緑色レーザーの現状と将来 —高出力・長波長化の現状と将来展望—

中村 孝夫

住友電気工業(株) 半導体技術研究所 (〒664-0016 兵庫県伊丹市昆陽北1-1-1)

Current Status and Future Challenges of Green Semiconductor Laser Diodes - Future Prospects on Its Output Power and Lasing Wavelength -

Takao NAKAMURA

Semiconductor Technologies R & D Laboratories, Sumitomo Electric Industries, Ltd., 1-1-1 Koyakita, Itami, Hyogo 664-0016

(Received November 16, 2012)

Continuous-wave operation of InGaN green laser diodes (LDs) on semi-polar {20 $\bar{2}$ 1} GaN substrates with output powers of over 100 mW in the spectral region beyond 530 nm is demonstrated. Wall plug efficiencies (WPEs) as high as 7.0–8.9% are realized in the wavelength range of 525–532 nm, which exceed those reported for *c*-plane LDs. The difference in the WPEs between these two crystal orientations was found to become larger with increasing wavelength. These results suggest that the InGaN green LDs on the {20 $\bar{2}$ 1} plane are better suited as light sources for applications requiring wavelengths over 525 nm. We also discuss the current status and the future prospects on the output power and the lasing wavelength of green semiconductor LDs compared with *c*-plane LDs.

Key Words: Green laser diode, GaN, Semi-polar {20 $\bar{2}$ 1} plane, C-plane, Wall plug efficiency

1. はじめに

近年、レーザーディスプレイへの応用が期待される緑色半導体レーザーの開発競争が活発化している。レーザーディスプレイは、高い色再現性、フォーカスフリー、低消費電力、といった特長を併せ持つが、これまで光源に必要な3原色のうち、赤色と青色の半導体レーザーは実用化されていたものの、緑色の半導体レーザーの開発は難航していた。そのため、赤外光を第2高調波素子(SHG)で緑色に変換するSHGレーザーが使われてきたが、サイズ、コスト、効率、安定性といった面で課題が有り、これらを克服できる緑色の半導体レーザーが待ち望まれてきた。

緑色レーザーの半導体材料として、これまで窒化ガリウム(GaN)系が有望視されてきたが、長波化を進めるうえで課題は大きく分けて2つある。課題1は、ピエゾ電界による発光効率の低下である。Blu-ray用として最初の実用化された青紫色GaN系レーザーは結晶面に(0001)面(*c*面)を用いるが、*c*面上では結晶の非対称性に起因する自発分極や発光層のInGaNとGaNの格子不整に起因する歪みの影響で、*c*軸方向に大きなピエゾ電界が発生する。このピエゾ電界が量子井戸での電子と正孔の波動関数を空間的に分離させ、発光効率を低下させてしまう。

課題2は、GaNとInNの非混和性に起因したInGaN発光層中のIn組成ゆらぎである。このような組成ゆらぎは青色LEDではキャリア局在による発光効率の向上に有効であるが、緑色レーザーでは高In組成化に伴う非発光性欠陥の生成につながり問題となる。さらに、このような組成不均一性の増大は、発光スペクトル幅の増加につながり、微分利得を低下させ、動作電流の増加を招く^{1,2)}。

このような課題はあるものの、2009年以降、青緑から緑色域での発振に関する報告が相次いできた³⁻¹⁴⁾。これまで500 nm以上の発振が厳しいとされてきた*c*面上では、量子井戸層の結晶性を高めることで、515 nmでの室温連続発振が実現し^{7,8)}、さらに531 nmまでの長波長化が報告されている⁹⁾。また、ピエゾ電界の緩和が期待される無極性面や半極性面を用いる試みも進められている。無極性面では*m*面で499 nm¹⁰⁾、半極性面では(11 $\bar{2}$ 2)面上で426 nmまでの発振が報告されているが¹¹⁾、いずれもInGaN量子井戸層の結晶性に課題が残っていた。このような状況を打破すべく、我々はピエゾ電界が多少残っていても、高品質で均質なInGaN量子井戸層を実現できる半極性面を得るべく検討を進め、新たな半極性面である{20 $\bar{2}$ 1}面が緑色半導体レーザーに優位であることを見出した。この面に作製したレーザーで2009年7月に世界初の純緑色531 nmでのパルス発振¹²⁾を皮切りに、8月には

520 nmでのCW発振¹³⁾, さらに最近, 525–532 nmの波長域で100 mW以上の高出力動作と高効率化に成功し, 実用化に大きく前進した(ソニーと共同)¹⁴⁾. 本稿では, 半極性 {20 $\bar{2}$ 1} 面を用いた緑色半導体レーザー開発の最近の進展, c面上レーザーとの比較から将来展望について述べる.

