

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H02332

研究課題名(和文) AlGa<sub>N</sub>系超高効率紫外発光素子の実現に向けたキャリア再結合過程の解明と制御研究課題名(英文) Elucidation and control of carrier recombination processes for the realization of AlGa<sub>N</sub>-based ultra-high efficiency ultraviolet light emitting devices

研究代表者

船戸 充 (Funato, Mitsuru)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70240827

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、窒化物半導体AlGa<sub>N</sub>を用いた深紫外域(波長：210-300 nm)での超高効率な発光を目指し、非輻射再結合過程の解明・抑制と輻射再結合過程の増強を目指した。前者に関して、従来のAlGa<sub>N</sub>系量子井戸では、Al空孔が主たる非輻射再結合中心であることがわかった。また線欠陥導入のメカニズムの理解も進んだ。これらの欠陥を排除する結晶成長条件の探索や新しい素子構造の提案を通じて、非輻射再結合の抑制を達成した。後者に関しては、新奇結晶面の利用による分極制御を図り、輻射再結合の増強を実証した。結果として、研究開始時に0.1%程度と見積もられた内部量子効率を50%程度にまで引き上げることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義の一つとして、ワイドギャップ半導体AlGa<sub>N</sub>の物性理解が進んだことを指摘することができる。例えば、点欠陥の光学特性への影響がAl組成を高めると顕著に表れることが実験的に示された。また、結晶成長に関連して、過飽和度が点欠陥形成に与える影響、格子緩和現象の解明、表面原子の吸着・脱離の制御による単分子層量子井戸の作製、新奇結晶面における輻射再結合の増強などで基礎的な知見が得られた。これらの基礎学術的な知見を通じて、発光効率を律速する要因のいくつかが解明され、社会実装に向けての大きな課題の一つである効率の改善に向けて重要な指針を示すことができた。

研究成果の概要(英文)：In this research, to achieve ultra-high efficiency emission in the deep ultraviolet region (wavelength: 210 to 300 nm) from a nitride semiconductor AlGa<sub>N</sub>, we elucidated and suppressed the non-radiative recombination process and enhanced the radiation recombination process. Regarding the former, it was found that the Al vacancies are the main non-radiative recombination centers in the conventional AlGa<sub>N</sub>-based quantum well. The understanding of the mechanism of introducing line defects was also advanced. Searching for crystal growth conditions and proposing new device structures led to the suppression of non-radiative recombination. Regarding the latter, we tried to control the polarization by using a novel crystal plane and demonstrated the enhancement of radiation recombination. Through these studies, we were able to raise the internal quantum efficiency, which was estimated to be about 0.1% at the start of the study, to about 50%.

研究分野：光電子材料

キーワード：電子材料 結晶工学 紫外光源技術

## 1. 研究開始当初の背景

2013 年制定の「水銀に関する水俣条約」により、水銀含有製品の製造や輸出入が規制されるようになった。この製品のなかには、一般照明用蛍光灯(一部)や水銀ランプが含まれており、これらを LED など固体光源により置き換えることが社会的な要請として急務である。可視域においては、2014 年ノーベル物理学賞の受賞根拠でもある窒化物半導体 InGaN による白色 LED の進展は著しく、米国エネルギー省の試算では、全照明に占める LED 照明の割合が、光束ベースで 2013 年の数%から 2030 年には 80%を超えると見込まれている。一方、紫外域においても窒化物半導体 AlGaIn が有望であると考えられている。しかし、紫外 LED の発光効率は波長 280 nm で高々 15%であり(可視域では波長 460 nm で 80%を超える)、しかも弱励起下あるいは短波長化によりさらに低くなるのが、紫外 LED 固体照明の実用化・普及に向けてボトルネックとなっている。

