

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：33919

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00353

研究課題名(和文) 大口径・高出力青緑色面発光レーザーの開発

研究課題名(英文) Development of large-aperture high-power blue green VCSELs

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) 35,900,000円

研究成果の概要(和文)：大口径高出力青緑色面発光レーザー実現を目指し、複数の要素構造・技術を確立した。水素クリーニング導入により高品質導電性DBR(貫通転位が従来より2桁低減)を達成した。GaN表面酸化電流狭窄により、VCSELと同等の10数 μm 径LEDを実証した。0.3nm AlNキャップ層導入によりトレンチ欠陥発生が抑制されたGaInN量子井戸(波長540nm)が形成可能になったが、発光強度は発振実績のある紫色量子井戸の1/5と改善が必要である。その場反射率スペクトル測定により、共振波長制御の精度を0.5%(従来1/4)まで高めた。今後の緑色面発光レーザーの実現に向けて極めて有用な技術を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、緑色VCSELの実証には至らなかったが、複数の要素構造・技術を確立した。さらなる発展により、緑色VCSEL実証が成し遂げられれば、低消費電力網膜走査ディスプレイ、低眩惑アダプティブヘッドライト、室内・水中光無線通信、ドローンなどの移動体や被災地への光無線給電、超小型バイオセンサーなどの光源として活用され、安心・安全社会実現に大きく貢献するだろう。学術的な観点からは、Inを含む半導体エピタキシャル成長技術、窒化物半導体酸化技術、そして、その場観察技術など、材料工学やデバイス工学の発展に寄与し、将来の光デバイスに留まらずパワーデバイス実現にも大きく貢献すると期待できる。

研究成果の概要(英文)：Novel structures and techniques towards large-aperture high-power bluegreen VCSELs have been established. High-quality (two orders of magnitude lower threading dislocation density) conducting DBRs were demonstrated by hydrogen cleaning. About-10- μm -aperture LEDs (same as VCSELs) were demonstrated by GaN surface-oxidation current confinement. GaInN QWs emitting 540 nm without trench defects were obtained with 0.3 nm AlN cap layers, but the light output power was still 1/5 compared to the purple GaInN QWs in VCSELs, suggesting that further improvements are necessary. An accuracy of resonance wavelength control in VCSEL was improved to 0.5% (down to 1/4 compared to the previous case). The above structures and techniques open the door for a demonstration of Green VCSELs in the future.

研究分野：半導体デバイス、結晶成長

キーワード：面発光レーザー エピタキシャル成長 その場観察

1. 研究開始当初の背景

面発光レーザー (VCSEL) は、図 1 のように基板垂直方向にレーザー光を放射し、低消費電力、低コスト、単一縦モード、円形ビーム形状、二次元アレイ化などの優れた特徴を有する。今では、赤外 850 nm 帯ガリウム砒素 (GaAs) 系 VCSEL が、レーザーマウス、データセンター内光通信、スマートフォン用顔認証の光源として広く利用されている。



図 1 名城大で作製した VCSEL

可視域では、赤色 VCSEL が実用化されたものの、窒化物半導体 (GaN) を用いた紫～緑色 VCSEL は実用化に至っていない。紫～緑色まで拡張できれば、低消費電力と 3D 映像表示が可能な網膜走査ディスプレイ、夜間視野を大幅に改善する低眩惑アダプティブヘッドライト、室内・水中光無線通信 (LiFi)、ドローンなどの移動体や被災地への光無線給電、そして超小型バイオセンサーの光源として応用先が大幅に拡大し、安心・安全社会実現に大きく貢献する。現在、この GaN 系 VCSEL は盛んに開発が進められ、日本企業 2 社から青色領域にて 10 mW を超える最大光出力が報告されている。しかしながら、上述した応用への適用を具現化するには、

- (1) 高出力化とビーム形状制御を可能にする発光径大口径化
- (2) 発光波長の長波長化
- (3) その場反射スペクトル測定による高精度共振波長制御が必要な状況である。

2. 研究の目的

上記背景を鑑み、本研究では、大口径 (～30 μm) ・高出力 (～30 mW) ・青緑色 (～500 nm) VCSEL 実現を目的とした。そして、これを実現するための新規要素構造・技術として、以下の四つ (①～④) を掲げ、その確立を遂行した。

