c面GaN基板上可視光半導体レーザーの開発

三好 隆, 長濱 慎一, 向井 孝志

日亜化学工業(株) 第二部門開発本部 窒化物半導体研究所 (〒774-8601 徳島県阿南市上中町岡491番地)

Development of Visible Range Semiconductor Laser Diodes Grown on c-Plane GaN Substrate

Takashi MIYOSHI, Shin-ichi NAGAHAMA, and Takashi MUKAI

Nitride Semiconductor Research Laboratory, R&D Division, Optoelectronics Products BU, Nichia Corporation,
491 Oka, Kaminaka-cho, Anan-shi, Tokushima 774-8601

(Received November 30, 2009)

This paper reports development and characteristics of visible range nitride based semiconductor laser diodes (LDs) grown on c-plane free-standing GaN substrates by Metal Organic Chemical Vapor deposition (MOCVD). In blue regions, 1 W 445 nm LDs have been developed for laser projection display. In blue-green regions, 488 nm LDs have been developed for the replacement with Ar-ion lasers or diode pumped solid state (DPSS) lasers. Moreover, we succeeded in developing green LDs with the wavelength in 518 nm by improving the growth condition of epitaxial layers and structures of LDs.

Key Words: Visible range, Laser diodes, Blue, Green

1. はじめに

ウルツ鉱型の結晶構造を持つGaN, AlN, InNからなるIII族窒化物半導体は、深紫外～赤外まで(0.8–6.4 eV)のワイドバンドギャップをカバーする化合物半導体である^{1,2)}。これらは直接遷移型のバンド構造を持つことから発光デバイスとして広く利用されており、これまでに高輝度青色、緑色発光ダイオード(LED)、固体照明用白色光源などが実現、実用化されている。半導体レーザー(Laser Diode; LD)については1996年に世界初のレーザー発振が報告され³⁾、現在では波長405 nmの青紫色LDがブルーレイに代表される次世代光ディスク用の光源として利用されている。また近年では発振波長の広帯域化や光出力の高出力化により^{4–6)}、光ディスク以外の分野にもその用途を広げている。

本稿ではそれらの中でも最近特に開発が進められている、青～緑色に渡る可視光領域のLDに関して報告する。青色領域では大型ディスプレイ用途に向けて波長445 nm、光出力1 W以上の高出力、高効率のLDを作製した。またこれまではAr⁺レーザーなどが主流であったバイオ用途向け光源の置き換えとして波長488 nmのLD、更には小型プロジェクタ向けに510 nmを越す緑色領域のLD開発に成功した。

2. III族窒化物LDの長波長化

III族窒化物半導体では初のレーザー発振波長が410 nmであったことが示すように³⁾、一般に400～420 nmの青紫色領域が比較的LDを作りやすい波長帯と考えられる。これは活性層(主にInGaN)やクラッド層(主にAlGaN)と基板であるGaNとの格子定数差が小さく、比較的容易にエピタキシャル成長出来るためである。一方筆者らはより長波長である可視光領域のLD実現を目的として、開発に取り組んできた。Fig. 1はこれまでに報告されたc面GaN基板上窒化物LDにおけるしきい値電流密度の発振波長依存性である^{7–9)}。LDのしきい

Fig. 1 Lasing wavelength dependence of the threshold current density of LDs under CW operation at 25 °C.

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。これは主に基板との格子定数差の増大に伴うInGa_N活性層の結晶劣化や内部電界^{10,11)}による発光効率の低下、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原因として挙げられる。これらは長波長化に伴い影響がより大きくなり、LDを長波長化する際の壁となる。しかしながら筆者らはこれらに対し、高品質自立Ga_N基板^{12,13)}の採用やエピタキシャル成長条件、光閉じ込め構造の最適化等により、発振波長の長波長化を達成してきた。その結果現時点では510 nmを越す緑色領域でのレーザー発振が可能となっている。加えて500 nm以下では、440 nm以下の短波長領域と比較してもしきい値電流密度の上昇は発生しておらず、長波長領域においても短波長同様に高効率、高出力のLDが作製可能であることを示している。

3. LDの作製方法

Fig. 2に作製したLDの構造概念図を示す。基板としては低転位密度のn型導電性を有するc面自立Ga_N基板を用い、有機金属気相成長法(Metal Organic Chemical Vapor Deposition; MOCVD)によりエピタキシャル成長を行った。構造としては発光層であるInGa_N活性層を中心として成長方向にガイド層、クラッド層で挟み込んだ分離閉じ込めヘテロ構造(Separate Confinement Heterostructure; SCH)である。また導波路はリッジ構造とし、共振器端面はウェハーをm面でへき開することで作製した。波長については主に活性層であるInGa_Nの組成を変化させることにより制御した。

4. 窒化物可視光LD

4.1 高出力青色LD

ディスプレイ用青色光源として要求される波長は440～460 nm程度である。我々はLDの波長を445 nmとし、

Fig. 2 Schematic structures of LDs.

