープ効率 Se は 0.1 W/A である。 I_{th} は、屈折率導波型LDの

開発により、利得導波型LDの約1/5に抑えられ、目標の100 mA以下とすることが出来た。図4(c)に、この緑色LDの電流-電圧 (IV) 特性を示す。このLDの発振しきい電圧 V_{th} は、9.4 Vであった。薄膜結晶層と屈折率導波型LD作製プロセス技術の最適化により、利得導波型LDよりも大幅に V_{th} を低減できたが、更に低電圧化させるための開発を続けている。

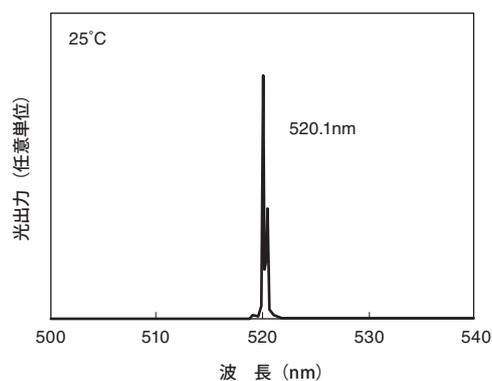


図4(a) 520nm室温CW発振緑色LDのスペクトル⁽⁴⁾

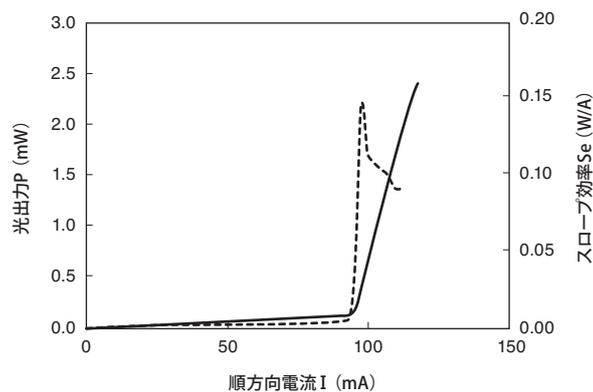


図4(b) 520nm室温CW発振緑色LDの電流-光出力特性⁽⁴⁾

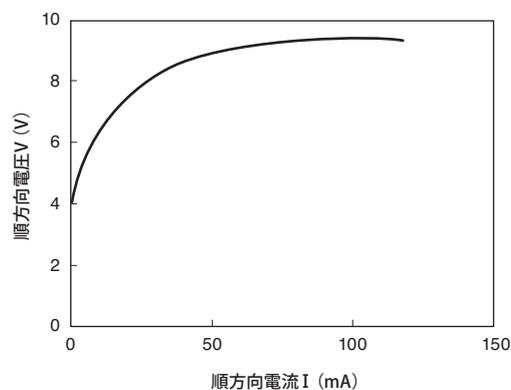


図4(c) 520nm室温CW発振緑色LDの電流-電圧特性⁽⁴⁾

これら Ith, Vth の抑制により、発熱量を抑制することが可能となり、かつ、同時に開発した高放熱技術により、レーザ発振の CW 動作を実現可能とした。

6. 結 言

前稿では、世界初の緑色レーザ発振に成功した[2021]面上の発光層の性質をピエゾ電界と結晶品質の観点から紹介し、本稿では、特に、LD のデバイス構造、CW 発振のポイント、およびその電光的学的特性を紹介した。短期間で緑色発振を実現するため利得導波型 LD 構造を採用し、531nm 室温パルス発振に成功した。さらに発熱を抑制できる屈折率導波型 LD プロセスを開発し、高放熱技術と組み合わせることにより、520nm での室温 CW 発振に成功した。この純緑色 LD 開発により、三原色のレーザ光源をすべて半導体レーザで構成することが可能となり、超小型プロジェクトを代表とする新たな映像機器はもちろん、医療技術の新開発にも貢献すると期待される。

用語集

※1 LD

レーザ・ダイオード。電子を光子に変換し、光出力を増幅する半導体の結晶。その光は、色純度、指向性に優れる。

※2 CW 発振

時間的に発振を持続している状態のこと。パルス発振と対比し、CW 発振、連続発振と呼ばれる。

※3 デューティ比

パルス発振を規定する量で、パルスのオン時間と周期との比。デューティ比 100% は、CW 発振と等価。

参 考 文 献

- (1) 米津宏雄、「光通信素子工学」—発光・受光素子—、工学図書 (2000)
- (2) 元木、「窒化ガリウム基板の開発」、SEI テクニカルレビュー、175 号、pp.10-18 (2009)
- (3) Y. Enya, Y. Yoshizumi, T. Kyono, K. Akita, M. Ueno, M. Adachi, T. Sumitomo, S. Tokuyama, T. Ikegami, K. Katayama, and T. Nakamura : "Appl. Phys. Express 2" (2009) 082101
- (4) Y. Yoshizumi, M. Adachi, Y. Enya, T. Kyono, K. Akita, M. Ueno, T. Sumitomo, S. Tokuyama, T. Ikegami, K. Katayama, and T. Nakamura : "Appl. Phys. Express 2" (2009)

執 筆 者

足立 真寛* : 半導体技術研究所 光半導体技術研究部
博士 (工学)
半導体発光デバイスに関する研究開発に従事



京野 孝史 : 半導体技術研究所 光半導体技術研究部 博士 (工学)
塩谷 陽平 : 半導体技術研究所 光半導体技術研究部
秋田 勝史 : 半導体技術研究所 結晶技術研究部 主査 博士 (工学)
上野 昌紀 : 半導体技術研究所 光半導体技術研究部 グループ長
博士 (理学)
住友 隆道 : 半導体技術研究所 光半導体技術研究部 博士 (工学)
徳山 慎司 : 半導体技術研究所 光半導体技術研究部
池上 隆俊 : 半導体技術研究所 技師長
片山 浩二 : 半導体技術研究所 光半導体技術研究部 グループ長
博士 (工学)
中村 孝夫 : 半導体技術研究所 光半導体技術研究部 部長
博士 (工学)

* 主執筆者