

高出力青紫色半導体レーザ

High-Power Blue-Violet Semiconductor Laser Diodes

橘 浩一 布上 真也 小野村 正明

■ TACHIBANA Koichi

■ NUNOUE Shinya

■ ONOMURA Masaaki

窒化物半導体混晶 (InGaAlN : 窒化インジウム ガリウム アルミニウム) は直接遷移型のワイドバンドギャップ半導体物性を持つことから、紫外光から可視光までの広い波長領域で発光するデバイスを作製することが可能である。近く商品化される次世代 DVD には、発振波長 405 nm の窒化ガリウム (GaN) 系青紫色半導体レーザが搭載される。

東芝では、GaN 基板上有機金属気相成長法を用いた、リッジ導波型の青紫色半導体レーザを開発してきた。これまでに、25℃連続発振で最大光出力 200 mW という高い出力と、3 mW の低光出力時における相対雑音強度が -132 dB/Hz という極めて低いノイズ特性を実現した。

GaN-based semiconductors (InGaAlN alloys) have the characteristics of a wide band gap and direct transition. They are useful for optical devices emitting light at wavelengths from the ultraviolet to the visible. GaN-based blue-violet semiconductor laser diodes will be used as the light sources of next-generation DVD systems.

Toshiba has been developing GaN-based blue-violet semiconductor laser diodes with ridge waveguide structures on GaN substrates using metal organic chemical vapor deposition. The maximum light output power of the laser diodes was as high as 200 mW under continuous-wave operation at 25°C. A low relative intensity noise of -132 dB/Hz was achieved at a low light output power of 3 mW.

1 まえがき

DVD (Digital Versatile Disc) は、標準画質テレビ用録再機・再生機、ゲーム機、カーナビゲーションシステム、パソコン(PC)などの光ディスクメモリとして大きな市場に成長した。現在では、ハリウッド映画のほとんどがDVDで市販されているばかりか、VTRからDVDレコーダへの代替が急速に進んでいる。その一方で、高画質テレビやAV (Audio Video)・PC用ディスプレイの高精細化に伴い、高密度・大容量化のニーズに応えられる次世代DVDへの関心が高まっている。

標準DVD用光源として赤色半導体レーザ (発振波長 650 nm) が用いられているが、より短波長のレーザを用いるとレンズで絞り込める光のスポットサイズは小さくできるので、高密度化が実現できる。一方、DVDで用いられているプラスチックレンズなどの光学系部品やディスク基板は、400 nm より短い波長の光を吸収するので、レーザ光が透過しなくなるばかりか、劣化しやすい。したがって、発振波長 405 nm の青紫色半導体レーザを用いると、同じ光学部品やディスク材料を用いての最大限の高密度化が可能である。InGaAlNは、ワイドバンドギャップを持つ直接遷移型の半導体であるので、青紫色半導体レーザを作製するうえで最適である。

ディスクへの情報書込みは高出力光のほうが短時間で済むことから、半導体レーザには高出力化が望まれる。高倍速書込み以外にも、2層ディスクへの書込みでも半導体レーザ

の高出力が望まれることから、高出力化に対する要求は将来にわたって続く。青紫色半導体レーザの高出力・高性能化を図るには、GaN系半導体結晶の高品質化やデバイス構造の最適化が必須となる。

GaN系半導体の結晶成長には、主にサファイア (Al₂O₃) や炭化ケイ素 (SiC) などの単結晶基板が用いられてきた。異種結晶基板上へのGaN系半導体成長は、格子定数差や熱膨張係数差などにより転位などの結晶欠陥やクラックが発生し、デバイス特性の劣化や歩留りの低下を招きやすい。更には、レーザ光出射端面形成のためのへき開が容易ではなかった。

一方、最近では、2インチ径のn型導電性GaN (以下、n-GaNと略記) 基板⁽¹⁾が、高価ではあるが市場で入手できるようになってきた。n-GaN基板を採用することで、デバイスの上下通電が可能となり、また、へき開のしやすさからデバイスの歩留り向上が期待できる。更に、サファイア基板に比べて放熱性が高く、しかも結晶欠陥やひずみの少ないエピタキシャル成長が可能になる。したがって、青紫色半導体レーザの高光出力化や高信頼性化が期待できる。

