

高効率 GaN 面発光レーザの現状と展望

竹内 哲也^{†a)} 上山 智[†] 岩谷 素顕[†] 赤崎 勇^{†,††}

Status and Prospects of High-Efficiency GaN Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers

Tetsuya TAKEUCHI^{†a)}, Satoshi KAMIYAMA[†], Motoaki IWAYA[†],
and Isamu AKASAKI^{†,††}

あらまし 近年, GaN を主構成材料とした紫～青色領域で動作する面発光レーザに関する開発が活発化し, これまでに室温連続動作において光出力 4.2 mW, 外部微分量子効率 13% が実証された. 本論文では, まず, GaN 面発光レーザの特性に関して現状を整理, 概観する. 続いて, この面発光レーザを構成する各要素構造の現状と特性改善に向けた新規手法を紹介し, 本素子の今後を展望する.

キーワード GaN, 面発光レーザ, AlInN, 多層膜反射鏡

1. ま え が き

GaN は室温で 3.4 eV のバンドギャップを有する化合物半導体であり, InN との混晶である GaInN を活性層に用いることで, これまでに紫～赤色領域で動作する発光ダイオードや, 紫～緑色領域で動作する半導体レーザが実証されている. 1989 年に, この GaN による pn 接合青色・紫外発光ダイオードが発明され, 著者の一人を含む 3 名の日本人が 2014 年ノーベル物理学賞を受賞したことは記憶に新しい [1].

面発光レーザは, 1977 年に伊賀によって発案された半導体レーザの一つである [2]. 多層膜反射鏡 (DBR) による縦方向共振器を有し, ウエハ垂直方向にレーザ光を射出するのが特徴である. この縦方向共振器の存在により, 円形ビーム, 単一縦モード, 二次元アレー, そして高生産性という特徴も有している. これまでに赤外や赤色領域で動作する面発光レーザが実用化され, 光学マウス, レーザプリンタ, そしてパソコン・周辺機器間のデータ伝送の光源として活躍している.

共に日本発の技術である窒化物半導体と面発光レーザを組み合わせることで, 紫～緑色領域で動作する面発光レーザが実現する. この GaN による青～緑色面発光レーザは, 既存の赤色 GaInP 面発光レーザと組み合わせることで白色化が実現し, 車載用アダプティブヘッドライト [3], 網膜走査ディスプレイ [4], そして超高速可視光通信 [5] に必要な新規光源としての活躍が期待される.

本論文では, これまでに報告された紫～青色 GaN 面発光レーザの現状を述べるとともに, 高効率 GaN 面発光レーザに向けた研究開発の状況と展望を記載する. まず, 各研究機関から報告された素子構造と静特性の現状を整理, 概観する. 更に, GaN 面発光レーザの特徴的な素子特性について, 最近の報告例を紹介する. 続いて, GaN 面発光レーザを構成する各要素構造の現状として, 我々が取り組んでいる, 窒化物半導体多層膜反射鏡, 光導波構造, デチューニングについて詳しく記載するとともに, 特性改善に向けた新規手法について紹介し, GaN 面発光レーザの今後を展望する.

2. GaN 面発光レーザの現状

2.1 紫～青色 GaN 面発光レーザの現状

表 1 に, これまでに報告された紫～青色領域で室温連続動作 (一部パルス動作) する GaN 面発光レーザの構造と特性について整理した [6]～[13]. 後述する

[†] 名城大学理工学部材料機能工学科, 名古屋市
Faculty of Materials Science and Engineering, Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tempaku-ku, Nagoya-shi, 468-8502 Japan

^{††} 名古屋大学赤崎記念研究センター, 名古屋市
Akasaki Research Center, Nagoya University, Foro-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8601 Japan

a) E-mail: take@meijo-u.ac.jp

表 1 紫～青色 GaN 面発光レーザーの構造と特性
Table 1 Structures and properties of violet-blue GaN VCSELs.

