

# 1.3 $\mu\text{m}$ 帯 GaAs 基板上タイプ II 活性層 レーザ

1.3  $\mu\text{m}$ -Wavelength Laser with Type-II Active Layer on GaAs Substrate

冬木 琢真\*

Takuma Fuyuki

呉 剛志

Takashi Go

吉永 弘幸

Hiroyuki Yoshinaga

吉本 晋

Susumu Yoshimoto

光通信トラフィックの急速な増加に対応するべく、光デバイスを高密度に集積して大容量化させる一方で、光デバイスの発熱による特性の劣化が問題となっており、高温環境下でも特性が劣化しにくい温度特性に優れた半導体レーザが求められている。我々は、量産性の高い有機金属相成長法による独自の低温成長技術を展開し、光通信に適した1.3  $\mu\text{m}$  帯 GaAs 基板上 GaInAs/GaAsSb/GaInAs タイプ II 活性層レーザを作製した。しきい値電流密度の特性温度は25 $^{\circ}\text{C}$ ~100 $^{\circ}\text{C}$ において152 Kと、従来のInP基板上InGaAsP系レーザの60 Kを大きく上回る値が得られた。タイプ II 活性層を用いることで高温環境下でも特性が劣化しにくい1.3  $\mu\text{m}$  帯半導体レーザを実現可能であることを示した。

To meet the rapidly increasing demand for optical communication traffic, a high-capacity solution is required through the high-density integration of optical devices. The challenge lies in the potential degradation of device performance due to heat generation. Consequently, there is a need for a semiconductor laser exhibiting superior temperature attributes. Addressing this, we have developed a 1.3  $\mu\text{m}$ -wavelength laser, employing a GaInAs/GaAsSb/GaInAs type II active layer on a GaAs substrate, suitable for optical communication. This has been achieved utilizing our proprietary low-temperature growth technology from highly productive Organic-Metal Vapor Phase Epitaxy. Our solution exhibits a characteristic temperature of the threshold current density of 152 K between 25 $^{\circ}\text{C}$  and 100 $^{\circ}\text{C}$ , a value significantly larger than the traditional 60 K of InGaAsP lasers on InP substrates. This result demonstrates the feasibility of a 1.3  $\mu\text{m}$  semiconductor laser with a type II active layer, less susceptible to performance degradation in high-temperature environments.

キーワード : GaInAs, GaAsSb, GaAs, タイプ II, OMVPE

## 1. 緒言

生成AIやクラウドサービス、自動運転など、高度な情報通信技術によって提供される様々なアプリケーションによって我々の生活における利便性が向上する一方で、通信トラフィックは急速に増加している。そのため、データセンター内のネットワークスイッチは大容量化と消費電力の削減が同時に求められており、次世代のアーキテクチャであるCo-Packaged Optics (CPO) や、III-V族化合物半導体とシリコン (Si) フォトニクスを組み合わせた光デバイスなどが解決策として提案されている。

これらの提案では、光デバイスを高密度に集積して大容量化を実現させる一方で、光デバイスの発熱による特性の劣化が問題となっている。通常、発熱の問題に対してはペルチェ素子を用いた温度調整機構が採用されるが、集積性、消費電力、コストの面でデメリットがある。そこで、高温環境下でも特性が劣化しにくい、温度特性に優れたペルチェ素子フリーの半導体レーザが求められている。

光情報通信には、光ファイバの分散が少ない1.3  $\mu\text{m}$  帯および損失が少ない1.55  $\mu\text{m}$  帯の半導体レーザが主に使われる。この波長帯の半導体レーザには、一般的にはInP基板上のInGaAsP系の材料が使われているが、主にオージェ

再結合<sup>(1)</sup> やキャリアオーバーフロー<sup>(2)</sup> といった課題があり、温度上昇に伴うしきい値電流の増加や光出力の低下といったレーザ特性の劣化が顕著である。

