GaN基板上GaN系半導体レーザーの現状

長濱 慎一

日亜化学工業(株) 第2部門LD技術本部LD開発部 (〒774-8601 徳島県阿南市上中町岡491番地)

Current Status of GaN-Based Laser Diodes Grown on Freestanding GaN Substrate

Shin-ichi NAGAHAMA

LD Development Department, LD Engineering Division, Optoelectronics Products BU,
Nichia Corporation, 491 Oka, Kaminaka, Anan, Tokushima 774-8601

(Received July 25, 2006)

The development of optical memory devices that use violet laser diodes (LDs) has progressed significantly and these devices have been commercialized. The need for high-speed recording and multilayer recording is increasing, and it is expected that even higher power LDs will be necessary in the future. In this paper, the current state of GaN-based LD research for the next generation optical memory devices is reported, and next targets are discussed. Moreover, we developed high power pure blue laser diodes for full-color laser display. The details of these pure blue LDs characteristics are reported.

Key Words: Laser diode (LD), AlInGa_N, GaN substrate, Blue laser

1. 緒 言

1995年にGaN系材料を用いた波長405 nmの紫色半導体レーザー¹⁾が発表されて、10年以上が経過した。現在では、紫色半導体レーザーを用いた次世代大容量光メモリの実用化が進められている。今後は、より高速記録化、多層記録化の要望も強くなってきており、半導体レーザーのさらなる高出力化が必要になってくると予想される。また、最近では、GaN系半導体レーザーの発振波長域は、紫外域²⁾へあるいは、より長波長の青色域³⁾へと拡大して、医療、バイオ関連機器や、フルカラーレーザーディスプレイ等への応用が期待されている。このうち、特にフルカラーレーザーディスプレイへの応用を考えた場合、発振波長が440 nmから460 nmの純青色半導体レーザーの高出力化が強く望まれている。

本稿では、次世代大容量光メモリ用の紫色高出力半導体レーザーの現状について報告し、今後の課題について述べる。加えて、近年ディスプレイ青色表示用として注目されつつある青色半導体レーザーの最近の発展と現状について詳細に報告する。

2. 紫色高出力半導体レーザー

2.1 紫色高出力半導体レーザーの構造

開発初期は、サファイア基板上に半導体レーザー構造が作製されていた。この場合、レーザー素子寿命は数百

時間程度であり、実用レベルの信頼性が得られなかった。これは、サファイア基板とGaN間の格子不整合に起因する貫通転位が高密度($10^9 \sim 10^{10}/\text{cm}^2$)に存在するために、レーザー結晶が劣化していたためである。その結果、発光効率が低下しレーザー素子の長寿命化を阻んでいた。近年になり結晶の低転位密度化技術の開発が進み、良質のGaN基板の作製が可能となってきている。そこで、われわれは、低転位密度の自立GaN基板を用い^{4,5)}、この基板上にレーザーを作製し、レーザー素子の高出力化および長寿命化の検討を行った。

Fig. 1に、今回われわれが作製した半導体レーザーの構造概念図を示す。このレーザーは、GaN基板を用いることで上述したような格子不整合に起因する転位の発生が無いため、基板と同等の低い転位密度を実現することができる。レーザー構造はリッジストライプ構造で、外側をZrO₂膜で覆うことで水平横方向の屈折率差を設けている。また、垂直横モードの制御には、キャリアを活性層内部に、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を採用している。紫色高出力半導体レーザーでは、活性層はInGa_N多重量子井戸構造を採用し、ガイド層にはGaN層、クラッド層にはAlGa_N層をそれぞれ用いている。特に、p型クラッド層にはAlGa_N/GaNの超格子構造⁶⁾を採用することで、動作電圧の低減を図っている。また、GaN基板が導電性を有しているため、裏面にn電極を設ける対向電極構造となっており、従来の同一面に電極を形成する構造に比べ、活性層へ均等に電流注入が行え

Fig. 1 Schematic structure of GaN-based LDs.

る。このことは、横モードの安定化にも繋がっている。導電性GaN基板を用いることで従来のサファイア基板上に作製していた時よりも、作製プロセスが非常にシンプルになっている。

2.2 紫色高出力半導体レーザーの特性

光メモリ用半導体レーザーの高出力化で問題となるのがキンク(半導体レーザーの光出力-動作電流特性における非直線性のこと)の発生と出射端面の光学損傷(Catastrophic Optical Damage; COD)である。キンクが発生すると光ディスクを記録再生する際にエラーを生じてしまう。このためレーザーには、高出力領域までキンクフリーを維持することが要求される。このため、導波路内の光閉じ込め(特に水平方向)を制御する必要がある。一般的にはストライプ幅を狭くする手法が取られる。狭くすることで、レーザーの高次横モードの発生をカットオフし、高出力領域までキンクレベルを向上することができるためである。しかしながら、過剰に狭く設定すると、水平横方向の光閉じ込めが強くなりすぎてしまい、CODレベルが下がるという副作用が生じてしまう。加えて、狭ストライプ化は電極との接触面積が少なくなるため、動作電圧の上昇も懸念される。われわれはこれら課題について、レーザーのエピ層構造およびデバイス構造のさまざまな最適化検討を行った。

