

# 青紫色半導体レーザ技術

Blue-Violet Semiconductor Laser Diodes

小野村 正明

■ ONOMURA Masaaki

HD DVDの光源として適用可能な青紫色半導体レーザを開発した。レーザ発振波長(以下、発振波長と略記)405 nm帯のリッジ導波型InGa<sub>N</sub>(インジウム ガリウム 窒素)系量子井戸構造を持つ青紫色半導体レーザは、有機金属気相成長法(MOCVD: Metal Organic Chemical Vapor Deposition)によりGa<sub>N</sub>(窒化ガリウム)基板上に形成した。ケース温度(以下、温度と略記)25℃で連続発振のしきい電流は39 mA、光出力50 mW時の動作電流は73 mA、スロープ効率は1.47 W/Aであった。25℃から75℃までの特性温度は172 Kであった。発振波長の温度依存性と光出力依存性はそれぞれ0.053 nm/K、0.16 nm/mWであり、変化率を極めて小さく抑えることができた。ビーム広がり角の光出力による変動も0.2°以下と良好な特性を得た。25℃から75℃の温度範囲にわたってパルス光出力100 mWまでキンクフリーであり、75℃、100 mWにおける安定動作も確認できた。

Blue-violet laser diodes (LDs) with a wavelength of 405 nm are indispensable as a light source for HD DVD systems. Toshiba has developed InGa<sub>N</sub>-based multi-quantum-well LDs with ridge waveguide structures on Ga<sub>N</sub> substrates using metal organic chemical vapor deposition (MOCVD). The threshold current was 39 mA, the operating current was 73 mA at an output power of 50 mW, and the slope efficiency was 1.47 W/A under continuous-wave (CW) operation at 25 °C. The characteristic temperature between 25 °C and 75 °C was 172 K. The temperature dependence of the wavelength shift was as small as 0.053 nm/K, and the output power dependence was 0.16 nm/mW. A kink-free output power of 100 mW was obtained under pulsed operation in the temperature range between 25 °C and 75 °C, and stable laser operation was confirmed under 100 mW pulsed operation at 75 °C.

The characteristics of these high-performance blue-violet LDs make them suitable for use as a light source in next-generation DVD systems such as HD DVD.

## 1 まえがき

新・三種の神器としてDVD (Digital Versatile Disc) 録画再生機、高精度・大型ディスプレイ、及びデジタルカメラが急速に普及した。これらの相乗効果に加え、テレビ放送のデジタル化とパソコン(PC)やゲーム機の高機能化により情報量はますます増加することから、発振波長405 nm帯の青紫色半導体レーザを光源とする次世代DVDに大きな期待が寄せられている。

発振波長405 nm帯の青紫色半導体レーザの材料はInGaAl<sub>N</sub>(インジウム ガリウム アルミニウム 窒素)系混晶が適している。この材料の最大の特徴は、直接遷移型であり、赤色から紫外までの発光素子が可能であることである。近年、横方向成長と呼ばれる新技術の導入により、光出力30 mW、温度60℃で15,000時間という高い信頼性の青紫色半導体レーザが報告<sup>(1)</sup>された。一方、同じ時期に、InGaAl<sub>N</sub>系混晶に適した結晶欠陥の少ない導電性Ga<sub>N</sub>基板が開発され、徐々に青紫色半導体レーザの開発に適用されるようになった。

光ディスクシステム応用のためには、広い温度範囲におい

て安定した高出力、近円形ビーム形状、低ノイズ、低消費電力駆動の半導体レーザが望まれる。次世代DVD光源用青紫色半導体レーザは、第1世代から100 mWクラスの高光出力特性と低ノイズ特性が望まれている。更に、レーザ駆動条件に依存せず、安定した発振波長制御が望まれる。第2世代以降は、DVDと同様に、倍速記録競争が続くと予測されるので、更なる高出力化が重要になる。