オージェ再結合とは、電子と正孔が再結合する際に光を放出せずに他のキャリアを励起する現象であり、熱エネルギーに変換されてしまう非発光再結合過程である。オージェ再結合は光学遷移が生じる半導体のバンドギャップエネルギーが小さくなるほど発生確率が増大するため、光通信用波長帯に適したInGaAsP系材料においてその影響は顕著になる。また、このオージェ再結合はキャリア濃度が高いほど顕著であることから、温度上昇によるしきい値電流の上昇をさらに増長し、温度特性の劣化を招く。

キャリアオーバーフローとは、熱エネルギーによってキャリアが活性層から漏れて発光再結合に寄与しなくなる現象である。InGaAsP系材料の成長に適したInP基板上に格子整合可能な半導体材料群においては大きなバンドギャップを持つ材料がなく、活性層とクラッド層のバンドオフセットが小さいためにキャリアオーバーフローが顕著になる。一方、GaAs基板上では、大きなバンドギャップを持つ半導体材料が格子整合可能であり、温度特性に優れた半導体レーザを実現可能である。しかし、活性層に用いるGaInAs

系において、In組成を増加させることで発光波長を長波長化することが可能だが、In組成増加に伴いGaAs基板との格子歪によって結晶性が著しく劣化するため、光通信用波長帯まで長波長化するのは非常に困難である。

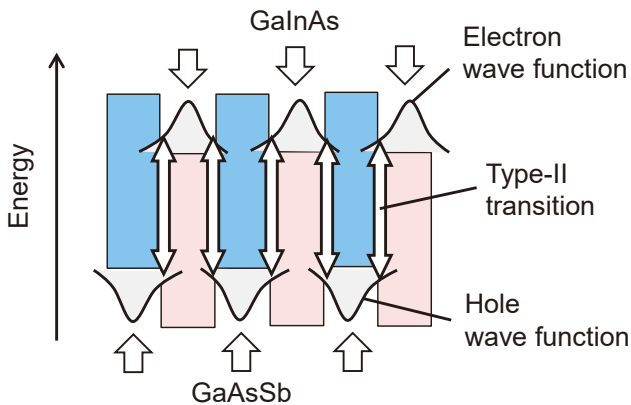


図1 GaInAs/GaAsSb タイプII量子井戸のバンド構造

そこで、GaAs基板上でタイプIIの遷移を利用して低In組成のまま長波長化が可能で、オージェ再結合の抑制も可能なGaInAs/GaAsSb系に着目した。我々はこれまでに、量産性に優れた有機金属気相成長 (OMVPE: Organic-Metal Vapor Phase Epitaxy) 法によって、近赤外センサ向けのInP基板上GaInAs/GaAsSb超格子の作製に成功し、高性能な近赤外センサを実現、実用化している<sup>(3),(4)</sup>。そこで今回、これらの開発で培った独自の低温OMVPE法成長技術を展開し、GaAs基板上のGaInAs/GaAsSbタイプII活性層の成長技術の開発と、上記活性層を用いて作製した光通信に適した1.3 μm帯GaAs基板上タイプII型活性層リッジ導波路型ファブリペロー (FP:Fabry-Perot) レーザに関して報告する。

## 2. タイプII量子井戸構造と成長

### 2-1 タイプII量子井戸構造

量子井戸 (QW: Quantum Well) 構造とは、異なるバンドギャップをもつ半導体を数nmオーダーで積層したものである。バルク構造と異なり光学利得が大幅に向上できることから、半導体レーザーの活性層に欠かせない構造となる。光情報通信分野に用いられるほぼ全ての半導体レーザーの活性層にはタイプIと呼ばれる同一の井戸層内に電子と正孔が閉じ込められ光学遷移が生じる構造が採用される。一方、図1に示すGaInAs/GaAsSb系のように電子および正孔の波動関数が空間的に分離されて、ヘテロ界面付近における波動関数の重なりにより光学遷移が生じるタイプIIの量子井戸も存在する。利点としては下記が挙げられる。