	日亜 [6]	パナソニック [7]	ソニー [8]	UCSB [9]	厦門大学 [10]	国立交通大学 [11]	EPFL [12]	名城大学 [13]
発表年	2011	2012	2016	2016	2014	2015	2012	2017
下部DBR	誘電体	誘電体	誘電体	誘電体	誘電体	窒化物	窒化物	窒化物
電流狭窄構造	ITO	ITO	ITO	トンネル接合	ITO	ITO	RIE処理	ITO
活性層	GaN 5QWs	GaN MQWs	6 nm GaInN 2QWs	3 nm GaInN 7QWs	4 nm GaInN 5QWs	4 nm GaInN 5QWs	5nm GaInN 5QWs	3 nm GaInN 5QWs
発振波長 (nm)	451	405	454	419	430	-	421	411
しきい値電流 (mA)	1.5	2	18	18	0.93	8.5	70	5.2
微分量子効率 (%)	4	-	3	-	-	2	-	13
最大光出力 (mW)	0.7	0.003	1.1	0.25	0.001	0.9	0.3 (パルス)	4.2

ように、窒化物半導体による半導体 DBR の形成が容易ではないため、GaN 面発光レーザー素子構造としては、以下の二つに大別できる。一つは、上下とも誘電体 DBR を有する構造 [6]～[10] であり、もう一つは少なくとも下部に窒化物半導体 DBR を有する構造 [8]～[10] である。上下に誘電体 DBR を有する構造では、高反射率 DBR が利用できるため、現在、GaN 面発光レーザー構造として主流となっている。しかしながら、煩雑な基板剥離プロセスが必要であり、かつ面発光レーザーの特徴である薄い（数波長相当の）共振器の形成が困難である。一方、下部に半導体 DBR を有する構造では、DBR に必要な屈折率の異なる二つの材料の組み合わせとして、Al(Ga)N/GaN [14]、あるいは AlInN/GaN [15] が報告されている。この半導体 DBR 上に、引き続き活性層を含む共振器までエピタキシャル成長が可能であり、実用化された赤外 GaAs 面発光レーザーに近い構造となる。高性能と高生産性を両立する素子構造として期待されているものの、いずれの DBR も結晶成長が困難である点が課題である。次に、各素子の静特性を眺めてみると、上下誘電体 DBR 構造では 1 mA 程度のしきい値電流が実現しており、下部半導体 DBR 構造では 4.2 mW の最大光出力と 13% の外部微分量子効率が実現している [13]。一方で、実用化された赤外面発光レーザーのような低しきい値電流と高光出力を同時に満たす素子は未だ実現していない。これは、後述するように内部損失や素子熱抵抗が高いことが主な要因と考えられる。特性改善に向けた、更なる素子構造検討が必要な状況である。

2.2 GaN 面発光レーザーの諸特性

続いて、GaN 面発光レーザーの動特性、温度特性、そして動作波長域に関して、以下に記載する。

赤外面発光レーザーでは、その小さい活性領域を反映

して、数 10 GHz を超える高い変調特性が実現されている。GaN 面発光レーザーにも同様の動特性が期待されており、Shen らは、上下誘電体 DBR を有し、419 nm で動作する素子において、微小信号による周波数応答を測定した [16]。その結果、測定に使用したフォトダイオードの周波数特性によって制限されているものの、少なくとも 1 GHz までの動作を達成した。これにより、GaN 面発光レーザーが高速可視光通信の光源として高いポテンシャルを有することが実証された。

次に、温度特性に関して、素子熱抵抗の理論検討や、実際に作製された GaN 面発光レーザーの高温動作の実証が進められている。Masabih らは、上下誘電体 DBR を有する GaN 面発光レーザーの熱抵抗を有限要素法により計算した [17]。上下に存在する誘電体 DBR の存在により、また、電流狭窄径が小さくなるに従って熱抵抗は大きくなること、一方で、誘電体 DBR にリセス構造を設けて金属を埋め込む、あるいは誘電体 DBR メサを GaN で埋め込む [8]、更には、共振器長を厚くして横方向への熱拡散を促進するなどの工夫により、熱抵抗として 3000 K/W まで低下すると予測している。一方、Chang らは、上下誘電体 DBR を有し、402 nm で動作する素子の電流光出力特性における温度依存性を実測した [18]。しきい値電流密度が 20 kA/cm^2 以上にまで増大するものの、 77°C までの高温動作を実証した。更に、発振波長における投入電力依存性と素子温度依存性から、投入電力に対する素子温度の関係、すなわち熱抵抗を見積もった。その結果、 $\sim 700 \text{ K/W}$ という、非常に低い値を得ている。素子の下部で誘電体 DBR を介さずに接触する幅 $20 \mu\text{m}$ の金属電極での熱伝導が、この低い熱抵抗に大きく寄与していることを理論計算により説明している。赤外面発光レーザーで報告されている値は 1000～2000 K/W

