

# 光ディスク用青紫色半導体レーザー

岡内 茂樹\*・小崎 徳也\*\*・榊井 真吾\*\*・大森 雅樹\*\*\*

## Blue-Violet Laser Diode for Optical Data Storage

Shigeki OKAUCHI\*, Tokuya KOZAKI\*\*, Shingo MASUI\*\*, Masaki OMORI\*\*\*

Almost twelve years have passed since the initial development of GaN based blue-violet laser diodes (LDs) at 405 nm wavelength range in 1995. Now, the development of the next-generation optical memory which uses the laser diode has been progressing and been already commercialized. The needs for a high-speed recording and multilayer recording are increasing, and it is well expected that even higher power LDs are necessary. In this paper, the current state of GaN based laser diode for a next generation optical memory and laser for holographic memory is reported.

**Key words:** AlInGaN, laser diode, high power, DFB, ECLD

ディスプレイの大型化, 映像の HD (high definition) 化が広まるなか, 高画質の映像を記録・再生するためには光メモリーの大容量化が必要となっている。大容量記録再生機器の代表として, 次世代大容量光メモリーである Blu-ray Disc などのフォーマットが挙げられる。多くのメーカーが次世代大容量光メモリーの開発を進めており, 2003 年春に世界ではじめて Blu-ray Disc が発売されて以来, AV 機器や PC 向けに複数のメーカーから Blu-ray Disc 機器が製品化されている。

これら次世代大容量光メモリーには波長 405 nm の青紫色 GaN 系半導体レーザーが使用されており, 次世代大容量光メモリーを実現させるためのキーデバイスとなっている。今後, Blu-ray Disc 向けの LD は高速記録化, 多層記録化に向けてさらなる高出力化が必要になると予想される。

また, その次々世代のさらなる大容量の光メモリーとして近接場光メモリー, 超解像光メモリー, 二光子吸収メモリー, ホログラフィックメモリー等もすでに開発が始まっており, このなかでも最近特に注目されているのがホログラフィックメモリーである。この記録システムは, 情報光

と参照光を用い光の干渉を利用して立体的に光ディスクに記録するものであるため光の干渉性が重要で, レーザー光源としてはスペクトルの単一縦モードが必要不可欠となっている。

本稿では, 次世代大容量光メモリーの光源の GaN 系高出力 LD と次々世代大容量光メモリーの光源候補である回折格子を素子内部にもつ DFB (distributed feedback) 半導体レーザーと外部共振器を利用した EC (external cavity) 半導体レーザーの現状を紹介する。

### 1. 青紫色高出力半導体レーザー

GaN 系材料を用いた半導体レーザー (LD) は, 1995 年に電流注入による室温パルス発振<sup>1)</sup>が達成されて以来, 12 年が経過した。その間, 結晶の転位密度の低減や LD 構造の最適化により目覚ましい進歩を遂げ, 2007 年にはパルス出力が 250 mW の高出力タイプがサンプル出荷される一方, パルス出力 420 mW でケース温度 80°C 時の推定寿命が 10000 時間の高出力 LD が開発されている。

#### 1.1 青紫色高出力半導体レーザーの構造

GaN 系 LD 研究の初期は, サファイア基板上に LD 構

\* 日亜化学工業(株)LD事業企画部 (〒774-8601 阿南市上中町岡 491 番地) E-mail: shigeki.okauchi@nichia.co.jp

\*\* 日亜化学工業(株)LD開発部 (〒774-8601 阿南市上中町岡 491 番地)

\*\*\* 日亜化学工業(株)横浜技術研究所 (〒221-0022 横浜市神奈川区守屋町 3-13-19)

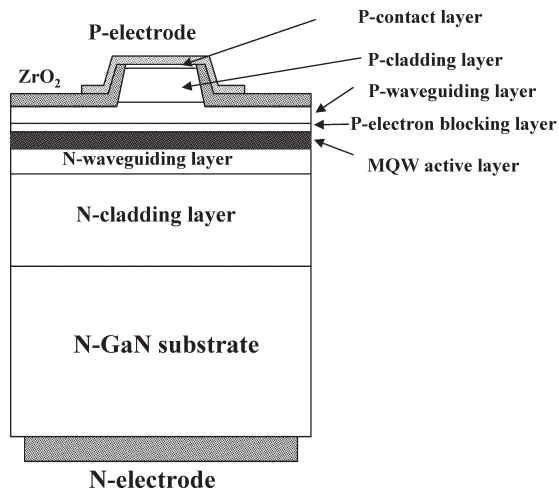


図1 青紫色半導体レーザーの構造概念図。

造が作製されていた。この場合、LDの素子寿命は数十mWの出力であっても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<sup>2,3)</sup> 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LDの長寿命化を阻んでいた。GaN系LDにおいても他の材料系と同様に、LD素子の長寿命化には、基板転位密度の低減が必要不可欠であるといえる。

