

# 窒化ガリウム(GaN)系半導体レーザーの高出力化の現状と今後の展開

河西 秀典

研究開発本部 基盤技術研究所

窒化ガリウム(GaN)系青紫色半導体レーザーは、Blu-ray Disc用として急速に普及が進んできましたが、多層記録への対応、書き込みの高速化のためにはより高い光出力が必要となります。ここでは、光を放出する結晶表面(光出射端面)への独自保護膜形成により、主たる劣化モードである端面破壊を防止し、パルス500mWにおいても高い信頼性を有する高出力青紫色半導体レーザーについて解説します。また、青紫以外の他の波長域、特にプロジェクタ等の光ディスク用以外のアプリケーションへの利用が検討されている純青色半導体レーザーから緑色レーザーを目指した長波長領域への展開について解説します。

## 1 はじめに

本号の技術開発物語で詳しく述べられていますように、Blu-ray Disc(BD)用青紫色(405nm)半導体レーザーは既にパルス250mW級が量産され、幅広く使われています。BDの記録容量は片面1層あたり25GBですが、DVDのときと同じく多層化による大容量化と書き込み速度の高速化の流れの中で、現行商品を上回る更なる高出力化が強く求められています。例えば3層/4層ディスクで6倍速の場合にはパルス410mW、8倍速ではパルス500mWの光出力で高い信頼性を持つ半導体レーザーが必要となります。

本稿では青紫色半導体レーザーの高出力化における課題について説明し、その解決手法とそれを適用したパルス500mW級青紫色半導体レーザーについて解説します。

また今後の展開として、光ディスク以外の用途、例えばプロジェクタなどへの応用が期待される他の波長域、特により長波長の窒化ガリウム(GaN)系半導体レーザー開発の現状についても紹介します。

## 2 高出力化における課題

光ディスク用半導体レーザーでは、ディスク上の小さいスポットに光を集光させる必要がありますので、レーザーチップには光を狭い領域に閉じ込めて安定した光ビーム(横モードと呼ばれます)を得るための幅1.0~2.0 $\mu$ mのリッジ構造が形成されています。

図1に青紫色半導体レーザーの断面構造の模式図を示します。活性層で生じる光は、縦方向にはクラッド層と呼ばれる光閉じ込め層でサンドイッチ構造とし、横方向にはリッジ構造によって閉じ込められます。つまり、ミクロン単位の非常に小さい領域に高密度の光が閉じ込められる構造となっています。因みにリッジの幅を広くすると光密度を下げることは可能ですが、横モードは不安定となり、後述する注入電流—光出力の特性においてキックとよばれる非線形性が出現します。これではもはや光ディスク用としては使用できませんので、高い光密度に耐えるレーザーの実現は光ディスク用としては必須の条件です。

この光密度は特にレーザーの光出射

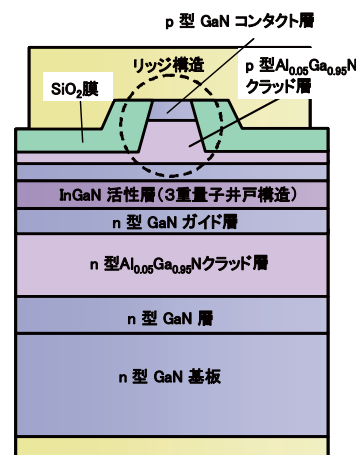


図1 青紫色半導体レーザーの断面模式図

端面近傍で高くなり、端面付近の表面準位などでの光吸収を介した端面の発熱となってレーザーの信頼性を低下させてしまいます。通常高出力半導体レーザーの光出射端面(前面)、および後面には光反射率を制御するコーティング膜が付加され、前面反射率を低く、後面反射率を高くすることで効率よく前面から光を取り出します。

