GaN系半導体レーザーの高出力化と長波長化への道程

枡井 真吾, 長濱 慎一

日亜化学工業(株) 第二部門開発本部第三開発部 (〒774-8601 徳島県阿南市上中町岡491番地)

Road to Higher Optical Output Power and Longer Wavelength of GaN Based Semiconductor Laser Diodes

Shingo MASUI and Shin-ichi NAGAHAMA

Development Division Optoelectronics Products BU, Nichia Corporation
491 Oka, Kaminaka-cho, Anan-shi, Tokushima 774-8601

(Received August 21, 2013)

AlInGaN is most attractive material due to a directive semiconductor materials covering wide band energy ranging 0.8–6.4 eV. AlInGaN based violet semiconductor laser diodes (LD) is first demonstrated by Nichia Corporation in 1995. Since it, AlInGaN based LDs device characteristics have been improving and its lasing wavelength are expand from UV, blue, to green. In this paper, the technology histories of higher power and longer wavelength GaN based LDs are reviewed. Also, recent high optical power watt class blue and green LDs characteristics are introduced.

Key Words: GaN, Laser diodes, Visible laser

1. はじめに

GaN系半導体 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_{(1-x-y)}\text{N}$ は、深紫外～赤外まで(0.8–6.4 eV)^{1,2)}という広範囲のバンドギャップエネルギーをカバーする直接遷移型の化合物半導体材料である。発光デバイスとしての研究が盛んに進められており、発光ダイオード(Light Emitting Diode: LED)の分野では、青色LEDと黄色蛍光体と組み合わせた白色LED³⁾が高効率、長寿命の光源として液晶用バックライトや照明等に幅広く普及している。半導体レーザー(Laser Diode: LD)の分野では、1995年に電流注入によるレーザー発振(波長: 410 nm)⁴⁾が初めて実現した。それ以降、半導体レーザーデバイスとしての性能は飛躍的に向上し、現在ではBlu-rayディスクに代表される大容量光ディスクに広く普及している。また近年では、GaN系半導体レーザーの広帯域化の開発が進み、発振波長帯はUV領域から可視光である青色、緑色域まで広がっており⁵⁻⁷⁾、露光、バイオ等の分野において、気体レーザーやランプの代替光源として用途を広げている。近年では可視光領域の青色と緑色領域の半導体レーザーが、光の三原色として利用できるため、レーザーディスプレイ用の光源⁸⁾として大きく注目されている。

本稿ではGaN系半導体レーザーの発展について述べた後、近年その開発の進展が著しい青色および緑色半導体

レーザーの開発状況について概説する。

2. GaN系半導体レーザーの発展

2.1 自立GaN基板

GaN系半導体材料の大きな技術課題としてホモエピタキシャル用のバルクGaN基板の欠如があった。一般的なLEDの作製においては、サファイア基板上にエピタキシャル膜⁹⁾を成長しているが、基板とGaNとのヘテロ接合に起因する結晶欠陥(貫通転位)が多数発生している。このような結晶欠陥は駆動電流密度の低いLEDでは問題とならなかったが、半導体レーザーのように駆動電流密度が高くなると、結晶の劣化とともに発光効率を低下させてしまい、実用デバイスとしての信頼性が得ることができなかった。近年になり、異種基板上に高品位なGaN結晶を得るためのELOG(Epitaxial Lateral Over Growth)成長¹⁰⁾のような低転位密度化技術やHVPEによる厚膜成長技術の開発が飛躍的に進み、低貫通転位密度の高品質自立GaN基板^{11,12)}の作製が可能となった。近年では、Naフラックス^{13,14)}やアモノサーマル法¹⁵⁻¹⁷⁾等の新たな結晶成長技術の開発も進んでいる。これら高品質な自立c面GaN基板の登場により、高効率化が進みGaN系半導体レーザーは実用デバイスとしての十分な信頼性が確保できるようになり、Blu-rayディスクに代表される大容量

Fig. 1 Wavelength dependence of threshold current density of c face GaN based laser diodes.