2. 半極性 {20 $\bar{2}$ 1} 面と緑色レーザーの作製方法

我々が半極性面のなかで着目した {20 $\bar{2}$ 1} 面について述べる. この面はFig. 1 (b)に示すように, c面からm軸方向に75度傾斜させた低指数面で, 最表面にはGaとNが混在する. 他機関から報告されている無極性m面や半極性 (11 $\bar{2}$ 2) 面はピエゾ電界が“0”になるが, {20 $\bar{2}$ 1} 面のピエゾ電界はFig. 1 (c)に示すようにc面に比べ非常に小さく, 向きが逆方向という特徴がある.

{20 $\bar{2}$ 1} 基板はハイドライド気相成長(HVPE)法によって作製した. 伝導性はn型で, 転位密度は $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 以下である¹⁵⁾. この基板上に有機金属気相成長(MOVPE)法によりレーザー構造のエピタキシャル層を成長した. まず, n-GaNバッファ層を成長した後, n-InAlGaNクラッド層, n-InGaNガイド層, InGaN量子井戸発光層, p-AlGaIn電子ブロック層, p-InGaIn光ガイド層, p-InAlGaInクラッド層, p-GaNコンタクト層を順に成長した. エピ構造で特に高品質化のポイントはGaN基板に格子整合する4元InAlGaInクラッド層の採用である. 次に, 一般的なフォトリソグラフィ法とドライエッチングなどにより, ストライプ幅2 μm , 共振器長500 μm の屈折率導波型(リッジ)レーザーを作製した. 共振器端面はへき開により形成し¹⁶⁾, 出射側の反射率が約50%になるよう誘電体多層膜を成膜した.

3. デバイス特性

Fig. 2は {20 $\bar{2}$ 1} 面GaN基板上に作製した緑色レーザーと, 他機関より報告されているc面GaN基板上的緑色レーザーの光出力の発振波長依存性を比較している. {20 $\bar{2}$ 1} 面上の緑色レーザーは, 530 nmを超える長波長域において, 室温CW動作で100 mWを越える高い出力が得られている. 具体的には, 522.0 nmで168 mW, 525 nmで167 mW, 531.3 nmで105 mW, 532.1 nmで107 mW, 535.7 nmで75 mWである. 我々は, これまでc面に対する {20 $\bar{2}$ 1} 面上レーザーの特長として長波長化に有利な点のみならず, 520 nmより長波の純緑色域で, 低い値電流であることを報告してきたが, 実用的な出力を得るためにはスロープ効率を改善する必要がある. 今回, キャビティー長と端面の反射率を最適化することでしきい値電流の増加を抑えつつ, スロープ効率をほぼ4倍向上させることに成功し, このような高い出力を得るに至った.

次に, {20 $\bar{2}$ 1} 面上緑色レーザーの光電変換効率(Wall plug efficiency: WPE)について説明する. 発振波長に対するWPE依存性をFig. 3に示す. Fig. 2と同様に他機関か

Fig. 1 Schematic crystal structures of GaN of a c-plane (a) and a semi-polar {20 $\bar{2}$ 1} plane. The internal field changes with crystal orientation (c) and has a maximum at 0 degree (c-plane).

Fig. 2 Dependence of output power upon lasing wavelength of InGaIn green LDs on different plane GaN substrates. Solid lines are guides to the eye.

Fig. 3 Dependence of wall plug efficiency upon lasing wavelength of InGaIn green LDs on different plane GaN substrates. Solid lines are guides to the eye.