次世代DVD用光源のために、東芝では、有機金属気相成長法(MOCVD: Metal Organic Chemical Vapor Deposition)を用いたInGaAl<sub>N</sub>系エピタキシャル結晶成長技術と、n型導電性Ga<sub>N</sub>基板を用いたリッジ導波型青紫色半導体レーザの開発に注力してきた。これまでに、200 mWまでキンクフリーの連続発振とともに、光出力3 mW以上で相対雑音強度-132 dB/Hz以下の低ノイズ特性を実現した<sup>(2)</sup>。更に、エピタキシャル結晶積層構造と加工プロセスを最適化し、高温高出力駆動時のビーム特性の安定化を図った。

## 2 青紫色半導体レーザ構造

青紫色半導体レーザの概略の断面を図1に示す。pn接合

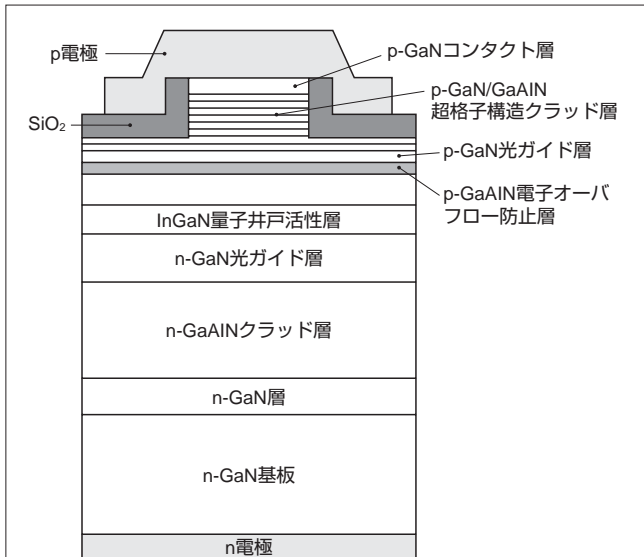


図1. 青紫色半導体レーザーの断面 — GaN基板上に、InGaAlN系薄膜からなるレーザー構造をMOCVD法でエピタキシャル結晶成長させる。レーザー光は紙面に垂直方向に出射される。

Cross-sectional view of blue-violet LD

ダイオードからなる薄膜エピタキシャル結晶構造は、n-GaN (n型導電性GaN) 基板上に、n-GaN層、n-GaAlNクラッド層、n-GaN光ガイド層、InGaN量子井戸活性層(量子井戸数は3、量子井戸厚は3 nm)、p-GaAlN電子オーバーフロー防止層(厚さは10 nm)、p-GaN光ガイド層、p-GaN/GaAlN超格子構造クラッド層、p-GaNコンタクト層の順にMOCVD法で積層した。InGaN量子井戸活性層は、発振波長がHD DVD規格に最適な405 nm帯になるように、InとGaの混晶比を制御した。活性層上部に位置するp-GaAlN電子オーバーフロー防止層は、下部のn型層から活性層に注入される電子が上部のp型層にあふれるのを防止するだけでなく、InGaN量子井戸活性層の圧縮ひずみをGaAlNの引張ひずみで相殺する役割を持っている。レーザー光を閉じ込めるためのGaAlNクラッド層は、GaN基板に対する引張ひずみによる結晶割れが生じないように、混晶比と厚さを制御した。

p-GaNコンタクト層とp-GaN/GaAlN超格子構造クラッド層の一部を、幅約1.5 μmのストライプ状にドライエッチング法でエッチングして、リッジ導波構造を形成した。GaN基板を用いたことにより、長さ600 μmのレーザー共振器をへき開法で容易に形成することができた。前方及び後方の光出射端面には、10%の低反射コート、95%の高反射コートを各々施した。

青紫色半導体レーザーは、p電極と高い熱伝導率を持つAlN(窒化アルミニウム)サブマウントが接触するように配置して、図2に示す直径5.6 mmのCANパッケージに搭載した。