である [19] ことから, GaN 面発光レーザにおいても同程度の熱抵抗が実現されつつある。

動作波長域としては, 現状主流となっている紫～青色領域を黄～赤色領域まで長波長化させ, 可視全域をカバーすることが応用上重要である。しかしながら, 長波長化のためには, GaInN 量子井戸活性層における InN モル分率を増大させる必要があり, GaN との格子不整合度増大により活性層品質は著しく低下する。Weng らは, 活性層にピーク波長 524 nm の InGaIn 量子ドットを用いるとともに, 面発光レーザ特有のデチューニング (3.3 にて詳細説明) において, 従来よりも大幅に大きなデチューニング量 (36 nm) を用いることで, 560 nm で動作する GaN 面発光レーザを実現した [20]。出力は数 μW と極めて低いものの, しい値電流は 1 mA 以下と十分低い。面発光レーザでは, 短共振器により縦モード間隔が非常に広いため, 共振器による共振波長によって決定される。GaN 面発光レーザにおいても, このデチューニングを積極的に利用することで, 大幅な長波長化が可能なが示された。

以上述べたように, 面発光レーザとしての特徴を示唆する素子特性が報告され始めており, LED や端面発光レーザでは実現し得ない新規光源としての可能性が示され始めている。

3. 高効率 GaN 面発光レーザに向けた取り組みと今後の展望

3.1 窒化物半導体 DBR

上述したように GaN 面発光レーザにおいても, 実用化された赤外面発光レーザと同様, 高品質半導体 DBR の形成並びに面発光レーザへの適用が期待されている。窒化物半導体 DBR としては, Al(Ga)N/GaN あるいは AlInN/GaN の組み合わせが検討されている。表 2 に示すように, AlN と GaN の組み合わせでは, これら二層の成長条件が比較的近く, かつ成長

速度も数 $\mu\text{m}/\text{h}$ と十分速い一方, 約 2% の格子不整合が良好な多数ペア DBR 形成を阻んでいる。我々は従来の GaN テンプレートに代わり, AlN テンプレート上に AlN/GaN DBR を形成することで, クラックの原因となる AlN 内の引っ張り歪を低減し (代わりに GaN 内に圧縮歪が内在する), 実際にクラックが抑制されることを実証した [21]。しかしながら, 依然として格子不整合のために, 界面平坦性が低下し, 最大反射率は 97.5% にとどまっている。

数 μm の厚さが必要な DBR では, やはり格子整合が重要と考え, 既に報告されている格子整合 AlInN/GaN [15] の検討を我々も開始した。この DBR における課題は, AlInN 層自体の結晶成長である。18% の InN モル分率を達成しつつ, 良好な表面平坦性を実現するためには, GaInN と同様, 800°C 以下の成長温度と 0.2 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以下の成長速度が必要と考えられていた。面発光レーザ動作に必要な 99.9% の反射率を実現するためには, 40 ペア, すなわち 4 μm 近い厚さの DBR を形成する必要があり, 上述した成長速度では DBR 形成だけで一昼夜必要になる。成長時間が長いと, コスト増大の要因になるのみならず, 素子の試作回数も減り, 開発速度も遅くならざるを得ない。そこで, 我々は, DBR 形成のために高い成長速度 (0.5 $\mu\text{m}/\text{h}$ 以上) を使用し, かつ高品質 AlInN 層が得られる成長条件を模索した [22]。図 1 に, 従来の成長条件 (成長温度 785°C) と我々が開発した成長条件 (成長温度 835°C) を用いて, それぞれ 0.5 $\mu\text{m}/\text{h}$ と高い成長速度にて成長させた約 80 nm の AlInN 層の表面を示す。新規成長条件で作製した表面は, 従来と異なり, ステップフロー成長を示唆すると思われる原子層ステップに対応した表面形態が観測された。なお, 高い成長温度を用いても 18% の InN モル分率が

表 2 AlN と AlInN の比較
Table 2 Comparisons between AlN and AlInN.

