



高出力・高効率純緑色レーザー

高木 慎平*・上野 昌紀・片山 浩二
池上 隆俊・中村 孝夫・築嶋 克典

High-Power and High-Efficiency True Green Laser Diodes — by Shimpei Takagi, Masaki Ueno, Koji Katayama, Takatoshi Ikegami, Takao Nakamura and Katsunori Yanashima — The authors demonstrated InGaN green laser diodes (LDs) that were grown on semipolar $\{2\bar{0}21\}$ GaN substrate and achieved output power of over 100 mW in the spectral region beyond 530 nm. In the range of 525-532 nm, these LDs realized wall plug efficiencies as high as 7.0-8.9%, which exceed those reported for c-plane LDs. Moreover, the InGaN green LDs are expected to have a long lifetime of over 5,000 hours under auto power control of 50 mW at a case temperature of 55 °C. These results suggest that the InGaN green LDs grown on the $\{2\bar{0}21\}$ plane are ideal as light sources for applications that require wavelengths of over 525 nm.

Keywords: semipolar, GaN, green, semiconductor, laser

1. 緒言

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は存在しなかった。そのため、赤外光を第2高調波素子 (SHG^{*1}) 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あり、これらを克服可能な緑色の半導体レーザーが待ち望まれていた。

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、長波長化を進めるうえでの課題は大きく分けて2つある。1つめは、ピエゾ電界による発光効率の低下である。ブルーレイ用として最初に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の他、発光層の InGaN と GaN の格子不整合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内で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。2つめの課題は、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^{*2} 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⁽¹⁾。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^{(2),(3)}。

このような課題はあるものの、2009年以降、青緑から

緑色にいたる領域での発振に関する報告が相次いでいる。これまで500nm以上の発振は難しいとされてきたc面上では、量子井戸層の結晶性を高めることで、515nmでの室温連続 (CW^{*3}) 発振が実現し^{(4),(5)}、さらに531nmまでの長波長化が報告されている⁽⁶⁾。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面上で499nm⁽⁷⁾、半極性面では (11 $\bar{2}2$) 面上で426nm⁽⁸⁾までの発振が報告されているが、いずれも InGaN 量子井戸層の結晶性に課題がある。このような状況を鑑み、当社はピエゾ電界が多少残っていても量子井戸層の結晶性を維持できる半極性面上レーザーの検討を進め、新たに $\{2\bar{0}21\}$ 面が優位であることを見出した。この面方位の基板上に作製したレーザーにより、2009年の世界初の純緑色531nmでのパルス発振⁽⁹⁾を皮切りに、520nmでのCW発振⁽¹⁰⁾、さらに525nmで $J_m = 4.3\text{kA/cm}^2$ の低閾値CW発振⁽¹¹⁾を達成した。

今回、ソニー(株)との共同開発により、新たに525-532nmの波長域で100mW以上の高出力動作に成功するとともに、ケース温度55°Cでの長期信頼性も確認し、実用化に大きく前進した。本稿では、半極性 $\{2\bar{0}21\}$ 面を用いた緑色半導体レーザー開発の最近の進展について述べる。

2. 半極性 $\{2\bar{0}21\}$ 面と緑色レーザーの作製方法

まず初めに、我々が着目した半極性 $\{2\bar{0}21\}$ 面について述べる。この面は図1に示すように、c面をm軸方向に75.1度傾斜させた代表的な低指数面で、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c面の1/3程度で、向きが逆方向という特徴がある。

