

報 告

GaN系高品質多重量子井戸構造の開発と応用

小池正好^{*1}, 永井誠二^{*1}, 山崎史郎^{*1},
手銭雄太^{*1} 小島彰^{*1}, 岩山章^{*1}

Development of high-quality GaN based multiple quantum wells and its applications

Masayoshi Koike^{*1}, Seiji Nagai^{*1}, Shiro Yamasaki^{*1}, Yuta Tezen^{*1},
Akira Kojima^{*1}, Sho Iwayama^{*1}

要 旨

紫外～赤色の発光が可能な窒化ガリウム (GaN) 系化合物半導体は、青／緑色発光ダイオード、青紫色短波長レーザを実現するための材料として有望である。発光効率の高い高品質の発光層を実現するために、GaInN/GaN多重量子井戸構造 (MQW: Multi Quantum Wells) 発光層の開発を進めてきた結果、原子層厚レベルで制御可能な成長技術を確立でき、高品質のMQW発光層の開発に成功した。この高品質MQWを用いて短波長半導体レーザを作製し、室温連続発振を実現できた。その寿命は約300時間でありほぼ実用化のめどがたった。

現在のデジタルビデオディスク (DVD: Digital Versatile Disk) には赤色 (670nm) 半導体レーザが使用されているが、短波長にすることにより記録容量の飛躍的増大が可能である。発振波長を400nmにもつGaN系短波長レーザが実現すれば、大容量の次世代DVDが可能となる。

Abstract

III-V nitride compound semiconductors are potential materials for high efficient optical devices in the ultraviolet to red region. High-efficient active layer can be realized by newly developed high-quality GaInN/GaN Multi Quantum Wells.

We have achieved continuous operation (CW) of high-quality GaInN/GaN MQW-laser diode at room temperature, and the lifetime reached 300 hours which is almost practical for super-DVD.

Current DVD systems consist of red laser diodes as light sources. The shorter a wavelength is, the larger memory size is. Accordingly bluish-violet laser beams by GaN based laser diodes realize the super-DVD.

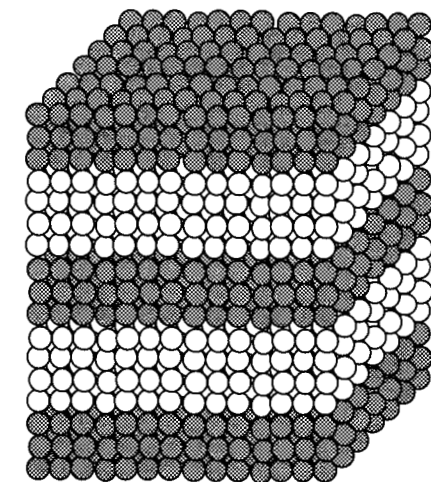
^{*1} オプトE事業部 第1技術部

1. はじめに

窒化ガリウム (GaN) 系化合物半導体は紫外～赤色の領域で高輝度発光ダイオード (LED :Light Emitting Diode) , 及び短波長レーザが可能な材料であり, 各種ディスプレイ, 高密度光メモリ用光源への応用が期待されている。

高品質GaN結晶成長法として, 有機金属気相成長法 (MOVPE : Metalorganic Vapor-Phase Epitaxy) によりサファイア上に低温成長窒化アルミニウム (AlN) バッファ層を用いて, 均一で結晶性の良いGaN及びその混晶が得られており¹⁾, 今日のTGブルー, TGグリーン等の高輝度LEDはこれらの技術を基盤とした高効率MQWの実現によって可能になった。

半導体レーザ (LD :Laser Diode) では, 特性を向上させるために活性層には多重量子井戸構造 (MQW :Multi Quantum Wells) が用いられており, その概念図を図-1に示す。MQWは異なる物質を原子層オーダーで交互に積層させた構造になっている。この周期構造のバンドギャップエネルギーの小さい方の層 (井戸層 窒化ガリウムインジウム : GaInN) 中に電子が閉じ込められて量子サイズ効果が現れる。