- (1) 大口径化：①導電性多層膜反射鏡 (DBR) の高品質化、②AlInN 酸化電流狭窄構造
 - (2) 長波長化：③高 InN モル分率 GaInN 量子井戸の高品質化
 - (3) 高精度共振波長制御：④その場反射率スペクトルによるその場共振波長制御
- 最終的に、(1)～(3)までを組み込んだ VCSEL 形成を目指した。

3. 研究の方法

①では、導電性 DBR 界面で発生する貫通転位発生抑制に向けて、AlInN 層成長後の表面クリーニングとして、新たに水素を導入、高品質化を図った。②では、最終的に GaN 表面を酸化することで数～数 10 μm 径の電流狭窄構造を有する LED を形成した。③では、緑色 GaInN 量子井戸に発生する特有のトレンチ欠陥低減を目指して井戸成長後に AlN 極薄膜を導入した。④では、その場反射率スペクトル測定装置を導入し、成長中のその場共振波長制御を確立した。

4. 研究成果

①導電性 DBR の高品質化

AlInN/GaN DBR 成長において、各 AlInN 層成長後に水素を導入し、その DBR 最終表面に発生するピット (貫通転位) 密度を評価した。図 2 に、成長装置に流した全流量に対する水素の割合に対する、AlInN/GaN DBR 表面に発生するピット密度を示す。最適条件 (水素比 0.979) の場合、水素を導入しない場合と比較して 2 桁近くピット密度を低減させられることがわかった。その最適水素供給条件を用いて 40 ペアの Si ドープ導電性 AlInN/GaN DBR を形成した。その断面 TEM 像を図 3 に示す。界面から発生する貫通転位は観測されず、従来のアンドープ DBR と同等の結晶品質 (貫通転位密度： $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 未満) を達成した。

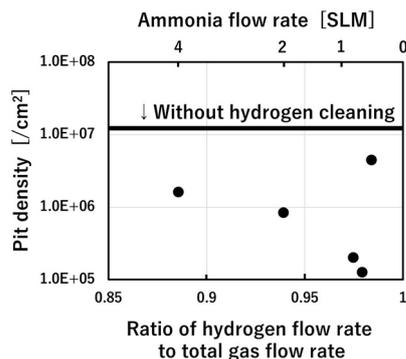


図 2 水素比に対するピット密度

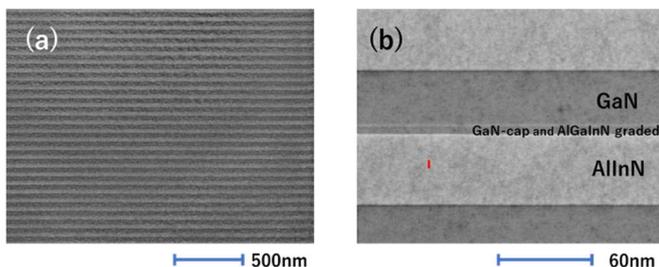


図 3 水素クリーニングを用いた導電性 DBR の断面 TEM

また、最大反射率は 99.8% (波長 399nm)、抵抗は 15Ω であり、反射率特性、電気的特性ともに極めて良好な値を示した。従来、熱処理による表面クリーニングにて貫通転位密度の低減が可能であったが (文献①)、熱処理のみならず水素導入によっても AlInN 表面の清浄化が可能なが判明し、AlInN 表面に過剰に存在する In 原子 (より詳しくは In-In 結合と推察) の除去による貫通転位発生の抑制という描像が推察された。

② AlInN 酸化電流狭窄構造 (表面 GaN 酸化狭窄構造)

本要素構造検討では、元々、より酸化されやすいと考えられる AlInN 層の、新規ミスト酸化法を用いた横方向選択酸化を目論んでいた。本研究により遂行した AlInN 層横方向選択酸化の一例として、ミスト酸化法により 850°C で 6 時間の酸化処理を行った後の断面 TEM 像を図 4 に示す。AlInN 層が選択的に酸化されることがわかったものの、酸化速度が 0.2~0.3 μm/h と遅く、かつ多数のクラックが形成されることもわかった。ゆえに、本研究で検討した範囲内では、AlInN 横方向選択酸化は難しく、電流狭窄構造形成には適さないと判断した。

代わりに、遅い酸化レートでも狭窄構造を形成可能な、表面からの酸化狭窄構造形成に方針を切り替えて検討した。標準的な LED ウエハを用いて、図 5 に示すように、p 側電極を形成する領域をマスクし、それ以外の領域をミスト酸化法により 700°C、10 分間処理し、表面から 10nm 程度酸化させた。図 5 の挿入図 (近視野像) が示すように、ほぼ設計通り (15μm 径) に電流が狭窄され、図 6 が示すように、電流電圧光出力特性も従来のエッチングによる電流狭窄構造と比べて遜色ない特性が得られるなど、酸化狭窄構造を有する GaN 系 LED を初めて実証した。一方で、リーク電流による歩留まりの低下が顕著であり、さらなる改善 (マスク材の選択) が必要な状況でもある。