ら報告されているc面上レーザーのデータと比較している。{2021}面上緑色レーザーでは、全領域にわたり高いWPEを示しているが、とくに525 nmより長波領域でc面上レーザーに比べ、高いWPEを維持できていることがわかる。とくに525 nmでWPEは8.9%に達している。c面上レーザーでは520 nmで6%が報告されているが、{2021}面上レーザーにおいてWPEが6%は、より長波長の535 nmにも達している。これは、{2021}面上の緑色レーザーでは長波化に伴うInGaN量子井戸層の結晶品質の低下が抑えられていることに加え、piezo電界が弱いためと考えられる。{2021}面上の量子井戸層は、ELの半値幅が小さいことや様なPL像などから、その高い均一性が明らかにしてきた¹²⁾。さらに、時間分解フォトルミネセンス法による評価からも発光層として非常に均質なInGaN層が作製できていることを定量化してきた¹⁷⁾。今回デバイスの特性は、これまでの基礎的な評価結果を実際に実証したことになる。なお一連の改善により長波長化も進展した。Fig. 4に示すように、Ga系レーザーとして最も長い発振波長となる536.6 nmでの室温CW発振を実現している。

次に、{2021}面上緑色レーザーの素子特性について述べる。Fig. 5, 6にそれぞれ、代表的な電流-光出力(I - L)特性と電流-電圧(I - V)特性を示す。しきい値電流、しきい値電流密度、しきい値電圧はそれぞれ、59 mA, 5.9 kA/cm², 4.7 Vである。ケース温度25 °C, 出力70 mWでCW駆動したときの発振波長は528.1 nmである。しきい値電圧は接触抵抗の改善に加え、p型層のドーピングプロファイルを最適化することで、これまでの6.4 Vから4.7 Vまで低減している。前述の高WPEはスロップ効率改善による効果と合わせて、このような低電圧化も寄与している。この素子の温度特性については、ケース温度80 °Cで I - L 特性の線形性に若干のずれが見られるものの、同温度で90 mW以上の出力が得られている。

レーザーの実用化を判断するためには、駆動電圧は材料により決まるためしきい値電流 I_{th} 、特性温度 T_0 が重要な指針となる。これまで我々は、京都大学のグループから理論的に予測されて半極性面を用いるとしきい値電流が低減できることを実験的に実証してきた^{18,19)}。Fig. 5に示すデータから算出される T_0 は165 Kである。c面上レ

Fig. 4 Lasing spectrum of the LD on {2021} plane under CW operation at RT. The lasing wavelength is 536.6 nm.

ザーの T_0 は、140 K程度と報告されていることから、この値は放熱が難しいモバイル機器への搭載に適していることを示唆している。このように、{2021}面上レーザーは実用上重要なしきい値電流、特性温度ともc面に比べ高いポテンシャルをもつといえる。さらにこのような高い特性温度で、視感度の高い長波長領域で低しきい値電流を実現できれば実質的な輝度が向上できシステムとしての高効率化を実現できるキーデバイスとなる。

レーザーディスプレイ応用ではスペckル抑制が重要である。Fig. 7に出力50 mWでの発振スペクトルの温度依存性を示す²⁰⁾。25 °Cから55 °Cの範囲で、発振波長はほぼ温度に対して比例し、0.07 nm/Kで変化している。この温度依存性はc面上レーザーとほぼ同じ値である。またそれぞれの温度でのスペクトル幅は2-3 nmであり、従来のSHGレーザーで問題となるスペckルノイズの抑制に有効である。Fig. 8に光出力50 mWで、ケース温度が25 °C, 40 °C, 55 °Cのときのファーフイルドパターン(FFP)を示す。出射光は単峰性で、 $\theta_{\perp}$ は23.2°, $\theta_{\parallel}$ は16.6°である。水平方向と垂直方向のアスペクト比は1.4であり、実用上問題のないビーム形状が得られている。

Fig. 5 Temperature dependence of the L - I curves of the semi-polar {2021} green LD lasing at 528.1 nm under CW operation.

Fig. 6 Temperature dependence of the V - I curves of the semi-polar {2021} green LD lasing at 528.1 nm under CW operation.

Fig. 7 Temperature dependence of lasing spectra of green LD under CW operation at 50 mW in the T_c range of 25 to 55 °C.

4. 信頼性評価

最後に{2021}面上緑色レーザーの信頼性について述べる²⁰⁾。とくに実用上重要な比較的高い温度での信頼性に着目した。温度発振波長が527.5 nm–530.8 nmの5素子をケース温度55 °C、光出力50 mWでAPC(Automatic Power Control)モードで駆動させた。このときの動作電流と動

Fig. 8 Lateral FFPs (a) and vertical FFPs (b) for green LD with a wavelength of 528 nm and an output power of 50 mW under CW operation in the T_c range from 25 to 55 °C.