Fig. 3 V-I, L-I characteristics of the blue LD under CW operation at 25 °C.

高出力化を図った。リッジ幅については高出力駆動時に懸念されるレーザー端面の光学損傷(Catastrophic Optical Damage; COD)を抑制するため、光ディスク向けレーザー(リッジ幅3 μm以下)に比べてリッジ幅を拡大したワイドストライプ構造(リッジ幅15 μm)とした。

Fig. 3に作製した青色LDの電流-電圧(V-I)、電流-光出力(L-I)特性を示す。測定はLDのケース温度を25 °Cとし、連続駆動(CW)の条件下で行った。図よりしきい値電流は152 mA、電流1 Aを流したときの光出力および電圧値はそれぞれ1.23 W、4.5 Vであった。ここから見積もられる電力-光変換効率(Wall- Plug Efficiency; WPE)は27.3 %であった。次に青色LDの1 W光出力時のスペクトルと遠視野像(Far Field Pattern; FFP)をFig. 4, 5に示す。Fig. 4から発振波長は445 nmであり、縦マルチモードで発振していることが分かる。またFFPについては結晶成長面に対して垂直($\theta_{\perp}$)、水平方向($\theta_{\parallel}$)で形状が大きく異なることがわかる。垂直方向については基本モードで発振しているためガウス形状であるが、水平方向はワイドストライプ構造であることから高次モードの発生によりマルチモード化し、台形状の放射モードとなっている。広がり角は強度がピークの1/e²となる角度で定義した場合、垂直方向が40.9°, 水平方向が12.8°の縦方向に

Fig. 4 Lasing spectrum of the blue LD with an output power of 1 W under CW operation at 25 °C.

Fig. 5 FFPs of the blue LD with an output power of 1 W under CW operation at 25 °C.

長い放射形状となる。

次に作製したLDをパルス電流(パルス幅: 2 μ s, デューティ: 1 %)で駆動した場合の L - I 特性をFig. 6に示す。パルス電流で駆動した場合, 光出力3 Wまで駆動することを確認した。この結果は作製したLDのCOD等

Fig. 6 L - I characteristic of the blue LD the pulsed current condition (pulse width: 2.0 μ s, pulse duty: 1 %).

Fig. 7 Results of the lifetime test of CW-operated blue LDs under ACC condition with an operating current of 1 A at 25 °C.

による破壊レベルが非常に高いことを示唆しており, GaN系材料の堅牢さを示す結果であると考えられる。

青色LDの寿命についてはディスプレイ用途を考慮し, LDを一定電流で駆動(駆動電流値: 1 A, Auto Current Control; ACC)した際の光出力の経時変化から見積もりを行った(Fig. 7)。ケース温度を25 °Cとし, 寿命を光出力が初期の半分になる期間(半減期)と定義した場合, 1000時間後の劣化係数($=\Delta L/\Delta t$)より平均の推定半減期は3万時間以上と見積もられた。長寿命が要求される大型ディスプレイ用途にも十分適用可能であると考えられる。

4.2 バイオ向け488 nmLD

波長488 nmのレーザー光は主に医療やバイオ分野の計測用途に用いられる光源である。従来この波長帯のレーザー光源は気体レーザーである Ar^+ レーザーが用いられてきたが, 近年では機器の小型化の点で有利である波長変換型の半導体励起固体(Diode Pumped Solid State; DPSS)レーザーへの置き換えが進んでいる。一方LDの場合, 非常に小型の光源から直接488 nmのレーザー光が得られるため機器の構成が非常にシンプルとなる。また電流制御による光出力の直接変調が可能である, 消費電力が小さい, 光源の取り扱いが容易であるなど多くのメリットがあり, 既存光源の置き換えが期待される。そこで我々はIII族窒化物半導体をベースとして, 高出力かつ信頼性の高い波長488 nmのLDを作製した。

