

令和 2 年 7 月 2 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01055

研究課題名(和文) 高品位三原色光源実現に向けた青・緑色面発光レーザー

研究課題名(英文) blue-green VCSELs towards high-quality light sources with three primary color

研究代表者

竹内 哲也 (Takeuchi, Tetsuya)

名城大学・理工学部・教授

研究者番号：10583817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,000,000円

研究成果の概要(和文)：高効率・高出力化に対して、光閉じ込め構造と長共振器構造により、従来3mW程度の光出力が、4.4mWまで増大した。また、導電性DBRにより、素子抵抗が2/3まで低減した。さらに、低抵抗GaInNトンネル接合を実現させ、トンネル接合を有する面発光レーザーも実証した。長波長化に関しては、その場合エピ成長率測定により、エピ成長が進行することでInNモル分率が意図せず増加する現象を見出し、エピ条件で補償することで、より均一なDBRを作製した。活性層の長波長化はGaInN基板上の成長条件最適化が必要なることが明らかになった。最後に、変調特性としてGHzレベルの応答を示す初期的結果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

レーザーの高性能とLEDの高生産性を兼ね備える面発光レーザーでは、GaAs系赤外・赤色面発光レーザーが実現し、顔認証などの光源として実用化されている。GaInN系青・緑色面発光レーザーが実現すれば、三原色が揃い、メガネ型ディスプレイ、アダプティブヘッドライトなどの次世代光源として、安心・安全社会実現に大きく貢献する。

本研究では、GaInN系反射鏡、光閉じ込め、電流狭窄などの必須構造を、生産性の観点も考慮した手法で検討した。その結果、波長410nmにて光出力4.4mW、GHzレベルの高速変調の可能性などを実証した。上述したアプリケーションへの社会実装に必要な要素技術の確立と今後の方向性を明確にした。

研究成果の概要(英文)：A light output power (LOP) is increased from previous 3mW to 4.4mW this time by including a newly developed SiO<sub>2</sub> optical confinement structure and a long vertical cavity. A device resistance is also reduced to 2/3 with an optimized conducting AlInN/GaN DBR, compared with an undoped DBR. We have developed low resistive GaInN tunnel junctions and demonstrated a GaInN-based VCSELs with a tunnel junction, showing a 2mW LOP. By in-situ wafer curvature monitoring, we found that InN mole fraction was gradually increased along with a progress of the AlInN/GaN DBR epitaxial growth. We compensated for the increase by adjusting growth temperatures, resulting in a more uniform DBR. Regarding the long-wavelength active layer, an optimization of GaInN growth conditions on GaInN substrates was necessary because the results with the sapphire substrate case were very different from the GaInN substrate case. Finally, our VCSEL showed a feasibility for a high speed (GHz) modulation.

研究分野：半導体光デバイス

キーワード：面発光レーザー 窒化物半導体 多層膜反射鏡 トンネル接合

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

面発光レーザーは、面方向に光を出射するレーザーであり、半導体レーザーの高性能と発光ダイオードの高生産性を兼ね備える日本で発明された究極の発光素子である。これまでに砒化ガリウム (GaAs) を用いた赤外・赤色面発光レーザーが実現し、レーザーマウス、プリンタ、顔認証などの光源として実用化された。窒化ガリウム (GaN) による青・緑色面発光レーザーが実現すれば、高品位三原色が揃い、メガネ型ディスプレイ、アダプティブヘッドライト、可視光通信などの次世代光源として、安心・安全社会実現に大きく貢献する。

しかしながら、この青色面発光レーザーの最大光出力は 1mW 程度に限定されていた。研究代表者は、面発光レーザーの必須構造である、半導体多層膜反射鏡 (半導体 DBR) 電流狭窄構造などを、GaN にて独自かつ着実に実現し、発光波長 410nm において世界最高出力である 3mW を示す面発光レーザーを実現した。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、研究代表者が実現した GaN 系紫色面発光レーザーをもとに、高効率・高出力化、長波長化、高速変調と、三つの特性を進展させ、高品位三原色光源に適した青・緑色面発光レーザーの要素構造確立とその実現を目指した。