Fig. 9 Change in operating current (a) and voltage (b) with time for five green LDs with a wavelength of 527.5–530.8 nm and an output power of 50 mW under CW operation with APC at a T_c of 55 °C.

Fig. 10 Change in operating current (a) and voltage (b) with time for two green LDs with a wavelength of 528.2–529.1 nm and an output power of 70 mW under CW operation with APC at a T_c of 55 °C.

作電圧の時間変動をFig. 9に示す。これらの素子のしきい値電流、しきい値電圧、スロープ効率の典型値はそれぞれ、73 mA, 4.5 V, 0.5 W/Aである。動作電流、動作電圧とも、1000時間を経過した時点でほとんど増加は見られず、安定している。動作電流と動作電圧の平均増加率はそれぞれ、2.44%と2.99%であり、動作電流が1.3倍となる時間を寿命と定義した場合、同条件における素子寿命は5000時間を超えると推察される。同様に発振波長が528.2 nmと529.1 nmの2素子をケース温度55 °C, 光出力70 mWでAPC駆動させた。このときの動作電流と動作電圧の時間変動をFig. 10に示す。動作電流と動作電圧の平均増加率はそれぞれ、4.49%と3.51%と見積もられ、推定寿命は2000時間を超えている。今回の結果から、2000時間を上回る素子寿命を得るためには投入電力を1 W以下に抑える必要があることがわかった。今後、さらなる動作電流と動作電圧の低減により、長寿命化が見込める。

5. 緑色レーザーの将来展望

2012年に入りc面上レーザーの進展は目覚ましいものがある。このような進展の背景には、我々が報告した{2021}面上緑色レーザーとの技術競争の側面があり、今後もこの競争は続くことで、緑色半導体レーザーの高出力化・高効率化は大きく改善すると考えられる。実際にレーザー学会専門委員会のロードマップでは緑色レーザーのWPEは2015年で10%になると予想されているが、2012年の段階で9%近くと、10%レベルをほぼ達成しており、今後予想を上回る更なる向上が期待される。最終的に広く実用化するためには、コストに直結するウエハ面内で均一なエピ成長技術、デバイスとしてシステムの優位性に寄与できることが必須である。{2021}面上緑色レーザーは、本質的にc面に比べ、低いピエゾ電界に加え、発光層の均一性からエピ均一性に優れる、さらにシステムからの要求である省電力化に関しては、Fig. 11に

Fig. 11 Dependence of the effective luminance of c-plane based LDs and {2021} based LDs on the lasing wavelength.

視感度を考慮した実効輝度の波長依存性を示すが、長波長化に有利な{2021}面上緑色レーザーは、実効輝度が高く、低消費電力が求められるシステムでのメリットも多い。

6. まとめ

我々は{2021}面GaN基板上の緑色レーザーで、530 nmを超える長波長域において、100 mWを超える高出力動作に成功し、光電変換効率として8%を上回る高い値を得た。近年のc面GaN基板上の進展は目覚ましいものがあるが、520 nmを超える純緑色域では、光出力、効率の何れにおいても、{2021}面の優位性が実証できたと考えている。さらに、モバイル機器への搭載で重要なポイントとなる高温特性についても、ケース温度80 °Cで90 mWの高出力動作を確認している。また、長期信頼性については、ケース温度55 °C, 光出力50 mWのAPC駆動で推定5000時間、ケース温度55 °C, 光出力70 mWで推定2000時間を超える寿命が期待される。今後さらなる高出力化と高効率化を進め、早期の実用化を目指す。