その一方で、光ディスクの表面で反射した光がレーザー内部に戻るとレーザー発振が不安定になるという問題が発生します。これは戻り光ノイズと呼ばれる現象で、これを避ける

ために前面反射率も最適な値に設定されます。従って、定められた条件のもとで高い光密度に耐えるレーザーの実現が高出力化における最大の課題となります。

それ以外にも注入する電流によるジュール熱で発熱しますので、電流をできるだけ小さくする、つまり光電変換効率を向上させる必要があるなど、多くの点に注意が必要です。

### 3 新しい端面コーティング技術による高出力青紫色半導体レーザー

従来から GaN 系半導体レーザーの光出射端面には SiO<sub>2</sub>、TiO<sub>2</sub>、ZrO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> などの酸化物が保護膜としてコーティングされています。屈折率と膜厚を制御することで所望の反射率を得るという意味では上記保護膜は有効に働きました。また端面を保護して信頼性を高めるためにも一定レベルの効果を発揮します。但し、高出力レベルでの高い信頼性を得るまでには至っていなかったというのが現状です。通常、半導体レーザーに大電流を注入すると COD (Catastrophic Optical Damage) と呼ばれる端面破壊を起こして劣化してしまいます。長期信頼性試験においてはこの現象に起因する突然の劣化(頓死)が発生しますので、如何にこれを防ぐかが重要となります。

シャープでは、詳細な検討を進めた結果、AION 膜を端面と通常の保護膜の間に用いることでこの COD 破壊レベルが向上することを見出しました。ここでは、それを適用した高出力半導体レーザーについて紹介します。

ここで用いた半導体レーザーは図1に示した構造ですが、チップの長さ(共振器長)は 800 μm で、電流を SiO<sub>2</sub> 膜(絶縁膜)の無いリッジ部分のみに注入しています。

前面、および後面のコーティングにはまず、ターゲットをアルミニ

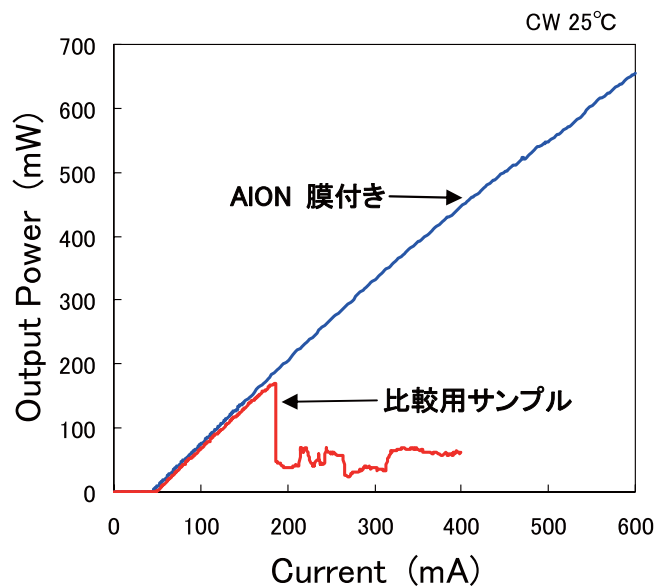


図2 試作した青紫色半導体レーザーの注入電流 - 光出力特性

ウム、スパッタガスをアルゴンとした ECR プラズマによる反応性スパッタを用い、反応性ガスに酸素ガスと窒素ガスを使って AION 膜を形成しています。その上に反射率が約 16% になるように調整して保護膜を形成しました。後面側は多層膜を追加することにより反射率を 95% としました。

このようにして実際に試作した半導体レーザーに連続駆動 (CW) で電流を注入して素子の破壊レベルを調べた結果を図2に示します。比較用として作製した AION 膜無しの素子では約 200mW で端面破壊が生じているのに対して、AION 膜付きの場合には 600mW 以上まで端面破壊が見られず、安定に動作していることが確認できます。

図3に、AION 付の保護膜を施したレーザーの端面近傍の断面 TEM (透過型電子顕微鏡) 像を示します。GaN 系半導体で構成されるレーザーと保護膜の間に AION 層が形成されていることがわかります。ここで特徴的なのは、AION 膜が横方向(成膜方向)に配向しているという点です。AION 膜の電子線回折パターンを評価したところ、この AION 膜は単結