東芝では、有機金属気相成長法 (MOCVD : Metal Organic Chemical Vapor Deposition) を用いたGaN系半導体エピタキシャル結晶成長技術と、n-GaN基板上的リッジ導波型青紫色半導体レーザを開発している。これまでに、量子井戸活性層とその周辺構造、及び不純物濃度プロファイルに工夫

を凝らすとともに、リッジ導波構造形成と電極形成のための独自の自己整合プロセス技術を開発した。その結果、25℃連続発振において200 mWまで安定な単一横モード発振を実現し、また、3 mWの低光出力時において、相対雑音強度 - 132 dB/Hzという極めて低いノイズ特性を実現した。

2 レーザ構造の結晶成長とデバイスプロセス

青紫色半導体レーザーの模式断面を図1に示す。n-GaN基板上に、n-GaN層、n-GaN系クラッド層、n-GaNガイド層、InGaIn系量子井戸活性領域、p-GaN電子オーバーフロー防止層、p-GaNガイド層、p-GaN/GaN超格子クラッド層、p-GaNコンタクト層からなるレーザー構造をMOCVD法でエピタキシャル成長させた。また、比較のために、サファイア基板上にも同一のレーザー構造をエピタキシャル成長させた。

得られたレーザー構造エピタキシャルウェーハは、X線回折逆格子マップ法により評価した⁽²⁾。六方晶構造からなるGaN系半導体結晶のc軸方向の情報だけでなく、a軸方向の情報も調べるために、非対称面(20 $\bar{2}$ 0)付近のX線回折を測定した。GaN基板上とサファイア基板上にそれぞれ成長させた、レーザー構造のX線回折逆格子マップを図2に示す。図2において、[20 $\bar{2}$ 0]方向への逆格子空間ベクトル q_{xy} [20 $\bar{2}$ 0]はa軸の格子定数の逆数に比例し、[0004]方向への逆格子空間ベクトル q_z [0004]はc軸の格子定数の逆数に比例する。図2(a)、2(b)共に q_z [0004]が約0.593 rlu (reciprocal lattice unit: 逆格子空間単位)、0.594 rlu、0.596 rluがそれぞれInGaIn、GaN、GaAlNからのピークである。

ここで、GaAlNとInGaInの q_{xy} [20 $\bar{2}$ 0]はGaNの q_{xy} [20 $\bar{2}$ 0]に等しい。これはGaAlNとInGaInのa軸方向の格子定数がGaNのa軸方向の格子定数に等しいことを意味する。フリースタンディングのAlNはGaNよりも格子定数が小さく、またフリースタンディングのInNはGaNよりも格子定数が大きい。これらより、レーザー構造においてGaAlNは引張りひずみを受け、InGaInは圧縮ひずみを受けている⁽³⁾ことがわかる。

図2(a)と2(b)におけるGaNやGaAlN、InGaInのピーク形状を比較する。図2(a)中の結晶のチルト分布、格子間隔の分布のふるまいから、GaN基板上に成長させたGaNやGaAlN、InGaInは、サファイア基板上に成長させたGaNやGaAlN、InGaInに比べて、チルト分布や格子間隔の分布が小さい。これはGaN基板上に成長させたレーザー構造の品質がより良いことを示唆している。したがって、青紫色半導体レーザーの低しきい電流化、高出力化、発振光出力における自然放出光成分低減(低ノイズ化)などが期待できる。

結晶成長後のレーザー構造基板の曲率半径をX線回折により見積もった。基板の曲率半径の大小は、その後のデバイスプロセスのしやすさにかかわってくる。レーザー構造成長後の