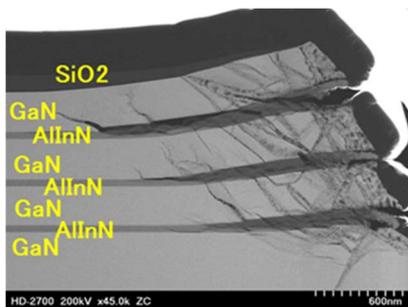


図 4 選択酸化 AlInN の断面 TEM

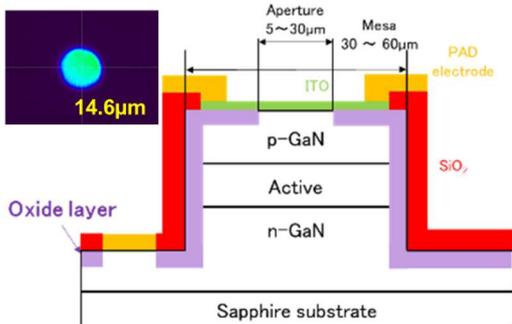


図 5 表面酸化狭窄構造 LED とその近視野像

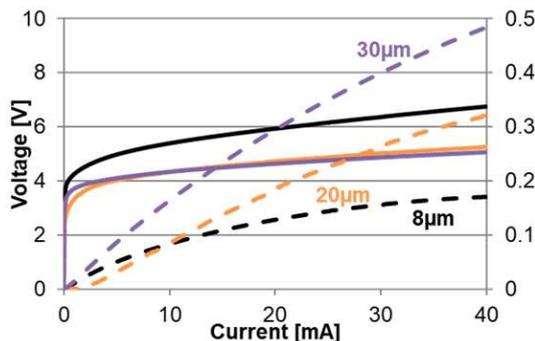


図 6 表面酸化狭窄構造 LED と I-L-V 特性

③ 高 InN モル分率 GaInN 量子井戸の高品質化

高 InN モル分率を有する緑色 GaInN 量子井戸では、紫や青色量子井戸に比べ、その発光強度の著しい低下が課題である。すなわち、非発光再結合が多く存在している。同時に、結晶表面にはトレンチ欠陥と呼ばれる、V 字状溝で囲まれた幅 1μm 弱の欠陥領域が形成されることもわかっている。これは結晶成長時に供給しなければならない過剰の In 原料により、表面に In-In 結合が形成されドメイン反転が生じるためと考えられている。様々な検討を行った結果、従来から用いられている数 nm の AlN キャップ層の層厚を 0.3nm と原子層一層程度を水素を導入しながら形成することで、上記サイズのトレンチ欠陥をほぼ抑制できること (図 7)、それに伴い、フォトルミネッセンス強度を大幅に改善できること (図 8) を見出した。さらに、GaN バリア層の最適化も行い、高い成長温度と水素導入により、トレンチ欠陥発生を完全に抑制し、原子層ステップの観測できる表面を実現した。一方で、この GaN 障壁層が最適化された試料では、フォトルミネッセンス強度のさらなる改善は得られなかった。最終的に、緑色 GaInN 活性層を有す

る LED を作製した結果、すでに VCSEL 動作が実証された紫色活性層とその発光強度を比較すると 1/5 程度に留まっており、緑色 VCSEL 動作実現に向けて、少なくとも、さらに数倍の発光強度改善が必要な状況である。

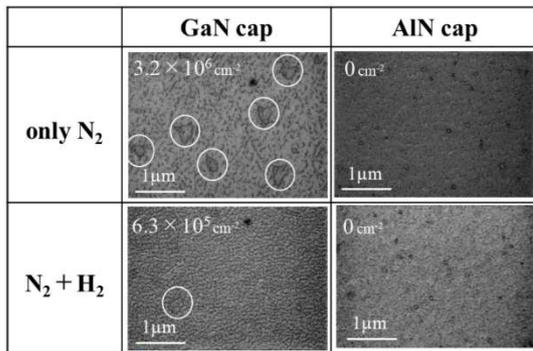


図 7 高 InN モル分率 GaInN 量子井戸の表面 SEM 像 (AlN 層・水素導入ありなし)