	AlN	AlInN	GaN
屈折率差	14%	9%	—
格子不整合	2%	0%	—
成長速度	数 $\mu\text{m}/\text{h}$	~0.2 $\mu\text{m}/\text{h}$	数 $\mu\text{m}/\text{h}$
成長温度	1100°C 以上	800°C 未満	1050°C
キャリアガス	水素	窒素	水素

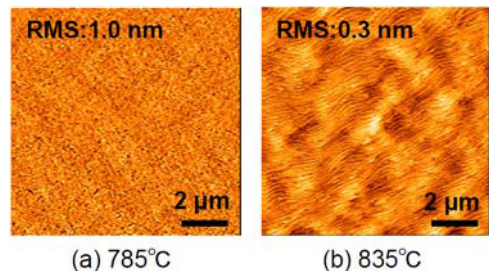


図 1 (a) 従来と (b) 新規成長条件における AlInN 表面
Fig. 1 (a) conventional and (b) newly developed AlInN surfaces.

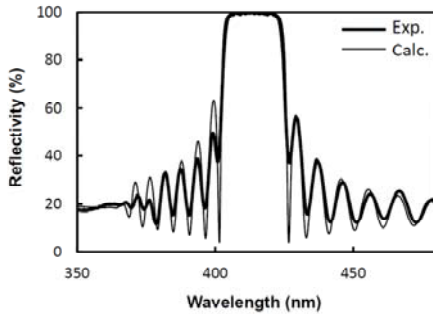


図2 AlInN/GaN DBR 反射スペクトルの実験値と計算値

Fig. 2 Experimental and calculated AlInN/GaN DBR reflectivity.

得られているのは、高い成長速度により、膜中への In 取り込みが増大したことに加え、In/Al 原料供給比も従来より高い値を用いたからである。ただだか 50°C の成長温度上昇により、このように AlInN 層の表面形態が大幅に改善することが明らかになった。

続いて、この成長条件を用いて、AlInN 層と GaN 層を 40 ペア積層させた多層膜反射鏡を作製した。成長速度の増大により、40 ペア DBR の成長時間は 12 時間程度に抑えられている。その反射率スペクトルを図 2 に示す。報告されている AlInN の屈折率を用いて計算した反射率スペクトルも同時にプロットした。サイドローブも含めて、実測値と計算値はよく一致し、最大反射率で 99.9% を示した。このように、GaN に格子整合する AlInN を用いること、更にはその成長条件を DBR に向けて最適化することで、面発光レーザ動作に必要な反射率を実現する高品質窒化物半導体 DBR が実現した。この DBR を用いることで、現時点で、発振波長 411 nm、しきい値電流 5.2 mA、最大出力 4.2 mW (外部微分量子効率 13%) を示す GaN 面発光レーザが実現している [13]。また、同様の構造をもつ素子では、図 3 に示すように、30~100°C までの連続動作に成功し、高温動作においても一定の性能を示すことがわかった。我々は、この素子構造を、更に赤外面発光レーザの素子構造に近づけるために、この AlInN/GaN DBR に導電性をもたせ、縦方向に電流注入可能な素子構造実現を目指した。より均一な電流注入と構造簡素化による歩留まり向上が期待できる。我々は上述した AlInN/GaN DBR に、窒化物半導体特有のそれぞれ正負の界面分極電荷を考慮した Si 変調ドーピングにより、DBR に縦方向導電性をもた

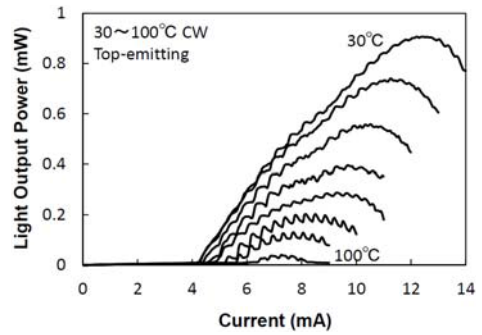


図3 GaN 面発光レーザの I-L 特性温度依存性

Fig. 3 Temperature dependence of I-L curves of GaN VCSEL.