このような{20 $\bar{2}1$ }面の2インチ自立GaN基板をハイドライド気相成長 (HVPE^{*4}) 法により作製した。伝導性はn型で、転位密度は $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 以下である⁽¹²⁾。この基板の上に有機金属気相成長 (OMVPE^{*5}) 法によりレーザ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-AlGaN電子ブロック層、p-InGaN光ガイド層、p-InAlGaNクラッド層、p-GaNコンタクト層を順に成長した。エピ構造における高品質化のポイントはGaN基板に格子整合する4元InAlGaNクラッド層の採用である。次いで、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 $2 \mu\text{m}$ 、共振器長 $500 \mu\text{m}$ の屈折率導波型 (リッジ) レーザを作製した。共振器端面は劈開により形成し、出射側の反射率が50%程度になるよう誘電体多層膜を成膜している。

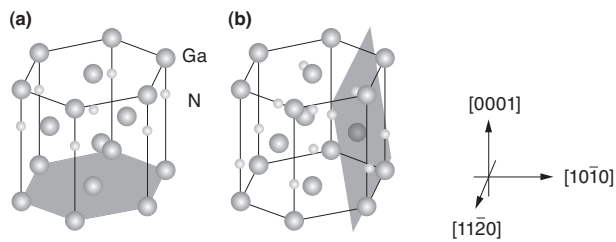


図1 GaN結晶の結晶面：(a) c面、(b) {20 $\bar{2}1$ }面

3. 半極性{20 $\bar{2}1$ }面上緑色レーザの特性

図2(a)に{20 $\bar{2}1$ }面GaN基板上に作製した緑色レーザと、他機関より報告されているc面及び半極性面GaN基板上緑色レーザの光出力特性^{(13)~(15)}を比較している。{20 $\bar{2}1$ }面上の緑色レーザは、530nmを超える長波長域において、室温CW動作で100mWを超える高い出力が得られている。具体的には、522.0nmで168mW、525.1nmで167mW、531.3nmで105mW、532.1nmで107mW、535.7nmで75mWである。我々は、これまでc面に対する{20 $\bar{2}1$ }面上レーザの特長として長波長化に有利な点のみならず、520nmより長波の純緑色域で、低閾値電流であることを報告している。一方、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⁽¹¹⁾。今回、キャビティ長と端面の反射率を最適化することで閾値電流の増加を抑えつつ、スロープ効率をほぼ4倍に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 $\bar{2}1$ }面上緑色レーザの光電変換効率 (WPE^{*6})

について述べる。図2(b)に示すように、520nmより長波の純緑色域ではc面上と比べ、WPEに顕著な差が見られる。特に長波長化に伴い、c面上との差が開いていることがわかる。これは、{20 $\bar{2}1$ }面上の緑色レーザでは長波長化に伴う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、ピエゾ電界が弱いためと考えられる。{20 $\bar{2}1$ }面上の量子井戸層は、エレクトロルミネセンス (EL) の半値幅が小さいことや一様なフォトルミネセンス (PL) 像などが