①大きなバンドギャップを持つ半導体を用いながら、実効的な遷移エネルギーを低減し、長波長化が可能

②オージェ再結合の抑制<sup>(5)</sup>

このタイプIIの遷移を半導体レーザーの活性層に活用する際には、正孔が閉じ込められるGaAsSb層を、電子が閉じ込められるGaInAs層で挟み込んだGaInAs/GaAsSb/GaInAs構造、所謂“W”型とすることで、波動関数の重なりが増大し、再結合確率の上昇によるレーザー特性の向上が期待されている<sup>(6),(7)</sup>。

### 2-2 タイプII量子井戸構造の成長

成長法としては量産性に優れたOMVPE法を用いた。まず、タイプII遷移による長波長化の効果を検証するため、厚さ4 nmのGaAs/GaIn<sub>0.34</sub>As-QW、GaAs/GaAsSb<sub>0.23</sub>-QW、それぞれを組み合わせたGaIn<sub>0.34</sub>As/GaAsSb<sub>0.23</sub>/GaIn<sub>0.34</sub>As “W”-QW、および、長波長化のためにSb組成を更に増加させたGaIn<sub>0.34</sub>As/GaAsSb<sub>0.30</sub>/GaIn<sub>0.34</sub>As “W”-QWを成長した。バンド構造と室温におけるフォトルミネセンス (PL: Photoluminescence) 測定の結果を図2に示す。GaAs/GaIn<sub>0.34</sub>As-QWでは波長1030 nm、GaAs/GaAsSb<sub>0.23</sub>-QWでは波長1130 nm、GaIn<sub>0.34</sub>As/GaAsSb<sub>0.23</sub>/GaIn<sub>0.34</sub>As “W”-QWでは波長1230 nmでの発光が得られ、予想通りタイプII遷移による長波長化の効果を確認し、GaIn<sub>0.34</sub>As/GaAsSb<sub>0.30</sub>/GaIn<sub>0.34</sub>As “W”-QWでは波長1360 nmでの発光を実現した。

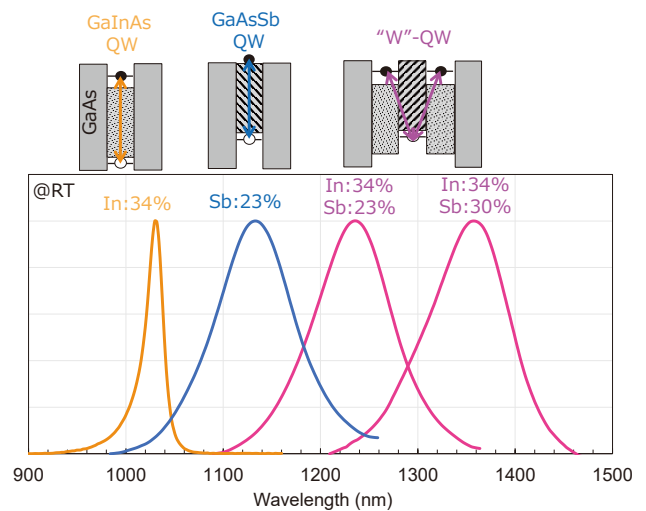


図2 GaAs/GaInAs-QW、GaAs/GaAsSb-QW、GaInAs/GaAsSb/GaInAs “W”-QWのバンド構造および室温におけるPLスペクトル

上述した通り、タイプIIの遷移はヘテロ界面で生じることから界面品質が非常に重要となる。一般的に、異なる元素を多く持つヘテロ界面の形成は、元素の相互拡散や偏析などの効果によって急峻な界面形成が難しいとされる。今回、我々独自の低温OMVPE法成長技術を用いて、界