Fig. 2に、ケース温度を25℃、パルス駆動(パルス幅: 10 μs, デューティ: 5%)条件下で測定した典型的な紫色高出力半導体レーザーの電流-光出力(I - L)特性および電流-電圧(I - V)特性を示す。定格光出力130 mW時のオペレーション電流および電圧は、それぞれ140 mA, 5.3 Vである。また、この半導体レーザーの I - L 特性の温度特性をFig. 3に示す。レーザーのケース温度を20℃から80℃まで20℃きざみで変化させ、パルス駆動の条件下で測定を行った。全ての条件下において200 mWまでキンクフリーを実現できていることから、光閉じ込めが良好に行えていることを示している。また、このレーザーの特性温度(20~80℃)は160 Kで、温度依存性が少ないことを示している。

CODレベルを向上させるために、垂直方向の光閉じ込めを調整し、導波路内の光密度の最適化を行った。また

Fig. 2 Typical I - L and I - V characteristics of high power violet LDs.

Fig. 3 Temperature dependence of I - L characteristics.

同時に、端面保護膜の最適化も検討した。CODについて調査した結果をFig. 4に示す。これより端面破壊が700 mWを越える出力のレベルで発生していることから、CODレベルについては十分な性能を有していることがわかる。

高温動作試験結果をFig. 5に示す。測定条件は、レーザーのケース温度を70℃に設定し、パルス駆動(パルス幅: 30 nsec, デューティ: 50%)でレーザーに光出力130 mWを維持するようにAPC(Auto Power Controller)駆動させ、動作電流をモニターした。図から、レーザーは1000時間以上安定して動作しており、この時の推定寿命は数千時間となっている(動作電流が初期の1.3倍になった時がライフエンドと定義)。高い信頼性が得られていることがわかる。

3. 青色高出力半導体レーザー

3.1 しきい値電流の発振波長依存性

本項では、405 nm帯紫色半導体レーザーよりも発振波長が長い青色領域でのレーザーの作製とその特性について述べる。Fig. 6に、2001年、2003年および2005年時点でのレーザー素子のしきい値電流密度の発振波長依存性を示す。レーザーのケース温度を25℃、連続動作(CW)の条件下で測定を行った。活性層の成長温度をより低温で成

Fig. 4 Result of Catastrophic Optical Damage (COD) test.

Fig. 5 Result of lifetime test of violet LDs under pulsed current operation at 70 °C.

長を行うことで、井戸層のIn組成比を増加させてレーザーの発振波長を長波長化させている。同図から、レーザー素子のしきい値電流密度は発振波長に大きく依存し、発振波長が長波長になるにしたがって上昇することが分かる。また、2001年時点では、発振波長が450 nmを超えるとしきい値電流密度が非常に大きくなりCW発振が実現できなかったのに対し、2003年時点では472 nm、2005年では482 nmとなり、開発年月を追うごとにCW発振が可能となる最長波長が長くなっていることが分かる。

発振波長が長くなるにしたがってしきい値電流密度が上昇する理由として、活性層であるInGaIn層中のInの空間的組成揺らぎ^{6,7)}による影響、およびエピ深さ方向の光閉じ込めの減少が挙げられると思われる。このうち前者のIn組成揺らぎについては、LEDの発光効率の向上には寄与したが、レーザーの場合、光学利得には寄与せず逆に吸収として作用するため内部損失となる。したがって、発振波長が長い、すなわちIn組成の大きいレーザーでは、内部損失が増大し、しきい値電流密度が上昇すると考えられる。また、後者の光閉じ込め効果の減少に関しては、波長が長くなるほど屈折率の波長分散⁸⁾によりガイド/クラッド層間の屈折率差が低下することで光閉じ込めが低下し、レーザー素子のしきい値電流が増大するためである。

Fig. 6 Lasing wavelength dependence of threshold current density under cw operation at 25 °C. (#1: S. Nagahama, et al., Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2001) 3075. #2: S. Nagahama, et al., *Proc. SPIE* **4995** (2003) 108. #3: K. Kozaki, et al., 2005 International Symposium Digest of Technical Papers **36** (2005) 1605.)