○ : GaN ● : InGaN

図-1 MQWの概念図

量子井戸レーザは, 1) 最大利得値が増大し, レーザの発振しきい値の低減が可能である, 2) 温度特性が良好である, 3) 導波路の損失を低減

できる, 等の特徴を有している²⁾³⁾。

またGaN系レーザでは, レーザ発振波長を制御するためにGaNと窒化インジウム (InN) の混晶であるGaInNが必要であるが, 組成比の均一な高品質GaInNの厚膜の結晶成長が困難であるため, 活性層に量子井戸構造を採用する検討を進めてきた。

以上のような理由から, GaN系レーザ実現のポイントは, 量子井戸構造の高品質化である。

本報告では, GaN系レーザダイオードに関して,

- 1) MQWの作製
- 2) MQWの最適化
- 3) GaN系MQWレーザの特性

について報告する。

2. 実験方法

2-1 成長方法

GaNの結晶成長は, III族原料として有機金属ガスであるトリメチルガリウム (TMG : $(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$), トリメチルアルミニウム (TMA : $(\text{CH}_3)_3\text{Al}$), トリメチルインジウム (TMI : $(\text{CH}_3)_3\text{In}$), V族原料としてアンモニア (NH_3) を用いたMOVPEにより行った。p型ドーパントの原料ガスにはビスシクロペンタジエニルマグネシウム ($\text{Cp}_2\text{Mg} : (\text{C}_5\text{H}_5)_2\text{Mg}$) を, n型ドーパントの原料ガスにはシラン (SiH_4) を用いた。各種原料ガスのキャリアガスには水素 (H_2), 窒素 (N_2) を使用した。

まずサファイア基板上に低温成長AlNバッファ層を形成した後, 成長温度700~1100°CにおいてIII族原料, NH_3 , ドーパントガスを供給して所定の層構成の結晶成長を行った。

2-2 評価方法

結晶膜の評価は, カソードルミネッセンス (CL : Cathode Luminescence), 窒素ガス (N_2) レーザを励起光源とした光励起実験, 2次イオン質量分析 (SIMS : Secondary Ion Mass Spectroscopy), 電流注入による発光特性を行った。図-2にその概念図を示す。

3. 結果および考察

3-1 MQWの作製

図-3にAlGaNクラッド層上に形成したMQWの断面図 (1例) を示す。MQWはGaInNからなる井

戸層とGa₂Nからなる障壁層から形成されている。井戸層の厚さは量子サイズ効果を顕著にするためには10nm以下の数原子層オーダーの厚さに設定する必要がある。この10nm以下の薄膜の積層構造を作製するためには、成長速度、成長温度、ガスの切換等が重要なポイントとなる。作製したGaInN成長層中のIn組成の急峻性を確認するため、SIMSによる深さ方向分析を行った。図-4にInの深さ方向プロファイルを示す。GaInN井戸層の厚さが7nm、Ga₂N障壁層の厚さが9nmで界面が急峻に形成されていることが確認でき、GaInN/GaN MQWの結晶成長に世界で初めて成功した。

3-2 MQWの最適化

3-2-1 低励起状態の特性

LED, LD等の発光素子において、電気エネルギーを直接光エネルギーに変換する発光層（活性層）に用いているMQWの室温におけるCLスペクトルを図-5に示す。CLは結晶への電子線照射による励起発光であるが、この発光強度が高いほどLED, LDの効率が低い。MQWの発光強度は同一組成のバルクGaInNより約30倍強く、ピーク波長はバルクGaInNより2nm、短波長であった。このことから、高品質のGaInN/GaN MQWが作製されていることが実証された。