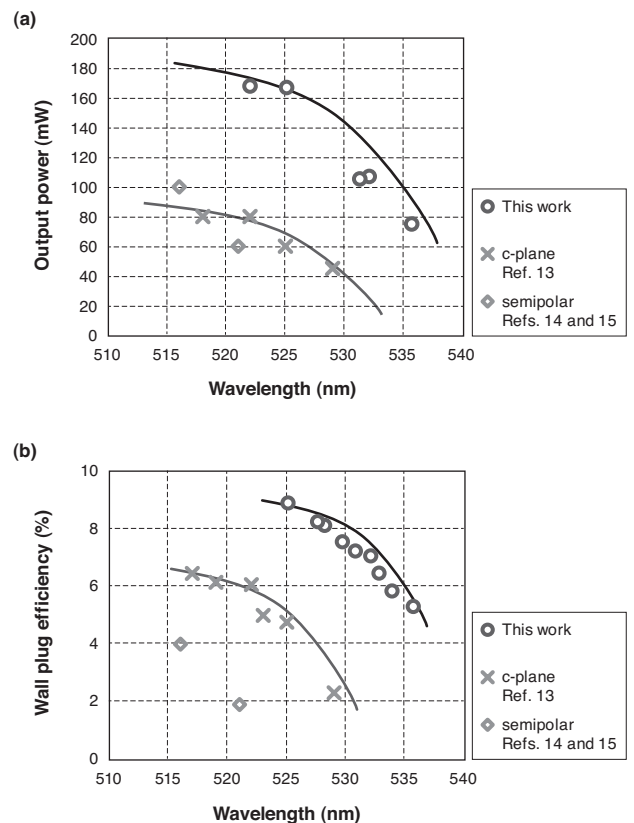


図2 {20 $\bar{2}1$ }面GaN基板上とc面GaN基板上緑色レーザの (a) 光出力と、(b) 光電変換効率の発振波長との関係

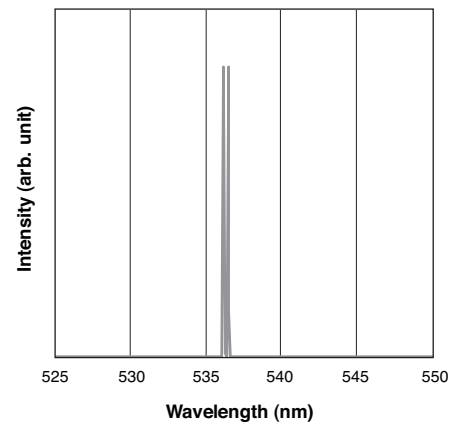


図3 {20 $\bar{2}1$ }面GaN基板上緑色レーザの室温CW駆動時の発振スペクトル

ら、その高い均一性が明らかになっている⁽¹⁶⁾。このような傾向は、時間分解フォトルミネセンス法による評価からも示唆されており⁽¹⁷⁾、{20 $\bar{2}$ 1}面上では長波長化しても、量子井戸層の結晶品質が維持される傾向にあることがわかってきた。このようなWPEの改善により、**図3**に示すように、GaN系レーザとして最も長い発振波長となる536.6nmでの室温CW発振を実現している。

次に、{20 $\bar{2}$ 1}面上緑色レーザの素子特性について述べる。**図4 (a)**と**4 (b)**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。閾値電流、閾値電流密度、閾値電圧はそれぞれ、59mA、5.9kA/cm²、4.7Vである。ケース温度25°C、出力70mWでCW駆動したときの発振波長は528.1nmである。閾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6.4Vから4.7Vまで低減している。前述の高WPE化には、スロー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飽和傾向が見られるものの、同温度で90mW以上の出力が得られており、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。また、**図5**に光出力

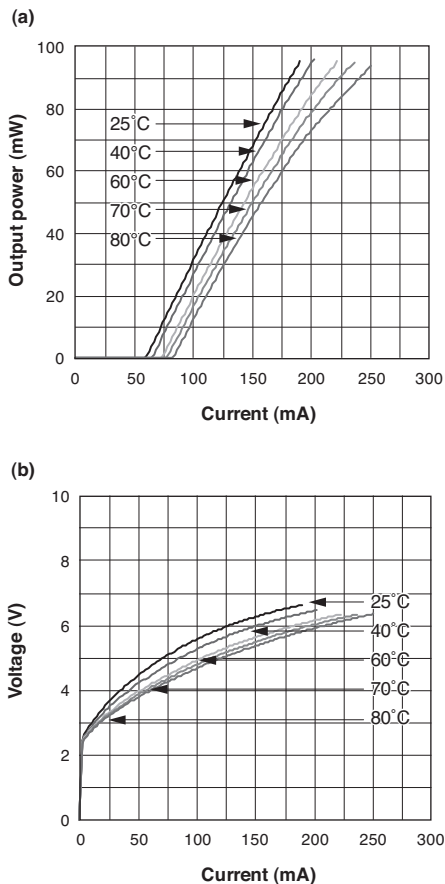


図4 {20 $\bar{2}$ 1}面 GaN 基板上緑色レーザの (a) I-L 特性と、(b) I-V 特性の温度依存性 (CW)