光ディスク用の紫色半導体レーザー光源^{18,19)}として製品化され広く普及するようになった。

2.2 GaN系半導体レーザーの長波長化

GaN系半導体レーザーの発振波長においては、400～420 nmの青紫色領域の発振波長のレーザーが比較的作製しやすいとされる。これは青紫領域の半導体レーザーでは、InGaN活性層のIn混晶やAlGaNクラッド層のAl混晶を大きくする必要がないので、レーザー素子と基板であるGaNとの格子定数差が小さく容易にエピタキシャル成長出来るためである。一方、それより長波長領域にある青色～緑色領域の半導体レーザーを実現するためには種々の問題が発生してくる。Fig. 1にこれまでに報告されてきたc面GaN基板上の系半導体レーザーのしきい値電流密度の発振波長依存性を示す⁵⁻⁷⁾。半導体レーザーのしきい値電流密度は発振波長に大きく依存し、長波長化に伴い上昇していくことがわかる。この原因として、基板との格子定数差の増大に伴うInGaN活性層の結晶劣化および内部電界の増加²⁰⁻²²⁾による発光効率の低下(量子シュタルク効果)や、屈折率の波長分散に起因したエピタキシャル層内での光閉じ込めの低下などが挙げられる。これらは長波長化に伴い影響がより大きくなるため、発振波長の長波長化を実現する際の壁となる。このような多くの技術課題があるものの、先述した高品質自立GaN基板^{11,12)}の採用やエピタキシャル成長条件、エピタキシャル膜構造の最適化による内部電界の抑制、光閉じ込め構造の最適化等により、発振波長の高効率化および長波長化が達成されており、青色領域だけでなく緑色領域のレーザー発振が実現され製品化されている。また、緑色領域のレーザーでは、c面GaN基板上のレーザー素子だけでなく、c面GaNから面方位を傾けることによって内部電界を抑制した半極性(20-21)GaN基板上のレーザー素子の報告²³⁾もあり、活発な研究開発がなされている。

さらなる長波長領域である黄色や赤色GaN系半導体レーザーにおいては未達の領域であり、InGaN基板等いくつかの新たなブレークスルーが必要になってくるものと思われる。

3. 青色・緑色半導体レーザー

本項においては、我々が開発しているc面GaN基板上

のワットクラスの高出力青色および緑色レーザーの現状の諸特性を紹介しながら、GaN系半導体レーザーの現状と今後について概説する。

3.1 半導体レーザーの構造

半導体レーザーの構造概念図をFig. 2に示す。基板として、低転位密度のc面自立GaN基板を用いた。この基板上にMOCVD法(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)を用いて、高出力半導体レーザー素子として最適化したエピタキシャル成長を行った。GaN系半導体レーザー素子は $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{In}_{1-y}\text{N}$ 結晶によって構成され、発光層にはInGaN量子井戸層を用いている。レーザーのデバイス構造は一般的な屈折率導波型のリッジストライプ構造とし、リッジ部分の外側を絶縁膜で覆うことで、水平横方向の屈折率差を設けて横モードの制御を図っている。一方、垂直横モードの制御には、キャリアをInGaN多重量子井戸発光層内部に、光をガイド層内部にそれぞれ分離して効率的に閉じ込める分離閉じ込め構造(Separate Confinement Heterostructure: SCH)が、採用されている。レーザーの共振器端面はGaN基板のm面をへき開することによって形成し、共振器端面の前面側を低反射に、裏側は高反射にそれぞれ絶縁膜でコーティングを行った。