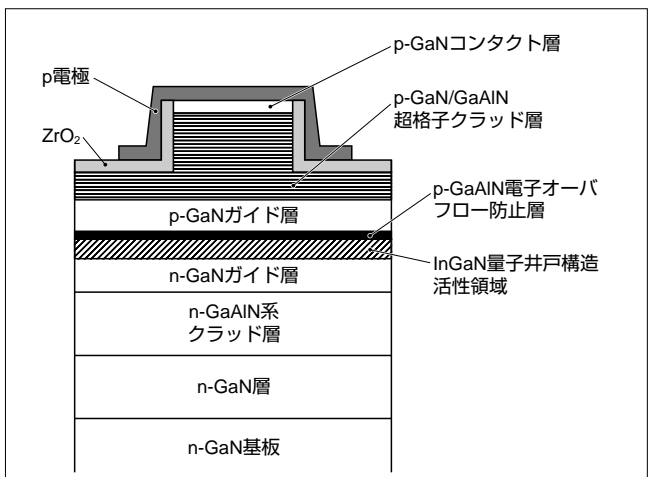


図1. GaN基板上GaIn系レーザーの模式断面 — GaN基板上と比較のためサファイア基板上に同一レーザー構造の結晶を成長させた。結晶成長には有機金属気相成長法(MOCVD)を用いた。
Schematic of GaN-based laser diodes on GaN substrate

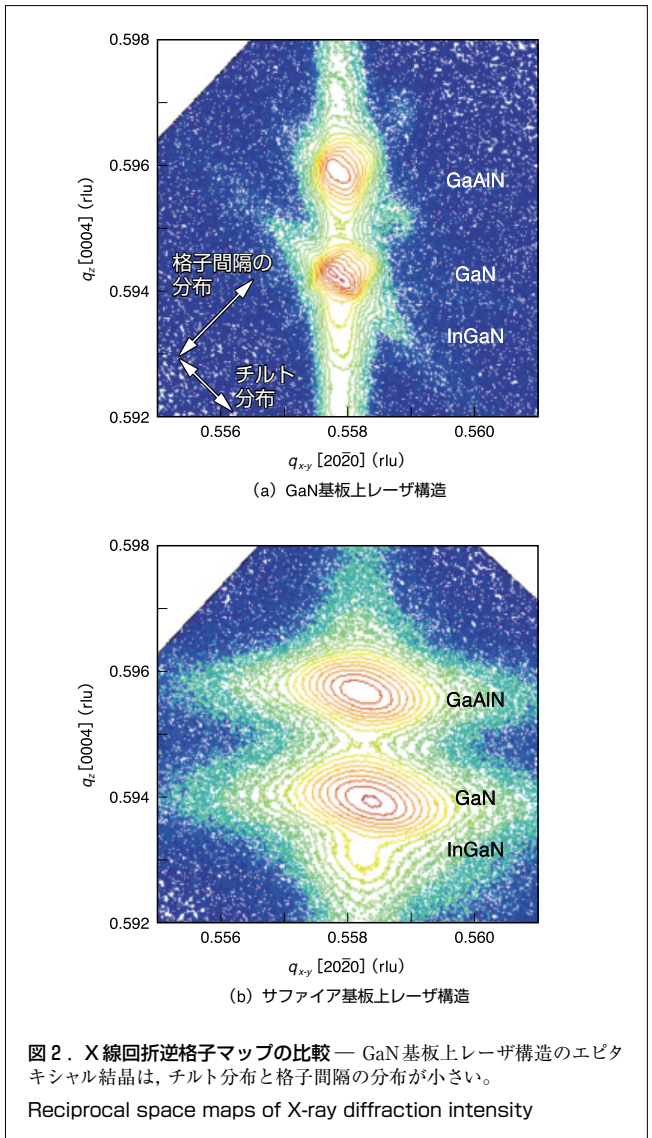
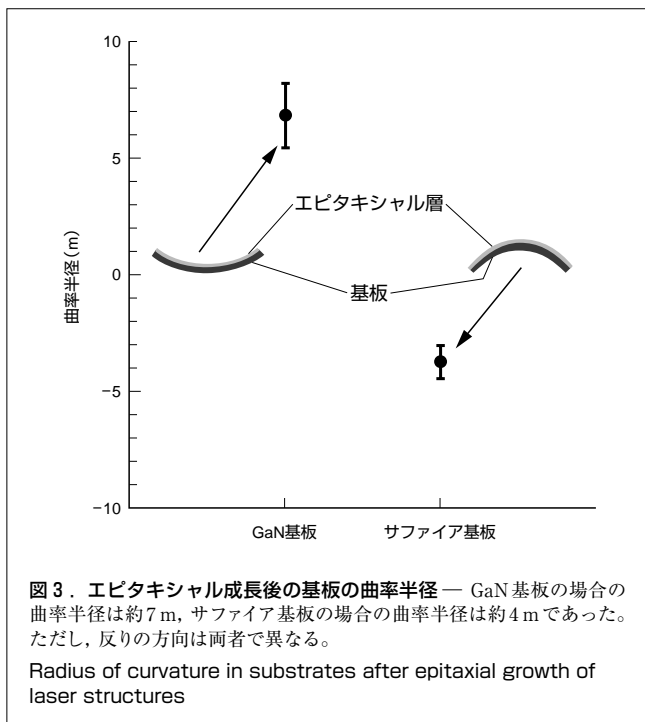