### 3. 研究の方法

(1)高効率・高出力に向けて、赤外面発光レーザーに倣って、導電性 DBR 構造、短共振器構造、横方向閉じ込め構造、そしてトンネル接合電流狭窄構造をそれぞれ形成し、素子に適用した。

(2)長波長化に関して、DBR の長波長化と GaInN 活性層の長波長化の双方を検討した。

(3)試作した GaN 系面発光レーザーの変調特性の測定を行った。

面発光レーザー層構造は全て MOVPE 法にて形成した。下部 DBR は全て半導体 DBR である。その後、フォトリソグラフィにより、40 $\mu\text{m}$  径の円形メサ、約 10 $\mu\text{m}$  径の電流注入領域を有する面発光レーザーを形成した。上部 DBR は誘電体 DBR である。

### 4. 研究成果

#### (1)高効率・高出力

研究代表者らは 2016 年に世界に先駆けて導電性 DBR を有する GaN 系面発光レーザーを実現した ( )。これは、現時点でも代表者だけが有する独自技術である。一方で、当時の光出力は  $\mu\text{W}$  レベルであり、非導電性 DBR を有する素子 (数 mW) に比べ、非常に低い値であった。我々は、この導電性 DBR の最適化と、導電性 DBR を用いた場合だけに形成可能な短共振器 (1.5 ) 構造を有する GaN 系面発光レーザーを試作した。赤外面発光レーザーにおいては、短共振器構造は性能向上に有益であったが、短共振器 GaN 系面発光レーザーでは素子熱抵抗が大幅に増大し、特性を大きく劣化させる要因となることが初めて見出された。図 1 に示すように、熱抵抗の実験結果と理論計算結果との比較により、導電性 DBR に使用している AlInN 層の熱伝導率が極めて低いことが原因であることがわかった。実際、代表者の共同研究先は 10 という長共振器を用いることにより、世界最高出力 (15.7mW) を実現している ( )。

次に、共振器長を 4 に固定し、導電性 DBR の最適化、具体的には導電性 DBR 内 Si 濃度の低減を行い、素子を作製、評価した。その結果、最大光出力は 1.8mW を経て、最終的に図 2 に示す 2.6mW まで改善された。これは導電性 DBR を有する GaN 系面発光レーザーの光出力として世界最高値である。また、素子抵抗も 80 であり、非導電性 DBR の場合の 120 に比べ、大幅な低減が達成された。

続いて、横方向閉じ込めに関して、これまででは段差のある凸型構造を用いていたが、光散乱により光出力がかえって低下 (1mW) してしまうことがわかっていった。本研究では、SiO<sub>2</sub> 埋込構造を採用し、かつ形成工程を最適化して段差のない構造とすることで、図 3 に示すように、非導電性 DBR を用いた場合、4.4mW の最大光出力まで得られた。一方で、微分量子効率は光閉じ込め構造を有しない面発光レーザーと比べて、大きな改善は得られていない。すな