この AlGaIn 系半導体に関して、申請者らは、研究の初期に有機金属気相成長法(MOVPE)による独自の結晶成長法を開発し、サファイア基板上でのヘテロ成長において世界最高品質の AlN および AlGaIn 量子井戸(QW)構造を得ることに成功した。この QW を電子線励起することにより、波長 240 nm のいわゆる UV-C 領域において、電力変換効率 20%で光出力 100 mW のインコヒーレント発光を実現し、次世代深紫外光源として高い注目を集めた。最近、バルク AlN 基板上に高品質ホモエピタキシャル AlN 層の成長に成功しており、単分子ステップ表面と高い結晶性を実現した。さらに、この試料のフォトルミネッセンス(PL)スペクトルから、自由励起子の発光線は、大きな電子正孔交換相互作用(+6.8 meV)によって、一重項励起子(FX)と三重項励起子(X)に分裂していることを明らかにした。FX および X の結合エネルギーは、それぞれ 54, 67 meV と室温の熱エネルギーより 2 倍以上大きく、室温においても励起子発光が発光素子の再結合機構に関与した励起子オプトエレクトロニクス材料として大変興味深い。また、この材料系ではスピン軌道相互作用エネルギーが小さいことから、キャリアや励起子の固有スピン緩和時間が長いことが予想され、高スピンコヒーレントデバイスとしての機能性も大いに期待される。さらに、Al リッチ AlGaIn/AlN 系の QW 構造については、半極性バルク基板上への高品質成長に成功しており、ピエゾ分極の低減による高振動子強度の PL を観測するに至っている。

一方で、申請者らの検討により、貫通転位はもとより、点欠陥も重要な非輻射再結合過程であることがわかってきた。(この報告では、バンド端以外での再結合を非輻射再結合と総称する。)しかも、可視発光素子材料として実用されている InGaIn とは異なり、点欠陥による効率低下が顕著であり、室温での再結合過程を支配していた。

本研究の究極の目標は、上記の通り深紫外固体光源のみならず新機能光素子として有望な AlGaIn 系発光素子のポテンシャルを 100%引き出す、物理限界への挑戦である。しかし研究開始当初、線欠陥(貫通転位)や点欠陥により、機能を十分に発現するには至っていなかった。

## 2. 研究の目的

(1) 点欠陥による顕著な効率低下の抑制に向け、まず点欠陥の活性化エネルギー、密度など、その基本的な特性を、カソードルミネッセンス(CL)法などの光学的手法により複合的に解析する。

(2) 点欠陥を抑制する手法を構築する。例えば、結晶成長条件の調整により結晶のストイキオメトリを精密制御する。とくに AlGaIn では Al 空孔が形成されやすいことが理論的に示唆されていることから、成長後処理として、溶融 Al 中での熱処理や Al イオン打ち込みなどにより、その低減を図る。

(3) 線欠陥(貫通転位)による非輻射過程を抑制するため、局在中心制御や、Al 金属と窒素ガスだけを用いた環境負荷の小さい新たなバルク AlN 基板の作製方法を確立する。また、(0001)面から傾斜した新結晶面 半極性面に QW 構造を形成し、輻射再結合確率を増強する。

(4) 以上より、AlGaIn 系ワイドギャップ半導体の最適な成長条件やデバイス構造に関する指針を確立し、目的とする内部量子効率 100% (物理限界)や励起子発光素子など新機能素子の基盤構築を目指す。

### 3. 研究の方法

AlN や AlGaIn QW は、所有する MOVPE 装置を用いて研究室で作製する。QW としては、基本的に基板上に AlN 下地層、AlGaIn 発光層、AlN キャップ層を順次積層した構造とした。評価としては、X 線回折や原子間力顕微鏡などによる構造評価に加え、とくに光学特性に注目した評価を行う。まず主たる非輻射再結合中心である点欠陥の物性を CL などの光学的手法により複合的に解析する。ついで、物性評価を通じて明らかになった点欠陥の起源を踏まえ、結晶成長中あるいは成長後のプロセスによりその低減を図る。一方、線欠陥は、AlN バルク基板を用いることで低減するが、加えて、現行の環境負荷の高いバルク結晶成長法ではない新しい手法も併せて検討する。また、線欠陥の運動による格子緩和現象について、実験的および理論的な検討を加える。これら非輻射再結合過程の同定と制御に加え、分極制御を通じた高い輻射再結合確率の実現と合わせ、AlGaIn の超高効率深紫外発光の実現につなげる。