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基板の作製および入手が可能となってきた。この低転位密度 ( $10^5 \sim 10^6/\text{cm}^2$ ) の自立GaN基板を用い<sup>4,5)</sup>、LD素子の高出力化および長寿命化が図られている。

図1は自立GaN基板上に製作されたLDの構造概念図である。このLD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ないため、基板と同等の低い転位密度を実現することができる。LD構造はリッジストライプ構造で、外側をZrO<sub>2</sub>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。また、GaN基板が導電性であるため、裏面にn電極を設ける対向電極構造となっており、サファイア基板を使用した場合に必要であった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る。このことは、横モードの安定化につながっている。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ときよりも、作製プロセスが非常にシンプルになっている。

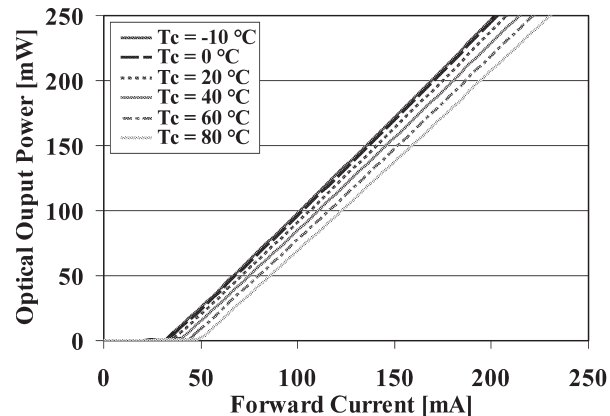


図2 青紫色半導体レーザーの電流-光出力の温度依存性。

## 1.2 青紫色高出力半導体レーザーの特性

光メモリー用LD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、LDの発光点位置が移動してしまい、光ディスクを記録再生する際にディスクから反射してくる光で得られる信号にエラーが生じてしまう。このため、高出力領域までキンクフリーを維持する必要がある。そのためには、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り、一般的にはストライプ幅を狭くする手法がとられる。狭くすればするほどより高出力領域までキンクレベルを向上させることができるが、あまり狭くしすぎると、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。また、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。特にGaN系LDは他の材料と比べ物性上、電圧が高くなってしまいうため、省電力化という観点からみても、電圧の上昇は喜ばしいことではない。このように、高出力になればなるほど、要求される特性を満たすことが難しくなってくる。そこで、これら課題についてさまざまな検討が行われている。

### 1.2.1 キンクフリーの実現

活性層領域で発生する光は、水平方向はリッジ構造によって閉じ込める。キンクフリーを実現するために、ストライプ幅とストライプ両脇の絶縁膜を調整し、水平方向の光閉じ込めの最適化が実施されている。図2は、パルス駆動の条件下で250mWまで、LDのケース温度を-10°Cから80°Cにわたってキンクフリーであることをあらわしている。

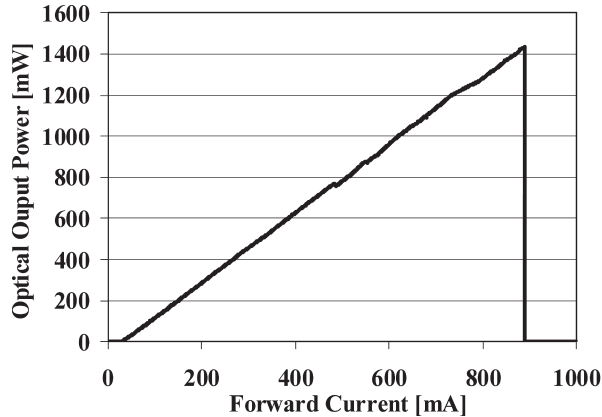


図3 青紫色半導体レーザーのCODレベル.