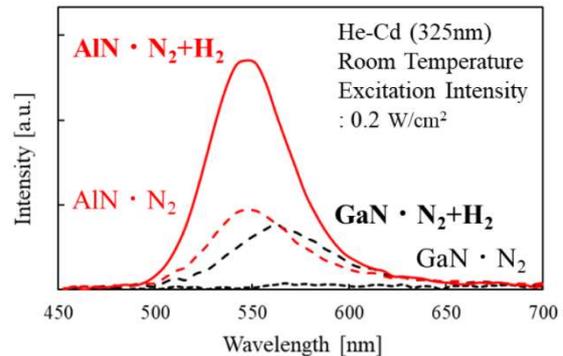


図 8 高 InN モル分率 GaInN 量子井戸の室温 PL スペクトル (AlN 層・水素導入ありなし)

④その場反射率スペクトルによるその場共振波長制御

面発光レーザー層構造成長時にその場反射率スペクトル装置を用いて共振波長制御する手法は GaAs 系では確立されているが、GaN 系ではほとんど報告がない。反射率スペクトルを用いて成長中に制御するという事は、各成長温度における共振波長の波長シフトの把握が大前提であり、GaN 系に関しては、この情報が不足していた。本研究では、反射率スペクトル測定装置をエピタキシャル成長装置に設置し、成長中にその場で観測できるように設定し、その検討を進めた。

まず、AlInN/GaN DBR の中心波長 (共振波長に設定される) の波長シフトの温度依存性を測定した。その結果、室温から成長温度 (1100°C) にすると中心波長が 23nm まで線形にシフトすることが明らかになった。続いて、この波長シフトを考慮し、DBR 上に GaN 共振器を共振波長での強度を観測しながら成長させた。図 9 に示すように、共振状態に応じた明瞭な強度の上下振動が観測でき、成長温度での共振波長 (室温におけるターゲット波長から成長温度による波長シフトを考慮) において、4 波長分の共振器を形成した。その室温での共振波長を測定したところ、設計共振波長 406nm に対し、作製された共振器の共振波長は 404nm と 2nm の違い、すなわち 0.5% の精度で共振器長を制御できることがわかった。これは、その場観察装置を導入する以前の従来の精度である 2% から 1/4 まで低減できた。面発光レーザーでは意図的に共振波長を 5~10nm 程度長くすることで高温動作時の特性を良好にする設計 (デチューニング) が採用されるが、以前の作製精度では 8nm ばらつき可能性があり、適切なデチューニングを設けることが困難であったが、本手法により 2nm まで低減でき、良好な面発光レーザーが再現性良く形成できる可能性が大幅に向上した。

最後に、実際に VCSEL 層構造をその場反射率スペクトル測定を行いながら成長させた。40 ペアの AlInN/GaN DBR 上に紫色 GaInN 量子井戸と pn 接合を有する共振器を形成するが、ここでの課題は共振器形成時に成長温度を変える、すなわち、共振波長が変わる点である。最初の検討で明らかになった、共振波長が温度に伴って線形にシフトすることを考慮し、n-および p-GaN を形成する成長温度 (1050°C) での共振波長 (432nm) と GaInN 量子井戸を形成する成長温度 (800°C) での共振波長 (427nm) の二波長における反射率強度の推移を観測した。その結果を図 10 に示す。設計上、n-GaN では 2.7 波長、p-GaN では合計 3.7 波長位置でそれぞれ成長を終了する必要があるが、中途半端な層厚になっている。そこで、2.5 波長や 3.5 波長など強度が極小値となる明確な点を参考に、一方、2 波長分成長時までにはその場で得た成長速度を参考に 2.7 波長および 3.7 波長位置を精度よく判断する手法を考案した。さらに活性層形成時にはその温度に則した共振波長を用いることで活性層位置が設計値である 3 波長位置に存在することも検証できた。このように、複数の成長温度にわたるエピタキシャル成長であっても、温度に対する波長シフトを把握することで精度よく観測、制御できることがわかった。この結果は、同様に成長温度が変わる AlInN/GaN DBR 形成にも適用可能で、今後、DBR の中心波長もその場制御できる可能性が示された。