### 4. 研究成果

#### (1) 点欠陥の特性評価

AlN(0001)基板上にホモエピタキシャル成長した AlN 単層膜の CL マッピングを実施した。その結果、低温では、線欠陥(貫通転位)が暗点として観察されたが、室温においてはそれがほとんど消失することを見出した(図 1)。室温近傍では、貫通転位付近であっても、その周りに多数存在する点欠陥が支配的な非輻射再結合中心となってしまうことを示している。この貫通転位起因のコントラストの温度依存性の原因を探るため、PL の温度依存性を別途測定した。温度上昇に伴う発光強度の変化をアレニウス型の関数でフィットすることにより、PL は 10 meV と 130 meV の二つの活性エネルギーをもって温度消光することが明らかになった。この PL で求めた活性化エネルギーを用いて CL コントラストの温度依存性が再現できること確認した。とくに室温付近では、活性化エネルギー 130 meV の点欠陥が主たる非輻射再結合中心であり、PL の解析から、その起源は III 族空孔(AI 空孔)あるいはそれと酸素の複合欠陥であると推察した。また、貫通転位と活性化エネルギー 130 meV

の点欠陥を比較したとき、密度と捕獲断面積の積(実効的なキャリアの捕獲能に相当)が、後者において  $10^7$  倍大きいことが CL コントラストの解析から示された。貫通転位低減に先立ち、点欠陥の形成を抑制することが高発光効率化に向けて必須であることが定量的に示された。これらの成果は、物理学会で権威のある *Phys. Rev. Applied* 誌に掲載された[10, 064027 (2018)]。

#### (2) 点欠陥の抑制

結晶成長の条件の検討：成長圧力は通常 76 Torr であったが、これを 200 Torr ~ 500 Torr にすることにより、QW の発光が高効率化することが実験的に明らかになった。具体的には、室温での時間分解 PL の寿命が数 10 ps から数 100 ps に伸びていたことから、非輻射再結合確率が一桁程度抑制されていることが示唆された。熱力学解析を行ったところ、成長圧力を上げることによって成長最表面での AI 分圧が上昇することがわかった。そのため、AI 空孔系の点欠陥が効果的に抑制されるとのモデルを構築した。

成長後処理の検討：AI 空孔の低減を意図して、AlN 単層膜に対して AI イオンインプラネーション(および高温熱処理によるダメージ回復)を試みた。インプラネーション後には、もともと観察できなかった自由励起子に起因した発光が観察されるようになり、AI 空孔の低減が示唆された。ただし、発光強度が弱くなっていたことから、ダメージ回復の処理が容易ではないことがわかった。

基板傾斜の効果：AlN を (0001)面から少し傾斜した面に形成すると、表面に 10 nm 程度の高さのマクロステップが発生することが知られている。その上に AlGaIn/AlN QW を作製した場合、マクロステップ上の QW で非輻射再結合が抑制されることを見出した。この効果は、「成長中のマクロステップでの過飽和度の上昇によって、Ga および AI 空孔が減少する」と考えることで説明できる。従来、微傾斜基板上 AlGaIn QW が高い輻射再結合確率を持つことが、われわれのグループから報告され、それを再現する報告もなされていたが、それに加えて、非輻射再結合の抑制効果あることが初めて示された。この成果は *Adv. Opt. Mater.*, 7, 1801106 (2019)に掲載された。

QW での AI 空孔形成を抑制する最も極端な構造として、AlN/GaN/AlN QW のように発光層から

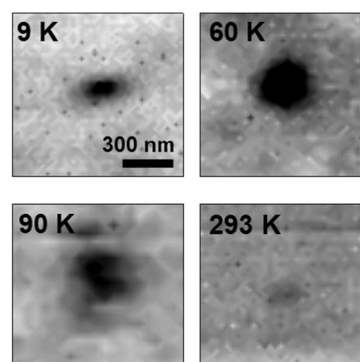


図 1 AlN 表面から観察した表面 CL 像。低温では、画面中央に貫通転位による暗点が見えるが、室温ではそのコントラストが弱まる

Al を排除する対策が考えられるが、この場合、発光波長を 250 nm 程度以下の深紫外光にするために、GaN は分子層レベルの厚みであることが必要となる。結晶成長条件の検討により、膜厚が 1 分子層で自己停止する条件を見出し、再現性良く極薄膜 GaN/AIN QW を作製する技術を確立した。図 2 に断面から観察した高分解能透過電子顕微鏡像を示す。光学的には、極薄膜 GaN QW の採用により弱励起条件下での内部量子効率が約一桁改善することが明らかになった。見込み通り Al 空孔の影響が抑制されたものと考えられる。これまで、このような極薄膜 QW は、膜厚の制御性に優れた分子線エピタキシー法によって作製されることが大半であった。それに対して、本研究では、現在、窒化物半導体による実用デバイスの作製方法である MOVPE で再現性よく作製できるようになったこともポイントの一つである。この成果は、*Adv. Opt. Mater.* 7, 1900860 (2019) に発表した。