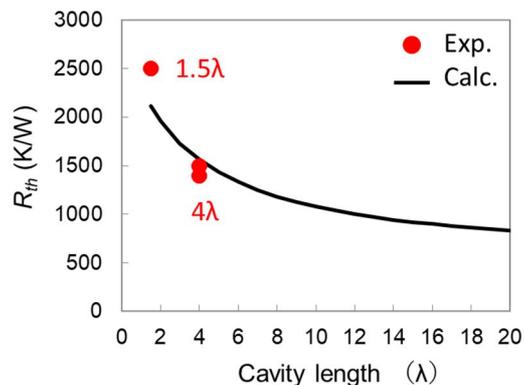


図 1 熱抵抗の共振器長依存性

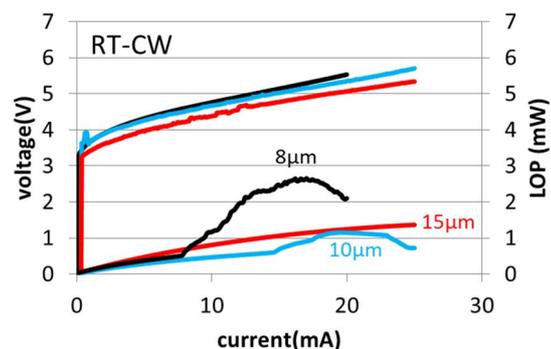


図 2 導電性 DBR 面発光レーザーの I-L-V 特性

わち、本来の目的である、横方向光散乱抑制による内部損失低減には大きな効果がなかったのが現状である。ところで、上述した導電性 DBR の場合の 2.6mW においても、同一の SiO<sub>2</sub> 埋込構造を採用している。すなわち、非導電性 DBR の場合に比べ、導電性 DBR の場合は最大光出力が低いことも判明した。導電性 DBR 上に GaInN 量子井戸活性層を形成すると、その表面平坦性が悪化し、かつフォトルミネッセンスの発光強度が低下することも明らかになった。

これまで、我々は GaInN を用いた低抵抗トンネル接合を実現してきた( )。より光吸収の少ないトンネル接合を目指して GaN によるトンネル接合の低抵抗化を進めた。その結果、従来の設計思想(アクセプタ不純物とドナー不純物はトンネル界面で急峻に切り替わる)と相反し、双方がオーバーラップする場合に、低抵抗 GaN トンネル接合が得られることを初めて明らかにした。図 4 に、トンネル接合における Mg と Si の不純物プロファイルを示す。このように Mg が完全に Si にオーバーラップされる場合に、 $2.4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$  という極めて低い値が得られた。並行して、GaInN トンネル接合電流狭窄構造を有する GaN 系面発光レーザーを試作し、評価した。図 5 に I-L-V 特性を示す。最大光出力は 2.0mW であり、上述した最大光出力には及ばないものの、一定の実現可能性を示すことができた。

以上に関して、今後の課題を記載する。導電性 DBR では、その上に形成された GaInN 活性層の品質低下が観測されたことから、導電性 DBR の結晶性改善をさらに推し進める必要がある。横方向光閉じ込め構造では、一定の効果が得られたものの、赤外面発光レーザーで期待されるほどの効果は得られなかったことから、新たな光閉じ込め構造の考案、あるいは光散乱以外の内部損失の可能性を検討する必要がある。トンネル接合に関しては、本研究で得られた、低吸収・低抵抗 GaN トンネル接合を用いた面発光レーザーを試作し、評価する必要がある。

## (2)長波長化

GaInN 量子井戸活性層の長波長化に向けて、サファイア基板の上に AlGaIn 薄膜バリア層と高温成長 GaN バリア層を利用して長波長 GaInN 量子井戸を有する LED を形成した。エピ成長条件の最適化により、発光波長 540nm において、光出力として青色 LED の 40%まで達成した。しかしながら、GaN 基板の上にこの構造をそのまま形成したところ、表面平坦性と発光強度の大幅な劣化が確認された。貫通転位密度の違いにより、高歪 GaInN 層の成長モードが大きく変わったと推察される。

続いて、DBR の長波長化について記載する。屈折率の波長分散により、一般的に長波長化させると、屈折率差は減少する方向である。AlInN/GaN の組み合わせも例外ではなく、長波長化させると、屈折率差が稼げなくなるとともに、波長が長くなる割合も相まって、必要な DBR 層膜厚は約 2 倍になってしまう。そこで当初は、GaN の代わりに、より高い屈折率が得られる GaInN を用いて屈折率差を稼ぎ、長波長 DBR を実現する方法を検討した。得られた結果からは、50nm 程度の厚さ、かつ表面平坦性の良好な GaInN 層の形成は、現状困難であると判断した。そこで、ペア数増大により、屈折率差低下に伴う反射率低下を補うアプローチに変更した。この場合の課題は、長時間におよぶ厚い DBR 形成により、表面平坦性が悪化し、かえって反射率が低下してしまう点である。この課題に対する一つの要因として、長波長 DBR における長時間成長での格子歪の推移を検討するため、その場合ウエハ曲率測定装置を導入した。サファイア基板の上に AlInN/GaN DBR をエピ成長させる際に、ウエハの曲率を測定し、その値から格子歪を算出した。その結果、図 6 に示すように、エピ成長が進行するに従って、曲率の傾きが下に向かって垂れ下がる、すなわち、