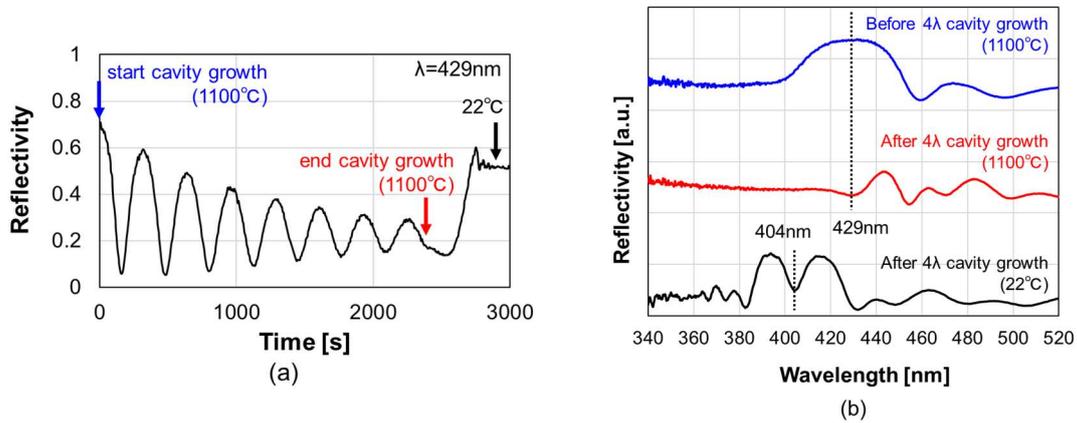


図9 AlInN/GaN DBR 上の 4λ GaN 共振器形成時の (a) 反射率強度の推移と (b) 反射率スペクトル

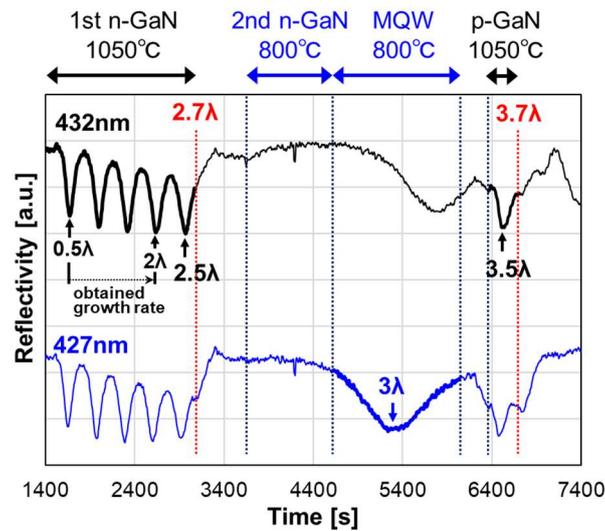


図10 GaN 面発光レーザー形成時の 1050°Cと 800°Cでの共振波長における反射率強度の推移

上述したように、各要素構造の達成状況は、①導電性多層膜反射鏡 (DBR) の高品質化では 100%、②表面 GaN 酸化狭窄では 70% (歩留まり改善が必要)、③高 InN モル分率 GaInN 量子井戸の高品質化では 40% (さらに数倍の発光強度改善が必要)、④その場反射率スペクトルによるその場共振波長制御では 100%と考えている。緑色 VCSEL に必要な活性層の高品質化が不十分であり、現時点で緑色 VCSEL の実証には至っていない。一方で、導電性 DBR の高品質化とその場共振波長制御では期待通りの結果が得られ、GaN 面発光レーザーの高性能化に大いに役立つ内容であると考えている。今後は、緑色 GaInN 量子井戸の高品質化を着実に進め、緑色 VCSEL 実証を達成したい。そして、デバイス研究開発という総合力を求められる内容においても、高い競争力を発揮できるような新規要素技術の開発、そしてそれらの最適統合による高性能デバイス実証を遂行していく所存である。