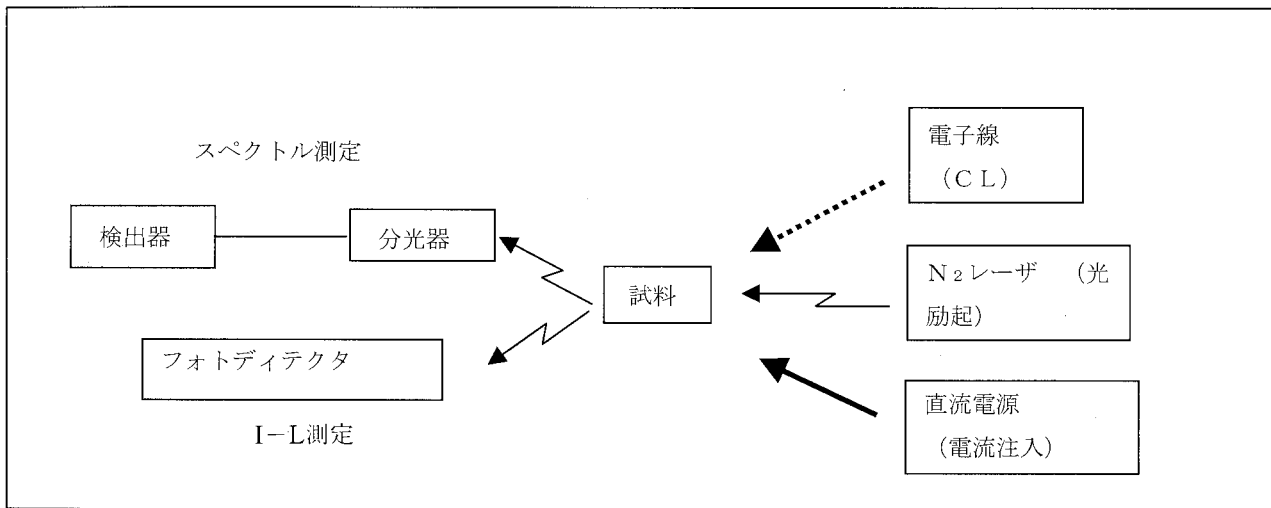


図-2 評価装置概念図

GaInN (7nm) / GaN (9nm) MQW (6 Qws)
AlGa ₂ N
GaN
AlNバッファ層
サファイア基板

図-3 AlGa₂N クラッド層上に成長したMQWの断面図(例)

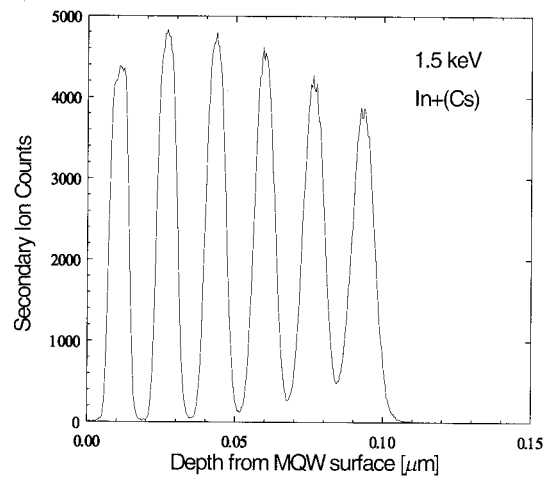


図-4 SIMS分析によるInの深さ方向プロファイル

さらに、量子サイズ効果、ピエゾ効果による発光効率の増大のため、井戸層厚を薄くする検討を行った。図-6に井戸層厚と発光スペクトルの関係を示す。障壁層の厚さはすべて9 nmである。井戸層の厚さが10 nmから3 nmまでの範囲では、井戸層の厚さが薄いほどピーク波長は短波長側へシフトし、発光強度が飛躍的に増大することを発見した。