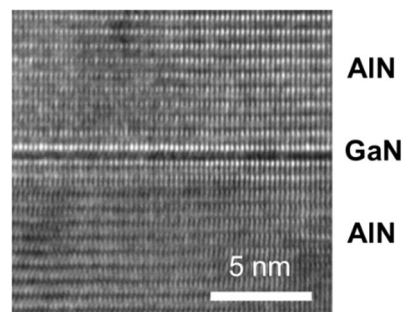


図 2 AlN/GaN/AlN QW の断面透過型電子顕微鏡像。1 分子層の GaN が形成されていることがわかる

とを組み合わせて微傾斜基板上に 1 分子層 GaN/AIN QW を作製したところ、弱励起下で内部量子効率が改善し、同程度の波長 (~250 nm) で発光する従来の AlGaIn QW と比べたとき、非輻射再結合確率が一桁程度抑制できることがわかった。(発表準備中)

### (3) 線欠陥の抑制および新奇結晶面の利用

AIN バルク結晶の新しい結晶成長法として、Al と窒素ガスによる成長を試みた。成長条件の検討により、成長速度 18  $\mu\text{m}/\text{時}$  を達成した。貫通転位密度は、サファイア基板上に作製した AIN としては、これまでの報告の中でも最小レベルにあった(10 の 8 乗台/平方 cm)。環境負荷の低い原料を用いる点からも、有望な成長方法であると考えられる。

この新しい結晶成長法を用いて AIN への炭素添加を試みた。有機金属気相成長法によって作製した p 型 AlGaIn 上に、本手法で Al、窒素、プロパンを供給すると、表面に 1 nm 程度の p 型伝導層(N を含んだ AIC 系化合物)が堆積し、それが正孔注入層として機能することを実証した。また、バンドラインナップを光電子分光法で検討し、堆積層自体が p 型伝導を担っていることを確認した。窒化物半導体分野で最も重要な「窒化物半導体国際ワークショップ 2018」で発表した学生が Student 賞を受賞して注目され、*Appl. Phys. Exp.* 13, 015512 (2020) および *Appl. Phys. Lett.* 117, 062101(2020) に掲載された。

格子不整による線欠陥の導入に関する検討を行い、新たなすべき面を考慮する必要性を時間分解分光によって実験的に明らかにするとともに、その導入の臨界膜厚を計算するモデルを構築した。(論文査読中)

(0001)極性面と(1-102)半極性  $r$  面 AIN 基板上での AIN の結晶成長条件を検討した。前者は、低圧成長が好ましいことが知られているが、後者は 500 Torr 程度の中圧成長が表面モホロジーの観点から好ましいことがわかった。この成長圧力を上げることの副次的な効果として、上記の点欠陥の抑制効果が得られることも確認した。また、(1-102)面 AIN 基板上において、AlGaIn の伝導型制御を確立し、AlGaIn 系 LED を試作した。265 nm の殺菌波長において電流注入発光を達成した。結晶成長の論文が *J. Cryst. Growth*, 522, 68 (2019) に、LED の論文が *Appl. Phys. Exp.* 11, 061001 (2018) に掲載された。LED 論文については、*Compound Semiconductor* 誌にも紹介され、窒化物半導体以外の化合物半導体分野からも注目された。

(1-102)  $r$  面上での線欠陥の導入に関連して、格子不整転位が導入される臨界膜厚を実験的に検討した。(3) で構築した理論モデルで、実験結果がよく再現できることを確認した。線欠陥の導入を制御する基礎データと言える。*Appl. Phys. Exp.* 13, 061008 (2020) に論文発表した。