<引用文献>

- ① Akagi et al., Appl. Phys. Express 13, 125504 (2020).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kana Shibata, Tsuyoshi Nagasawa, Kenta Kobayashi, Ruka Watanabe, Takayuki Tanaka, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Toshihiro Kamei	4. 巻 15
2. 論文標題 High-quality n-type conductive Si-doped AlInN/GaN DBRs with hydrogen cleaning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 112007-1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac9bc9	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	4. 巻 17
2. 論文標題 窒化物半導体面発光レーザーの最近の動向	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 一般財団法人光産業技術振興協会オプトニュース	6. 最初と最後の頁 1
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 Takeuchi Tetsuya, Kamiyama Satoshi, Iwaya Motoaki, Akasaki Isamu	4. 巻 36
2. 論文標題 GaN-based tunnel junctions and optoelectronic devices grown by metal-organic vapor-phase epitaxy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Semiconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 063001 ~ 063001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6641/abeb82	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 Kiyohara Kazuki, Odawara Mahito, Takeuchi Tetsuya, Kamiyama Satoshi, Iwaya Motoaki, Akasaki Isamu, Saito Tatsuma	4. 巻 13
2. 論文標題 Room-temperature continuous-wave operations of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with buried GaInN tunnel junctions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 111003 ~ 111003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abbe80	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 Iida Ryosuke, Ueshima Yusuke, Iwayama Sho, Takeuchi Tetsuya, Kamiyama Satoshi, Iwaya Motoaki, Akasaki Isamu, Kuramoto Masaru, Kamei Toshihiro	4. 巻 14
2. 論文標題 Aperture diameter dependences in GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with nano-height cylindrical waveguide formed by BCl ₃ dry etching	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 012003 ~ 012003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abcf7	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 Akagi Takanobu, Kozuka Yugo, Ikeyama Kazuki, Iwayama Sho, Kuramoto Masaru, Saito Tatzuma, Tanaka Takayuki, Takeuchi Tetsuya, Kamiyama Satoshi, Iwaya Motoaki, Akasaki Isamu	4. 巻 13
2. 論文標題 High-quality AlInN/GaN distributed Bragg reflectors grown by metalorganic vapor phase epitaxy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 125504 ~ 125504
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abc986	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 田先美貴子, 清原一樹, 小田原麻人, 伊藤太一, 竹内哲也, 上山 智, 岩谷素顕, 赤崎 勇	4. 巻 120
2. 論文標題 GaNトンネル接合を備えたLEDにおける横方向Mg活性化の最適化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 信学技報	6. 最初と最後の頁 67 ~ 70
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 Tsuyoshi Nagasawa, Kenta Kobayashi, Ruka Watanabe, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya and Toshihiro Kamei	4. 巻 -
2. 論文標題 In-situ cavity length control of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with in-situ reflectivity spectra measurements	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	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) 10.35848/1347-4065/acdba9	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 -

