

高品位テレビの映像 2 時間分を収録・再生できる次世代 DVD は、現行の DVD に比べ 3 倍以上の情報量を必要とする。この光源として、青色半導体レーザは必要不可欠である。そのための青色半導体レーザを開発し、電流注入による室温パルス発振に成功した。このレーザは、基板の上に窒化ガリウム(GaN)や窒化インジウムガリウム(GaN)などの半導体薄膜を有機金属気相成長(MOCVD: Metal Organic Chemical Vapor Deposition)技術を用いて多層にたい積させてある。超薄膜の結晶の界面を最適に制御することで、数原子層単位の薄い層を積み重ねる多重量子井戸(MQW: Multi Quantum Well)構造を実現した。また、これまで形成が難しかった共振器の鏡の役割を果たす平坦な端面を量産に適したへき開で作製した。青色のレーザ発振が実現したことにより、高精細 DVD 実現の可能性が大きく広がった。

Blue semiconductor lasers are indispensable for optical pickups in the next-generation high-definition DVD. We have demonstrated room-temperature pulsed operation of gallium nitride-based lasers. Two factors are cited to account for achieving this milestone. The first is a proprietary metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) technique, which allowed the fabrication of ultra-thin and precisely controlled InGaN layers. And the second is a new technology for cleaving the films grown on sapphire substrate and assuring a smooth cavity mirror. It results in a more manufacturing-friendly process, which will give Toshiba an advantage as the technology moves toward production.

### 1 まえがき

CD(Compact Disc)と同じ直径 12 cm の光ディスクでデジタル映像信号を再生する DVD では、記録情報量がディスク片面で 4.7 G バイトという CD のもつ 650 M バイトに比べて 7 倍以上もの大容量化が達成されている。これにより現在ある映画の 94% 程度をカバーする 135 分間の再生時間をレーザディスクよりも高画質で実現できる<sup>[1]</sup>。これに対して、さらに高画質映像を再生できる高精細 DVD が検討されており、現行 DVD の 3 倍以上の 15 G バイトというさらなる大容量化が必要とされている<sup>[2]</sup>。

しかし再生信号の検出、誤り訂正などの信号処理技術の向上や対物レンズの NA (開口数) を大きくすることによって得られる高密度化の余地はあまりない。レーザ光を対物レンズで絞る、ディスク上に集光させたときのビームスポット径は波長に反比例するので、記録密度は波長の 2 乗に反比例して増える。現行の DVD システムを大きく変えることなく記録容量を増大するには、レーザの波長を短くすることが本質的な鍵(かぎ)となる。

小型、低消費電力、高信頼および低価格は民生機器応用で必須(す)の項目であり、光源としては半導体レーザがもっとも有望といえる。ガスレーザはもとより固体レーザやこれらから希土類添加ファイバによって周波数上方変換す

る方式や、非線形光学結晶による SHG(第 2 高調波発生: Second Harmonic Generation)は光源以外に構成光学部品を必要とするので小型・低価格化が困難と考えられ不向きである。

これまで、光ディスク応用の半導体レーザとしては波長 780 nm の GaAlAs 系赤色レーザが CD に使用され、波長 650 nm の InGaAlP 系の赤色レーザが DVD に使用されて

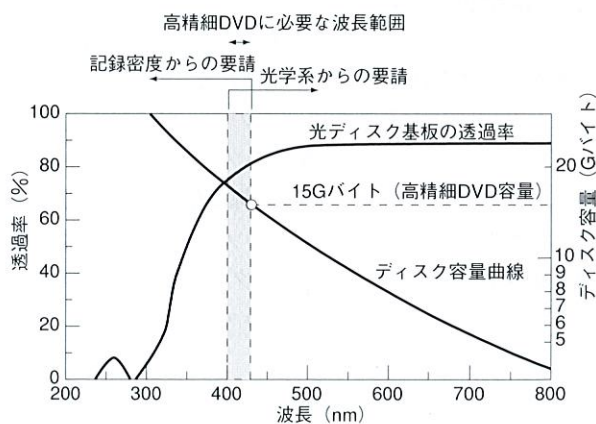


図 1. 高精細 DVD 用光源への要求 半導体レーザの発振波長として 400~430 nm の領域が求められている。

Light source requirement for high-definition DVD

いる。記録密度向上の要請に合わせてレーザの短波長化がなされてきた。すなわち、それぞれの所望の波長域に対応する材料開発を行ってきたわけであり、より大きなバンドギャップエネルギーをもつ半導体材料の研究が世界中でなされてきた。

他方で光ディスクシステムに用いられている光検出器、光学部品や光ディスク基板材料の光透過率などの制限から波長はあまり短くできない。両者を考慮すると、光源の波長領域として、400~430 nm 付近が要求される<sup>2)</sup>(図1)。