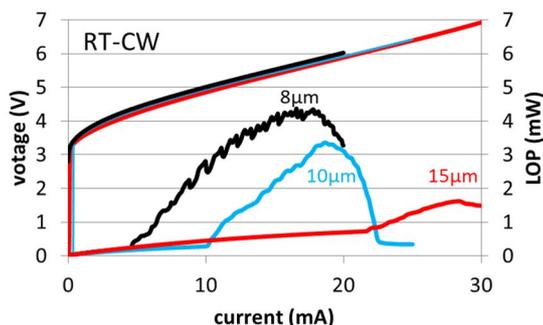


図 3 非導電性 DBR 面発光レーザーの

## I-L-V 特性

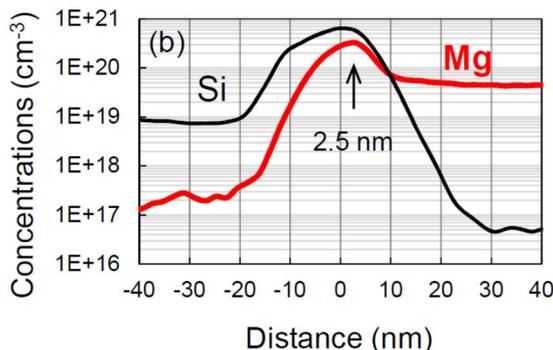


図 4 Mg と Si の濃度プロファイル

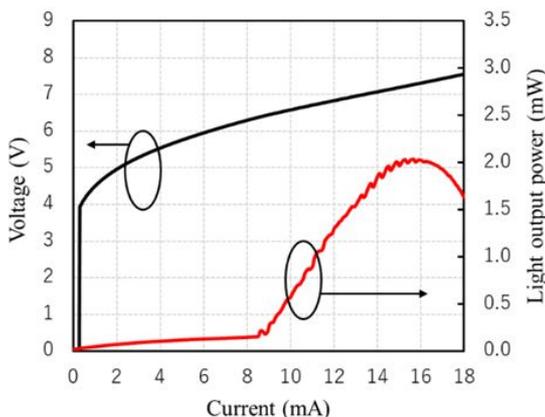


図 5 トンネル接合面発光レーザーの

## I-L-V 特性

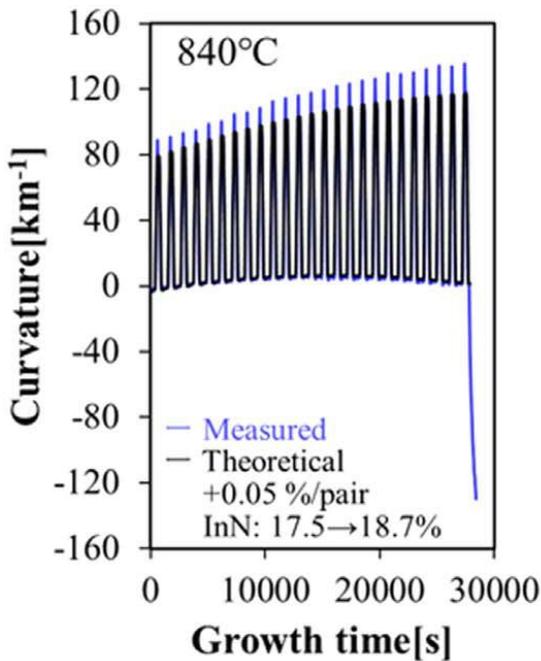


図6 AlInN/GaN DBR のウエハ曲率の  
時間推移（成長温度一定）

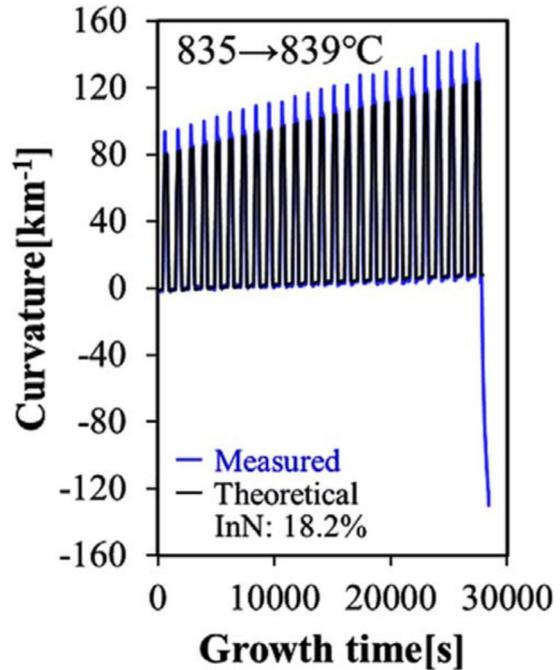


図7 AlInN/GaN DBR のウエハ曲率の  
時間推移（成長温度上昇）

格子歪が圧縮方向に増大していくことが初めて見出された。この結果を定量的に分析したところ、AlInNのInNモル分率が1ペア毎に0.04%程度増大すると解釈できた。この結論を踏まえて、InNモル分率の増大分を成長温度で補償するエピ成長（5ペアで1上昇）を行った。その結果を図7に示す。補償の効果により、曲率の傾きは一定、すなわちAlInN層のInNモル分率は最初の層と最後の層で変化しない、より均一なDBRを実現することができた。

以上に関して、今後の課題を整理する。GaN基板上長波長GaInN活性層のエピ条件を新たに最適化する必要がある。特に、GaInN量子井戸層そのものの高品質化に立ち返って検討する必要があると考えられる。長波長DBRとしては、今後、GaN基板上DBRにその場曲率測定を適用し、サファイア基板上の場合の結果と比較検討することで、表面平坦性が良好で、クラックのない長波長DBRの実現を目指す。

### (3)高速変調

GaN系面発光レーザーの変調特性に関する報告は極めて少ない( )。本研究では、試作したGaN系面発光レーザーの変調特性を測定した。5V程度の直流電圧印加下に、さらに正弦波電圧を印加した。その結果、図8に示すように、1GHzまで明瞭な発振ピークが、初期的結果として得られた。今後は、適切な電極パターンや低誘電率樹脂埋込など、より高速変調に適した素子構造を試みて、GaN系面発光レーザーの変調特性を見極める必要がある。

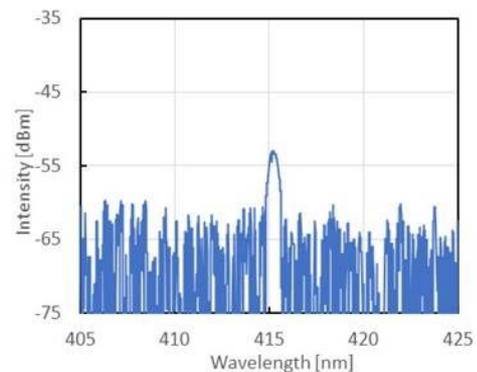


図8 1GHz変調時の発振スペクトル

### <引用文献>

- K. Ikeyama et al., Appl. Phys. Express 9, 102101 (2016).
- M. Kuramoto et al., Appl. Phys. Express 11, 112101 (2018).
- D. Takasuka et al., Appl. Phys. Express 9, 081005 (2016).
- C. Shen et al., CLEO 2016 STh1L2.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya and Isamu Akasaki	4. 巻 82
2. 論文標題 GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with AlInN/GaN distributed Bragg reflectors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Reports on Progress in Physics	6. 最初と最後の頁 1-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.1088/1361-6633/aad3e9">https://doi.org/10.1088/1361-6633/aad3e9</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 竹内 哲也 上山 智 岩谷 素顕 赤崎 勇	4. 巻 J101-C