〔学会発表〕 計43件（うち招待講演 16件 / うち国際学会 20件）

1. 発表者名 竹内哲也、上山智、岩谷素顕
2. 発表標題 VCSELおよびEEL向けトンネル接合の最新の進展
3. 学会等名 ワイドギャップ半導体学会（WideG）第6回研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹内哲也、上山智、岩谷素顕
2. 発表標題 GaN VCSELの最新動向
3. 学会等名 第1回光技術動向調査委員会 トピックス講演（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹内哲也、上山智、岩谷素顕
2. 発表標題 窒化物半導体面発光レーザー：多層膜反射鏡と電流狭窄構造
3. 学会等名 応用物理学会 応用電子物性分科会研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Takeuchi, S. Kamiyama, and M. Iwaya
2. 発表標題 GaN-based VCSELs with conductive AlInN/GaN DBRs
3. 学会等名 ICMOVPE XX（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Takeuchi, S. Kamiyama, and M. Iwaya
2. 発表標題 GaN-based tunnel junctions and laser diodes
3. 学会等名 IWN2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya
2. 発表標題 MOVPE-growth of conductive AlInN/GaN DBRs towards GaN-based VCSELs
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya
2. 発表標題 Status and prospects of blue vertical-cavity surface-emitting lasers
3. 学会等名 OWPT2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kenta Kobayashi, Kana Shibata, Tsuyoshi Nagasawa, Ruka Watanabe, Kodai Usui, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, and Motoaki Iwaya
2. 発表標題 N-type conducting Si-doped AlInN/GaN DBRs with AlGaIn graded layers
3. 学会等名 OPIC LEDIA 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林憲汰、柴田夏奈、長澤剛、渡邊琉加、臼井広大、岩山章、竹内哲也、上山智、岩谷素顕
2. 発表標題 AlGa _N 組成傾斜層を有するn型導電性 AlInN/GaN DBR
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenta Kobayashi, Kana Shibata, Tsuyoshi Nagasawa, Ruka Watanabe, Kodai Usui, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, and Motoaki Iwaya
2. 発表標題 MOVPE-grown n-type conducting AlInN/GaN DBRs with AlGa _N graded layers
3. 学会等名 ISPlasma 2023/IC-PLANTS 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小林憲汰、長澤剛、柴田夏奈、竹内哲也、上山智、岩谷素顕
2. 発表標題 AlInN/GaN DBRのその場反射率スペクトル測定
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 長澤剛、柴田夏奈、稲垣徹郎、竹内哲也、上山智、岩谷素顕
2. 発表標題 GaN系面発光レーザ構造のその場反射率スペクトル測定
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tsuyoshi Nagasawa, Kana Shibata, Kenta Kobayashi, Ruka Watanabe, Tetsuya Takeuchi, Motoaki Iwaya, and Satoshi Kamiyama
2. 発表標題 In-situ reflectivity spectra measurements of GaN-Based VCSELs
3. 学会等名 ISLC 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柴田夏奈、稲垣徹郎、長澤剛、竹内哲也、上山智、岩谷素顕
2. 発表標題 高品質導電性 AlInN/GaN DBR 形成に向けた水素クリーニング
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kana Shibata, Tsuyoshi Nagasawa, Tetsuya Takeuchi, Motoaki Iwaya, and Satoshi Kamiyama
2. 発表標題 Hydrogen cleaning for high-quality conductive AlInN/GaN DBRs
3. 学会等名 ISLC 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊琉加、松本浩輝、長澤剛、小林憲汰、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕
2. 発表標題 ミスド供給酸化を用いた電流狭窄型青色LED
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ruka Watanabe, Tsuyoshi Nagasawa, Kenta Kobayashi, Mitsuki Yanagawa, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, and Motoaki Iwaya
2. 発表標題 A blue LED with current confinement formed by mist particle supply oxidation
3. 学会等名 ISPIasma 2023/IC-PLANTS 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊琉加、柳川光樹、長澤剛、小林憲汰、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕
2. 発表標題 ITO電極とNb2O5スペーサ層を含むGaN面発光レーザー共振器長の制御
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 白井広大、稲垣哲郎、竹内哲也、岩谷素顕、上山智
2. 発表標題 MOVPE法により作製した下部トンネル接合青色レーザーダイオード
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 実乃里、飯田 涼介、小田 薫、稲垣 徹郎、柴田 夏奈、長澤 剛、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕
2. 発表標題 GaN系VCSELに向けた微小段差による横方向光閉じ込め・電流狭窄構造
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柴田夏奈、上島佑介、稲垣徹郎、上田晋太郎、長澤剛、田中実乃里、竹内哲也、上山智、岩谷素顕
2. 発表標題 AlGaIn組成傾斜層を有する導電性AlInN/GaNDBRのピット低減
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長澤剛、上島佑介、稲垣徹郎、柴田夏奈、竹内哲也、上山智、岩谷素顕、三好実人
2. 発表標題 AlInN/GaN多層膜反射鏡における反射率スペクトルの温度依存性
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩月 梨恵、速水 一輝、石黒 永孝、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕
2. 発表標題 組成傾斜p-AlGaIn層とp-Al _{0.4} Ga _{0.6} Nコンタクト層を有する深紫外LED
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神谷 直樹、伊藤 太一、岩月 梨恵、上山 智、岩谷 素顕、竹内 哲也
2. 発表標題 その場Mg活性化を用いたGaInトンネル接合
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 岩月 梨恵、藤田 真帆、石黒 永孝、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕、永田賢吾、奥野浩司、齋藤義樹
2. 発表標題 組成傾斜p-AlGaIn層とp-Al _{0.5} Ga _{0.5} Nコンタクト層を有する深紫外LED
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Motoki Nakano, Shintaro Ueda, Ruka Watanabe, Tsuyoshi Nagasawa, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya
2. 発表標題 MOVPE growth of long-wavelength GaInN single layers on GaN substrates
3. 学会等名 OPIC LEDIA2022 (国際学会)
4. 発表年 2022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 Lattice-Matched AlInN/GaN DBRs
3. 学会等名 OPIC LDC2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Takeuchi, S. Kamiyama, and M. Iwaya
2. 発表標題 Progress in GaN-based VCSEL
3. 学会等名 ISLC2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya
2. 発表標題 MOVPE-grown GaN-based tunnel junctions and optoelectronic devices
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹内哲也、上山智、岩谷素顕
2. 発表標題 GaNトンネル接合の現状とレーザーダイオードへの応用
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会 第42回年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹内哲也、上山智、岩谷素顕
2. 発表標題 GaNトンネル接合によるpコンタクト形成
3. 学会等名 応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第8回個別討論会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田先美貴子、清原一樹、小田原麻人、伊藤太一、竹内哲也、上山 智、岩谷素顕、赤崎 勇
2. 発表標題 GaNトンネル接合を備えたLEDにおける横方向Mg活性化の最適化
3. 学会等名 電子情報通信学会 研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松本浩輝、岩山章、小出典克、小田原麻人、竹内哲也、上山智、岩谷素顕、丸山隆浩、赤崎勇
2. 発表標題 ミスド供給法を用いたAlInN層の熱酸化の低温化
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上島 佑介、稲垣 徹郎、飯田 涼介、岩山 章、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕、赤崎 勇
2. 発表標題 n型AlInN/GaN多層膜反射鏡のSi濃度依存性
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Ueda, Y. Ueshima, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki
2. 発表標題 High InN-mole-fraction GaInN thin layers on GaN substrates grown by MOVPE
3. 学会等名 ISPlasma2021/IC-PLANTS2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Odawara, K. Kiyohara, S. Iwayama, T. Takeuchi, M. Iwaya, S. Kamiyama and I. Akasaki
2. 発表標題 Nitride-based tunnel junction current confinement structures by Ar plasma irradiation toward VCSELs
3. 学会等名 ISPlasma2021/IC-PLANTS2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	Hiroki Matsumoto, Sho Iwayama, Norikatsu Koide, Mahito Odawara, Yusuke Ueshima, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, Takahiro Maruyama, and Isamu Akasaki
2. 発表標題	Thermal oxidation of AlInN surfaces by mist particle supply
3. 学会等名	ISPlasma2021/IC-PLANTS2021 (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	T. Ito, M. Tasaki, M. Odawara, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, I. Akasaki
2. 発表標題	In-situ activation of MOVPE-grown GaN tunnel junctions
3. 学会等名	ISPlasma2021/IC-PLANTS2021 (国際学会)
4. 発表年	2021年