50mWで、ケース温度を25°C、40°C、55°Cとしたときのファーフィールドパターン (FFP) を示す。出射光は単峰性で、 θ_{\perp} は23.2°、 θ_{\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。

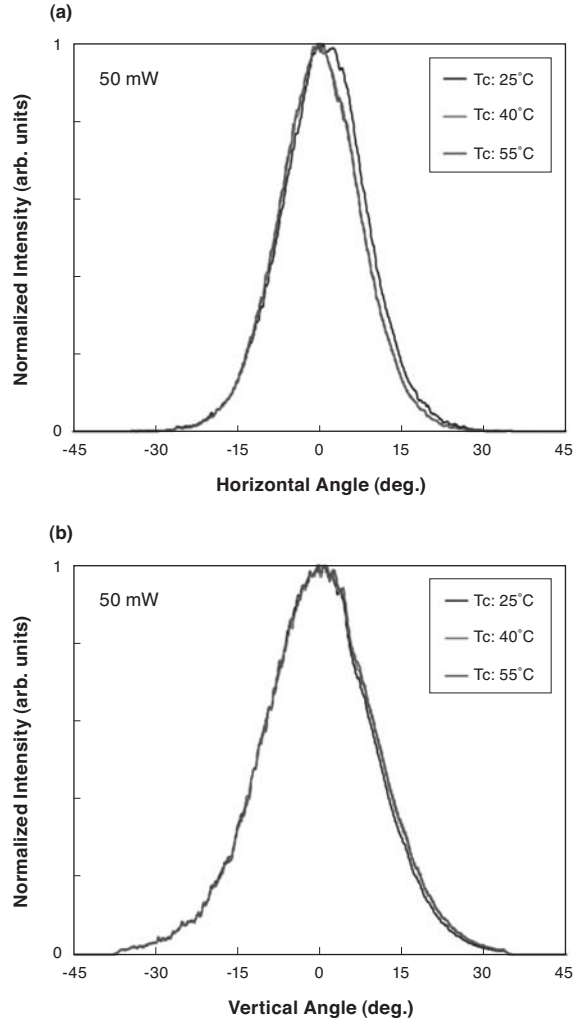


図5 {20 $\bar{2}$ 1}面 GaN 基板上緑色レーザの出力50mWにおける (a) 水平方向と、(b) 垂直方向のビーム拡がり角

4. {20 $\bar{2}$ 1}面上緑色レーザの信頼性

最後に{20 $\bar{2}$ 1}面上緑色レーザの信頼性について述べる。発振波長が527.5nm-530.8nmの5素子をケース温度55°C、光出力50mW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作電圧の時間変動を**図6**に示す。これらの素子の閾値電流、閾値電圧、スロープ効率の典型値はそれぞれ、73mA、4.5V、0.5W/Aである。**図6**の動作電流、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