(1-102)  $r$  面上で 2 分子層 (ML) の GaN/AIN QW を作製したところ、(2) で述べた(0001)面の場合と比較してさらに発光効率が改善することがわかった。図 3 に PL の温度消光の様子を示す。近似的には、低温の PL 強度に対する室温のその比が内部量子効率を与えることから、QW から Al を排することによる上述した非輻射再系都合の抑制に加えて、(1-102)半極性  $r$  面による輻射再結合の増強効果が重畳し、内部量子効率が向上したものと考えられる。この成果は、*Adv. Opt. Mater.* 7, 1900860 (2019) に発表した。

(4) 以上の検討を通じて、従来の AlGaIn 系 QW においては、Al 空孔およびその複合欠陥が非輻射再結合中心として重要な役割を担っていることが明らかとなった。また線欠陥の導入のメカニズムの理解も進んだ。これら、点欠陥や線欠陥を排除するような結晶成長条件の探索や素子構造

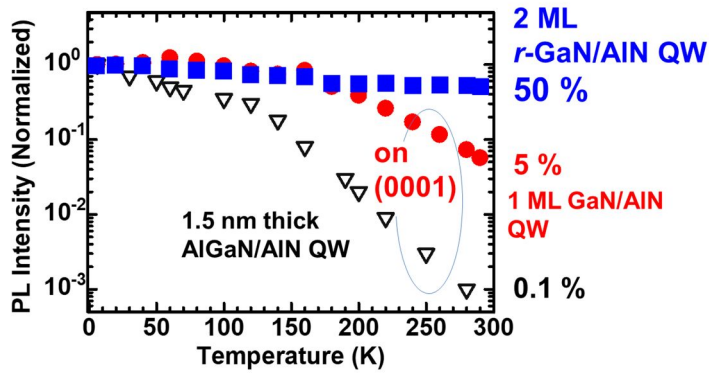


図3 AlN/GaN/AlN QW の PL の温度消光. すべてのサンプルは 230 ~ 250 nm の波長域で発光している. 従来型の 1.5 nm AlGaIn/AlN QW に比べて, (0001) で 50 倍, (1-102) 面でさらにその 10 倍, 温度消光が抑制されており, それだけ内部量子効率が改善したことを示唆している