2. 論文標題 高効率GaN面発光レーザーの現状と展望	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌 C	6. 最初と最後の頁 312-318
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 竹内 哲也	4. 巻 380
2. 論文標題 LED(発光ダイオード)からLD(半導体レーザー)へ：未来の光源としての期待	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 工業教育資料	6. 最初と最後の頁 7-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Akatsuka Yasuto, Iwayama Sho, Takeuchi Tetsuya, Kamiyama Satoshi, Iwaya Motoaki, Akasaki Isamu	4. 巻 12
2. 論文標題 Doping profiles in low resistive GaN tunnel junctions grown by metalorganic vapor phase epitaxy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 025502 ~ 025502
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="https://doi.org/10.7567/1882-0786/aafca8">https://doi.org/10.7567/1882-0786/aafca8</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 吉永純也、市川竜弥、竹内哲也、岩谷素顕、上山智、赤崎勇	4. 巻 23
2. 論文標題 GaN 量子井戸を用いた黄緑色発光ダイオードの作製	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 名城大学総合研究所紀要	6. 最初と最後の頁 41-44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hayashi Natsumi, Ogimoto Junichiro, Matsui Kenjo, Furuta Takashi, Akagi Takanobu, Iwayama Sho, Takeuchi Tetsuya, Kamiyama Satoshi, Iwaya Motoaki, Akasaki Isamu	4. 巻 -
2. 論文標題 A GaN-Based VCSEL with a Convex Structure for Optical Guiding	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 physica status solidi (a)	6. 最初と最後の頁 1700648 ~ 1700648
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssa.201700648	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 竹内哲也	4. 巻 46
2. 論文標題 n型導電性AlInN/GaN多層膜反射鏡を有するGaN系面発光レーザーの室温連続動作	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 光学	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計42件 (うち招待講演 18件 / うち国際学会 26件)