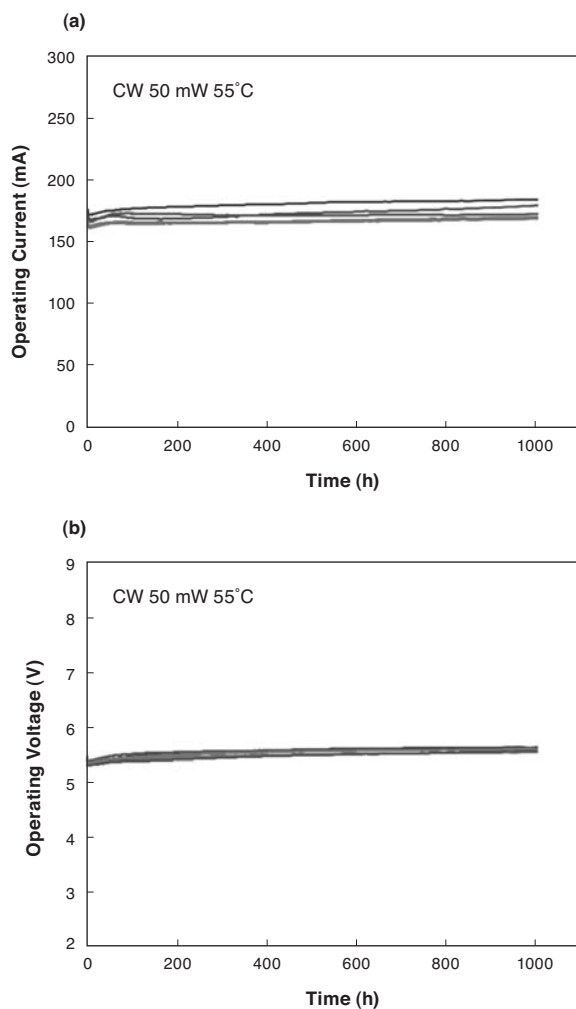


図6 出力50mW、ケース温度55°CでAPC駆動させた{20 $\bar{2}$ 1}面Ga \bar{N} 基板上緑色レーザの
(a) 動作電流の時間依存性、(b) 動作電圧の時間依存性

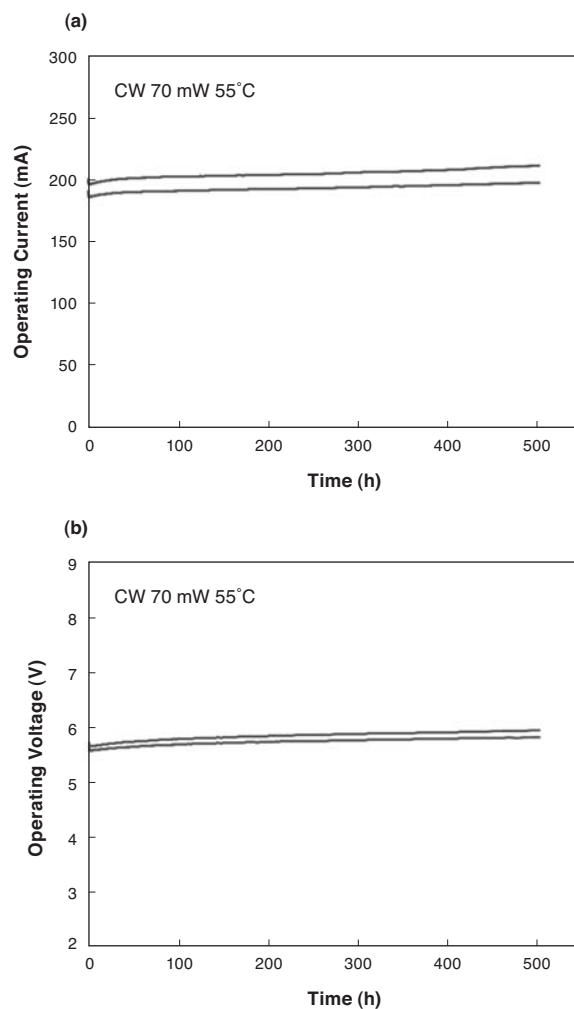


図7 出力70mW、ケース温度55°CでAPC駆動させた{20 $\bar{2}$ 1}面Ga \bar{N} 基板上緑色レーザの
(a) 動作電流の時間依存性、(b) 動作電圧の時間依存性

る。動作電流と動作電圧の平均増加率はそれぞれ、2.44%と2.96%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時間を超えると推定される。同様に発振波長が528.2nmと529.1nmの2素子をケース温度55°C、光出力70mW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図7に示す。動作電流と動作電圧の平均増加率はそれぞれ、4.51%と3.59%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1W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、長寿命化が見込まれる。