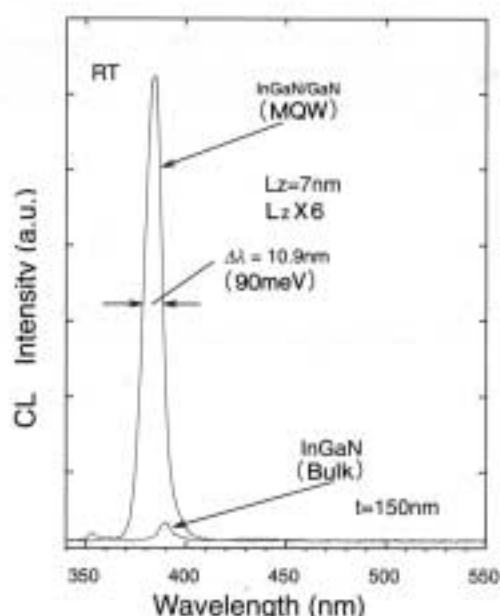


図-5 MQWとバルクGaInNのCLスペクトルの比較

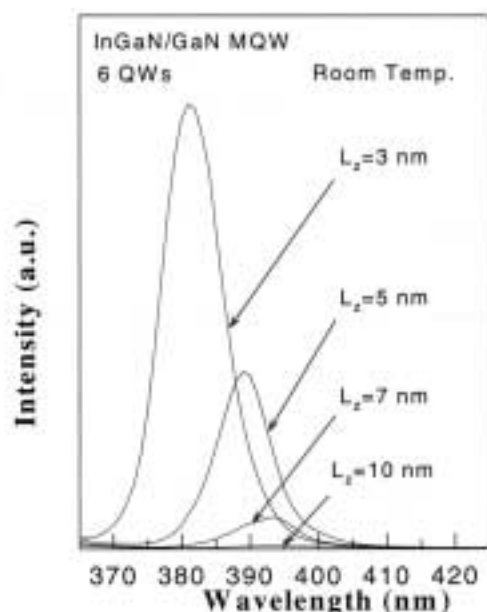


図-6 MQWの井戸層厚 (L_z) を変化させた時のCLスペクトル

図-7にMQWを発光層とした応用例の短波長LEDの発光スペクトルを示す。MQWのバンド端発光により、TGブルー、TGグリーンが実現した。

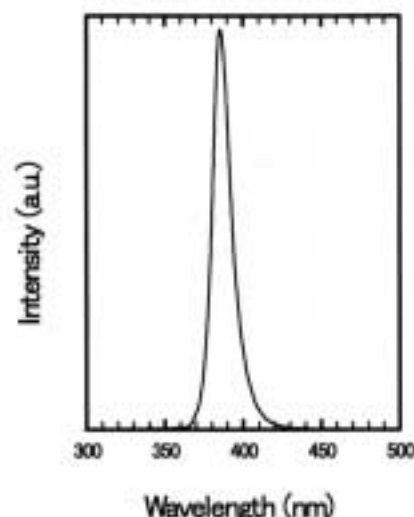


図-7 短波長LEDの発光スペクトル

3-2-2 高励起状態の特性

前述のCL特性において述べたように低励起状態で良好な発光特性が得られたが、レーザの活性層としては高励起状態でのレーザ発振特性が不可欠である。そのため、高励起が可能な窒素ガスレーザを励起光源とした光励起発振実験を行った。レーザ発振状態では特にMQWの井戸層と障壁層の界面の急峻性、活性層内の欠陥の低減が重要である。従って、成長温度、III族ガス供給量を中心にさらに検討を行った。

光励起実験は図-1のMQW層を、アルゴンと塩

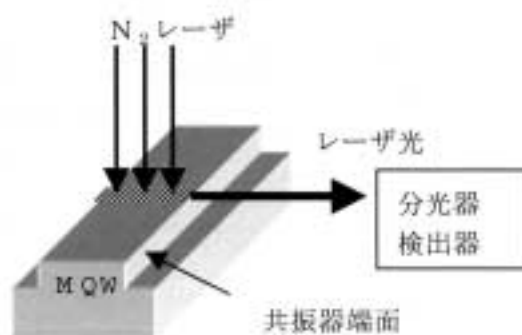


図-8 端面発光型光励起の概略図

素を用いた反応性イオンビームエッチング (RIBE: Reactive Ion-Beam Etching) により共振器端面を形成し、端面発光型の光励起実験を行った。端面発光型光励起実験の概略図を図-8に示す。共振器長は700 μmである。励起強度 (P) - 発光強度 (L) の特性を図-9に、発光スペクトルを図-10に示す。各スペクトルはP-Lグラフ (図-9) の各測定点に対応する。励起強度がしきい値に達したところからスペクトル半値幅が狭くなり、発光強度が急激に増大し、レーザ発振が確認できた。