しかしながらわれわれは、これらしきい値電流上昇要因に対し、主に基板の欠陥密度の低減化、InGaIn活性層の結晶性を向上させる結晶成長技術およびレーザーエピ構造の最適化により、発振波長が482 nmの青緑色領域まで発振波長の拡大に成功している。さらに特記すべきは、Fig. 6の2005年時点でのデータ³⁾において、カラー表示としての青色の波長である450 nmから460 nmの領域まで、しきい値電流密度の上昇が見られないことである。このことは、純青色半導体レーザーの発光効率が、GaIn系半導体レーザーの最も発振しやすい405 nm帯紫色領域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と思われる。

3.2 青色高出力半導体レーザーの特性

カラー表示としての青色LDに望まれる波長は、440 nmから460 nmである。われわれはレーザーの波長を445 nmに設定して、レーザーの高出力化を図った。一般的に、高出力化の方法には、出射端面の光密度を低減するため、単一ワイドストライプ構造、マルチストライプ構造などの構造が採られる。今回われわれが採用した構造は、単一ワイドストライプ構造であり、ストライプ幅を7 μmとした。レーザーの構造および作製の詳細に関しては、これまでに発表された報告³⁾に譲る。

Fig. 7は、発振波長445 nmのレーザーの典型的なI-L、I-V特性である。測定は、レーザーのケース温度25 °C、CW駆動の条件下で行った。図から、しきい値電流は98 mA、光出力500 mW時の電流値および電圧値は、それぞれ480 mA、4.8 Vであった。よって、電力変換効率(Wall-Plug Efficiency; WPE)は、21.7 %である。また、このレーザーの500 mW光出力時のスペクトルをFig. 8に示す。図から、ピーク発振波長は445.5 nmであり、縦マルチモード発振していることが分かる。

Fig. 9に、このレーザーをパルス電流(パルス幅: 2 μs, デューティ: 1 %)およびCW駆動した場合のI-L特性の比較図を示す。図から、CW駆動時の光出力は、発熱による影

Fig. 7 Typical I-L and I-V characteristics of high power blue LEDs under cw operation at 25 °C.

Fig. 8 Emission spectra of blue LEDs measured at an output power of 500 mW under cw operation.

響で約1.2 W程度のところで飽和したのに対し、パルス電流で駆動した場合は、スロープ効率が飽和せずに光出力が最大で2.5 Wまで駆動することができた。この結果は、作製した青色半導体レーザーが、COD等による破壊レベルが非常に高いことを示唆しており、GaN系材料の堅牢さを実証する結果であると思われる。また、今回レーザー素子を実装したパッケージは、熱容量が小さく、熱抵抗が比較的大きなφ5.6 mmの汎用ステムである。光出力が1 Wを超える高出力化に関しては、この汎用ステムより熱抵抗の小さなパッケージを採用することで、比較的容易に達成することが可能であると考えられる。

Fig. 10に、この青色レーザーの寿命試験結果を示す。測定は、光出力が500 mWになるときの電流をレーザー素子に駆動(ACC駆動; Auto Current Controller)し、個々のレーザーの光出力の経時変化をモニターした。1000時間経過後の劣化係数($\delta L/\delta t$)から、平均の推定半減期は、約1万時間以上と見積もられ、信頼性の高いレーザーが得られていることが分かる。

4. 結 論

GaN系材料を用いた波長405 nmの紫色レーザーは研究開発が完了し、大容量光メモリに必要な特性を十分得られている。今後、大容量光メモリは高速記録化や多層記録化が進むと思われるため、紫色半導体レーザーにはさら

Fig. 9 I-L characteristics of blue LEDs by cw and pulsed current operation at 25 °C.

Fig. 10 Result of lifetime test under ACC with an output power of 500 mW at 25 °C.

に高い光出力が求められる。今後の課題として、さらなる高出力化(200 mW以上)、また、ノイズ特性やビーム形状の低アスペクト比化などの特性の改善によって、ビームの利用効率を高めることなどが挙げられる。

また、カラー表示用としての青色半導体レーザーにおいては、光出力0.5 Wまで高出力化が進み、加えて高い信頼性も確保できている。今後さらなる高出力化に関しては、チップ構造の最適化、低熱抵抗パッケージの採用等が必要であると思われる。

参考文献

- 1) S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, and Y. Sugimoto: Jpn. J. Appl. Phys. **37** (1996) L74.
- 2) S. Masui, Y. Matsuyama, T. Yanamoto, T. Kozaki, S. Nagahama, and T. Mukai: Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) L1318.
- 3) K. Kozaki, T. Yanamoto, T. Miyoshi, Y. Fujimura, S. Nagahama, and T. Mukai: 2005 International Symposium Digest of Technical Papers **36** (2005) 1605.
- 4) 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: Jpn. J. Appl. Phys. **39** (2000) L647.
- 5) K. Motoki, T. Okahisa, N. Matsumoto, M. Matsushita, 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: Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2001) L140.
- 6) Y. Narukawa, Y. Kawakami, M. Funoto, Sz. Fujita, Sg. Fujita, and S. Nakamura: Appl. Phys. Lett. **70** (1997) 981.
- 7) S. Chichibu, K. Wada, and S. Nakamura: Appl. Phys. Lett. **71** (1997) 2346.
- 8) 稲森 正彦, 近藤 哲也, 天野 浩, 赤崎 勇: 電子情報通信学会 信学技報 (1994) p. 13.