この波長領域の光源として採用しようとする、GaN系の材料がもっとも有望である。II-VI族化合物半導体であるZnSe系の材料では、これまで実用化しているIII-V族化合物半導体に比べて、材料物性に起因する開発の困難さが広く認識されている。しかも波長が500 nm程度なので、これによる容量増の効果はたかだか1.6倍程度しかないのである。

今回、GaN系の青色半導体レーザを開発し、波長410~430 nmで電流注入によるパルス発振を室温で達成した。

以下にGaN系レーザの発振のために非常に重要な役割を果たしたと考えられる要素技術、および発振したレーザの特性について述べる。

## 2 GaN系青色半導体レーザの構成

室温パルス発振に成功したGaN系半導体レーザは、MOCVD法によって薄膜結晶の積層構造を基板上に成長させることで作製した。n型電極は、電子サイクロトロン共鳴選択性イオンビームエッチング法により部分的にn-GaNコンタクト層を露出させた上に形成した。p型電極は、p-GaNコンタクト層の表面にSiO<sub>2</sub>を介して窓を開けて作製した。共振器の鏡面(レーザ出射端面)はへき開により形成した(図2)<sup>3)</sup>。

活性層は青色レーザ光を放つ部分であり、半導体レーザの心臓部である。特に、発光部から出た光を図中の上下方向にGaN層で閉じ込めるとともに、図の奥と手前の鏡面となっている共振器端面で反射増幅してレーザ発振を得る。したがって、活性層の結晶の質を向上させて発光効率を高めることと、構造として反射率の高い共振器鏡面を形成することが技術課題となる。

## 3 要素技術の特長

室温での電流注入パルス発振に至った主要要素技術の特長をまとめると以下のとおりである。

### 3.1 多重量子井戸(MQW)構造の実現

発光層に用いるInGaN単結晶を数原子層という超薄膜状態で作製し、それを積み重ねることで井戸層(図3中の

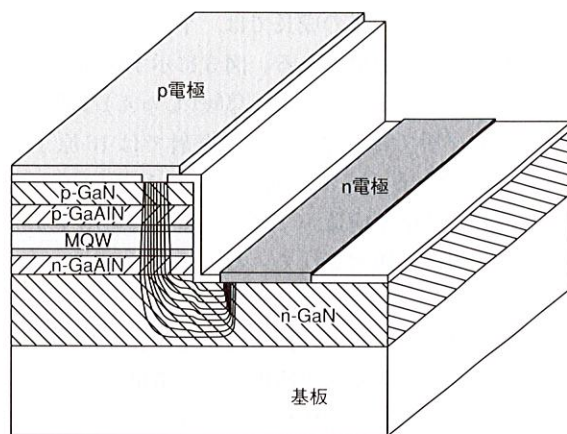


図2. 青色半導体レーザの構造模式図 素子内の線は計算機シミュレーションにより得られた電流のようすを示している。  
Schematic drawing of blue semiconductor laser diode

色の濃い部分でIn<sub>0.20</sub>Ga<sub>0.80</sub>N)と障壁層(図3中の色の薄い部分でIn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N)との対で構成するMQW構造を作製した。インジウムの平均組成を高めた活性層を採用することにより、レーザ発振に必要なしきい電流密度の低減が可能になった。井戸層の幅は励起子ボア半径程度まで薄膜化して発光効率を高めてある。

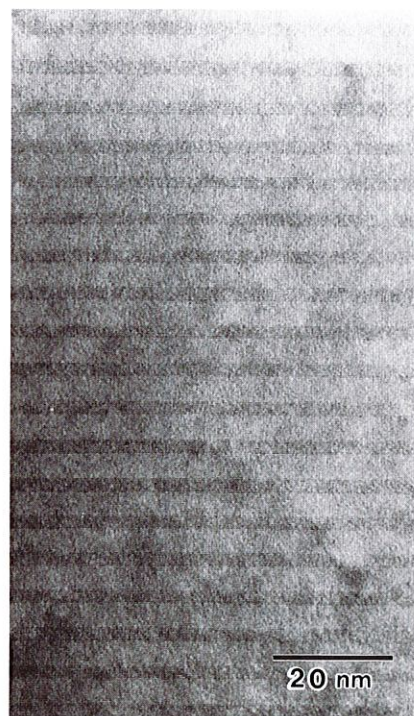


図3. MQW構造部分の断面透過電子顕微鏡写真 8原子層からなる井戸層(図中黒く見える)と16原子層からなる障壁層(図中白く見える)の積重ねにより鮮明な界面を得ている。

Cross-sectional transmission electron micrograph of multi-quantum well structure

このような超薄膜の層の成長では、平行で界面が明確な構造を形成することが鍵となる。図3に示す断面の透過電子顕微鏡写真から、平行性の良い急峻(しゅん)な界面ができており、井戸層では8原子層、障壁層では16原子層を数えることができる。また、別途行ったX線回折の結果からも、良好な超格子構造ができていていることを示すサテライトピークが明確に観測されている。