参考文献

- 1) 岸野 克己：応用物理 **78** (2009) 1029.
- 2) 川上 養一：OPTRONICS **9** (2009) 122.
- 3) S. Lutgen, D. Dini, I. Pietzonka, S. Tautz, A. Breidenassel, A. Lell, A. Avramescu, C. Eichler, T. Lerner, J. Müller, *et al.*: *Proc. SPIE* **7953** (2011) 79530G.
- 4) A. Avramescu, T. Lerner, J. Müller, S. Tautz, D. Queren, S. Lutgen, and U. Strauß: *Appl. Phys. Lett.* **95** (2009) 071103.
- 5) J. W. Raring, M. C. Schmidt, C. Poblentz, Y. Chang, M. J. Mondry, B. Li, J. Iveland, B. Walters, M. R. Krames, R. Craig, *et al.*: *Appl. Phys. Express* **3** (2010) 112101.
- 6) J. W. Raring: presented at ICNS9, 9th Int. Conf. Nitride Semiconductors, 2011.
- 7) T. Miyoshi, S. Masui, T. Okada, T. Yanamoto, T. Kozaki, S. Nagahama, and T. Mukai: *Appl. Phys. Express* **2** (2009) 062201.
- 8) T. Miyoshi, S. Masui, T. Okada, T. Yanamoto, T. Kozaki, S. Nagahama, and T. Mukai: *Phys. Status Solidi A* **207** (2010) 1389.
- 9) A. Avramescu, T. Lerner, J. Müller, C. Eichler, G. Bruederl, M. Sabathil, S. Lutgen, and U. Strauß: *Appl. Phys. Express* **3** (2010) 061003.
- 10) K. Okamoto, J. Kashiwagi, T. Tanaka, and M. Kubota: *Appl. Phys. Lett.* **94** (2009) 071105.
- 11) H. Asamizu, M. Saito, K. Fujito, J. S. Speck, S. P. DenBaars, and S. Nakamura: *Appl. Phys. Express* **1** (2008) 091102.
- 12) Y. Enya, Y. Yoshizumi, T. Kyono, K. Akita, M. Ueno, M. Adachi, T. Sumitomo, S. Tokuyama, T. Ikegami, K. Katayama, *et al.*: *Appl. Phys. Express* **2** (2009) 082101.
- 13) Y. Yoshizumi, M. Adachi, Y. Enya, T. Kyono, S. Tokuyama, T. Sumitomo, K. Akita, T. Ikegami, M. Ueno, K. Katayama, *et al.*: *Appl. Phys. Express* **2** (2009) 092101.
- 14) S. Takagi, Y. Enya, M. Adachi, T. Kyono, Y. Yoshizumi, T. Sumitomo, Y. Yamanaka, T. Kumano, S. Tokuyama, K. Sumiyoshi, *et al.*: *Appl. Phys. Express* **5** (2012) 082102.
- 15) 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** (2001) L140.
- 16) T. Kyono, Y. Yoshizumi, Y. Enya, M. Adachi, S. Tokuyama, M. Ueno, K. Katayama, and T. Nakamura: *Appl. Phys. Express* **3** (2010) 011003.
- 17) M. Funato, A. Kaneta, Y. Kawakami, Y. Enya, K. Nishizuka, M. Ueno, and T. Nakamura: *Appl. Phys. Express* **3** (2010) 021002.
- 18) K. Kojima: Dr. Thesis, Department of Electronic Science and Engineering, Kyoto University, Kyoto, 2008.
- 19) M. Adachi, Y. Yoshizumi, Y. Enya, T. Kyono, T. Sumitomo, S.

Tokuyama, S. Takagi, K. Sumiyoshi, N. Saga, T. Ikegami, *et al.*:
Appl. Phys. Express **3** (2010) 121001.
20) K. Yanashima, H. Nakajima, K. Tasai, K. Naganuma, N. Fuutagawa,

Y. Takiguchi, T. Hamaguchi, M. Ikeda, Y. Enya, S. Takagi, *et al.*:
Appl. Phys. Express **5** (2012) 082103.

レーザーワード

GaN半極性面 (GaN semi-polar plane)

窒化物半導体は、深紫外から赤外までの波長に対応できる光材料として盛んに研究されている。既に実用化されている青紫色・青色のレーザー、青・緑・白色LEDはすべてGaNの(0001)結晶面(*c*面)上に素子が作製されている。しかし、高品質の緑色発光素子実現には、*c*面上に作製した歪み量子井戸の活性層ではピエゾ効果のために数MV/cmオーダーの非常に大きな電界が生じ、電子

と正孔が引き離され、発光再結合の遷移確率が落ちてしまう。これに対して、*c*面とは異なる別の面方位の基板を用いることで活性層内部に生じる電界を大きく低減でき、発光効率を飛躍的に増大できる可能性がある。*c*面から90°傾斜した面(*a*面, *m*面)を無極性面、その他の角度で傾斜した面を半極性面と言われている。

(中村 孝夫)