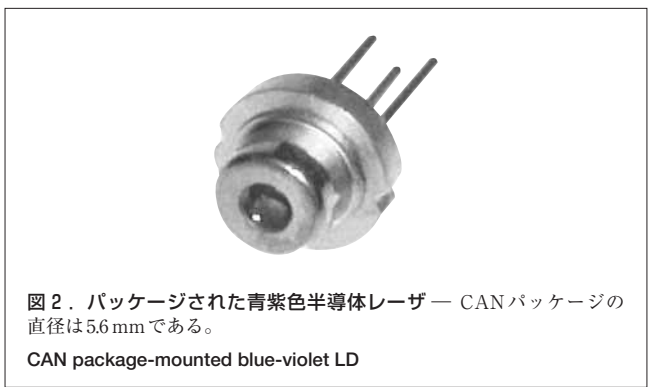


図2. パッケージされた青紫色半導体レーザー — CANパッケージの直径は5.6 mmである。

CAN package-mounted blue-violet LD

### 3 素子の連続発振特性

前述の構造による青紫色半導体レーザーの電流-光出力特性の温度依存性と電流-電圧特性の例を図3に示す。25℃において、しきい電流( $I_{th}$ )は39 mA、50 mW連続発振時の動作電流( $I_{op}$ )は73 mAであった。75℃という高温においても注入電流に対して光出力は直線的に伸びており、スロープ効率は1.47 W/Aと25℃の場合と同じであった。また、 $I_{th}$ の温度依存性から求めた特性温度( $T_0$ )は172 Kと算出できた。以上のことから、高温においても電子のオーバーフローが抑制できていることがわかった。

発振波長の温度依存性を図4に示す。50 mW連続発振条件下における発振波長は、25℃で403.91 nm、80℃で406.82 nmであり、その差は2.91 nmであった。0.053 nm/Kの波長変化率は、DVD用InGaAlP(P:リン)系赤色半導体レーザーに比べて格段に小さい。発振波長の変化が小さいと

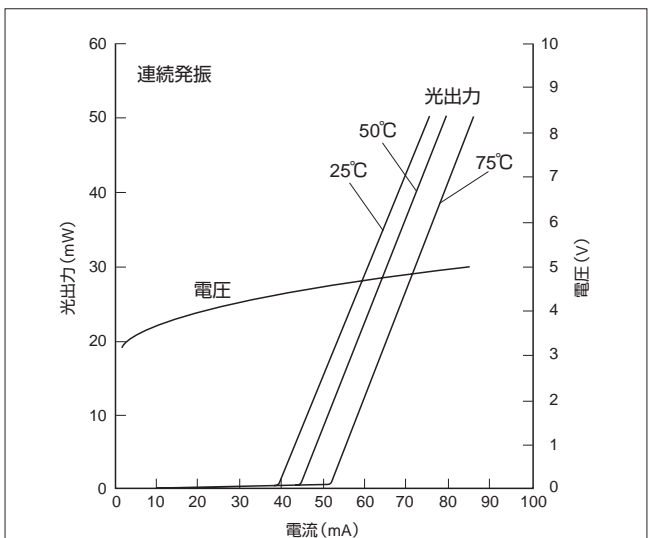


図3. 連続発振時の電流-光出力特性と電流-電圧特性 — 25℃では $I_{th}$ が39 mA、50℃では45 mA、75℃では52 mAで、それぞれ連続発振した。

Output power vs. injection current, and operating voltage vs. injection current (under CW operation)