の創出を通じて, 発光の内部量子効率が究極の目標である 100% (物理限界) の半分程度にまでは迫ることができた. 研究成果は, 主に学会や論文発表で公表しており, 未公表の部分については, 引き続き公開していく. また, 今後さらなる研究の進展により, LED など実デバイスでの高効率発光の実現や, 新奇構造, 例えば極薄膜 QW を用いた低次元励起子閉じ込め構造による励起子オプトエレクトロニクスへの展開など, 新機能性の発現が期待できる.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17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 Ichikawa Shuhei, Funato Mitsuru, Kawakami Yoichi	4. 巻 522
2. 論文標題 Metalorganic vapor phase epitaxy of pit-free AlN homoepitaxial films on various semipolar substrates	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 68 ~ 77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcrysgro.2019.06.010	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 Kobayashi Hirotsugu, Ichikawa Shuhei, Funato Mitsuru, Kawakami Yoichi	4. 巻 7
2. 論文標題 Self Limiting Growth of Ultrathin GaN/AlN Quantum Wells for Highly Efficient Deep Ultraviolet Emitters	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 1900860 ~ 1900860
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.201900860	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 Kishimoto Katsuhiko, Funato Mitsuru, Kawakami Yoichi	4. 巻 13
2. 論文標題 Control of p-type conductivity at AlN surfaces by carbon doping	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 15512
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab6589	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 Akaike Ryota, Ichikawa Shuhei, Funato Mitsuru, Kawakami Yoichi	4. 巻 11
2. 論文標題 AlxGa1-xN-based semipolar deep ultraviolet light-emitting diodes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 061001 ~ 061001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.11.061001	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 Ichikawa Shuhei, Funato Mitsuru, Kawakami Yoichi	4. 巻 10
2. 論文標題 Dominant Nonradiative Recombination Paths and Their Activation Processes in Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N-related Materials	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 064027 ~ 064027
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.10.064027	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 Hayakawa Minehiro, Ichikawa Shuhei, Funato Mitsuru, Kawakami Yoichi	4. 巻 7
2. 論文標題 Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N-Based Quantum Wells Fabricated on Macrosteps Effectively Suppressing Nonradiative Recombination	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advanced Optical Materials	6. 最初と最後の頁 1801106 ~ 1801106
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adom.201801106	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 船戸充, 市川修平, 川上養一	4. 巻 33
2. 論文標題 超ワイドバンドギャップ半導体AlNにおける励起子再結合過程の同定	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 京都大学物性科学センター誌	6. 最初と最後の頁 10 ~ 17
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 Kataoka Ken, Funato Mitsuru, Kawakami Yoichi	4. 巻 10
2. 論文標題 Development of polychromatic ultraviolet light-emitting diodes based on three-dimensional AlGa <sub>N</sub> quantum wells	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 121001 ~ 121001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.10.121001	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 Katsuhiko Kishimoto, Mitsuru Funato, Yoichi Kawakami	4. 巻 7
2. 論文標題 Effects of Al and N2 Flow Sequences on the Interface Formation of AlN on Sapphire by EVPE	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Crystals	6. 最初と最後の頁 123 ~ 123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/cryst7050123	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 P.-T. Wu, K. Kishimoto, M. Funato, and Y. Kawakami	4. 巻 16
2. 論文標題 Control of crystal morphologies and interface structures of AlN grown on sapphire by elementary source vapor phase epitaxy	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Cryst. Growth & Design	6. 最初と最後の頁 6337-6342
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.cgd.6b00979	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 M. Hayakawa, Y. Hayashi, S. Ichikawa, M. Funato, and Y. Kawakami	4. 巻 9363
2. 論文標題 Enhanced radiative recombination probability in AlGaIn quantum wires on (0001) vicinal surfaces	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE Nanoscience + Engineering	6. 最初と最後の頁 93631T/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2237606	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 K. Kataoka, M. Funato, and Y. Kawakami	4. 巻 10
2. 論文標題 Deep ultraviolet polychromatic emission from three-dimensionally structured AlGaIn quantum wells	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Appl. Phys. Exp.	6. 最初と最後の頁 031001/1-4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/APEX.10.031001	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 M. Funato, M. Shibaoka, and Y. Kawakami	4. 巻 121
2. 論文標題 Heteroepitaxy mechanisms of AlN on nitridated c- and a-plane sapphire substrates	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Appl. Phys.	6. 最初と最後の頁 085304/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4977108	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 M. Funato, S. Ichikawa, K. Kumamoto, and Y. Kawakami	4. 巻 10104
2. 論文標題 Design of Al-rich AlGa <sub>N</sub> quantum-well structures for efficient UV emitters	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE Photonics West	6. 最初と最後の頁 1010401/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2254797	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 Akaike Ryota, Ichikawa Shuhei, Funato Mitsuru, Kawakami Yoichi	4. 巻 13
2. 論文標題 Lattice relaxation in semipolar Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N grown on (1-102) AlN substrates	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 061008 ~ 061008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ab9183	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 Kishimoto Katsuhiro, Funato Mitsuru, Kawakami Yoichi	4. 巻 117