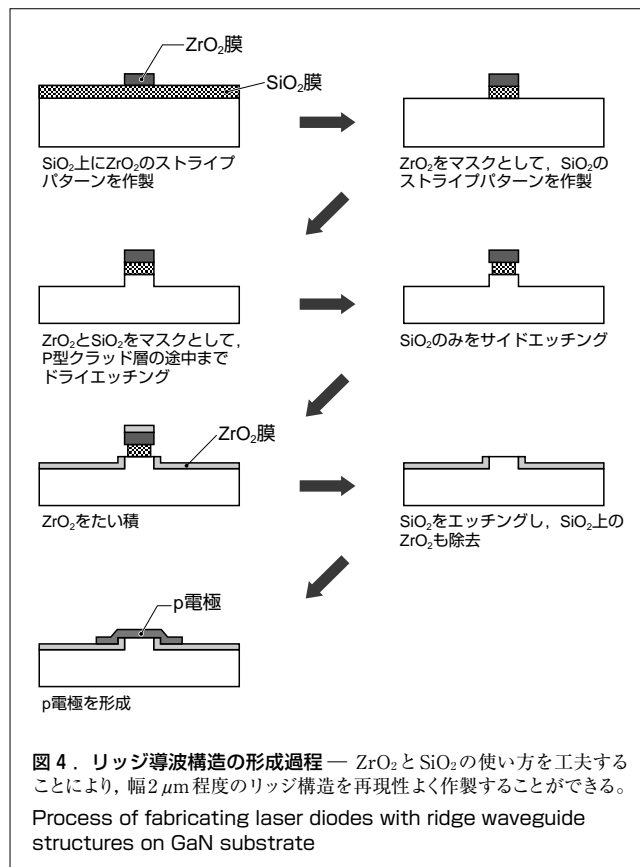
図2. X線回折逆格子マップの比較 — GaN基板上レーザー構造のエピタキシャル結晶は、チルト分布と格子間隔の分布が小さい。
Reciprocal space maps of X-ray diffraction intensity



GaN基板とサファイア基板の曲率半径を図3に示す。サファイア基板の曲率半径は約4mであるのに対し、GaN基板の曲率半径は約7mと大きい。曲率半径が大きいということは、基板の反りが小さいことを意味し、デバイスプロセスが容易となる。

GaN基板上のリッジ導波型青紫色半導体レーザは、以下のようなプロセスで作製した。前述したように、GaN基板を用いた場合でも、レーザ構造成長後の基板には反りが存在する。基板の反りが大きい場合、幅2μm程度でさえリッジ構造形成のためのリソグラフィが困難となるばかりか、形成されたリッジ上面への電極形成プロセスが困難になる。そこで、反りの影響を受けにくい独自の自己整合プロセスを開発した⁽⁴⁾。リッジ導波構造形成プロセスの流れを図4に示す。

