GaN-Based High-Output-Power Blue Laser Diodes

Takashi Miyoshi Non-member (Nichia Corporation, takashi.miyoshi.2@nichia.co.jp)

Tokuya Kozaki Non-member (Nichia Corporation, tokuya.kozaki@nichia.co.jp)

Tomoya Yanamoto Non-member (Nichia Corporation, tomoya.yanamoto@nichia.co.jp)

Yasushi Fujimura Non-member (Nichia Corporation, yasushi.fujimura@nichia.co.jp)

Shin-ichi Nagahama Non-member (Nichia Corporation, shinichi.nagahama@nichia.co.jp)

Takashi Mukai Member (Nichia Corporation, takashi.mukai@nichia.co.jp)

Keywords : GaN, high-output-power, blue, laser diodes

Since the first demonstration of GaN-based laser diodes (LDs) at 405nm, we have been developing wider wavelength range LDs. At this time, 365nm to 482nm LDs were realized by using free standing GaN substrate, and improving of the epitaxial growth technology. And these frontier wavelength band LDs have been expanding the possibility of new applications; for example, sensing devices, biotechnology, photolithography, and printing.

And now, full-color display systems using laser light sources are attracting attention for wide-color-gamut applications. In three-prime-colors, red and green high-power and reliable laser light sources are realized by using AlInGaP LDs and second harmonic generation (SHG) lasers, respectively. On the other hand, in blue region, we have proposed GaN-based blue LDs with an emission wavelength of 445nm. However, high-output-power blue LDs are required because display screen size is becoming larger and larger. Consequently, we developed high-output-power blue LDs with an output power of 500mW. The details of these LDs characteristics are described.

Figure 1 shows the typical current-voltage (I-V) characteristics and the optical output power per facet of the LD with an emission wavelength of 445nm as a function of dc current (L-I) at 25deg. The threshold current density was 1.8kA/cm^2 and the operating current, voltage, and wall-plug efficiency at an output power of 500mW were 480mA, 4.8V, and 21.7%, respectively.

Figure 2 shows the result of lifetime test of CW-operated 445nm LDs at a case temperature of 25deg under automatic current control (ACC) with an output power of 500mW. The lifetime is defined as the time the output power of the LDs declined to 0.5 times the initial output power. After 5000 hours, the lifetime was estimated to be over 30,000 hours.

In this work, we succeeded in fabricating GaN-based high-output-power (500mW) blue LDs with high wall-plug efficiency (21.7%) and long lifetime (>30,000 hours). In full-color laser display systems, high-output-power and reliable laser light sources are essential and we believe that our LDs are the enabler for full-color display systems.

Fig. 1. Typical L-I and V-I characteristics of LDs with a lasing wavelength of 445nm under 25 °C CW operation

Fig. 2. Result of lifetime test under ACC condition with an output power of 500mW at 25 °C

GaN 系高出力青色半導体レーザー

非会員 三好 隆* 非会員 小崎 徳也*
 非会員 柳本 友弥* 非会員 藤村 康史*
 非会員 長濱 慎一* 正 員 向井 孝志*

GaN-Based High-Output-Power Blue Laser Diodes

Takashi Miyoshi*, Non-member, Tokuya Kozaki*, Non-member, Tomoya Yanamoto*, Non-member,
 Yasushi Fujimura*, Non-member, Shin-ichi Nagahama*, Non-member, Takashi Mukai*, Member

We succeeded fabricating high-output-power blue (445nm) laser diodes (LDs) with an output power of 500mW. The operating current, voltage, wall-plug efficiency of these LDs were 480mA, 4.8V, and 21.7%. Estimated lifetime of these LDs was over 30,000 hours under continuous wave operation at 25°C.