面品質の向上を試みた。図3は界面品質改善前後のPLスペクトルである。具体的には成長温度を550°Cから475°Cに低温化することで、PL強度は約3倍に向上、半値全幅(FWHM: Full Width at Half Maximum)も88 nmから75 nmに改善した。また、断面透過電子顕微鏡(TEM: Transmission Electron Microscope)像を図4に示す。550°C成長では、GaInAs/GaAsSbヘテロ界面に中間層(図中では黒いコントラスト)が存在していることがわかる。この中間層はコントラストがGaAs層に近いことから原子量がGaAsに近い成分と推定され、GaInAs層の成長初期段階においてはIn原子が、GaAsSb層の成長初期段階においてはSb原子が偏析していると推測している。一方、475°C成長では中間層の形成が抑制されており、低温成長によってInおよびSbの偏析が抑制され、ヘテロ界面の急峻性が向上し、発光特性の向上に寄与したと考えられる。

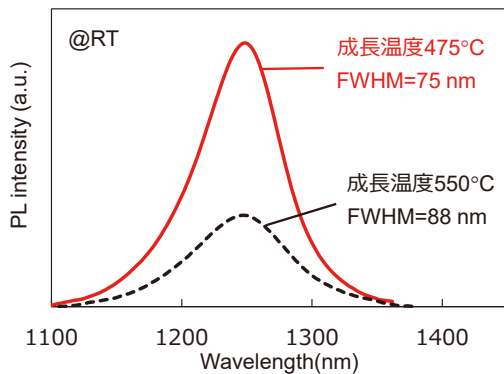


図3 成長温度550°Cおよび475°CにおけるPLスペクトル

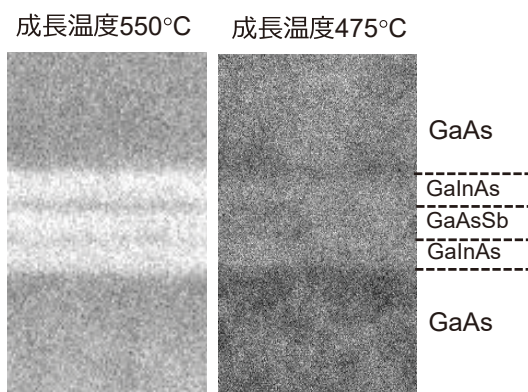


図4 成長温度550°Cおよび475°Cにおける断面TEM像

### 3. リッジ導波路型FPレーザの作製

図5は作製したリッジ導波路型FPレーザの断面構造である。n型GaAs基板の上にOMVPE法を用いてn-Al<sub>0.45</sub>GaAsクラッド層(1500 nm)、GaAs-SCH層(150 nm)、活

性層としてGaInAs(4 nm)/GaAsSb(4 nm)/GaInAs(4 nm)“W”-QWを2ペア、GaAs-SCH層(150 nm)、p-Al<sub>0.45</sub>GaAsクラッド層(1500 nm)、p-GaAsコンタクト層(200 nm)を成長した。続いて、一般的なフォトリソグラフィとウェットエッチング技術を用いてメサ幅2-30 μmで複数水準のリッジ構造を作製した。ウエハ全面に絶縁膜によるパッシベーションを行い、p-GaAsコンタクト層直上のみ絶縁膜を開口して、オーミック電極を真空蒸着法により成膜した。ウエハ裏面を研磨して約100 μmの厚さに減厚したのち、裏面電極を形成した。劈開にて端面を形成し、共振器長1~3 mmのリッジ導波路型FPレーザを複数水準作製した。