2. 論文標題 Deposition of carbon-containing hole injection layers on p-type Al <sub>0.8</sub> Ga <sub>0.2</sub> N grown by metalorganic vapor phase epitaxy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 062101 ~ 062101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0017703	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 Ichikawa Shuhei, Funato Mitsuru, Kawakami Yoichi	4. 巻 14
2. 論文標題 Enhanced nonradiative recombination in Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N-based quantum wells thinner than the critical layer thickness determined by X-ray diffraction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 031007 ~ 031007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/abe658	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 18件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 M. Funato, K. Kataoka and Y. Kawakami
2. 発表標題 Broad-band UV emission from a two-dimensional array of AlGaIn microstructures
3. 学会等名 13th International Conference on Nitride Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Funato, H. Kobayashi and Y. Kawakami
2. 発表標題 Highly efficient UV emission from ultrathin GaN/AlN quantum wells grown by metalorganic vapor phase epitaxy
3. 学会等名 13th International Conference on Nitride Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Funato and Y. Kawakami
2. 発表標題 GaN/AlN ultrathin quantum wells for UV emitters
3. 学会等名 7th Intern. Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Kishimoto, M. Funato, and Y. Kawakami
2 . 発表標題 Adding p-type conductivity to AlN surfaces by deposition of ultrathin carbon-containing layers
3 . 学会等名 7th International Workshop on Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Kishimoto, M. Funato, and Y. Kawakami
2 . 発表標題 Carbon and aluminum co-treatment at high temperatures for surface p-type conduction of AlN
3 . 学会等名 9th Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors ( 国際学会 )
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 M. Funato, S. Ichikawa, and Y. Kawakami
2 . 発表標題 Ultrathin GaN/AlN quantum wells fabricated with a self-limiting process
3 . 学会等名 19th Intern. Conf. on MOVPE ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 M. Funato and Y. Kawakami
2 . 発表標題 Control of carrier recombination processes in AlGaIn-based UV emitters
3 . 学会等名 SPIE Nanoscience + Engineering ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Kobayashi, S. Ichikawa, M. Funato and Y. Kawakami
2. 発表標題 Self-limiting growth and optical properties of ultrathin GaN/AlN quantum wells
3. 学会等名 International Workshop on Nitride Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Kishimoto, M. Funato and Y. Kawakami
2. 発表標題 Controlling p-type conductivity at AlN surfaces
3. 学会等名 International Workshop on Nitride Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川上養一, 早川峰洋, 船戸充
2. 発表標題 AlGaIn系ステップバンディング特異構造からの高効率発光現象
3. 学会等名 第79回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 船戸充, 市川修平, 川上養一
2. 発表標題 GaN/AlN極薄膜量子井戸の作製と偏光特性
3. 学会等名 電子情報通信学会 研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岸元克浩, 船戸充, 川上養一
2. 発表標題 AlN表面におけるp型伝導の制御
3. 学会等名 第1回結晶工学 ISYSE合同研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岸元克浩, 船戸充, 川上養一
2. 発表標題 カーボン添加によるAlN表面におけるp型伝導制御
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林敬嗣, 市川修平, 船戸充, 川上養一
2. 発表標題 有機金属気相成長したGaN/AlN極薄量子井戸構造の光学的特性
3. 学会等名 第66回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Kishimoto, M. Funato and Y. Kawakami
2. 発表標題 Interfacial structure control of AlN on sapphire fabricated from Al metal and N <sub>2</sub> gas
3. 学会等名 12th International Conference on Nitride Semiconductors (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Funato and Y. Kawakami
2. 発表標題 Impact of defects on the optical characteristics of AlGaIn quantum wells
3. 学会等名 29th International Conference on Defects in Semiconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Funato and Y. Kawakami
2. 発表標題 An environmentally friendly method to grow AlN thick layers
3. 学会等名 10th Intern. Workshop on Bulk Nitride Semiconductors (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Y. Kawakami and M. Funato
2. 発表標題 Clarifying carrier recombination processes in AlGaIn-based materials towards efficient DUV emitters
3. 学会等名 Intern. Workshop on UV Materials and Devices 2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 船戸充, 川上養一
2. 発表標題 窒化物半導体における輻射・非輻射再結合過程
3. 学会等名 第9回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 片岡研, 千賀岳人, 船戸充, 川上養一
2. 発表標題 AIN系三次元構造による紫外多波長発光LED
3. 学会等名 第78回応用物理学会秋季学術講演会, 福岡国際会議場
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 船戸充, 川上養一
2. 発表標題 短波長半導体発光デバイスの現状と動向
3. 学会等名 第48回アナログ技術トレンドセミナー(HAB研セミナー) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Hayakawa, Y. Hayashi, S. Ichikawa, K. Kumamoto, M. Shibaoka, M. Funato and Y. Kawakami
2. 発表標題 Longer nonradiative lifetimes of excitons localized in AlGaIn quantum wires grown on macrosteps
3. 学会等名 36th Electronic Materials Symposium
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 早川峰洋, 林佑樹, 長瀬勇樹, 市川修平, 熊本恭介, 柴岡真美, 船戸充, 川上養一
2. 発表標題 マクロステップ上AlGaIn量子細線の光学特性
3. 学会等名 電子情報通信学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岸元克浩, 船戸充, 川上養一
2. 発表標題 EVPE法で成長したAlN膜におけるp型伝導
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 早川峰洋, 市川修平, 船戸充, 川上養一
2. 発表標題 微傾斜c-AlN基板上AlGaIn量子井戸におけるマクロステップを利用した高効率発光
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 片岡研, 千賀岳人, 船戸充, 川上養一
2. 発表標題 AlGaIn微細構造の二次元アレイによるブロードバンドUV発光
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 M. Funato, and Y. Kawakami
2. 発表標題 Unveiling the carrier recombination paths in high Al content AlGaIn quantum wells
3. 学会等名 Intern. Workshop on UV Materials and Devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年