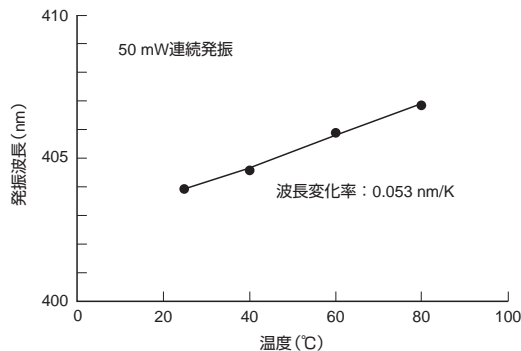


図4. 発振波長の温度依存性 — 開発した青紫色半導体レーザーは温度による発振波長の変化が小さく、HD DVD用光ピックアップの小型化や低価格化が可能となる。

Lasing wavelength vs. case temperature

焦点のずれを抑えられるので、レンズ設計が容易になり、光ピックアップの小型化や低価格化が可能となる。

HD DVDなどの光ディスクシステムはパルス光を用いるために、注入電流パルスに対する発振波長の変化量を抑制することも重要である。電流パルス波形に対する発振波長の変化を動的に評価することは容易ではない。しかしながら、発振波長の連続発振における光出力依存性を評価することにより、パルス発振時の発振波長揺らぎを予測することができる。図5に、25°C連続発振における発振波長の光出力依存性を示す。5 mWから50 mWの光出力範囲における発振波長の変化率は0.016 nm/mWと極めて小さいことがわかった。言い換えれば、レンズで絞った場合の低出力レーザー光と高出力レーザー光の焦点ずれは極めて小さい。例えば、HD DVDの再生と記録が瞬時に変わるような場合においても、光ピックアップとディスクの距離を制御することが容易であると考えられる。

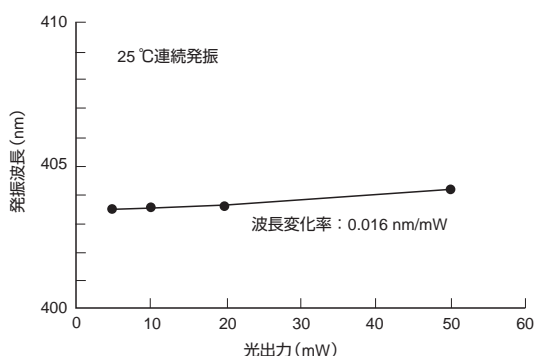


図5. 発振波長の光出力依存性 — 光出力による発振波長の変化が極めて小さく、光ピックアップとディスクの距離を制御することが容易となる。

Lasing wavelength vs. output power

遠視野像 (FFP: Far Field Pattern) の光出力依存性を図6に示す。積層面に垂直方向のビームの形状と水平方向のビームの形状は、光出力に依存せず、共に単峰であった。透明で屈折率の高いGa<sub>N</sub>基板へのレーザー光のわずかな染み出しにより、垂直方向のFFPの-20°付近に小さなリップルが現れているが、実用上は問題にならないレベルに抑えられている。25°C、50 mW連続発振におけるFFPの垂直方向の半値幅 ( $\theta_{\perp}$ ) は21.8°、水平方向のそれ ( $\theta_{\parallel}$ ) は8.0°であった。5 mWから50 mWまでの光出力におけるビーム広がり角の半値幅の変化量は、垂直方向も水平方向も0.2°以下であり、ピーク位置もほとんど変化しなかった。一般に、リッジ導波型半導体レーザーでは、ビーム広がり角が温度や光出力に依存する場合も多いが、開発した素子では、光導波構造の最適化や加工精度の向上、適切な放熱設計などにより、光ディスクシステムに適した安定なFFPを実現することができた。