せることに成功した [23]。この n 型伝導 AlInN/GaN DBR を下部に有する GaN 面発光レーザを作製し、発振波長 405 nm、しきい値電流 2.6 mA で室温連続動作する素子を実証した [24]。現状では、光出力は上述したアンドープ DBR に比べ低い値であり、更なる改善が必要であるが、赤外面発光レーザに近い縦方向電流注入構造を有する GaN 面発光レーザが実証された。

3.2 光導波構造

低いしきい値電流と高微分量子効率の両立には内部損失の低減が欠かせない。GaN 面発光レーザの内部損失の大きな要因として考えられるのは、共振器内部に配置された ITO 電極/SiO₂ 開口構造における、ITO 電極の光吸収損失、並びに SiO₂ 開口の凹型段差による反導波構造での光散逸損失の双方が考えられる。Hashemi らは、理論計算により、ITO による光吸収が 10 cm⁻¹ 程度である一方、SiO₂ 開口による光散逸が 30~40 cm⁻¹ であると見積もっている [25]。赤外 GaAs 面発光レーザでは、AlAs 酸化狭窄開口構造を利用することで、上記の問題が一挙に解決しているが、GaN 面発光レーザでは、この酸化狭窄構造のように容易かつ制御良く、高絶縁かつ低屈折率を有する領域を形成する技術は存在しない。一方で、上記酸化狭窄構造が利用できない InP 上 InGaAs 面発光レーザでは、トンネル接合メサを n 層で埋め込むことで、電流狭窄とそのメサに起因する凸型段差により光導波構造を同時に形成する手法が採用されている [26]。この実現に向けて、我々も低抵抗トンネル接合の形成 [27] や凸型段差構造による光導波構造の検証を進めており、以下に、この段差構造による光導波構造の形成を紹介する。

段差構造を有する面発光レーザ構造の概略図を、従

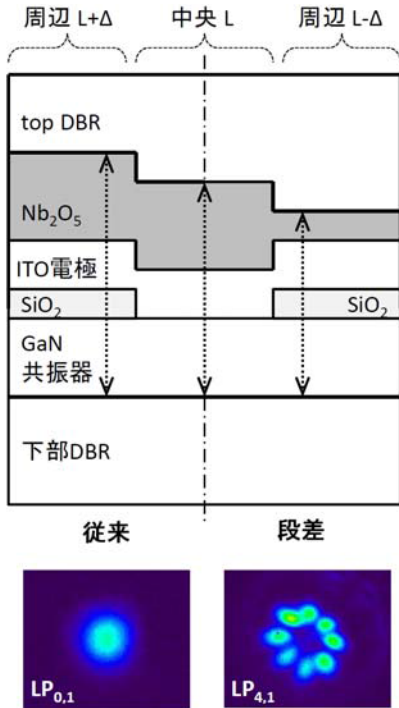


図4 従来構造(左)と段差構造(右)の断面模式図と近視野像
 Fig. 4 Cross-sectional schematics and near-field patterns of conventional (left) and step (right) structures.

来の素子構造とともに図4に示す。Effective Index Model [28]と呼ばれるモデルにより、段差の有無の領域における共振波長の差異が、屈折率差の差異に相当すると理解され、実効的な光導波構造として機能することが報告されている[25]。このモデルに従って、以下のように素子構造を設計した。すなわち、電流が注入される素子中央部に対し、素子外周部のNb₂O₅スペーサ層における物理的な段差を10nm設けることで、外周部の共振波長を6nm短くさせた。これにより、比屈折率差が1.5%になることが理論的に予想される。図4の下部に示すように、従来構造では熱レンズ効果によると思われる基本モードでの発振が観測される一方、段差構造では、上述した大きな比屈折率差に基づく高次(LP_{4,1})モードによる発振が得られている。この従来構造と段差構造を同一ウエハ上に形成し、そのI-L特性を比較した。その結果、段差構造を設けることで、同じウエハ上に同時に形成した従来構造よりも低しきい値電流、高最大光出力が得られた[29]。以上の結果から、段差構造により光導波構造が形成さ

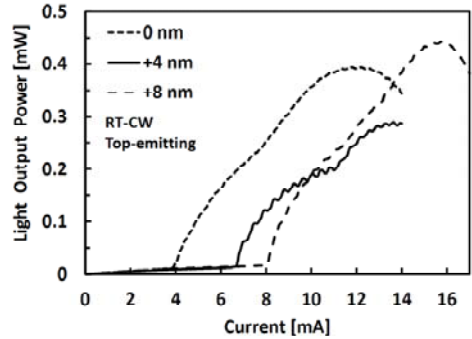


図5 I-L特性のデチューニング量依存性
 Fig. 5 Detuning dependence of I-L characteristics.