488 nmLDの基本構造はFig. 1で示した青色LDと同様のリッジストライプ構造である。エピ構造については発振波長の長波長化に合わせて, 主に活性層成長条件を最適化した。リッジ幅については Ar^+ レーザーやDPSS等と同様の高いビーム品質を要求されることから, 光ディスク用LDと同様の狭ストライプ構造(2 μ m)とした。

Fig. 8に488 nmLDの典型的な V - I , L - I 特性を示す。ケース温度25 °C, CW駆動時のしきい値電流は30 mAであり, 光出力60 mW時の電流及び電圧値はそれぞれ96 mA, 5.6 Vであった。また注入電流に対する光出力の非線形性(キンク)は80 mWまで発生しておらず, 横モードの安定性が高いことを示唆している。また光出力

Fig. 8 V - I , L - I characteristics of the 488 nm LD under CW operation at 25 °C.

Fig. 9 Lasing spectrum of the 488 nm LD with an output power of 60 mW under CW operation at 25 °C.

60mW時の発振スペクトル及びFFPをFig. 9及び10に示す。スペクトルより発振波長は488 nmであり、青色LDと同様に縦マルチモードで発振していることがわかる。FFPについては狭ストライプ構造であるため水平方向についても基本モードでの発振を示すガウス形状となっており、レンズ等によるビーム整形や集光も容易と考えられる。広がり角についてはピーク強度の半値全幅(Full Width at Half Maximum; FWHM)で定義した場合、水平方向が 10° 、垂直方向が 23.5° であった。寿命特性についてはケース温度を 60°C とし、LDの光出力が一定(60 mW)となるように駆動(Auto Power Control; APC)し、評価を行った(Fig. 11)。この場合電流値が初期の1.3倍となる時間を寿命と定義すると、2000時間通電後の劣化係数($\Delta I / \Delta t$)より平均寿命は10,000時間以上と見積もられた。従来光源の置き換えとして十分な信頼性であると考えられる。

4.3 小型プロジェクタ向け緑色LD

近年LEDやレーザーを光源とする小型プロジェクタが着目されており、LEDに関しては既に実用化段階であ

Fig. 10 FFPs of the 488 nm LD with an output power of 60 mW under CW operation at 25 °C.

Fig. 11 Results of the lifetime test of CW-operated 488 nm LDs under APC condition with an output power of 60 mW at 60°C .

る。レーザーを光源とした場合、既存光源に比べて単色性が高く色再現範囲が拡大する、発光点が小さいことから光学系の更なる小型化が可能である、更には高画質化の可能性があるなどから今後の実用化が期待されている。レーザーを光源としたデバイスの場合、フルカラー化のためには赤、青、緑の光源が必要となるが、このうち赤、青についてはそれぞれAlInGaP系、InGaP系のLDが実用化されている。一方緑についてはII-VI族化合物半導体を用いたLDに関する報告はある^{14,15)}が、現時点で実用化されているものは無く、2次高調波発生(Second Harmonic Generation; SHG)を用いた波長変換型のレーザーが用いられている。そこで筆者らは3原色すべてをLD化することを目的としてIII族窒化物半導体を用いて発振波長を長波長化し、510 nmを越す緑色領域でのLDを実現した。

緑色LDの構造については488 nm帯のレーザーと同様の狭ストライプ構造である。基板については現在様々な面方位を用いた長波長化のアプローチがなされている¹⁶⁻¹⁸⁾が、筆者らは他の波長帯と同様にc面GaIn基板を用いた。エピについては長波長化の際に問題となる活性層の結晶劣化⁷⁾を抑えるよう、成長条件や構造の最適化を行った。

Fig. 12 V - I , L - I characteristics of the green LD under CW operation at 25°C .

Fig. 13 Lasing spectrum of the green LD with an output power of 5 mW under CW operation at 25 °C.

Fig. 12に作製したLDの電流－電圧(V - I)、電流－光出力(L - I)特性を示す。しきい値電流は45 mA、光出力5 mW時の電流及び電圧値はそれぞれ78 mA、6.0 Vであった。また光出力5 mW時の発振スペクトル及びFFPをFig. 13及び14に示す。スペクトルより発振波長は518 nmであり、他の波長と同様に縦マルチモードで発振している。FFPについては基本的にはガウス形状となっているが、垂直方向に若干波形の乱れが確認される。これは長波長化に伴う光閉じ込めの低下によって垂直方向に光のものが発生していることが原因と考えられる。広がり角についてはFWHMにおいて、水平方向が10.4°、垂直方向が22.5°であった。寿命特性については488 nm帯と同様にAPC駆動で評価を行った(Fig. 15)。ケース温度についてはモバイル用途を考慮し、80 °Cとした。光出力5 mWの場合、1500時間通電後の劣化係数($\Delta I / \Delta t$)から寿命は5000時間以上と見積もられた。

5. まとめ

本稿ではc面GaIn基板に作製した青～緑色領域の窒化物LDに関して述べた。青色領域では光出力1 Wを越す高出力、高効率のLDが得られた。488 nm帯では既存光

Fig. 14 FFPs of the green LD with an output power of 5 mW under CW operation at 25 °C.