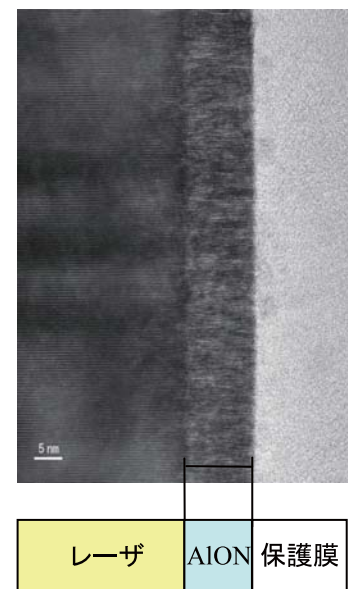


図3 光出射端面の断面 TEM 像

晶であることが確認されました。即ち GaN 系の結晶であるレーザーの端面上に AION 膜が結晶方位を保ちながらエピタキシャル成長しているということです。

このことより、GaN 系結晶と AION との間には良好な界面が形成され、端面破壊につながる界面準位が非常に少ないものと考えられます。

通常、端面保護膜に使用される酸化膜は、レーザーの端面に形成されるとほとんどの場合アモルファス、或

いは多結晶となるため、このように単結晶でエピタキシャル成長するAIONは特異な材料です。また、酸化アルミニウム、窒化アルミニウムともに非常に安定な材料ですから両方の性質を合わせ持つこの膜の安定性が高いのも十分に納得できる結果です。

AION膜はレーザを構成する材料GaN, InGaN, AlGaNを含む層構造のへき開面上に形成されており、それぞれの界面では歪が内在しているはずですが、それにも関わらずAION膜自身も光吸収の少ない、端面保護膜として最適な膜となっています。一方、その上に形成された保護膜はアモルファスとなっていることが断面TEM像からわかります。

次に長期信頼性試験の結果について説明します。まずは、6倍速の要求レベルを超えるパルス430mWにおける結果を図4に示します。信頼性試験は80℃でAPC (Automatic Power Control) 駆動での結果です。端面破壊レベルが向上したことを反映して約1500時間まで頓死と呼ばれる突然の劣化が全くなく、安定して動作していることが確認できました。更に、パルス500mWにおける信頼性試験の結果を図5に示します。500mWにおいても1000時間まで頓死が無く、安定して動作することが確認され、今回の青紫色半導体レーザは、BDの3層/4層の8倍速に対応可能なレベルの信頼性を有することが確認されました。

#### 4 GaN系半導体レーザの他の波長域への展開

GaN系材料は、In, Alとの混晶(InGaN, AlGaNなど)を用いることにより、そのバンドギャップが大きく変化するため、深紫外から赤外に至るまでの幅広い波長範囲で発光素子が実現できるポテンシャルを有しています。