### 3.2 ヘキ開による共振器端面の形成

これまで半導体レーザの共振器鏡面を作製するために広く用いられてきたヘキ開法の適用が、通常用いられているc面サファイア基板上では困難ではないかと考えられていた<sup>4)</sup>。

これまで報告されているレーザは、ドライエッチングで共振器端面を形成する方法<sup>5)</sup>や特有なサファイアの結晶面上に形成するなどのくふうを行っている<sup>6)</sup>。当社では、ヘキ開法にくふうを凝らすことにより、従来の方法より鏡面状態の良いものを得るための条件を見いだした。ヘキ開法はこれまでの他の半導体レーザの共振器端面形成の技術としてすで実績のある方法である。この材料系でも採用できたことは、生産工程で実績に乏しいドライエッチング法に比べ、プロセスが簡略化されて量産性に優れる点で大きな利点がある。共振器は幅10 $\mu\text{m}$ 、長さ500 $\mu\text{m}$ とし、端面の高反射率コーティングは実施しなかった。

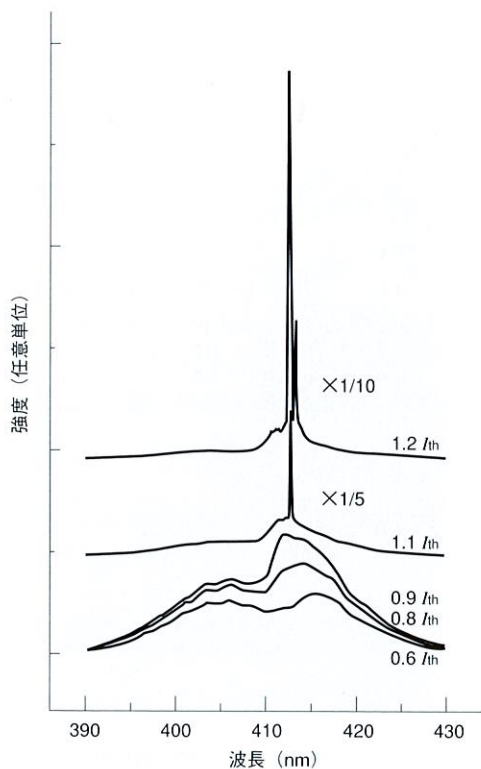


図4. 青色半導体レーザの発振スペクトル しきい電流値( $I_{th}$ )以上で波長412.8 nmに室温パルス発振が起こっている。

Emission spectra of blue semiconductor laser diode

## 4 青色半導体レーザの特性

図4にレーザのスペクトル例を示す。しきい電流値以上で波長412.8 nmにピークをもつ発振が観測された。

図5に注入パルス電流-光出力特性例を示す。発振のしきい電流値は530 mAであった。このときの動作電圧は18 Vであり、電流密度としては10.6 kA/cm<sup>2</sup>であった。端面あたりの最大光出力はデューティ10%(パルス幅1 $\mu\text{s}$ )のとき20 mWであった。

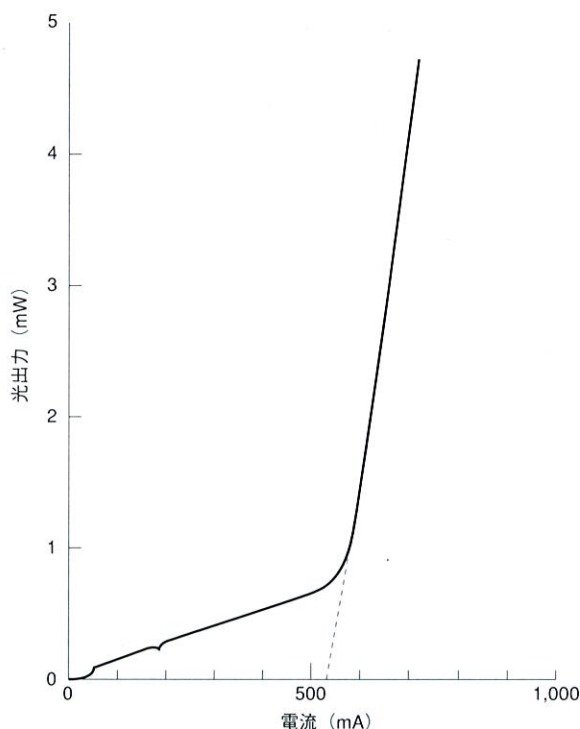


図5. 注入パルス電流に対する端面当たりの光出力 しきい電流値530 mAで発振が起こっている。

Light output power per facet as function of pulsed injected current

発振している青色半導体レーザのようすを図6に示す。ビーム広がりにはレンズで絞り、平行光線となるようにしてある。

## 5 あとがき

GaN系材料を用いた青色半導体レーザを室温で電流注入パルス発振させるに至った基盤となる技術の概要を述べた。高精細DVDに使用できる波長域で、電流注入による室温パルス発振を達成させたことは、次世代DVD実現の可能性を大きく広げることになる。