キーワード : GaN, 高出力, 青色, 半導体レーザー

Keywords : GaN, high-output-power, blue, laser diodes

1. はじめに

青紫色 (405nm 帯) GaN 系半導体レーザーは近年, HD-DVD, Blue-ray Disc などの高密度光ストレージ用光源として活発な開発が行われている。我々は 1995 年に初めて GaN 系材料でのレーザー発振を達成⁽¹⁾して以来, 基板の転位密度低減, 素子構造の最適化などによって 405nm 帯レーザーの高出力化を行い, 光出力 200mW を超えるレーザーの開発に成功している。

また我々は 405nm 帯の高出力化だけではなく, GaN 系レーザーの発振波長の広帯域化を行い, 現在までに 365~482nm までの波長帯で CW 発振を実現している⁽²⁾⁽³⁾。これにより GaN 系レーザーはストレージ分野だけではなくバイオ, 印刷, 露光といった様々な分野へアプリケーションを広げている。その中でも特に注目するのは青色 (445nm 帯) 半導体レーザーである。青色半導体レーザーは現在, レーザディスプレイ用の光源として大きな注目を集めている。レーザーディスプレイとは RGB 3 種類のレーザーを光源に用いたプロジェクション方式のディスプレイ⁽⁴⁾であり, 従来のディスプレイでは表現が不可能だった領域まで色再現性が広がるという特徴がある。RGB のうち, 赤色は AlGaInP 系半導体レーザー, 緑色は SHG (Second Harmonic Generation) レーザにより実現されており, 我々は青色光源として GaN 系材料を用いた青色半導体レーザーを提案している。また近年のスクリーン

サイズの大型化に伴い, 光源の高出力化が要求されている。そこで我々は高出力化に向けた開発を行い, 光出力 500mW の青色半導体レーザーの作製に成功した。

2. 青色半導体レーザー

〈2・1〉 青色半導体レーザーの特徴 一般に GaN 系レーザーにおいて長波長化で発振させるためには活性層として用いられる InGaIn の In 組成を上げていく必要があるが, これによって InGaIn 特有の現象である In 組成の空間的揺らぎ⁽⁵⁾⁽⁶⁾が大きくなり, 内部損失が増加する。また同時に発振波長が長波長化するのに伴い, 屈折率の波長分散関係から活性層とクラッド層との間の屈折率差が減少し, エピ成長方向の光閉じ込めが低下する。これらの結果, 図 1 のように 2001 年の段階では発振波長の長波長化に伴って閾値電流密度が上昇し, 450nm 以上の波長での CW 発振が不可能であった。

そこで我々はこれらの閾値電流密度上昇要因に対して, 主に基板転位密度の低減化, InGaIn 活性層の結晶性を向上させる結晶成長技術及びレーザーエピ構造の最適化を行った。その結果現在では 482nm までの長波長化が可能となっている。また特記すべきは図 1 の 2006 年時点でのデータにおいて 460nm の領域まで閾値電流密度の上昇がみられないことである。このことは青色領域の発光効率が GaN 系 LD で最も効率のよいとされる 405nm 帯のそれとほぼ同じであり, 高出力化に関しても十分ポテンシャルがあることを示している。

〈2・2〉 青色半導体レーザーの作製・構造 青色半導体

* 日亜化学工業株式会社
 〒774-8601 徳島県阿南市上中町岡 491
 Nichia Corporation,
 491 Oka, Kaminaka-cho, Anan, Tokushima 774-8601

Fig. 1. Wavelength dependence of threshold current density of GaN-based LDs.

Fig. 3. Typical L-I and V-I characteristics of LDs with a lasing wavelength of 445nm under 25°C CW operation.

Fig. 2. Schematic structure of blue LDs.

Fig. 4. Emission spectrum of the blue LD measured at an output power of 500mW under 25°C CW operation.