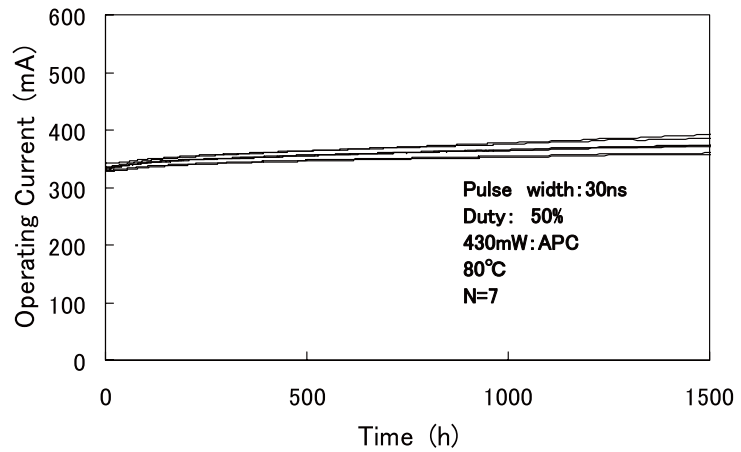


図4 試作した青紫色半導体レーザのパルス430mWにおける信頼性試験結果

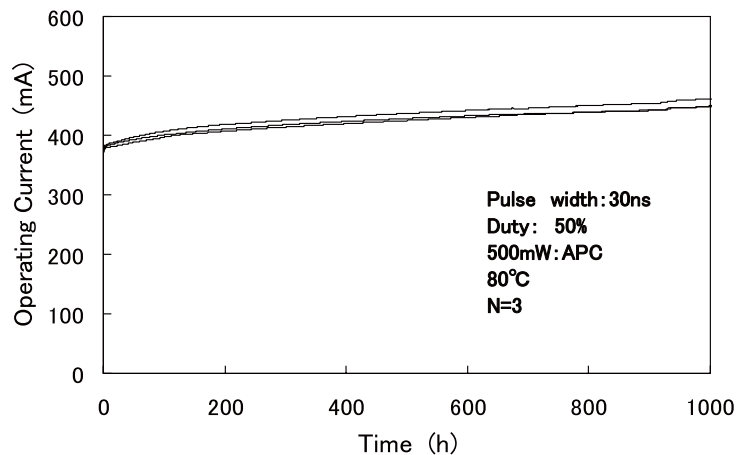


図5 試作した青紫色半導体レーザのパルス500mWにおける信頼性試験結果

そのうち赤外領域から赤色まではGaAs系やInGaAlP系の他の化合物半導体でカバーできる領域ですから、青色から緑色にかけての波長帯域がGaN系半導体に大きな期待のかかる波長帯です。青色と緑色半導体レーザが実現すれば3原色が揃うこととなりますから、ディスプレイ、プロジェクタなどの分野へとその応用の幅が広がることとなります。

ここではシャープにおける青色半導体レーザ及び緑色レーザに向けた開発の現状について解説します。

青紫色(405nm)から青色(440~450nm)、更には緑色(520nm)へと長波長化するためには量子井戸からなる活性層の井戸層に含まれるInの量を増やす必要があります。活性層中でInにはもともと組成ゆらぎがあると言われていました。また、

InGaN混晶は格子定数や結合エネルギーが大きく異なる材料(InNとGaN)の混晶であることから、この2つの材料は均一に混合するよりも相分離する方が本質的に安定となります。従って、長波長化の際には常にこの問題が付随します。

まず、青色半導体レーザについて説明します。基本的には405nmのレーザ構造を基本として量子井戸活性層のInの量を増やすことで長波長化します。長波長化とともに相分離によるIn組成の不均一の問題等によってレーザ発振を得るための活性層の利得は405nmと比較して小さくなるため、それを考慮した設計が必要となります。ここでは、活性層に2重量子井戸を採用し、共振器長は600μm、前面の反射率を60%まであげることで低い利得でも発振

可能な構成とすることにより、良好な特性を得ることができました。

図6に試作した青色半導体レーザの電流-光出力特性を示します。発振を開始する閾値電流は室温(25°C)で25mA, スロープ効率は0.84W/A, 発振波長は445nmであることを確認しました。

次に、青色半導体レーザの信頼性について説明します。図7にCW 60mW, 70°C, APC駆動での信頼性試験の結果を示します。700時間以上まで安定して走行していることが確認できます。素子寿命を駆動電流が当初の1.3倍に達した時点までと定義すると、500時間経過時点の電流増加率からMTTF (Mean Time To Failure) で表される寿命は5000時間以上と見積もられ、高い信頼性を有することが確認されました。

また、プロジェクトなどにおける実際の使用状態に近いパルス駆動での信頼性試験結果を図8に示します。パルス駆動条件はパルス幅0.35ms, デューティ25%としました。この条件においても700時間以上安定走行していることが確認できました。パルス120mW, 70°Cにおける寿命は同様にMTTFで3000時間以上と見積もられます。以上示しましたように、青色の波長(445nm)までは良好な特性が実現できることが確認されました。