3.2 GaN系半導体レーザーの高出力化

一般的に光出力が1 Wを超える高出力レーザーにはワイドストライプ構造が採用される。これは半導体レーザー特有の破壊モードである光学損傷(Catastrophic Optical Damage: COD)による故障が発生しないように、レーザーの出射端面幅を広げて光密度を低減するためである。また、ワットクラスの高出力レーザーの駆動時には、投入電力が大きくなるため、LD素子からの排熱性も重要となる。光Disc向けなどの半導体レーザーでは $\phi 5.6 \text{ mm}$ や $\phi 3.8 \text{ mm}$ のCANパッケージが多く用いられているが、これらは小型化を優先した設計であるため熱抵抗が高く、ワットクラスのような高出力半導体レーザーを駆動する場合、温度上昇が問題となってしまう。半導体素子の温度上昇は光出力や寿命の低下といった悪影響を及ぼすことから、比較的熱抵抗が低く、半導体レーザーパッケージとして汎用的である $\phi 9 \text{ mm}$ のCANパッ

Fig. 2 Schematic structure of GaN based laser diodes.

Fig. 3 Kinds of TO CAN packages of LDs.

Fig. 4 Image of inside package and mounting method.

ケースを用いた (Fig. 3)。また更なる熱抵抗低減のために、発光層に近いp層側が放熱面となるジャンクションダウン実装 (Fig. 4) をおこなうことで、大幅に熱抵抗を低減することができる。

次項よりこれらの高出力構造を採用し、我々が開発した青色および緑色GaIn系半導体レーザーの最新の特性について紹介する。

3.3 青色高出力半導体レーザー

Fig. 5にリッジストライプの幅30 μm で作製した青色LDの電流-電圧 (V-I)、電流-光出力 (L-I) 特性を示す。ケース温度25 $^{\circ}\text{C}$ 、CW駆動時のしきい値電流 (I_{th}) は225 mAであり、駆動電流2.3 A時の光出力、駆動電圧はそれぞれ3.75 W、4.24 Vであった。ここから見積もられる光-電力変換効率 (Wall-Plug Efficiency: WPE) は38.5%であった。また駆動電流を3 Aまで増加させても光出力の飽和は起こらず、5 Wに迫る光出力が得られている。これはLDチップの改良、パッケージ及びジャンクションダウン実装による熱抵抗低減の効果によるものである。

Fig. 6に駆動電流2.3 A時の発振スペクトルを示す。発振波長は450 nmであり、縦マルチモードで発振している。また遠視野像 (Far Field Pattern: FFP) を Fig. 7に示す。30 μm というストライプ幅を反映して成長面に対して水平方向 ($\theta_{\parallel}$) では高次モードが発生し、台形状の放射モードになっていることがわかる。広がり角は強度がピークの $1/e^2$ となる角度で定義した場合、水平方向が 14° 、垂直方向が 42° の成長方向に長い放射形状となる。

次に青色LDの温度特性について述べる。Fig. 8はCW駆動条件下でLDのケース温度を20~80 $^{\circ}\text{C}$ まで変化させ、L-I特性を測定した結果である。ケース温度80 $^{\circ}\text{C}$ においても光出力は飽和しておらず、WPEは34.7% (駆動電流2.3 A時) であることを確認した。また発振波長の温度依存性 (Fig. 9) から、温度上昇に伴う発振波長の長波

Fig. 5 Typical L-I and V-I characteristics of high-power blue LDs under 25 $^{\circ}\text{C}$ -CW operation.

Fig. 6 Typical spectrum characteristics of high-power blue LDs under 25 $^{\circ}\text{C}$ -CW operation.

Fig. 7 Typical FFP in perpendicular ($\theta_{\perp}$) and parallel ($\theta_{\parallel}$) of high-power blue LDs.

Fig. 8 Temperature dependence of L-I characteristics for high-power blue LDs.

Fig. 9 Temperature dependence of lasing wavelength for high-power blue LEDs.

Fig. 10 Aging data operating at 2.3 A and 50 °C under automatic current control.