レーザは MOCVD 法を用いて n 型自立 GaN 基板⁽⁷⁾⁽⁸⁾上にエピタキシャル成長させた。図 2 に青色半導体レーザの構造概念図を示す。構造としてはリッジ型導波路を採用し、ZrO₂を埋め込み材料とした。共振器長は 800 μm である。ストライプ幅については主に高出力化による端面光密度及び駆動電流密度の上昇を低減するため、一般にシングルモードレーザで用いられている幅 (2 μm 以下) よりも大幅に拡大し、7 μm とした。エピタキシャル構造については前述の LD 波長の長波長化に伴う成長方向の光閉じ込め係数が低下することを防ぐため、光ガイド層は InGa_N+Ga_N の 2 層に、またクラッド層は Al 組成比を高めた AlGa_N/Ga_N 超格子構造を採用した。活性層は InGa_N-MQW (Multi Quantum Well) 構造である。またレーザ端面はへきかいにより作製した後、リア端面には高反射率コーティング (反射率: 95%) を施し、効率の向上を図った。

〈2・3〉 特性 図 3 に作製した青色半導体レーザの電流-電圧 (V-I) 特性及び電流-光出力 (L-I) 特性を示す。閾値電流密度は 1.8kA/cm² であり、光出力 500mW 時の駆動電流、駆動電圧はそれぞれ 480mA, 4.8V, これより見積も

Fig. 5. Temperature dependence of Ith.

られる電力変換効率は 21.7%であった。また図 4 に光出力 500mW 時の典型的な発振スペクトルを示す。445nm 付近に複数のピークが観測されており、縦モードはマルチモードであることがわかる。

次に作製した青色半導体レーザの閾値電流の温度依存性を図 5 に示す。これよりケース温度 80°C においても急速な閾値電流の上昇は無く、活性層への注入キャリアの閉じ込

Fig. 6. CW and pulse L-I characteristics of the blue LD with a lasing wavelength of 445nm under 25°C.

Fig. 7. Result of lifetime test under ACC condition with an output power of 500mW at 25°C.

めが十分であることがわかる。これより見積もられる特性温度 (T_0) は 127K であった。

図 6 は CW 及びパルス駆動 (パルス幅: $2\mu\text{s}$, デューティ比: 1%) 時の L-I 特性を示している。CW 駆動の場合光出力が 1.2W 程度で飽和しており、発熱による発光効率の低下が確認される。なお図 5 のようにケース温度 80°C 程度までは急速な効率の低下が発生していないことを考慮すると、飽和状態の温度はそれ以上の高温であると推測される。一方パルス駆動の場合、発熱の影響がほとんど無視できるため光出力 2.5W まで駆動することが可能であった。このことは今回作製した青色半導体レーザの光学損傷 (Catastrophic Optical Damage ; COD) 等の破壊レベルが非常に高いことを示しており、GaIn 系材料の堅牢さを実証する結果であると考えられる。なお今回 LD 素子を実装したパッケージは熱容量が小さく、熱抵抗が比較的高い汎用ステム ($\phi 5.6\text{mmCAN}$ ステム) である。従って更なる高出力化に関

しては、低熱抵抗のパッケージを使用することによって比較的容易に達成可能であると考えられる。

次にディスプレイ用光源として使用する場合に重要となる寿命試験の結果について示す。ディスプレイ用光源として要求される寿命は一般に数万時間といわれており、非常に高い信頼性が要求される。図 7 はケース温度を 25°C に固定した状態でそれぞれの素子が初期光出力 500mW となるように電流値を調整し、定電流制御 (ACC) 駆動した場合の光出力の推移を示している。5000 時間まで評価を行ったが、すべての試料で突発的な劣化はみられておらず、安定性が高いことがわかる。この場合の寿命を出力の半減期 (一定電流で駆動し、光出力が初期の 0.5 倍になる期間) で定義した場合、5000 時間経過時点での光出力の劣化係数 ($\delta L / \delta T$) から、平均寿命は 30,000 時間以上と見積もられた。

3. まとめ

今回我々はエビ及び導波路構造の改良を行い、光出力 500mW の GaIn 系高出力青色半導体レーザの開発、作製に成功した。作製したレーザは高い電力変換効率 (21.7%) を持ち、かつ 2.5W まで光学的耐性があることを確認した。また 5000 時間の実駆動試験から寿命は 30,000 時間以上であると推定され、非常に要求が厳しいディスプレイ用光源としての特性を満足するものであった。