### 1.2.2 CODレベルの向上

CODレベルを向上させるために、レーザー出射口の平坦性の向上や、垂直方向の光閉じ込め（クラッド層とガイド層の屈折率差）を調整することで、導波路内の光密度の最適化が行われているが、端面保護膜の最適化もあわせて実施することによりキंकフリーレベルを上げるとともにCODレベルも上げることができる。図3は、CODレベルが光出力1.4 Wを超え高出力化に十分耐えうるCODレベルであることを示している。

### 1.2.3 低電圧化の実現

図4は、パルス250 mWまでの駆動電圧の温度特性である。高温では駆動電圧は低いが、低温になればなるほど高くなる。GaN系LDは他の材料と比べ物性上電圧が高くなる。特にp型層は内部抵抗が高いため、p型層の低抵抗化が大きな課題となる。この課題に対して、pクラッド層に超格子構造の採用、またアニール処理を用いることでアクセプターの活性化を促し、低い電圧特性を実現させている。これにより、LD駆動回路への負担も低減できると思われる。

### 1.2.4 信頼性

光メモリーには高温での信頼性が重要視される。特にPC用途については、昨今ノートPCの普及拡大に伴い、非常に薄い光ディスクドライブが出現している。その薄型化に伴いPC内の温度が上昇し、その結果として高温動作時の信頼性が問われるわけである。図5はケース温度が80°C、光出力が250 mWで一定になるようにパルス電流をレーザーに入力したときの試験結果であり、1000時間経過した時点でも安定して動作していることを示している。1000時間経過時の動作電流を外挿し、動作電流が初期の1.3倍になったときがライフエンドと定義すると、推定寿命は10000時間以上となっている。

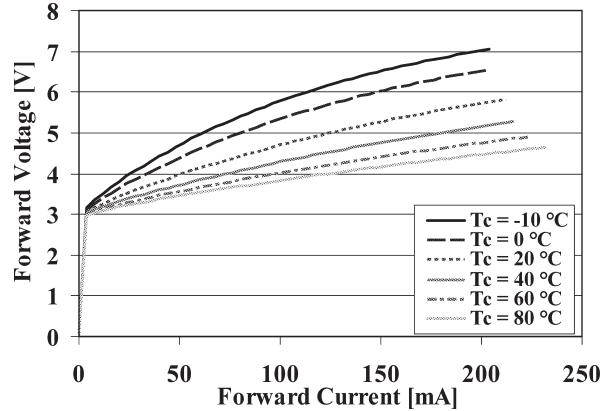


図4 青紫色半導体レーザーの駆動電圧の温度依存性.

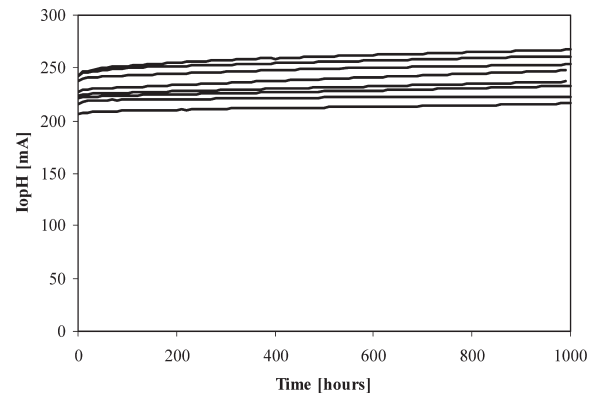


図5 青紫色半導体レーザーの高温動作試験.

## 2. 次々世代光メモリー用光源（単一縦モードを示すDFBLDとECLDについて）

ホログラフィックメモリーは光の可干渉性を利用するものであるため、スペクトルの単一縦モードが必要不可欠である。これまで赤色DFBLD (distributed feedback laser diode) や緑色固体レーザーが研究用途に使用されていたが、短波長化により記録容量が増えることから、青紫色405 nm GaN系DFBLD<sup>6,7)</sup> およびECLD<sup>8)</sup> が研究、開発されている。

### 2.1 青紫色DFB半導体レーザー

DFBLDはLD内に回折格子構造を設けることにより、その回折格子パターンで決まる波長で発振する。現在の青紫色DFBLDは、MOCVD (metal organic chemical vapor deposition) 法により、低転位GaN基板上にn-clad層まで成長させ、MOCVD炉内から取り出した後、EB (electron beam) lithographyにより周期80 nm深さ100 nmの1次回折格子パターンを形成し、そして活性層を含むLDエピ構造を再成長させることで作製されている。

図6および7は、青紫色DFBLDの電流-光出力曲線と

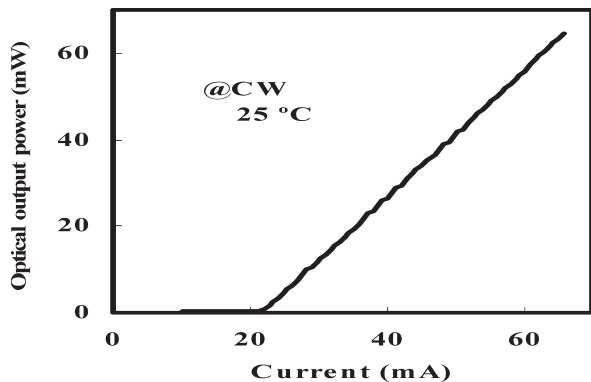


図6 青紫色DFBLDの電流-光出力特性.