Fig. 15 Results of the lifetime test of CW-operated green LDs under APC condition with an output power of 5 mW at 80 °C.

源を置き換え可能な高出力、かつ信頼性の高いLDを作製した。また窒化物LDで518 nmの発振を確認した。今後の課題としては更なる長波長化、高効率化と考えられる。

参考文献

- 1) T. Matsuoka, H. Okamoto, M. Nakao, H. Harima, and E. Kurimoto: *Appl. Phys. Lett.* **81** (2002) 1246.
- 2) 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.
- 3) S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, and Y. Sugimoto: *Jpn. J. Appl. Phys.* **35** (1996) L74.
- 4) S. Masui, Y. Matsuyama, T. Yanamoto, T. Kozaki, S. Nagahama, and T. Mukai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **42** (2003) L1318.
- 5) S. Nagahama, Y. Sugimoto, T. Kozaki, and T. Mukai: *Proc. SPIE* **5738** (2005) 57.
- 6) T. Kozaki, H. Matsumura, Y. Sugimoto, S. Nagahama, and T. Mukai: *Proc. SPIE* **6133** (2006) 613306.
- 7) S. Nagahama, T. Yanamoto, M. Sano, and T. Mukai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** (2001) 3075.
- 8) T. Kozaki, T. Yanamoto, T. Miyoshi, Y. Fujimura, S. Nagahama, and T. Mukai: *SID 2005 Digest*, Boston, May, 2005, p.1605.
- 9) T. Miyoshi, S. Masui, T. Okada, T. Yanamoto, T. Kozaki, S. Nagahama, and T. Mukai: *Appl. Phys. Express* **2** (2009) 062201.
- 10) S. Chichibu, T. Azuhata, T. Sota, and S. Nakamura: *Appl. Phys. Lett.* **69** (1996) 4188.
- 11) T. Takeuchi, S. Sota, M. Katsuragawa, M. Komori, H. Takeuchi, H. Amano, and I. Akasaki: *Jpn. J. Appl. Phys.* **36** (1997) L382.
- 12) S. Nagahama, N. Iwasa, M. Senoh, T. Matsushita, Y. Sugimoto, H. Kiyoku, T. Kozaki, M. Sano, H. Matsumura, H. Umemoto, K. Chocho, and T. Mukai: *Jpn. J. Appl. Phys.* **39** (2000) L647.
- 13) K. Motoki, T. Okahisa, N. Matsumoto, M. Matsushima, H. Kimura, H. Kasai, K. Takemoto, K. Uematsu, T. Hirano, M. Nakayama, S. Nakahata, M. Ueno, D. Hara, Y. Kumagai, A. Koukitu, and H. Seki: *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** (2001) L140.
- 14) J. M. Gaines, R. R. Drenten, K. W. Haberern, T. Marshall, P. Mensz, and J. Petruzzello: *Appl. Phys. Lett.* **62** (1993) 2462.
- 15) M. A. Haase, P. F. Baude, M. S. Hagedorn, J. Qiu, J. M. DePuydt, H. Cheng, S. Guha, G.E. Höfler, and B. J. Wu: *Appl. Phys. Lett.* **63** (1993) 2315.
- 16) K. Okamoto, J. Kashiwagi, T. Tanaka, and M. Kubota: *Appl. Phys. Lett.* **94** (2009) 071105.
- 17) Y. Enya, Y. Yoshizumi, T. Kyono, K. Akita, M. Ueno, M. Adachi, T. Sumitomo, S. Tokuyama, T. Ikegami, K. Katayama, and T. Nakamura: *Appl. Phys. Express* **2** (2009) 082101.
- 18) Y. Yoshizumi, M. Adachi, Y. Enya, T. Kyono, S. Tokuyama, T. Sumitomo, K. Akita, T. Ikegami, M. Ueno, K. Katayama, and T. Nakamura: *Appl. Phys. Express* **2** (2009) 092101.