れ、従来よりも素子特性が改善されたと言える。しかしながら、上述した従来構造における最大光出力を超えるまでの値には至っておらず、更なる改善が必要な状況である。

3.3 デチューニング

高出力時には投入電力の増大により素子の温度が上昇し、キャリアオーバーフローなどの影響により光への変換効率が低下する。これに加えて、面発光レーザでは縦モード間隔が広く、温度上昇による利得ピーク波長シフト量が共振波長のシフト量よりも大きいことも、効率低下に大きく影響する。すなわち、室温で利得ピーク波長と共振波長が一致していても、高出力動作時には一致しない状態に陥る。そこで、高出力時の温度上昇した状況で利得ピーク波長と共振波長が一致するように、室温では意図的に利得ピーク波長を共振波長よりも短波長化させておく、いわゆるデチューニングが用いられている。赤外面発光レーザではこの波長域で10~20nmのデチューニングが良く用いられている[2]。我々はGaN面発光レーザにおいても、このデチューニングを採用し、高出力時に高効率で動作する素子の実現を試みた。図5にデチューニング量を0, 4, そして8nmと設定した素子の室温におけるI-L特性を示す。デチューニング量が多いと、より高い電流注入時に最大光出力が得られることがわかり、将来的な高出力化に向けて重要なパラメータであることがわかる。一方で、4nmの素子は、光出力が小さくなってしまっており、一貫した傾向が得られていないことも事実である。これは、素子特性がデチューニング量以外のパラメータにより支配されており、それを我々が未だ制御しきれていない状況であることを示唆していると考えられる。具体的には、上述した素子間では内

部損失が異なっている可能性が挙げられる。内部損失を制御、低減させた上で、適切なデチューニング量を設けることで、高効率と高出力を両立する素子が実現すると考えている。

4. む す び

以上、記載したように、昨今の GaN 面発光レーザの特性改善は著しく、AlInN/GaN DBR を有する素子において室温連続動作における最大光出力 4.2 mW、また、最高動作温度 100°C が実現された。しかしながら、赤外面発光レーザが実現したような低しきい値電流と高微分子効率の両立は実現していない。ITO 電極による光吸収や、光導波構造が存在しないことによる光散逸損失が大きな要因と考えられる。InP 上 InGaAs 面発光レーザで用いられているトンネル接合メサ埋め込み構造が、その両立を可能にする構造と考えられ、GaN 面発光レーザへの適用及び実証が期待される。こうした内部損失を適切に制御できる技術を確認した上で、デチューニング量などの面発光レーザ特有の設計パラメータも最適化することで、実用化された赤外面発光レーザの特性に大きく近づくことができると考えている。

謝辞 本研究はの一部は文科省・私立大学研究ブランディング事業 (2016–2020)、日本学術振興会・科研費基盤研究 A (17H01055)、新学術領域研究 (16H06416) の援助によって行われた。