1. 発表者名 Junya Yoshinaga, Tatsuya Ichikawa, Tetsuya Takeuchi, Motoaki Iwaya, Satoshi Kamiyama, Isamu Akasaki
2. 発表標題 Growth of GaInN yellow-green LEDs
3. 学会等名 19th International Conference on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Wataru Muranaga, Ryota Fuwa, Takanobu Akagi, Shotaro Yoshida, Junichiro Ogimoto, Yasuto Akatsuka, Sho Iwayama, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, Isamu Akasaki
2. 発表標題 A 1.8mW GaN-based VCSEL with an n-type conducting bottom DBR
3. 学会等名 The International Workshop on Nitride Semiconductors 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平岩 恵, 村永 亘, 赤木 孝信, 竹内 哲也, 三好 実人, 上山 智, 岩谷 素顕, 赤崎 勇
2. 発表標題 GaN系長波長面発光レーザへ向けたAlInN/GaN多層膜反射鏡
3. 学会等名 第10回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kei Hiraiwa, Wataru Muranaga, Junichiro Ogimoto, Takanobu Akagi, Tetsuya Takeuchi, Satoshi, Kamiyama, Motoaki Iwaya, Isamu Aasaki
2. 発表標題 AlInN/GaN DBRs for long-wavelength GaN-based VCSELS
3. 学会等名 International Symposium of Growth of III-Nitrides ISGN-7 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 平岩 恵, 村永 亘, 岩山 章, 竹内 哲也, 上山 智, 岩谷 素顕, 赤崎 勇
2. 発表標題 "高品質AlInN/GaN多層膜反射鏡のための その場観察反り測定"
3. 学会等名 第66回 応用物理学会春期学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kei Hiraiwa, Wataru Muranaga, Sho Iwayama, Tetsuya Takeuchi, Satoshi, Kamiyama, Motoaki Iwaya, Isamu Aasaki
2. 発表標題 AlInN/GaN DBRs for long-wavelength GaN-based VCSELs
3. 学会等名 The 7th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisanori Kojima, Takuma Ogasawara, Myunghee Kim, Yoshiki Saito, Kazuyoshi Iida, Norikatsu Koide, Tetsuya Takeuchi, Motoaki Iwaya, Satoshi Kamiyama, Isamu Akasaki
2. 発表標題 Substrate off-angle and direction dependences on DUV-LED
3. 学会等名 The International Workshop on Nitride Semiconductors 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小島 久範, 小笠原 多久満, 金 明姫, 飯田 一善, 小出 典克, 竹内 哲也, 岩谷 素顕, 上山 智, 赤崎 勇
2. 発表標題 深紫外LED発光特性の基板オフ角・方向依存性
3. 学会等名 第79 回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kaoru Oda, Ryosuke Iida, Wataru Muranaga, Sho Iwayama, Tetsuya Takeuchi, Motoaki Iwaya, Satoshi Kamiyama, Isamu Akasaki
2. 発表標題 "Polarization characteristic of GaN-based VCSELs with AlInN/GaN DBRs "
3. 学会等名 The 7th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Ueshima, Wataru Muranaga, Ryosuke Iida, Sho Iwayama, Tetsuya Takeuchi, Satoshi, Kamiyama, Motoaki Iwaya, Isamu Aasaki
2. 発表標題 GaN based VCSELs using conducting AlInN/GaN DBRs with graded interfaces
3. 学会等名 The 7th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯田 涼介, 林 菜摘, 村永 亘, 岩山 章, 竹内 哲也, 上山 智, 岩谷 素顕, 赤崎 勇
2. 発表標題 SiO <sub>2</sub> 埋め込みによる光導波構造を有するIII族窒化物面発光レーザー
3. 学会等名 電子情報通信学会 レーザ・量子エレクトロニクス研究会(Laser and Quantum Electronics)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ryosuke Iida, Wataru Muranaga, Sho Iwayama, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, Isamu Akasaki
2. 発表標題 Embedded SiO <sub>2</sub> waveguide structure for GaInN VCSELs
3. 学会等名 11th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials 12th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ryosuke Iida, Wataru Muranaga, Sho Iwayama, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, Isamu Akasaki