長化は0.04 nm/°C程度であり、温度変化に対する波長シフトは赤色LDの0.20 nm/°Cよりも小さい。

寿命特性はLDのケース温度を50 °Cとし、駆動電流を2.3 Aとして光出力の変化から評価を行った(Fig. 10)。光出力が初期の半分になる時間(半減期)を寿命とした場合、1000時間通電後の劣化係数($\Delta L/\Delta t$)より平均寿命は30,000時間以上と見積もられた。

3.4 緑色高出力半導体レーザー

Fig. 11にリジストライプの幅15 μm で作製した波長525 nmの緑色LDのV-I, L-I特性を示す。ケース温度

Fig. 11 Typical L-I and V-I characteristics of high-power green LEDs under 25 °C-CW operation.

25 °C, CW駆動時のしきい値電流は300 mAであり、駆動電流1.5 Aにおいて光出力1 Wを実現している。この際の駆動電圧は4.76 Vであり、WPEは14.1%であった。また2 Aまで駆動電流を増加させても光出力の飽和は起こらないことを確認した。Fig. 12は駆動電流1.5 Aにおける発振スペクトルである。青色LD同様、縦マルチモードで発振を確認できた。

L-I特性、発振波長の温度特性も青色同様、CW駆動においてケース温度80 °Cまで測定を行った(Fig. 13, Fig. 14; 波長520 nm)。光出力の低下は青色に比べて若干大きい、ケース温度80 °Cにおいても光出力飽和は

Fig. 12 Typical spectrum characteristics of high-power green LEDs under 25 °C-CW operation.

Fig. 13 Temperature dependence of L-I characteristics for high-power green LEDs.

Fig. 14 Temperature dependence of lasing wavelength for high-power green LEDs.

Fig. 15 Aging data operating at 1.5 A and 50 °C under automatic current control.

発生していないことがわかる。波長の温度シフトに関しても青色LDとほぼ同等の0.05 nm/°C程度であった。

寿命特性は波長520～525 nmのLDを使用し、ケース温度50 °C、駆動電流1.5 Aとして光出力の変化から評価を行った(Fig. 15)。寿命を青色と同様に半減期で定義した場合、1,000時間通電後の劣化係数から平均寿命は10,000時間以上と見積もられた。

3.5 GaN系半導体レーザーの現状

GaN系半導体レーザー用基板において、量産実績のある光ディスク用の青紫色半導体レーザー(波長: 405 nm)と同じc面GaN基板が一般に多く用いられている。半導体レーザーを放射光特性で分類すると、横モードマルチとシングルの2つに分けられる。青色、および緑色GaN系半導体レーザーの最近の主な研究機関からの報告をTable 1にまとめる。

ワットクラスの光出力を実現できる横モードマルチの高出力レーザーでは主にc面GaN基板が用いられており、

Table 1 Comparisons in multi and single transverse mode blue and green LDs.

Transverse mode		Multi mode	
Color	Blue	Green	
Researcher	Nichia	Osram	Nichia
Orientation of GaN	(0001)	(0001)	(0001)
Wavelength (nm)	450	450	525
Optical output power (W)	3.75	~2.5	1.0
WPE (%)	38.5	~29	14
Reference	this paper	24)	this paper

Transverse mode		Single mode		
Color	Blue	Green		
Researcher	Nichia	Osram	Osram	SEI/SONY
Orientation of GaN	(0001)	(0001)	(0001)	(20-21)
Wavelength (nm)	445	452	520	525
WPE (%)	18.9	18.3	8.9	8.9
Reference	※	25)	26)	23)

※From Nichia's homepage (Model: NDB4116E).