1 . 発表者名 M. Hayakawa, Y. Hayashi, S. Ichikawa, M. Funato, and Y. Kawakami
2 . 発表標題 Enhanced radiative recombination probability in AlGaIn quantum wires on (0001) vicinal surfaces
3 . 学会等名 SPIE Nanoscience + Engineering ( 国際学会 )
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 Y. Kawakami and M. Funato
2 . 発表標題 Radiative and nonradiative recombination processes in AlGaIn-based quantum wells
3 . 学会等名 Intern. Workshop on Nitride Semiconductors ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 S. Ichikawa, M. Funato, and Y. Kawakami
2 . 発表標題 Stimulated emission at 250 nm from optically-pumped semipolar (1-102) AlGaIn/AlN quantum wells
3 . 学会等名 Intern. Workshop on Nitride Semiconductors ( 国際学会 )
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 M. Funato and Y. Kawakami
2 . 発表標題 Design of Al-rich AlGaIn quantum-well structures for efficient UV emitters
3 . 学会等名 SPIE Photonics West ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Funato and Y. Kawakami
2. 発表標題 AlN growth by an environmentally friendly method
3. 学会等名 2017 German-Japanese-Spanish joint workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 石井良太、船戸充、川上養一
2. 発表標題 GaNとAlNの物性定数の同定と(AI,Ga)N系半導体の物性予測
3. 学会等名 第8回窒化物半導体結晶成長講演会(招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 市川修平、船戸充、川上養一
2. 発表標題 微小なオフ角に由来するc面AlGaIn/AlNヘテロ界面におけるc面すべりの可能性
3. 学会等名 第8回窒化物半導体結晶成長講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 早川峰洋、林佑樹、市川修平、船戸充、川上養一
2. 発表標題 マクロステップを利用したAlGaIn量子細線構造による温度消光の低減
3. 学会等名 第8回窒化物半導体結晶成長講演会(招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 S. Ichikawa, M. Funato, and Y. Kawakami
2. 発表標題 Stimulated emission from optically-pumped semipolar AlGa <sub>N</sub> /AlN quantum well
3. 学会等名 35th Electronic Materials Symposium
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 市川修平, 船戸充, 川上養一
2. 発表標題 半極性面AlGa <sub>N</sub> /AlN量子井戸におけるポテンシャル揺らぎの抑制
3. 学会等名 第77回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 船戸充, 川上養一
2. 発表標題 非極性面上に作製したAlGa <sub>N</sub> 量子井戸の発光特性
3. 学会等名 光とレーザーの科学技術フェア2016 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 川上養一, 市川修平, 船戸充
2. 発表標題 AlリッチAlGa <sub>N</sub> 量子井戸のMOVPE成長と光物性制
3. 学会等名 (社)電子情報技術産業協会, 第12回 量子現象利用デバイス技術分科会 (招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 川上養一, 市川修平, 船戸充
2. 発表標題 AlリッチAlGaIn系量子井戸の発光・非発光過程
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 片岡研, 千賀岳人, 船戸充, 川上養一
2. 発表標題 AlN系三次元構造の形成と紫外多波長発光
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 岸元克浩, 船戸充, 川上養一
2. 発表標題 EVPE成長AlN/サファイア界面におけるボイド形成メカニズムの検討
3. 学会等名 第64回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Funato and Y. Kawakami
2. 発表標題 Ultrathin GaN/AlN quantum wells for deep UV emitters
3. 学会等名 SPIE Photonics West (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

深紫外発光AlGaIn/AIN量子井戸構造の作製  
[http://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp/research\\_2.html](http://www.optomater.kuee.kyoto-u.ac.jp/research_2.html)

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	川上 養一  (Kawakami Yoichi)  (30214604)	京都大学・工学研究科・教授    (14301)	

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
---------	---------