1. 発表者名	M. Tasaki, K. Kiyohara, M. Odawara, T. Ito, T. Inagaki, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, I. Akasaki
2. 発表標題	Lateral Mg activation for GaInN blue LEDs with GaN tunnel junctions
3. 学会等名	ISPlasma2021/IC-PLANTS2021 (国際学会)
4. 発表年	2021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	AlGaIn/AlInNの分極を利用したp型伝導
3. 学会等名	結晶加工と評価技術第145委員会 第169回研究会 (招待講演)
4. 発表年	2020年

1. 発表者名 竹内哲也
2. 発表標題 窒化物半導体光デバイスの現状と展望
3. 学会等名 第4回パワーエレクトロニクス等の研究開発の在り方に関する検討会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki
2. 発表標題 Developments of GaN-based VCSELs with epitaxially grown DBRs
3. 学会等名 SPIE OPTO Gallium Nitride Materials and Devices XVI: 11686-3（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki
2. 発表標題 MOVPE growth of AlInN/GaN DBRs and GaN VCSELs
3. 学会等名 CGCT-8 Category 1. III-V Semiconductors and Oxide Semiconductors（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計7件

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、柴田 夏奈、岩谷 素顕、 上山 智、倉本 大	権利者 学校法人名城大 学、スタンレー 電気株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-040955	出願年 2022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	発明者 竹内 哲也、長澤 剛、岩谷 素顕、上 山 智	権利者 学校法人名城大 学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-152586	出願年 2022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、及び窒化物半導体発光素子の製造方法	発明者 竹内哲也、小林憲 汰、柴田夏奈、岩谷 素顕、上山智、倉本	権利者 学校法人名城大 学、スタンレー 電気株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-066965	出願年 2022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、柴田 夏奈、岩谷 素顕、 上山 智、倉本 大	権利者 学校法人名城大 学、スタンレー 電気株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2023/009011	出願年 2023年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 窒化物半導体発光素子、及び窒化物半導体発光素子の製造方法	発明者 竹内哲也、小林憲 汰、柴田夏奈、岩谷 素顕、上山智、倉本	権利者 学校法人名城大 学、スタンレー 電気株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2023/009019	出願年 2023年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 埋込p層を有する発光素子の製造方法	発明者 竹内哲也、上山智、 岩谷素顕、赤崎勇	権利者 名城大
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-018091	出願年 2021年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 偏光制御された面発光レーザー素子	発明者 竹内哲也、上山智、 岩谷素顕、赤崎勇、 倉本大	権利者 名城大、スタン レー電気
産業財産権の種類、番号 特許、特願2021-135105	出願年 2021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	亀井 利浩 (Kamei Toshihiro) (90356824)	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・上級主任研究員 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------