2. 発表標題 Lateral current distribution in GaN-based VCSELs with conducting AlInN/GaN DBRs
3. 学会等名 The 7th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒川 溪, 三好 晃平, 竹内 哲也, 三好 実人, 上山 智, 岩谷 素顕, 赤崎 勇
2. 発表標題 AlInN/AlGaN多周期クラッド層を用いた青色端面発光レーザダイオード
3. 学会等名 第10 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kei Arakawa, Kohei Miyoshi, Tetsuya Takeuchi, Makoto Miyoshi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, Isamu Akasaki
2. 発表標題 Blue edge-emitting laser diodes with AlInN/AlGaN multiple cladding layers
3. 学会等名 The International Workshop on Nitride Semiconductors 2018 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki
2. 発表標題 GaInN VCSELs with semiconductor-based DBRs
3. 学会等名 SPIE photonics Europe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki
2. 発表標題 Electrically-injected GaN-based VCSELs
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki
2. 発表標題 GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with MOVPE-grown AlInN/GaN DBRs
3. 学会等名 ICMOVPE XIX (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki
2. 発表標題 GaN-based VCSELs: Their Progress and Prospects
3. 学会等名 MOC2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki
2. 発表標題 Low resistive GaN tunnel junctionsgrown by MOVPE
3. 学会等名 Photonics West OPTO (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki
2. 発表標題 GaN-based VCSELs with conducting AlInN/GaN DBRs
3. 学会等名 Photonics West OPTO (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 J. Yoshinaga, K. Suzuki, D. Takasuka, N. Koide,
2. 発表標題 Low-temperature-grown p-side structure with tunnel junction towards long wavelength nitride-based LED
3. 学会等名 The 5th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 吉永純也,市川達弥,鈴木健太,小出典克,竹内哲也,岩谷素顕,上山智,赤崎勇
2. 発表標題 トンネル接合を用いた低温成長 p 側構造黄色 LED の作製
3. 学会等名 第78回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 平岩 恵,荻本 純一郎,赤塚 泰斗,村永 亘,赤木 孝信,竹内 哲也,上山 智,岩谷 素顕,赤崎 勇
2. 発表標題 GaN系長波長面発光レーザーへ向けたAlInN/GaN多層膜反射鏡
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki
2. 発表標題 GaN-based VCSELs towards high efficiency
3. 学会等名 OPIC 2017 LDC ' 17 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内哲也、上山 智、岩谷素顕、赤崎 勇
2. 発表標題 名城大学におけるGaInN系面発光レーザの現状とその展望
3. 学会等名 光電相互変換第125委員会 第236回研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内哲也、上山 智、岩谷素顕、赤崎 勇
2. 発表標題 高効率窒化物半導体発光素子に向けた新展開
3. 学会等名 ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第162委員会 第104回合同研究会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki
2. 発表標題 GaInN VCSELs with AlInN/GaN DBRs
3. 学会等名 ICNS ' 12th International Conference on Nitride Semiconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内哲也、岩谷素顕、上山 智、赤崎 勇
2. 発表標題 窒化物半導体における新しい導電性制御： トンネル接合と分極ドーピング
3. 学会等名 第36回電子材料シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Takeuchi, M. Iwaya, S. Kamiyama, and I. Akasaki
2. 発表標題 Alternative hole injections in nitride-based light-emitting devices
3. 学会等名 2017 MRS Fall Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki
2. 発表標題 High-performance GaN-based VCSELs
3. 学会等名 2017 IEEE Photonics Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Takeuchi, M. Iwaya, S. Kamiyama, and I. Akasaki