まず、レーザ構造をエピタキシャル成長させた基板に、酸化ケイ素(SiO₂)膜と酸化ジルコニウム(ZrO₂)膜の2層構造からなるレーザストライプパターンを形成する。最上層のZrO₂をマスクとしてp型クラッド層の途中までドライエッチングし、リッジ導波構造を形成する。ZrO₂はGaN系半導体と比べてエッチング速度が十分に遅いので、垂直性が高く狭いリッジ構造を再現性よく形成することができる。次に、ZrO₂膜とGaN系エピタキシャル層に挟まれたSiO₂膜のみを選択的にサイドエッチングした後、電流ブロックのための絶縁膜となるZrO₂をたい積させる。次に、酸系エッチング溶液を用いてSiO₂膜だけを選択的にウェットエッチングすると、結果としてSiO₂膜上にたい積したZrO₂も同時に除去される。これにより、リッジ上部のみにGaN系エピタキシャル層



を露出することができる。

露出されたp-GaNコンタクト層にp電極金属を蒸着することで、その接触部分からだけInGaN系量子井戸活性層に電流が注入できるようになる。へき開法で形成したレーザダイオードのチップの後方光出射端面には、SiN(窒化ケイ素)/SiO₂系多層構造(各層の膜厚はλ(光の波長)/4)からなる高反射コート(反射率:約0.95)を施した。

3 GaN基板上レーザの特性

GaN基板上青紫色半導体レーザの電流—光出力特性を図5に示す。25℃、連続発振状態において、最大光出力は200mWという高い値が得られた。しきい電流は35mAであり、スロープ効率(発振しきい値以上の光出力と注入電流との比)は1.6W/Aであった。この効率は、これまでに報告された青紫色半導体レーザの中ではトップレベルである。また、光出力200mWまでキンクフリー(発振しきい値以上の光出力と注入電流の関係に折れ曲がりがない)であるとともに、安定した単一横モード発振を示した。更に、遠視野像を調べたところ、ビーム形状は垂直方向、平行方向とも単峰であり、水平ビームの広がり角は12.4°、垂直ビームの広がり角は25.8°、広がり角のアスペクト比は2.08であった。

レーザの相対雑音強度の光出力依存性を図6に示す。測

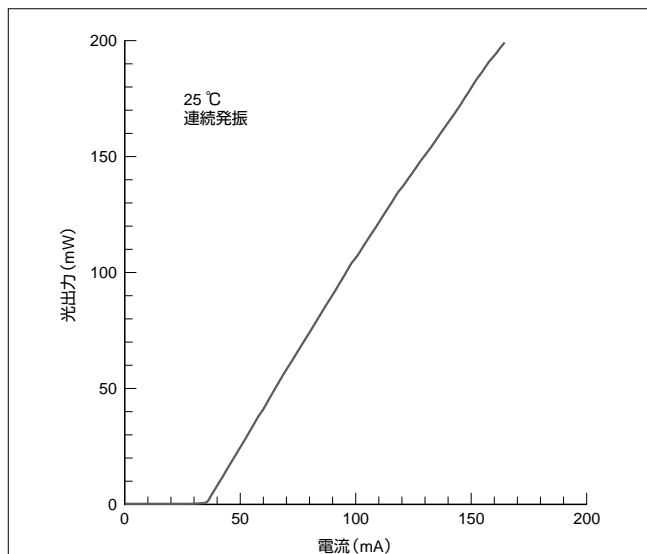


図5. GaN基板上青紫色半導体レーザーの電流-光出力特性 — 25℃, 連続発振状態で最大光出力200 mWを得た。また, 200 mWの光出力までキンクフリーである。

Light output power vs. injection current in blue-violet laser diodes on GaN substrate