青色領域においてOsramの研究グループから光出力は2.5 Wまで確認され、WPEは最大29%が得られていると報告されている²⁴⁾。日亜化学では、先述したように動作電流2.3 A時に光出力3.75 W、WPEは38.5%と高効率のレーザーが実現できており、緑色領域でも動作電流1.5 A時の発振波長525 nm、光出力1.01 W、WPEは14.1%と青色レーザーに比べると劣るもののワットクラスの半導体レーザーを実現している。

横モードシングルのレーザーでは、青色領域において、Osramの研究グループから、光出力100 mW時に、WPEとして18.3%²⁵⁾、日亜化学からはWPEは18.9%と報告されている。緑色領域において、Osramの研究グループから、c面GaN基板を用いて520 nmの発振波長でWPE8.9%²⁶⁾の報告がなされた。

一方で、c面GaN基板上だけでなく、半極性面である(20-21)GaN基板上に成長した横モードシングルの緑色半導体レーザーの報告がある。c面GaN基板上のレーザー素子では高いIn組成のInGaN発光層の結晶性の悪化の問題以外にも、piezo電界による量子閉じ込めシタルク効果による発光効率の低下の問題が起きている。Fig. 16に電流注入時におけるc面GaN基板上の緑色領域のInGaN活性層のバンド構造およびキャリア濃度のシミュレーション結果を示す。piezo電界の強さは理論値の1/2で計算を行っている。piezo電界の発生により、バンド構造は大きく曲がり、電子と正孔のキャリア濃度の分布に偏りがあることがわかる。このため、電子と正孔の波動関数の重なりが減少し、結果として再結合して発光する割合が低下してしまうのである。この問題を解決するために、c軸から傾けた面、つまり非極性や半極性のGaN基板を利用することにより、成長方向のpiezo電界強度を低減させる試みがなされている。このような利点を生かして住友電工とSONYの研究グループから、(202-1)半極性面GaN基板上に作製した緑色半導体レーザーにおいて、525 nmの発振波長でWPE8.9%²³⁾を報告している。しかしながら、半極性基板を用いた緑色LDの効率はc面GaN基板のそれと顕著な差がなく、極性面(c面)および半極性面を含めた緑色LDのWPEは青色LD

Fig. 16 Simulation results of Green active layer band structure and carrier concentration.

の半分程度しかないのが現状である。

今後、さらなる高効率化および長波長化のためには、たとえば高In組成比の発光層InGa_Nに格子整合する高品位InリッチInGa_N基板、もしくはInNの実現などの新たなブレークスルーが必要と思われる。

4. まとめ

本稿ではGa_N系半導体レーザーの発展および青色、緑色半導体レーザーの開発状況について解説した。青色領域だけでなく緑色領域においてもワットクラスの光出力の半導体レーザーが実現され、すでに実用化されている赤色LDと合わせ、光の三原色のワットクラス半導体レーザー光源が出揃うことになった。これらの半導体レーザーを光源として用いたディスプレイやプロジェクタの開発および製品化がさらに加速され、市場が活発になっていくことを期待する。さらなる高出力化においては、LD素子の効率改善はもちろんのこと、マルチストライプやアレイ構造の導入、TO-CANパッケージ以外の低熱抵抗パッケージの採用などにより、効果的に実現できるとされる。また、さらなる長波長化には高品位InリッチInGa_N基板、もしくはInN基板の実現など新たなブレークスルーが必要と思われる。