(平成 19 年 10 月 31 日受付, 平成 19 年 12 月 4 日再受付)

文 献

- (1) S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, and Y. Sugimoto : "InGaIn-based multi-quantum-well-structure laser diodes", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.35, pp.L74-L76 (1996)
- (2) S. Masui, Y. Matsuyama, T. Yanamoto, T. Kozaki, S. Nagahama, and T. Mukai : "365nm ultraviolet laser diodes composed of quaternary AlInGaIn alloy", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.42, pp.L1318-L1320 (2003)
- (3) S. Nagahama, Y. Sugimoto, T. Kozaki, and T. Mukai : "Recent progress of AlInGaIn laser diodes", *Proc. of SPIE*, Vol.5738, pp.57-62 (2005)
- (4) T. Mizushima, H. Furuya, K. Mizuuchi, T. Yokoyama, A. Morikawa, K. Kasazumi, T. Itoh, A. Kurozuka, K. Yamamoto, and S. Kadowaki : "Laser projection display with low electric consumption and wide color gamut by using efficient green SHG laser and new illumination optics", *SID 2006 Digest*, pp.1681-1684 (2006)
- (5) Y. Narukawa, Y. Kawakami, M. Funato, S. Fujita, S. Fujita, and S. Nakamura : "Role of self-formed InGaIn quantum dots for exciton localization in the purple laser diode emitting at 420nm", *APL*, Vol.70, pp.981-983 (1997)
- (6) S. Chichibu, K. Wada, and S. Nakamura : "Spatially resolved cathodoluminescence spectra of InGaIn quantum wells", *APL*, Vol.71, pp.2346-2348 (1997)
- (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 : "High-power and long-lifetime InGaIn multi-quantum-well laser diodes grown on low-dislocation-density GaIn substrates", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.39, pp.L647-L650 (2000)
- (8) K. Motoki, T. Okahisa, N. Matsumoto, M. Matsushima, H. Kimura, H. Kasai, K. Takemoto, K. Uematsu, T. Hirano, M. Nakayama, S. Nakahata, M. Ueno, D. Hara, Y. Kumagai, A. Koukitu, and H. Seki : "Preparation of large freestanding GaIn substrates by hydride vapor phase epitaxy using GaAs as a starting substrate", *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.40, pp.L140-L143 (2001)

三 好 隆

(非会員) 2000 年大阪市立大学大学院工学研究科前期博士課程修了。同年、日亜化学工業(株)入社。現在同社開発部において GaN 系半導体レーザの研究開発に従事。専門は GaN 系半導体レーザ。

藤 村 康 史

(非会員) 2002 年徳島大学大学院工学研究科前期博士課程修了。同年、日亜化学工業(株)入社。現在同社開発部において GaN 系半導体レーザの研究開発に従事。専門は GaN 系半導体レーザ。

小 崎 徳 也

(非会員) 1995 年徳島大学大学院工学研究科前期博士課程修了。同年、日亜化学工業(株)入社。現在同社開発部において GaN 系半導体レーザの研究開発に従事。専門は GaN 系半導体レーザ。

長 濱 慎 一

(非会員) 1991 年徳島大学工学部電気工学科卒業。同年、日亜化学工業(株)入社。同社開発部において GaN 系半導体レーザの研究開発に従事。2002 年、徳島大学より、博士号(工学)を受ける。専門は GaN 系半導体レーザ。

柳 本 友 弥

(非会員) 1996 年東京理科大学理工学研究科前期博士課程修了。同年、日亜化学工業(株)入社。現在同社開発部において GaN 系半導体レーザの研究開発に従事。専門は GaN 系半導体レーザ。

向 井 孝 志

(正員) 1987 年徳島大学工学部電子工学科卒業。同年、日亜化学工業(株)入社。同社開発部において GaAs, GaN 系発光デバイスの研究開発に従事。2000 年、徳島大学より、博士号(工学)を受ける。現在、日亜化学工業窒化物半導体研究所所長。