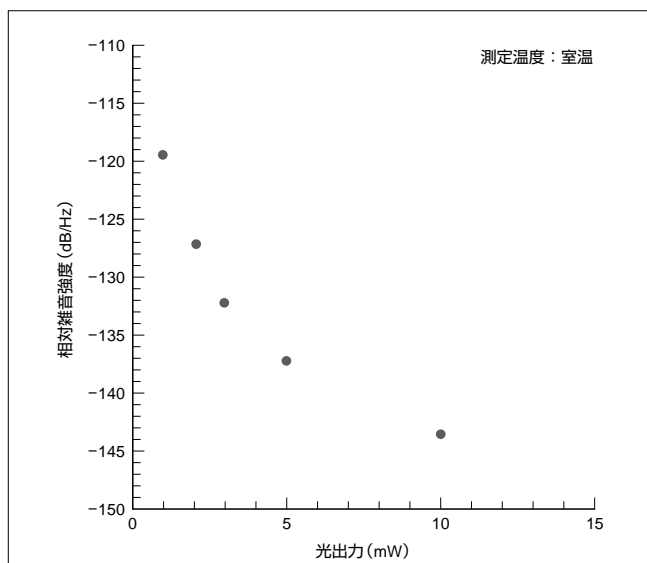


図6. 青紫色半導体レーザーの相対雑音強度 — 3 mW以上の光出力では, 相対雑音強度 -132 dB/Hz以下が得られた。

Relative intensity noise as function of light output power in blue-violet laser diodes

定は室温で行い, 高周波重畳はかけていない。図6において, レーザ出力を増加させるほど相対雑音強度は減少した。ディスク読取り時には3 mW程度の低出力が用いられる。図6から, 光出力3 mW時の相対雑音強度は-132 dB/Hzと,

極めて低いノイズ特性であることがわかる。戻り光ノイズを低減するための高周波重畳回路が不要になるので, 低コスト化が可能である。

4 あとがき

GaN基板上にMOCVD法を用いてリッジ導波型青紫色半導体レーザーを作製した。エピタキシャル結晶成長をさせたレーザー構造についてX線回折逆格子マップを調べたところ, サファイア基板上に成長したエピタキシャル結晶構造と比較して, チルト分布や格子間隔の分布が小さく, 品質がより良いことがわかった。また, GaN基板を採用することでエピタキシャル成長後の基板反りが抑制できることを明らかにした。更に, 青紫色半導体レーザーの特性として, 25℃連続発振状態で, 最大光出力200 mWまでの単一横モード発振と低ノイズ特性を達成し, 次世代DVDシステムに適用可能な特性を得た。

文献

- (1) Motoki K., et al. Preparation of large freestanding GaN substrates by hydride vapor phase epitaxy using GaAs as a starting substrate. Jpn. J. Appl. Phys. 40, 2001, p.L140 - L143.
- (2) Tachibana K., et al. " Reciprocal space mapping of x-ray diffraction intensity of GaN-based laser diodes grown on GaN substrates ". MRS Fall Meeting Y5.40. Boston, 2003-12, Materials Research Society. MRS, 2004.
- (3) Takeuchi T., et al. Optical properties of strained AlGaIn and GaInN on GaN. Jpn. J. Appl. Phys. 36, 1997, p.L177 - L179.
- (4) 布上真也, ほか. 窒化ガリウム基板上の青紫色半導体レーザー. 電子情報通信学会技報. LQE2003-62, 2003, p.67 - 72.



橋 浩一 TACHIBANA Koichi, D.Eng.

研究開発センター 個別半導体基盤技術ラボラトリー, 工博。半導体レーザーに関する材料・デバイスの研究・開発に従事。応用物理学学会会員。

Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.



布上 真也 NUNOUE Shinya, D.Eng.

研究開発センター 個別半導体基盤技術ラボラトリー主任研究員, 工博。半導体レーザーに関する材料・デバイスの研究・開発に従事。応用物理学学会, 日本表面科学学会, 日本金属学会会員。

Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.



小野村 正明 ONOMURA Masaaki

研究開発センター 個別半導体基盤技術ラボラトリー主任研究員。半導体レーザーに関する材料・デバイスの研究・開発に従事。応用物理学学会, 電子情報通信学会, 電気学会会員。

Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.