5. 結 言

我々は{20 $\bar{2}$ 1}面Ga \bar{N} 基板上の緑色レーザで、530nmを超える長波長域において、100mW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Ga \bar{N} 基板上の進展は目覚ましいものがあるが、520nmを超える純緑色域では、光出力、効率のいずれにおいても、{20 $\bar{2}$ 1}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90mW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50mWのAPC駆動で推定5000時間、ケース温度55°C、光出力70mWで推定2000時間を超える寿命が期待される。

用語集

※1 SHG

Second Harmonic Generation : 入射した光の半分の波長の光が発生する現象。

※2 LED

Light Emitting Diode : 電流を注入し電子の持つエネルギーを光に変換する半導体素子。

※3 CW

Continuous Wave : 時間的に持続している光波。

※4 HVPE

Hydride Vapor Phase Epitaxy : V族原料に水素化合物ガスをを用いる気相成長方法。

※5 OMVPE

Organometallic Vapor Phase Epitaxy : 構成元素の原料に有機金属化合物蒸気を用いる気相成長方法。

※6 WPE

Wall Plug Efficiency : 入力電力に対する光出力の割合。

参考文献

- (1) 岸野克巳, 「ディスプレイ技術と可視光レーザー」、応用物理、vol. 78、no. 11、p. 1029-1034 (2009)
- (2) T. Hino, T. Asano, T. Tojyo, S. Kijima, S. Tomiya, T. Miyajima, S. Uchida, and M. Ikeda, "Estimation of Device Properties in AlGaInN-Based Laser Diodes by Time-Resolved Photoluminescence", Phys. Stat. Sol. (a), vol. 188, p. 101-104 (2001)
- (3) K. Kojima, M. Funato, Y. Kawakami, H. Braun, U. Schwarz, S. Nagahama, and T. Mukai, "Inhomogeneously broadened optical gain spectra of InGaN quantum well laser diodes", Phys. Stat. Sol. (c), vol. 5, p. 2126-2128 (2008)
- (4) A. Avramescu, T. Lermer, J. Müller, S. Tautz, D. Queren, S. Lutgen, and U. Strau β , "InGaN laser diodes with 50 mW output power emitting at 515 nm", Appl. Phys. Lett., vol. 95, p. 071103 1-3 (2009)
- (5) T. Miyoshi, S. Masui, T. Okada, T. Yanamoto, T. Kozaki, S. Nagahama, and T. Mukai, "510-515 nm InGaN-Based Green Laser Diodes on c-Plane GaN Substrate", Appl. Phys. Express, vol. 2, p. 062201 1-3 (2009)
- (6) A. Avramescu, T. Lermer, J. Müller, C. Eichler, G. Bruederl, M. Sabathil, S. Lutgen, and U. Strau β , "True Green Laser Diodes at 524 nm with 50 mW Continuous Wave Output Power on c-Plane GaN", Appl. Phys. Express, vol. 3, p. 061003 1-3 (2010)
- (7) K. Okamoto, J. Kashiwagi, T. Tanaka, and M. Kubota, "Nonpolar m-plane InGaN multiple quantum well laser diodes with a lasing wavelength of 499.8 nm", Appl. Phys. Lett., vol. 94, p. 071105 1-3 (2009)
- (8) H. Asamizu, M. Saito, K. Fujito, J. S. Speck, S. P. DenBaars, and S. Nakamura, "Demonstration of 426 nm InGaN/GaN Laser Diodes Fabricated on Free-Standing Semipolar (11 $\bar{2}$) Gallium Nitride Substrates", Appl. Phys. Express, vol. 1, p. 091102 1-3 (2008)