2. 発表標題 MOVPE-grown GaN-based tunnel junction and its application
3. 学会等名 Photonics West OPTO (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹内哲也、上山 智、岩谷素顕、赤崎 勇
2. 発表標題 GaN系面発光レーザーの開発と展望
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第38回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki
2. 発表標題 GaInN VCSELs with semiconductor-based DBRs
3. 学会等名 SPIE photonics Europe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹内哲也、上山 智、岩谷素顕、赤崎 勇
2. 発表標題 半導体多層膜反射鏡を有するGaN系面発光レーザの高効率・高出力化
3. 学会等名 第3回パワー光源及び応用システム調査専門委員会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 R. Fuwa, D. Takasuka, Y. Akatsuka, T. Takeuchi, M. Iwaya, S. Kamiyama, and I. Akasaki
2. 発表標題 GaN/GaN tunnel junctions grown by MOVPE
3. 学会等名 LEDIA' 17 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 不破綾太、赤塚泰人、竹内哲也、岩谷素顕、上山智、赤崎勇
2. 発表標題 MOVPE法による低抵抗GaNトンネル接合
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 R. Fuwa, Y. Akatsuka, T. Takeuchi, M. Iwaya, S. Kamiyama, and I. Akasaki
2. 発表標題 Low resistive GaN tunnel junctions grown by MOVPE
3. 学会等名 2017 MRS Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 N. Hayashi, K. Matsui, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, I. Akasaki
2. 発表標題 GaN-based VCSELs with lateral optical confinement structures
3. 学会等名 ICNS-12 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 池山 和希、小塚 祐吾、松井 健城、吉田 翔太郎、赤木 孝信、赤塚 泰斗、小出 典克、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕、赤崎 勇
2. 発表標題 (優秀論文賞受賞記念講演) Room-temperature continuous-wave operation of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with n-type conducting AlInN/GaN distributed Bragg reflectors
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 赤塚 泰斗、不破 綾太、岩山 章、竹内 哲也、岩谷 素顕、上山 智、赤崎 勇
2. 発表標題 面発光レーザへの応用に向けた窒化物半導体埋め込みトンネル接合
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 赤塚 泰斗、不破 綾太、岩山 章、竹内 哲也、岩谷 素顕、上山 智、赤崎 勇
2. 発表標題 GaNトンネル接合の低抵抗化に向けた不純物プロファイルの最適化
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 S. Rajan, T. Takeuchi	4. 発行年 2017年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 209-238
3. 書名 III-Nitride Tunnel Junctions and Their Applications	

〔出願〕 計4件

産業財産権の名称 窒化物半導体多層膜反射鏡	発明者 竹内哲也、平岩 恵、岩山 章、上山 智、岩谷 素顕、赤	権利者 名城大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-228857	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 窒化物半導体発光素子の製造方法、及び窒化物半導体発光素子	発明者 竹内哲也、岩谷基 顕、赤塚泰斗、岩山 章、赤崎勇	権利者 名城大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-217351	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 窒化物半導体発光素子の製造方法、及び窒化物半導体発光素子 番号：特願2017-217348	発明者 竹内哲也、岩谷基 顕、不破綾太、岩山 章、赤崎勇	権利者 名城大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-217348	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 窒化物半導体光素子	発明者 竹内哲也、岩谷基 顕、上山智、赤崎勇	権利者 名城大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2017-239235	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	田中 崇之  (Tanaka Takayuki)  (10367120)	名城大学・理工学部・准教授    (33919)	
研究分担者	宮嶋 孝夫  (Miyajima Takao)  (50734836)	名城大学・理工学部・教授    (33919)	
研究分担者	井手 利英  (Ide Toshihide)  (90397092)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員    (82626)	