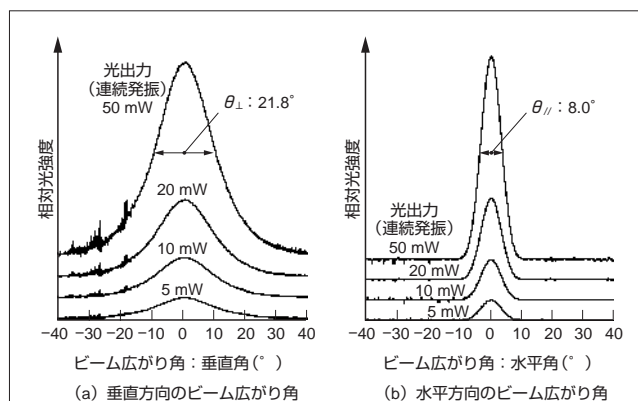


図6. 遠視野像の光出力依存性 — 光出力によるビーム中心角の変動は垂直方向、水平方向ともに極めて小さく、また、いずれも単峰であるのでレンズ設計が容易となる。

Far field pattern vs. output power

#### 4 素子のパルス発振特性

HD DVD録画再生機用青紫色半導体レーザーには、信頼性のある高温高出力特性が求められる。パルス発振における電流-光出力特性の温度依存性と電流-電圧特性の例を図7に示す。駆動条件は、パルス幅が50 ns、デューティ比が50%である。温度が75°Cの高温環境においても、キックフリーで100 mW以上の光出力が得られた。図8は、75°C、100 mWのパルス発振における168 h (1週間)のエージング特性の例であり、初期 $I_{op}$ が異なる三つの素子について示したものである。 $I_{op}$ のわずかな上昇は見られるが、時間経過とともに安定化してくる。初期の $I_{op}$ が約150 mAと高めの素子でも経時変化の傾向は同じであった。

## 5 あとがき

次世代DVDとして有望なHD DVDシステムの光源として適用可能な、リッジ導波型青紫色半導体レーザを開発した。結晶欠陥が低減されたGaN基板を用い、MOCVD法によるエピタキシャル成長層の構造を最適化することで、75℃、100 mWという高温高出力パルス発振においても高い信頼性を実現することができた。また、レーザ構造の最適化や、加工精度の向上と適切な放熱設計により、駆動条件によらず安定なビーム形状と発振波長を得られた。素子寿命の向上を図りながら、高速記録や2層記録のための更なる高出力化に対応していくことが今後の課題である。

## 文献

- (1) Nagahama, S., et al. "High-Power and Long-Lifetime InGaN Multi-Quantum-Well Laser Diodes Grown on Low-Dislocation-Density GaN Substrates", Jpn. J. Appl. Phys. Lett. **39**, 7A, 2000, p.L647-L650.
- (2) 橘 浩一, ほか. "高出力青紫色半導体レーザ". 東芝レビュー. **59**, 5, 2004, p.32-35.

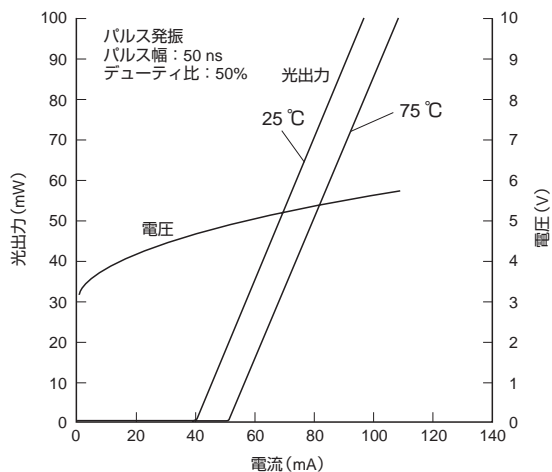


図7. パルス発振時の電流-光出力特性と電流-電圧特性 — 25℃から75℃までの範囲で、100mWまでキンクフリーで発振した。

Output power vs. injection current, and operating voltage vs. injection current (under pulsed operation)

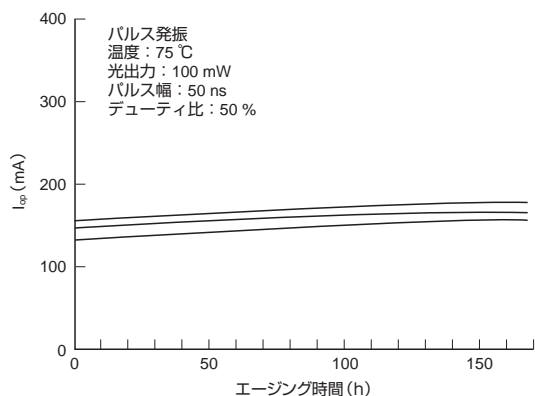


図8. エージング特性 — 75℃で100 mWの高出力動作において、駆動電流が高い素子でさえ経時変化は小さく、実用上は安定動作が可能である。

Aging characteristics



小野村 正明 ONOMURA Masaaki

セミコンダクター社 ディスクリート半導体事業部 光半導体製品技術部主査。半導体レーザに関する材料・デバイスの研究開発に従事。応用物理学会、電子情報通信学会、電気学会会員。

Discrete Semiconductor Div.