参考文献

- 1) J. Wu, W. Walukiewicz, K. M. Yu, J. W. Ager III, E. E. Haller, H. Lu, W. J. Schaff, Y. Saito, and Y. Nanishi: Appl. Phys. Lett. **80** (2002) 3967.
- 2) W. M. Yim, E. J. Stofko, P. J. Zanzucchi, J. I. Pankove, M. Ettenberg, and S. L. Gilbert: J. Appl. Phys. **44** (1973) 292.
- 3) K. Bando, K. Sakano, Y. Noguchi, and Y. Shimizu: J. Light & Vis. Env. **22** (1998).
- 4) S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, and Y. Sugimoto: Jpn. J. Appl. Phys. **35** (1996) L74.
- 5) S. Nagahama, M. Sano, T. Yanamoto, and T. Mukai: Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2001) 3075.
- 6) T. Kozaki, T. Yanamoto, T. Miyoshi, Y. Fujimura, S. Nagahama, and T. Mukai: SID Digest, Boston, May, (2005) pp1605.
- 7) T. Miyoshi, S. Masui, T. Okada, T. Yanamoto, T. Kozaki, S. Nagahama, and T. Mukai: Appl. Phys. Express **2** (2009) 062201.
- 8) 山本 和久: レーザー研究 **41** (2013) 300.
- 9) H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, and Y. Toyoda: Appl. Phys. Lett. **48** (1986) 353.
- 10) A. Usui, H. Sunakawa, A. Sasaki, and A. Yamaguchi: Jpn. J. Appl. Phys. **37** (1997) L899.
- 11) K. Motoki, T. Okahisa, N. Matsumoto, M. Matsushima, H. Kimura, H. Kasai, K. Takemoto, K. Uematsu, T. Hirano, M. Nakayama, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **40** (2006) L140.
- 12) Y. Oshima, T. Eri, M. Shibata, H. Sunakawa, K. Kobayashi, T. Ichibashi, and A. Usui: Jpn. J. Appl. Phys. **42** (2003) L1.
- 13) A. Yoshikawa, E. Ohshima, T. Fukuda, H. Tsuji, and K. Oshima: J. Cryst. Growth **260** (2004) 67.
- 14) J. A. Jeffer, S. McKernan, A. P. Purdy, W. L. Gladfelter: Chem. Mater. **12** (2000) 1003.
- 15) D. R. Ketchum and J. W. Kolis: J. Cryst. Growth **222** (2001) 431.
- 16) H. Yamane, M. Shimada, T. Sekiguchi, and F. J. DiSalvo: Chem. Mater. **9** (1997) 413.
- 17) Y. Mori, Y. Kitaoka, M. Imade, N. Miyoshi, M. Yoshimura, and T. Sasaki: Physica Status Solidi (c) **8** (2011) 1445.
- 18) S. Nagahama, N. Iwasa, M. Senoh, T. Matsushita, Y. Sugimoto, H. Kiyoku, T. Kozaki, M. Sano, H. Matsumura, H. Umemoto, *et al.*: Jpn. J. Appl. Phys. **39** (2000) L647.
- 19) T. Tojyo, S. Uchida, T. Mizuno, T. Asano, M. Takeya, T. Hino, S. Kijima, S. Goto, Y. Yabuki, and M. Ikeda: Jpn. J. Appl. Phys. **41** (2002) 1829.
- 20) S. Chichibu, T. Azuhata, T. Sota, and S. Nakamura: Appl. Phys. Lett. **69** (1996) 4188.
- 21) T. Takeuchi, S. Sota, M. Katsuragawa, M. Komori, H. Takeuchi, H. Amano, and I. Akasaki: Jpn. J. Appl. Phys. **36** (1997) L382.
- 22) T. Takeuchi, H. Amano, and I. Akasaki: Jpn. J. Appl. Phys. **39** (2000) 413.
- 23) S. Takagi, Y. Enya, T. Kyono, M. Adachi, Y. Yoshizumi, T. Sumitomo, Y. Yamanaka, T. Kumano, S. Tokuyama, K. Sumiyoshi, *et al.*: Appl. Phys. Express **5** (2012) 082102.
- 24) A. Avramescu, C. Eichler, T. Hager, T. Lermer, C. Vierheilg, S. Tautz, A. Lell, J. Müller, F. Kopp, B. Stojetz, *et al.*: Laser Display Conference '12 (2012) LDC1-1.
- 25) S. Lutgen, D. Dini, I. Pietzonka, S. Tautz, A. Breidenassel, A. Lell, A. Avramescu, C. Eichler, T. Lermer, J. Müller, *et al.*: Proc. SPIE. **7953** (2011) 795315.
- 26) G. Bruederl, T. Hager, C. Vierheilg, C. Eichler, S. Tautz, B. Stojetz, T. Lermer, A. Avramescu, and U. Strauß: 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR) SA1-2.