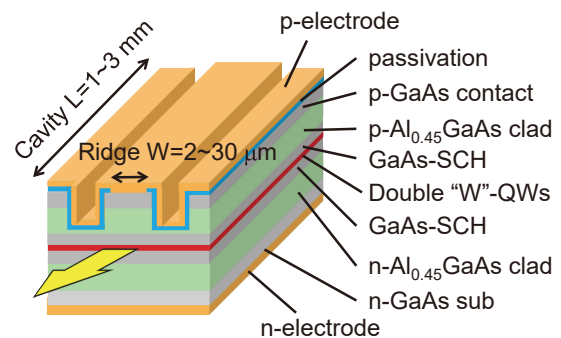


図5 作製したリッジ導波路型FPレーザの構造

## 4. レーザ特性

### 4-1 基本特性

図6(a)に室温、パルス駆動(パルス幅10 μsec、Duty比1%)におけるメサ幅5 μm、共振器長1~3 mm素子の電流密度-光出力特性、(b)に発振スペクトルを示す。共振器長1 mmの素子において、しきい値電流密度が約1.8 kA/cm<sup>2</sup>、波長1286 nmでのレーザ発振を実現した。また、共振器長1 mmの素子におけるしきい値電流のメサ幅依存性の評価より、活性層以外を流れる無効電流がないことを確認している。しきい値電流密度およびスロープ効率の共振器長依存性から、“W”-QW当たりの透明化電流密度は155 A/cm<sup>2</sup>、モード利得は12.7 cm<sup>-1</sup>と見積もられ、InP系材料と遜色のない値が得られた。一方、内部量子効率<sup>\*1</sup>は33%と見積もられ、一般的なタイプIレーザと比べて低い。タイプII量子井戸は波動関数の重なりがタイプIと比べて減少するため内部量子効率は低くなることが推測される。得られた値がタイプII活性層の本質的な要因か、プロセス起因による要因かを切り分けるために、電極幅13 μmのリッジ構造を用いないゲインガイド型FPレーザ素子を作製した。その結果、58%の内部量子効率が得られたことからリッジ導波路側面に起因した発光再結合効率の低下が要因と推測され、改善が必要である。



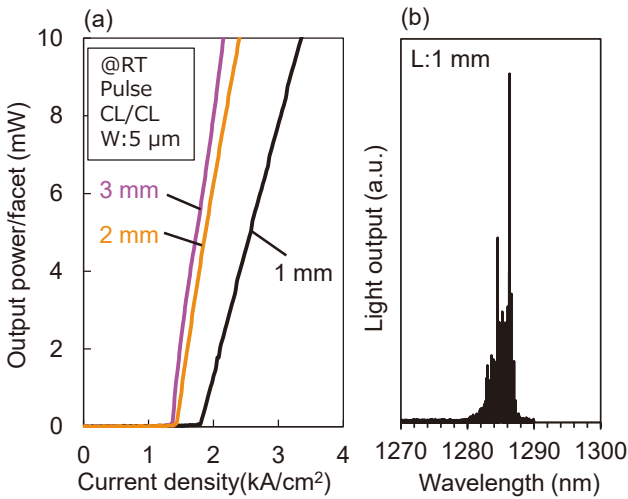


図6 (a) 室温、パルス駆動 (パルス幅10  $\mu$ sec、Duty比1%) におけるメサ幅5  $\mu$ m、共振器長1~3 mm素子の電流密度-光出力特性 (b) 発振スペクトル

4-2 温度特性

図7(a)は、メサ幅5  $\mu$ m、共振器長1 mm素子のパルス駆動 (パルス幅10  $\mu$ sec、Duty比1%) における25~100°Cの電流密度-光出力である。各温度にて明瞭なレーザ発振を実現した。しきい値電流密度に対する特性温度 $T_0$ は、既存のInP基板上InGaAsP系レーザの特性温度が約60 Kであるのに対し<sup>(8)</sup>、25~50°Cで333 K、50~75°Cで164 K、75~100°Cで92 K、25~100°Cでは152 Kが得られた (図7 (b))。また、オージェ効果によって、単位量子井戸層当たりのしきい値電流密度が小さいほど特性温度は大きくなることが報告されている<sup>(9)</sup>。タイプIと比べて内部量子効率が低いことに起因し、25°Cにおける“W”-QW当たりのしきい値電流密度はInGaAsP系レーザと比べてやや高い値であることを考慮すると<sup>(9)</sup>、GaAs基板上タイプII活性層レーザの温度特性が極めて良好であることを示している。