続いて更に長い波長におけるレーザ発振の実現に向けた取り組みについて説明します。これまで述べたレーザは全てc面と呼ばれる極性を有するGaN基板の上に結晶成長して作製されます。活性層の内部には極性に起因する大きな自発分極電界(ピエゾ電界)が存在し、素子の発光特性に大きな影響を及ぼします。この影響は波長が長くなるほど大きいため、長波長レーザ実現の大きな障害となっています。

c面上のアプローチに加えてピエゾ

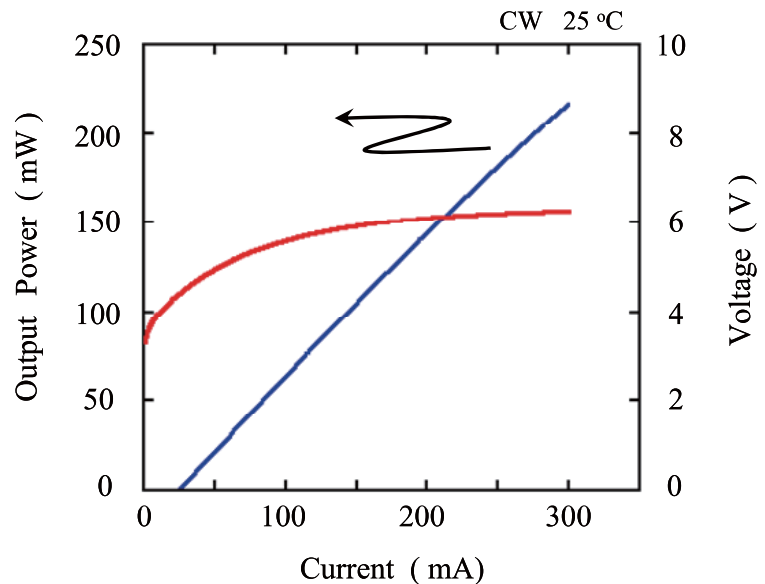


図6 試作した青色半導体レーザの電流 - 光出力特性

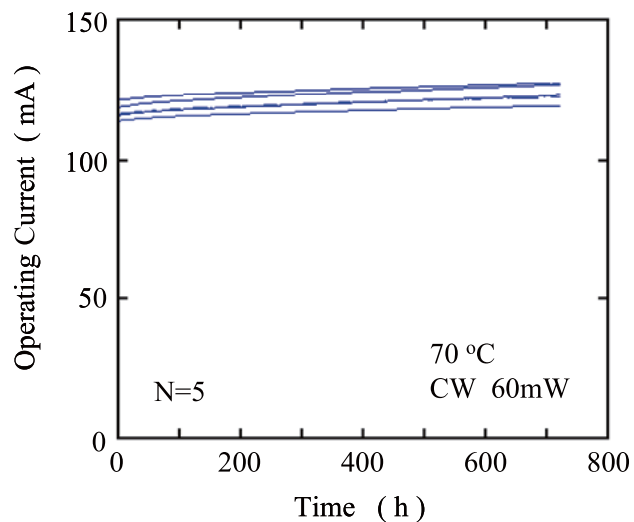


図7 試作した青色半導体レーザのCW 60mWにおける信頼性試験結果

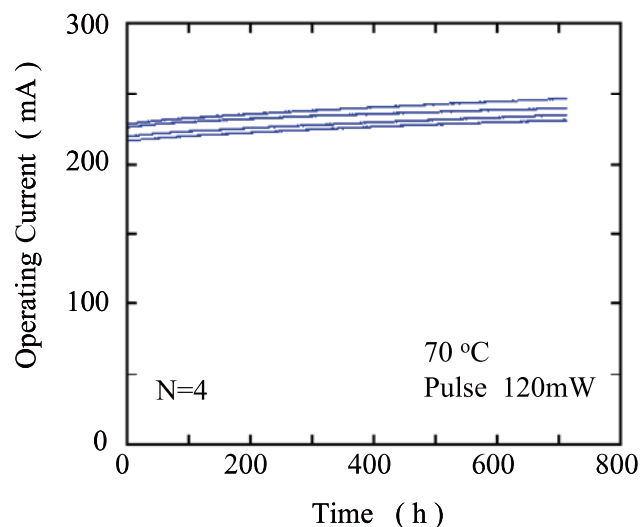


図8 試作した青色半導体レーザのパルス120mWにおける信頼性試験結果

電界に起因する問題を回避するもうひとつのアプローチが非極性面を有する基板を使うアプローチです。これについては、本号の論文紹介の記事に詳しい技術的な説明がありますので、ご参照ください。m面という非極性基板を使うことで463nmにおけるレーザ発振が実現されています。

ここでは、m面基板上の検討を更に進めた結果、現状どこまで長い波長でレーザ発振が得られているのかについて説明します。

長波長のためには高In組成においても高品質な活性層を実現できる結晶成長技術が必要です。詳細に結晶成長条件を検討した結果、463nmで発振したときの状態(図9)から的大幅な改善が見られ、図10に示すように平坦な結晶表面が得られるようになりました。

新しい条件を用いてレーザの試作を行ったところ、表面が改善されたことを反映して、室温で491nmまでパルス発振が確認されています。測定された発振スペクトルを図11に示します。