文 献

- [1] I. Akasaki, "Fascinated Journeys into Blue Light," Nobel Lecture, Dec. 8, 2014. H. Amano, "Growth of GaN on Sapphire via Low-Temperature Deposited Buffer Layer and Realization of p-Type GaN by Mg Doping Followed by Low-Energy Electron Beam Irradiation," Nobel Lecture, Dec. 8, 2014. S. Nakamura, "Background Story of the Invention of Efficient Blue InGaN Light Emitting Diodes," Nobel Lecture, Dec. 8, 2014.
- [2] 伊賀健一, 小山二三夫, 面発光レーザの基礎と応用, 共立出版, 1999.
- [3] <http://mercedes-benz.jp/my-service/brand/parts04/>
- [4] <http://www.qdlaser.com/applications/eyewear.html>
- [5] 中川正雄, "可視光通信," 映情学誌, vol.60, 1908, 2006.
- [6] D. Kasahara, D. Morita, T. Kosugi, K. Nakagawa, J. Kawamata, Y. Higuchi, H. Matsumura, and T. Mukai, "Demonstration of blue and green GaN-Based vertical-cavity surface-emitting lasers by current injection at room temperature," Appl. Phys. Exp. 4, 072103, 2011.
- [7] T. Onishi, O. Imafuji, K. Nagamatsu, M. Kawaguchi, K. Yamanaka, and S. Takigawa, "Continuous wave operation of GaN vertical cavity surface emitting lasers at room temperature," IEEE J. Quantum Electron., vol.48, 1107, 2012.
- [8] T. Hamaguchi, N. Fuutagawa, S. Izumi, M. Murayama, and H. Narui, "Milliwatt-class GaN-based blue vertical-cavity surface-emitting lasers fabricated by epitaxial lateral overgrowth," Phys. Stat. Sol. A, vol.213, 1170, 2016.
- [9] J.T. Leonard, E.C. Young, B.P. Yonkee, D.A. Cohen, T. Margalith, S.P. DenBaars, J.S. Speck, and S. Nakamura, "Demonstration of a III-nitride vertical-cavity surface-emitting laser with a III-nitride tunnel junction intracavity contact," Appl. Phys. Lett., vol.107, 091105, 2015.
- [10] W.-J. Liu, X.-L. Hu, L.-Y. Ying, J.-Y. Zhang, and B.-P. Zhang, "Room temperature continuous wave lasing of electrically injected GaN-based vertical cavity surface emitting lasers," Appl. Phys. Lett., vol.104, 251116, 2014.
- [11] D.H. Hsieh, A.J. Tzou, T.S. Kao, F.I. Lai, D.W. Lin, B.C. Lin, T.C. Lu, W.C. Lai, C.H. Chen, and H.C. Kuo, "Improved carrier injection in GaN-based VCSEL via AlGaIn/GaN multiple quantum barrier electron blocking layer," Opt. Express, vol.23, 2714519, 2015.
- [12] G. Cosendey, A. Castiglia, G. Rossbach, J.-F. Carlin, and N. Grandjean, "Blue monolithic AlInN-based vertical cavity surface emitting laser diode on free-standing GaN substrate," Appl. Phys. Lett., vol.101, 151113, 2012.
- [13] T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki, "GaInN vertical-cavity surface-emitting lasers with AlInN/GaN DBRs," 12th International Conference of Nitride Semiconductors, B.9.1, Strasbourg, France, July 2017.
- [14] G.S. Huang, T.C. Lu, H.H. Yao, H.C. Kuo, S.C. Wang, C.-W. Lin, and L. Chang, "Crack-free GaN/AlN distributed Bragg reflectors incorporated with GaN/AlN superlattices grown by metalorganic chemical vapor deposition," Appl. Phys. Lett., vol.88, 061904, 2006.
- [15] J.-F. Carlin and M. Ilegems, "High-quality AlInN for high index contrast Bragg mirrors lattice matched to GaN," Appl. Phys. Lett., vol.83, 668, 2003.
- [16] C. Shen, J.T. Leonard, E.C. Young, T.K. Ng, S.P. DenBaars, J.S. Speck, S. Nakamura, A.Y. Alyamani, M.M. El-Desouki, and B.S. Ooi, "GHz modulation bandwidth from single-longitudinal mode violet-blue VCSEL using nonpolar InGaIn/GaN QWs," CLEO 2016, STh1L.2.
- [17] S. Mishkat-Ul-Masabih, J. Leonard, D. Cohen, S. Nakamura, and D. Feezell, "Techniques to reduce thermal resistance in flip-chip GaN-based VCSELs," Phys. Stat. Sol. A, vol.214, 1600819, 2017.