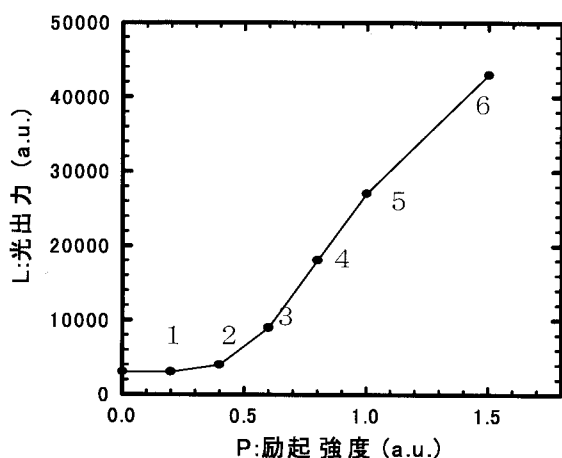


図-9 光励起発振実験における励起強度と光出力の関係

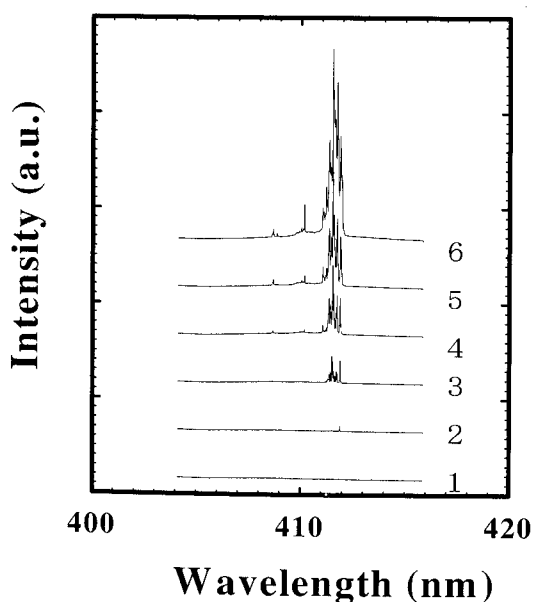


図-10 光励起による発振スペクトル

3-3 GaN系MQWレーザの特性

窒素ガスレーザを用いた光励起によって世界初の高品質MQWレーザが発振可能であることが証明できた。半導体レーザの実用化のためには電流を流すこと (電流注入) によって、レーザ発振を実現しなければならない。レーザ構造 (1例) は図-11に示すとおり、レーザ発振を可能とする光共振器内に電流と光を別々に閉じ込める分離閉じ込め型 (SCH) 構造を採用した。レーザダイオードの層構成は、n型GaNコンタクト層、n型AlGaInクラッド層、n型GaInN/GaN光ガイド層、MQW活性層 (井戸層は2~5層)、p型GaInN/GaN光ガイド層、p型AlGaInクラッド層から成る。

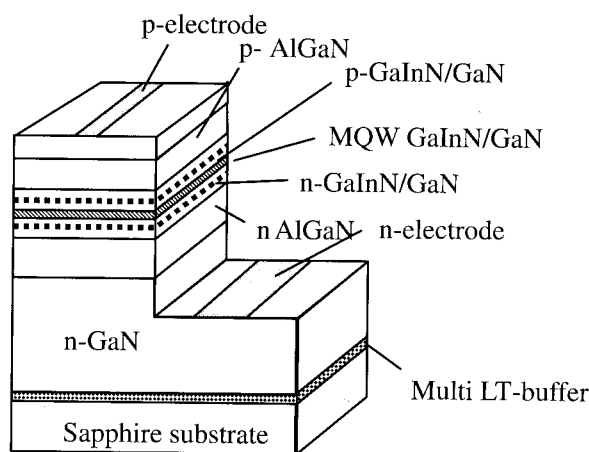


図-11 SCH-MQWのレーザ構造 (例)

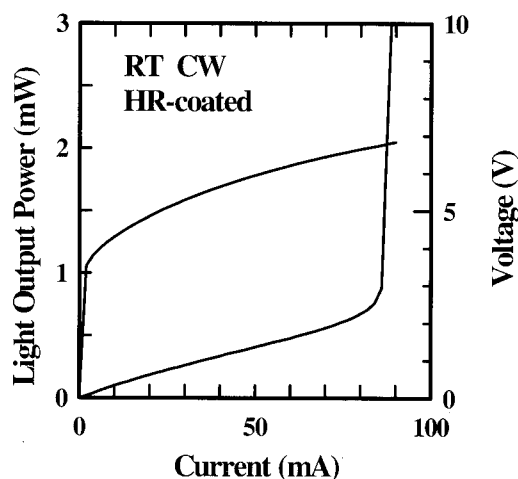


図-12 室温連続動作におけるMQWレーザのI-L、I-V特性

また、バッファ層を複数層形成したマルチ低温成長バッファ層により、欠陥を低減した⁴⁾。共振器長、ストライプ幅は300~700 μm, 2~5 μmである。共振器端面には反射率を上げるために誘電体多層膜からなる高反射膜をコーティングした。