## 5 おわりに

BD用として405nmから実用化が進んだGa<sub>N</sub>系半導体レーザは、BDの多層化、書き込み速度の向上のための高出力化が進み、80℃、パルス500mWで信頼性が確保できるレベルに到達しています。端面破壊レベルは既に高いレベルにありますので、今後素子特性の更なる改善によってより高い光出力にも手が届くと考えられます。

現在Ga<sub>N</sub>系半導体レーザは、これに加えて、他の波長帯域へとその領域を広げようとしています。長波長化に従って活性層で得られる利得が小さくなりますが、既に青色(445nm)においてはパルス120mWで信頼性も含めて良好な特性が実現されています。今後はやはり緑色レーザの実

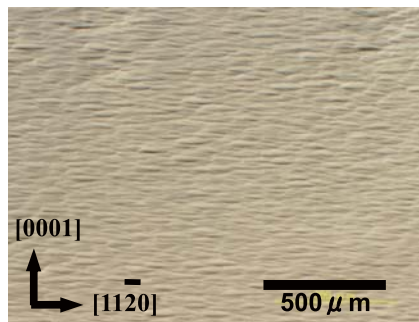


図9 463nm発振時の結晶成長終了の結晶表面状態

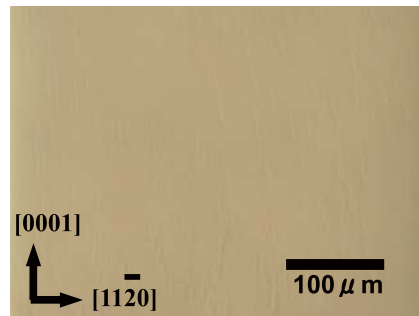


図10 今回の結晶成長終了の結晶表面状態(491nmでの発振を実現)

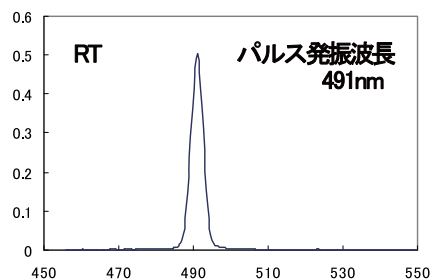


図11 m面基板を用いて試作した半導体レーザのパルス発振スペクトル

現に向けて開発が進んでいきます。このように他の波長帯域でのレーザが実現されることにより、光ディスク以外の他の用途、例えばプロジェクタ、レーザディスプレイなどへとその応用分野は広がっていくことでしょう。また、リッジのような狭い領域に光を閉じ込めない構造などでワットクラスの大出力を得ることも可能であり、そこにも新たなアプリケーションが生まれ、応用範囲が広がってくると思われます。当社でも既存のアプリケーションでの特性の改善に加えて新たな領域への展開に向けた開発を続けて参ります。