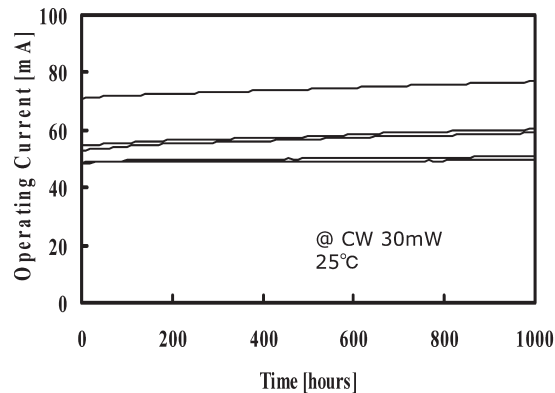


図8 青紫色DFBLDの寿命試験.

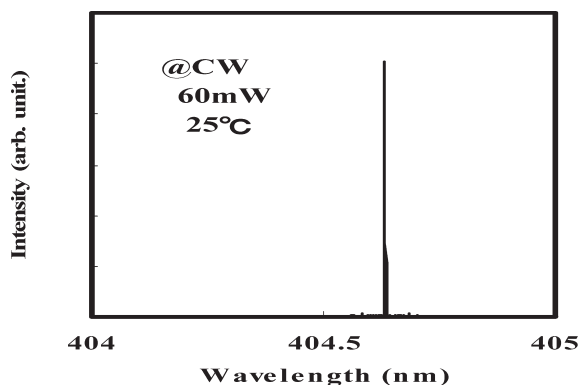


図7 青紫色DFBLDのスペクトラム.

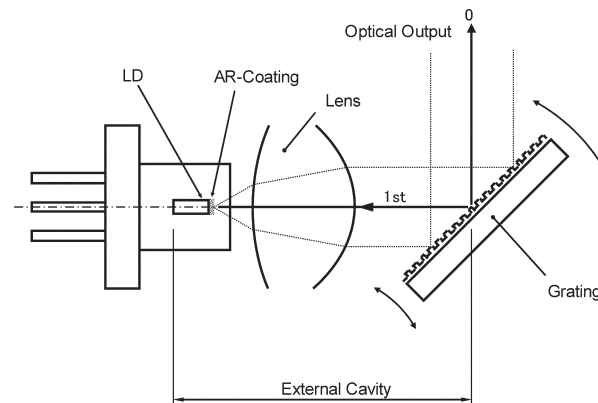


図9 リトロタイプECLDの原理図.

発振スペクトルである。端面は出射側コートなし、リア側HR (high-reflection) コートで構成されており、電流-光出力曲線は通常のLDと変わらない特性を示している。発振スペクトルについては、単一縦モードのスペクトルが得られている。青紫色DFBLDの波長-温度依存性は次世代大容量光メモリー向けLDの0.06 nm/°Cと比べて0.016 nm/°Cと小さく、DFBレーザー特有の回折格子の屈折率の温度依存性が反映された結果が得られており、20°Cで約0.3 nmの変化となっている。図8は、光出力を30 mWに固定してケース温度25°C、1000時間の駆動電流ライフ試験結果である。急激な劣化もなく、推定寿命計算を $\Delta I_{op}=1.3$ と定義すれば、4000時間以上の推定寿命が得られている。また、ライフ試験前後において単一縦モードが維持されていることも確認されている。

## 2.2 外部共振半導体レーザー (ECLD)

現在、ホログラフィックメモリーの記憶媒体は温度依存性がある。温度が変わると媒体が収縮し屈折率が変化する。そのため、媒体温度が5°C変化すると記録時と同じ角度では再生することができなくなり、媒体の温度を制御するか光源の波長を変えることで再生可能となっている。そ

のため、記録時と異なる温度状態で再生することが可能なように波長可変型ECLDが開発されている。図9はリトロタイプのECLDの原理を示している。LDの出射端面はAR (anti reflective) コートされており、LD端面から縦モードがマルチの光が出射し、その光はグレーティングにより1次光と0次光に分けられる。そのグレーティングからの1次光が、端面からLDに戻ることで増幅され単一縦モード発振する。出射端面がARコートされていることで、グレーティングが共振器の役割をはたしている。

波長を変えるためには、グレーティングの角度を変更することにより対応し、媒体の温度変化から求められる波長になるように制御する。一方、単一縦モードを維持するためにはLDを駆動する電流を制御する。モードセンサーによりモードの単一性はモニターされている。図10により、波長可変時に波長およびモード制御によって単一縦モードが維持されていることがわかる。