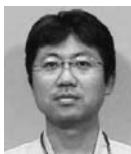
- (9) Y. Enya, Y. Yoshizumi, T. Kyono, K. Akita, M. Ueno, M. Adachi, T. Sumitomo, S. Tokuyama, T. Ikegami, K. Katayama, and T. Nakamura, "531 nm Green Lasing of InGaN Based Laser Diodes on Semi-Polar {20 $\bar{2}$ 1} Free-Standing GaN Substrates", Appl. Phys. Express, vol. 2, p. 082101 1-3 (2009)
- (10) Y. Yoshizumi, M. Adachi, Y. Enya, T. Kyono, S. Tokuyama, T. Sumitomo, K. Akita, T. Ikegami, M. Ueno, K. Katayama, and T. Nakamura, "Continuous-Wave Operation of 520 nm Green InGaN-Based Laser Diodes on Semi-Polar {20 $\bar{2}$ 1} GaN Substrates", Appl. Phys. Express, vol. 2, p. 092101 1-3 (2009)
- (11) M. Adachi, Y. Yoshizumi, Y. Enya, T. Kyono, T. Sumitomo, S. Tokuyama, S. Takagi, K. Sumiyoshi, N. Saga, T. Ikegami, M. Ueno, K. Katayama, and T. Nakamura, "Low Threshold Current Density InGaN Based 520-530 nm Green Laser Diodes on Semi-Polar {20 $\bar{2}$ 1} Free-Standing GaN Substrates", Appl. Phys. Express, vol. 3, p. 121001 1-3 (2010)
- (12) 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, "Preparation of Large Freestanding GaN Substrates by Hydride Vapor Phase Epitaxy Using GaAs as a Starting Substrate", Jpn. J. Appl. Phys., vol. 40, p. L140-L143 (2001)
- (13) S. Lutgen, D. Dini, I. Pietzonka, S. Tautz, A. Breidenassel, A. Lell, A. Avramescu, C. Eichler, T. Lermer, J. Müller, G. Bruederl, A. Gomez, U. Strauss, W. G. Scheibenzuber, U. T. Schwarz, B. Pasenow, and S. Koch, "Recent results of blue and green InGaN laser diodes for laser projection", Proc. SPIE 7953, 79530G (2011)
- (14) J. W. Raring, "III-Nitride Lasers", presented at ICNS, 9th Int. Conf. Nitride Semiconductors (2011)
- (15) J. W. Raring, M. C. Schmidt, C. Poblentz, Y. Chang, M. J. Mondry, B. Li, J. Iveland, B. Walters, M. R. Krames, R. Craig, P. Rudy, J. S. Speck, S. P. DenBaars, and S. Nakamura, "High-Efficiency Blue and True-Green-Emitting Laser Diodes Based on Non-c-Plane Oriented GaN Substrates", Appl. Phys. Express, vol. 3, p. 112101 1-3 (2010)
- (16) M. Ueno, Y. Yoshizumi, Y. Enya, T. Kyono, M. Adachi, S. Takagi, S. Tokuyama, T. Sumitomo, K. Sumiyoshi, N. Saga, T. Ikegami, K. Katayama, and T. Nakamura, "InGaN-based true green laser diodes on novel semi-polar {20 $\bar{2}$ 1} GaN substrates", J. Cryst. Growth, vol. 315, p. 258-262 (2011)
- (17) M. Funato, A. Kaneta, Y. Kawakami, Y. Enya, K. Nishizuka, M. Ueno, and T. Nakamura, "Weak Carrier/Exciton Localization in InGaN Quantum Wells for Green Laser Diodes Fabricated on Semi-Polar {20 $\bar{2}$ 1} GaN Substrates", Appl. Phys. Express, vol. 3, p. 021002 1-3 (2010)

執筆 者

高木 慎平* : 半導体技術研究所



上野 昌紀 : 半導体技術研究所
グループ長 博士 (理学)



片山 浩二 : 住友電工ファインポリマー(株)
光部品事業推進部 課長
博士 (工学)



池上 隆俊 : 半導体技術研究所 グループ長



中村 孝夫 : 半導体技術研究所 部長
博士 (工学)



築嶋 克典 : ソニー(株)

* 主執筆者