- [18] T.-C. Chang, S.-Yi Kuo, J.-T. Lian, K.-B. Hong, S.-C. Wang, and T.-C. Lu, "High-temperature operation of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers," *Appl. Phys. Exp.*, vol.10, 112101, 2017.
- [19] C. Wilmsen, H. Temkin, and L.A. Coeldren, *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*, Cambridge University Press, 1999.
- [20] G. Weng, Y. Mei, J. Liu, W. Hofmann, L. Ying, J. Zhang, Y. Bu, Z. Li, H. Yang, and B. Zhang, "Low threshold continuous-wave lasing of yellow-green InGaN-QD vertical-cavity surface-emitting lasers," *Opt. Express*, vol.24, 15546, 2016.
- [21] K. Yagi, M. Kaga, K. Yamashita, K. Takeda, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, H. Amano, and I. Akasaki, "Crack-Free AlN/GaN distributed bragg reflectors on AlN templates," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.51, 051001, 2012.
- [22] Y. Kozuka, K. Ikeyama, T. Yasuda, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki, "Growths of AlInN single layers and distributed bragg reflectors for VCSELs," 2014 MRS Fall Meeting, MRSF14-1736-T13-08.R1.
- [23] S. Yoshida, K. Ikeyama, T. Yasuda, T. Furuta, T. Takeuchi, M. Iwaya, S. Kamiyama, and I. Akasaki, "Electron and hole accumulations at GaN/AlInN/GaN interfaces and conductive n-type AlInN/GaN distributed Bragg reflectors," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.55, 05FD10, 2016.
- [24] K. Ikeyama, Y. Kozuka, K. Matsui, S. Yoshida, T. Akagi, Y. Akatsuka, N. Koide, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki, "Room-temperature continuous-wave operation of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with n-type conducting AlInN/GaN distributed Bragg reflectors," *Appl. Phys. Exp.*, vol.9, 102101, 2016.
- [25] E. Hashemi, J. Gustavsson, J. Bengtsson, M. Stattin, G. Cosendey, N. Grandjean, and Å. Haglund, "Engineering the lateral optical guiding in gallium nitride-based vertical-cavity surface-emitting laser cavities to reach the lowest threshold gain," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.52, 08JG04, 2013.
- [26] M. Ortsiefer, R. Shau, G. Bohm, F. Kohler, G. Abstreiter, and M.-C. Amann, "Low-resistance InGa(Al)As tunnel junctions for long wavelength vertical-cavity surface-emitting lasers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.39, 1727, 2000.
- [27] D. Takasuka, Y. Akatsuka, M. Ino, N. Koide, T. Takeuchi, M. Iwaya, S. Kamiyama, and I. Akasaki, "GaInN-based tunnel junctions with graded layers," *Appl. Phys. Exp.*, vol.9, 081005, 2016.
- [28] G.R. Hadley, "Effective index model for vertical-cavity surface-emitting lasers," *Opt. Lett.*, vol.20, 1483, 1995.
- [29] N. Hayashi, J. Ogimoto, K. Matsui, T. Furuta, T. Akagi, S. Iwayama, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M.

Iwaya, and I. Akasaki, "A GaN-based VCSEL with a convex structure for optical guiding," *Phys. Stat. Sol. A.*, vol.215, 1700648, 2018.

(平成 29 年 12 月 25 日受付, 30 年 4 月 4 日再受付,
7 月 10 日公開)



竹内 哲也

1990 名古屋大学工学部卒. 1999 名城大学博士 (工学) 取得. 民間企業を経て 2010 名城大学理工学部准教授. 2015 名城大学理工学部教授. 現在, 窒化物半導体の結晶成長及び光デバイスの研究に従事.



上山 智

1985 名古屋大学工学部卒, 1995 名古屋大学博士 (工学) 取得, 民間企業を経て, 2001 名城大学理工学部助教授, 2007 名城大学理工学部教授. 現在, 窒化物半導体や SiC の結晶成長及び光デバイスの研究に従事.



岩谷 素顕

1998 名城大学理工学部卒. 2003 名城大学博士 (工学) 取得. 2003 名城大学理工学部講師. 2007 名城大学理工学部准教授. 窒化物半導体の結晶成長及び光デバイスの研究に従事.



赤崎 勇 (名誉員)

1952 京都大学理学部卒. 1964 名古屋大学工学博士取得, 民間企業を経て 1981 名古屋大学工学部教授. 1992 名城大学理工学部教授. 2004 名古屋大学特別教授, 2010 名城大学大学院理工学研究科終身教授. 2014 ノーベル物理学賞受賞. 窒化物半導体の結晶成長及び光デバイスの研究に従事.