図11は、駆動電流を120 mAに固定したときの雰囲気温度45°Cの寿命試験データである。2000時間以降の出力低減カーブから見積もられる推定寿命は、4000時間以上となっている。



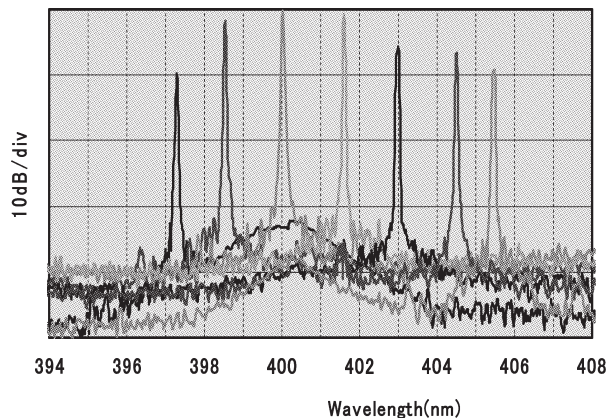


図10 ECLDの波長可変時の縦モード。

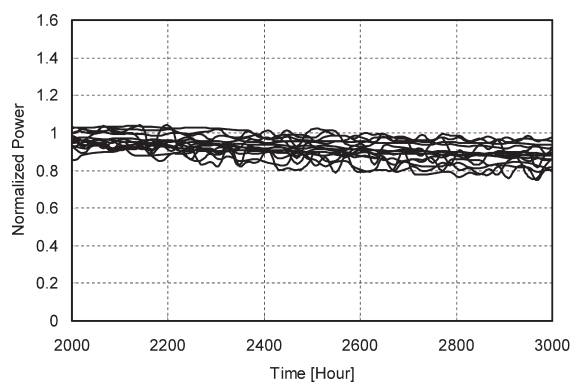


図11 ECLDの高温動作試験。

GaN系材料を用いた波長405nmの紫色レーザーは研究開発が進み、次世代大容量光メモリーに必要な高速記録化や多層記録化にも対応できる高出力が達成できつつある。今後の課題として、さらなる多層媒体に対応できるマルチエミッター化や、ノイズ特性やビーム形状の低アスペクト比化などのLD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、LDの低価格化についてはGaN基板の低価格が必須であるが、基板の大口径化や大型化が早期に実現することが望まれる。

次々世代大容量光メモリー候補のひとつであるホログラフィックメモリー用光源としては、業務用途向けに波長可変型ECLDで対応可能となっているが、民生向けにはメディアの温度依存性の改善やDFBLDの量産設計などが必要である。

## 文 献

- 1) S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku and Y. Sugimoto: "InGaN multi-quantum-well-structure laser diodes with cleaved mirror cavity facets," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996) L217-L220.
- 2) S. D. Lester, F. A. Ponce, M. G. Crawford and D. A. Steigerwald: "High dislocation densities in high efficiency GaN-based light-emitting diodes," *Appl. Phys. Lett.*, **66** (1995) 1249-1251.
- 3) W. Qian, M. Skowronski, M. Degraef, Doverspike, L. B. Rowland and D. K. Gaskill: "Microstructural characterization of  $\alpha$ -GaN films grown on sapphire by organometallic vapor phase epitaxy," *Appl. Phys. Lett.*, **66** (1995) 1252-1254.
- 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: "High-power and long-lifetime InGaN multi-quantum-well laser diodes grown on low-dislocation-density GaN substrates," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) L647-L650.
- 5) K. Motoki, T. Okahisa, N. Matsumoto, M. Matsushita, H. Kumura, H. Kasai, Y. Kumagai and A. Koukisu: "Preparation of large freestanding GaN substrates by hydride vapor phase epitaxy using GaAs as a starting substrate," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (2001) L140-L143.
- 6) S. Masui, K. Tsukayama, T. Yanamoto, T. Kozaki, S. Nagahama and T. Mukai: "First-order AlInGaN 405 nm distributed feedback laser diodes by current injection," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) L749-L751.
- 7) S. Masui, K. Tsukayama, T. Yanamoto, T. Kozaki, S. Nagahama and T. Mukai: "CW operation of the first-order AlInGaN 405 nm distributed feedback laser diodes," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45** (2006) L1223-L1225.
- 8) T. Tanaka, K. Sako, R. Kasegawa, M. Toishi, K. Watanabe and S. Akao: "Tunable blue laser for holographic data storage," *Optical Data Storage 2007 Technical Digest (ODS '07)* (Portland, 2007) WC3.

(2007年12月10日受理)