しかしながら、まだ、室温連続発振というマイルストー

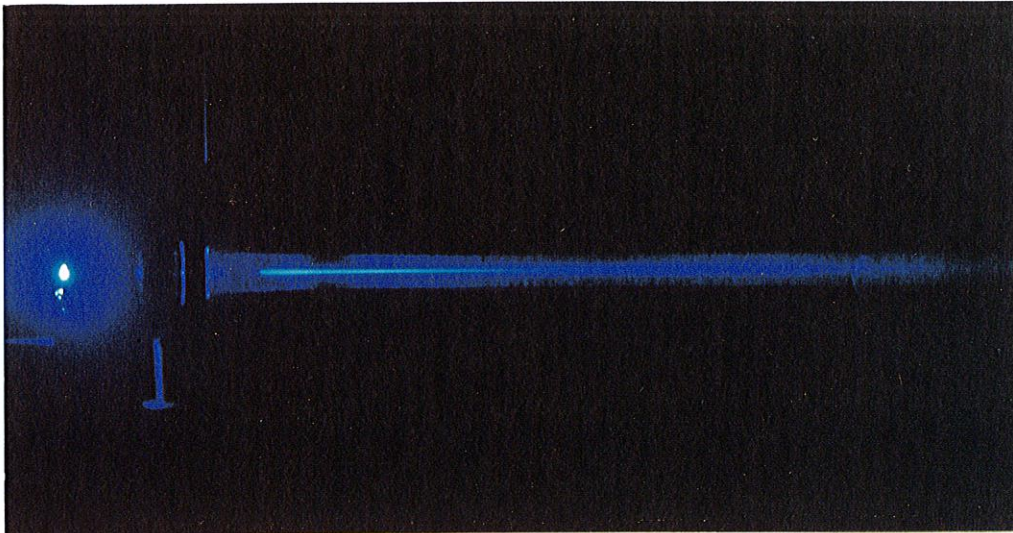


図6. 室温パルス発振のようす 青紫色のレーザー光がレーザーダイオードから出射されている。  
Demonstration of blue semiconductor laser diode

ンに到達しているわけではない。当面の目標である室温連続発振に向けた課題は、素子の発熱をいかに抑えるかということにある。素子が発熱して高温になると発振しなくなる。それを防ぐためには、素子の駆動電圧と注入電流を下げなければならない。さらなるしきい電流密度の低下に向けて、MQW構造の改良や、レーザの構造の改良などの検討を鋭意進めているところである。

室温連続発振を早期に達成した後は、実用化への課題となる横モード制御によるビーム特性向上や、レーザ雑音低減という課題が待っている。約1万時間以上の連続動作や、約0°C~70°Cの動作温度範囲の保証など信頼性を確保して、高精細DVDに搭載できるレベルまで到達できるよう努力を続けていきたい。

## 文 献

- (1) 鍋島大樹：DVD(デジタルバーサタイルディスク)、東芝レビュー、51, 1, pp.10-13(1996)
- (2) 菅谷寿鴻：高精細DVDと短波長デバイスへの要求、日本学術振興会短波長光デバイス第162委員会第2回研究会試料、pp.1-7(1996)

- (3) K. Itaya, et al.: Room temperature pulsed operation of nitride based multi-quantum-well laser diodes with cleaved facets on conventional c-face sapphire substrates, Jpn. J. Appl. Phys. **35**, 10B, pp.L1315-L1317(1996)
- (4) 倉又朗人, 他: III-V族窒化物半導体における基板の課題, 応用物理, **65**, 9, pp.936-940(1996)
- (5) S. Nakamura, et al.: InGaN-based multi-quantum-well-structure laser diodes, Jpn. J. Appl. Phys. **35**, 1B, pp.L74-L76(1996)
- (6) S. Nakamura, et al.: InGaN multi-quantum-well-structure laser diodes with cleaved mirror cavity facets, Jpn. J. Appl. Phys. **35**, 2B, pp.L217-L220(1996)



西尾 譲司 Johji Nishio, D.Eng.

研究開発センター 先端半導体デバイス研究所研究主務、工博。GaN系青色半導体レーザの開発に従事。応用物理学会、結晶成長学会会員。  
Advanced Semiconductor Devices Research Labs.



中村 優 Masaru Nakamura, D.Eng.

研究開発センター 先端半導体デバイス研究所ラボラトリーリーダー、工博。応用物理学会、電子情報通信学会、Optical Society of America 会員。  
Advanced Semiconductor Devices Research Labs.