また、25~100°Cにおける発振スペクトルを図8(a)に示す。発振波長の温度依存係数 $d\lambda/dT$ に関して、25~50°Cで0.43 nm/K、50~75°Cで0.29 nm/K、75~100°Cで0.25 nm/Kが得られた (図8 (b))。50°C以上の温度域において、既存のInGaAsP系レーザの温度依存係数0.4~0.5 nm/Kと比べて低い値となった<sup>(8)</sup>。発振波長の温度依存性は、温度上昇に伴うゲインピークの長波長化効果と、注入キャリアによって引き起こされたバンドベンディング効果による短波長化効果の減算となる。レーザ発振に必要な注入キャリア量の温度依存性が高い、すなわち、特性温度が低いほど短波長化効果が強くなり、発振波長の温度依存係数は小さくなる<sup>(8)</sup>。タイプIの量子井戸に比べ、タイプIIの量子井戸では注入キャリア量に対するバンドベンディング効果が顕著であるため<sup>(10)</sup>、GaAs基板上タイプII活性層

レーザは高い特性温度を維持したまま低い発振波長の温度依存係数を実現できたと推測される。このバンドベンディング効果を適切に設計することで、高い特性温度を有した発振波長が温度に依存しない半導体レーザの実現も期待できる。

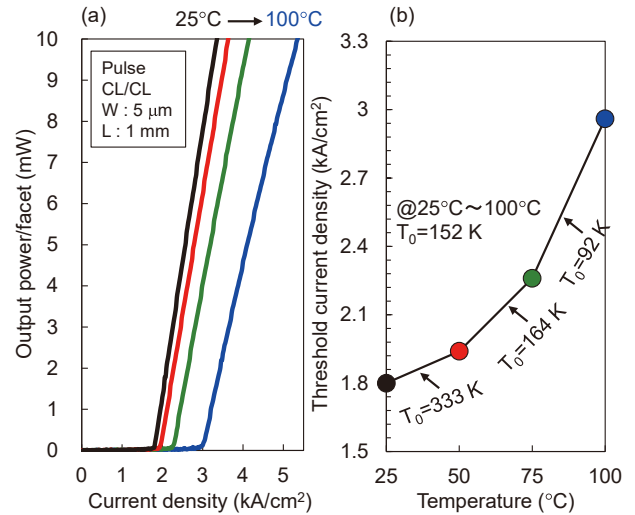


図7 (a) メサ幅5  $\mu$ m、共振器長1 mm素子のパルス駆動 (パルス幅10  $\mu$ sec、Duty比1%) における25~100°Cの電流密度-光出力 (b) しきい値電流密度の温度依存性

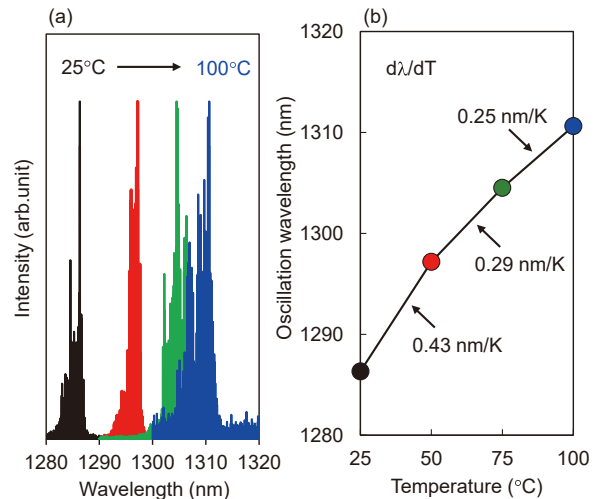


図8 (a) メサ幅5  $\mu$ m、共振器長1 mm素子の25~100°Cにおける発振スペクトル (b) 発振波長の温度依存性

5. 結 言

今回、独自の低温OMVPE法成長技術を用いてGaAs基板上GaInAs/GaAsSb/GaInAsタイプII活性層を成長し、リッジ導波路型FPレーザを作製した。1.3  $\mu$ m帯でのレーザ発振を実現し、25°C~100°Cにおいてしきい値電流密度の