室温 (RT : Room Temperature) -連続動作 (CW : Continuous Wave) における電流-光出力 (I-L), 電流-電圧 (I-V) 特性を図-12に示す。レーザ発振のしきい電流値, しきい電流密度, しきい電圧, スロープ効率は, それぞれ86mA, 5.7kA/cm², 6.8V, 0.8W/Aであった。

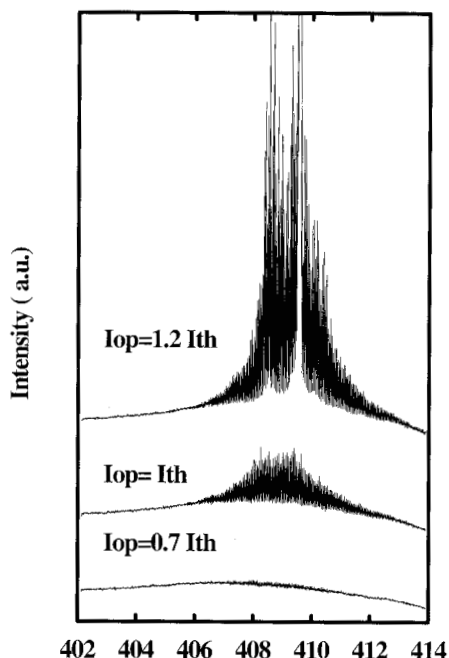


図-13 しきい値前後における電流注入による発光スペクトル

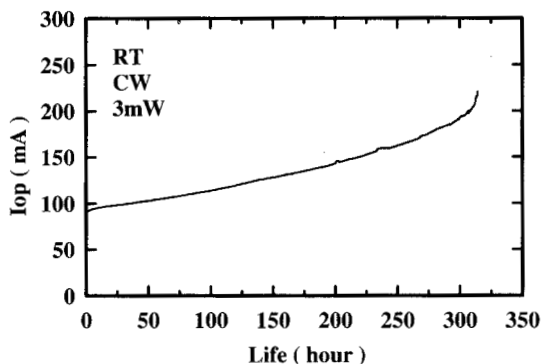


図-14 レーザの寿命特性

CW駆動における発光スペクトルを図-13に示す。発振波長は409.6nmで, しきい値以上では間隔0.048nmの縦モードが観測できた。RT-CW, 3mW一定出力におけるレーザの寿命特性を図-14に示す。室温において300時間以上の連続動作が達成できた。

4. むすび

GaN系化合物半導体による原子層厚レベルのMQWを高品質に作製でき, そのMQWを用いた青色/緑色MQW-LEDが実用化され, 短波長LDにおいては室温連続発振が実現できた。今後, 青色/緑色等LED及び短波長LDのさらなる高品質化を行うためには, 井戸層におけるIn組成のゆらぎのコントロール, 結晶欠陥の低減が課題となる。さらには量子細線, 量子ドット等の多次元量子井戸構造の開発が必要である。

謝辞

最後に本開発に並々ならぬご指導を頂きました名城大学赤崎教授, 天野助教授, 及び多大な御援助を頂いた科学技術振興事業団, (株)豊田中央研究所 デバイス部, 分析部の皆様に厚く感謝いたします。

また, 結晶成長, プロセスにおいてオプトE事業部第1技術部 平松敏夫氏, 伊藤優氏, 梅崎民代氏, 山下弘氏, 大橋雅浩氏, 木村昭彦氏, 佐藤光雄氏, 大口欽也氏, 浅見慎也氏に協力して頂きました。

参考文献

- 1) H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki and Y. Toyoda: Appl. Phys. Lett. 48 (1986) 353
- 2) 岡本紘, 超格子構造の光物性と応用, コロナ社, (1988)
- 3) 日本物理学会, 半導体超格子の物理と応用, 培風館, (1993)
- 4) M. Koike, S. Yamasaki, Y. Tezen, S. Nagai, S. Iwayama and A. Kojima: Mater. Res. Soc. Symp. Vol. 595 (2000) W1.2.1