特性温度は152Kと従来のInP基板上InGaAsP系レーザの60 Kを大きく上回る値が得られ、GaAs基板上のGalnAs/GaAsSb/GalnAsタイプII活性層を用いることで、高温環境下でもレーザ特性が劣化しにくい1.3 μm帯半導体レーザが実現可能である。

## 6. 謝 辞

本研究は、NASP III-V GmbHと共同で行ったものである。様々な議論を通じ、多大なるご助言を頂いたP. Ludewig氏、A. Bäumner氏、A. R. Perez氏、W. Stolz氏に感謝申し上げます。

### 用語集

#### ※1 内部量子効率

電極から注入されたキャリアが光に変換される割合。

#### ※2 特性温度

レーザのしきい値電流密度 $J_{th}$ は活性層温度 $T$ に対して

$$J_{th} \propto \exp(T/T_0)$$

のように指数関数的に増加する。このときの $T_0$ を特性温度と呼ぶ。特性温度が高いほど温度が高くなってもレーザ特性が劣化しにくいレーザと言える。

### 参考文献

- (1) N. K. Dutta, "Calculation of Auger rates in a quantum well structure and its application to InGaAsP quantum well lasers," J. Appl. Phys., 54, 1236-1245 (1983)
- (2) M. Kondow, K. Uomi, A. Niwa, T. Kitatani, S. Watahiki, and Y. Yazawa, "GalnNAs: A Novel Materials for Long-Wavelength-Range Laser Diodes with Excellent High-Temperature Performance," Jpn. J. Appl. Phys. 35, 1273-1275 (1996)
- (3) 猪口康博、森大樹、右田真樹、永井陽一、稲田博史、藤井慧、石塚貴司、秋田勝史、「低ノイズ・広帯域の近赤外2次元センサ開発」、SEIテクニカルレビュー第182号 (2013年1月)
- (4) 藤井慧、石塚貴司、永井陽一、猪口康博、秋田勝史、「高感度の近赤外受光素子エピソード」、SEIテクニカルレビュー第185号 (2014年7月)
- (5) G. G. Zegrya and A. D. Andreev, "Mechanism of suppression of Auger recombination processes in type-II heterostructures," Appl. Phys. Lett., 67, 2681-2683 (1995)

- (6) W. W. Chow and H. C. Schneider, "Charge-separation effects in 1.3 μm GaAsSb type-II quantum-well laser gain," Appl. Phys. Lett., 78, 4100-4102 (2001)
- (7) C. H. Pan and C. P. Lee, "Design and modeling of InP-based InGaAs/GaAsSb type-II "W" Type quantum wells for mid-Infrared laser applications," J. Appl. Phys., 113, 043112 (2013)
- (8) T. Higashi, T. Yamamoto, S. Ogita, and M. Kobayashi and A. D. Andreev, "Experimental Analysis of Temperature Dependence of Oscillation Wavelength in Quantum-Well FP Semiconductor Lasers," IEEE J. Quantum Electronics, 34, 1680-1689 (1998)
- (9) K. Otsubo, Y. Nishijima, and H. Ishikawa, "Long-wavelength Semiconductor Lasers on InGaAs Ternary Substrates with Excellent Temperature Characteristics," FUJITSU Sci. Tech. J., 34 212-222 (1998)
- (10) D. A. Duffy, I. P. Marko, C. Fuchs, T. D. Eales, J. Lehr, W. Stolz, and S. J. Sweeney, "Performance characteristics of low threshold current 1.2-μm type-II GalnAs/GaAsSb "W" -lasers for optical communications," J. Phys. D: Appl. Phys. 54 365104 (2021)

### 執筆者

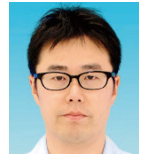
冬木 琢真\* : 伝送デバイス研究所 主査  
博士 (工学)



呉 剛志 : 伝送デバイス研究所 主査  
博士 (理学)



吉永 弘幸 : 伝送デバイス研究所 グループ長



吉本 晋 : 伝送デバイス研究所 グループ長



\*主執筆者