

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 13 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01831

研究課題名（和文）高圧高温熱処理による高品質インジウム系窒化物半導体の創製と熱電素子応用

研究課題名（英文）Growth of High-Quality Indium-Based Nitride Semiconductors by High-Pressure, High-Temperature Thermal Processing and Their Application to Thermoelectric Devices

研究代表者

荒木 努 (Tsutomu, Araki)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：20312126

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではRF-MBE法を用いてInN結晶を作成し、高温・高圧熱処理による結晶品質の向上を目指した。2021年度は、成長条件の最適化を図り、特に成長温度やプラズマパワーの影響を調査した。2022年度には、初期成長機構の解明とInN結晶に対する高温・高圧熱処理の基礎検討を行い、650 と750 での熱処理が比較的効果的であることを示した。2023年度は、初期成長機構の詳細な解明と、2年目の熱処理結果の評価を継続した。転位密度の減少などの改善は確認できなかったが、異常成長領域の発生過程をモデル化した。本研究は、InN結晶の品質向上に向けた重要な基礎データを構築できたと考える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、いまだ残留キャリア濃度や貫通転位などの結晶欠陥が多く、伝導制御やデバイス応用が実現されていないInNに対して、高温・高圧熱処理による貫通転位密度低減を目指した。その課程において、DERI法成長InNにおける成長条件の影響を詳細に検討することができた。さらにTEMを用いた緻密な極微構造観察により、Inドロップレットが関与する異常成長領域の成長モデルを構築することができた。これらはRF-MBE法を用いたInN結晶成長のさらなる理解に大きく役立つものである。一方、高温・高圧熱処理の効果については、試料サイズの問題から熱処理後の比較評価が十分に行えず、実験方法を含めた再検討が必要である。

研究成果の概要（英文）：In this study, we prepared InN crystals using the RF-MBE method and aimed to improve crystal quality by high-temperature and high-pressure thermal treatment. In FY2023, we continued to elucidate the initial growth mechanism in detail and to evaluate the results of the second year's heat treatment. Although we were unable to confirm improvements such as a decrease in dislocation density, we did model the process of generating abnormal growth regions. We believe that this research has established important basic data for improving the quality of InN crystals.

研究分野：半導体工学

キーワード：半導体 窒化インジウム 分子線エピタキシー 透過電子顕微鏡 結晶成長 結晶欠陥

## 1. 研究開始当初の背景

GaNを中心とする窒化物半導体は、青・緑色LED、白色LED、青紫色LDなどに実用化され、フルカラーディスプレイ、LED照明、ブルーレイディスクなど大きな社会変革を起こす立役者となった。また近年では高周波・高出力・高効率パワーエレクトロニクスデバイスとしても実用化がスタートしてきており、携帯電話基地局用パワーアンプとしてすでに広く利用されている。その中であって、InN(窒化インジウム)に関する研究は大きく立ち後れていた。研究代表者のグループは、1994年から窒素プラズマを用いたMBE法による窒化物半導体結晶成長を進めてきた。この成長手法は、プラズマ励起された窒素の活性種を高効率に基板上に供給することができ、MOCVD法と比較して500°C以上低い温度でも窒化物半導体の結晶成長が可能である。この優位性を世界に先駆けて活用し、当時世界最高値の移動度を持つInN結晶成長に成功した。さらにこの先駆的研究は、その後のInNのバンドギャップ発見へと結びつき、国際的にも大きなインパクトを与えた。この発見を契機として、InNに関する研究は結晶成長、物性評価、デバイス応用へと飛躍的な発展を遂げた。その後も2006年から実施された文部科学省特定領域研究「窒化物光半導体のフロンティア―材料潜在能力の極限発現―」において、DERI(Droplet Elimination by Radical beam Irradiation)法による結晶高品質化(立命館大)、InNのp型伝導実現(立命館大、千葉大)、PLD(Pulsed Laser Deposition)法による大面積基板上InN成長(東大)、1分子層InNを用いた新規太陽電池構造提案(千葉大)など世界をリードする多くの革新的な成果を挙げ、InNのデバイス応用への道が大きく拓かれたかに思われた。しかしながら、今なおInNを用いた実用的なデバイスは、光デバイスにおいても電子デバイスにおいても実現されていない。この一番の理由は、半導体デバイスの基本である伝導タイプ:n型およびp型の伝導制御が実現できていないからであろう。

研究代表者は、InNの大きなゼーベック係数に着目し、熱電変換材料としての応用を目指して、まずはInNのp型伝導制御に取り組んだ(科研費基盤研究B H28-H30「熱電変換素子応用のための窒化インジウム系半導体の潜在能力開拓」)。この研究課題では、p型化を阻む最大の要因である高い残留キャリア濃度、その起源となっている転位の低減に注力した。その結果、プラズマ照射による表面改質効果を利用したユニークなInN成長手法によって、転位密度の低減が可能であることを示した。一方で、プラズマ照射によるダメージ層が新たなキャリア発生起源となり、結果としてInN薄膜全体の残留キャリア濃度低減には至らなかった。InNのp型伝導、デバイス応用を実現するにはさらなる革新的なアプローチが必要であった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、高温・高圧アニールにより熱平衡状態に近づけ、InN中の貫通転位密度を低減させることにあった。前述のように、InN結晶成長技術は2000年以降進展してきており様々な課題が解決され、真のバンドギャップ発見につながるような結晶高品質化を実現した。しかしながら、デバイス応用まで実現するためには、p型・n型伝導型制御が必須であり、それを阻むキラー欠陥である転位を減らさなければならない。従来の窒化物半導体結晶成長において適用されてきた転位低減法は、バルク基板を開発して転位を発生させないようにするアプローチと、発生した転位を横方向成長などにより成長中に動かし合体させて消滅させるアプローチが取られていた。InNでは、バルク基板開発は皆無であり、また低温でのMBE成長では十分な横方向成長形態が得られず転位消滅の効果が少ない。このためこれまでとは異なるアプローチでの転位低減に取り組む必要があり、本研究課題にて平衡状態を実現するためのアプローチとして高温・高圧アニールに挑んだ。

## 3. 研究の方法

高温・高圧アニール実験に必要なInN薄膜結晶成長は、分子線エピタキシー法(Molecular Beam Epitaxy: MBE)を用いて行った。本研究では、RF(radio frequency)プラズマ源によって生成した窒素ラジカルをV族源として用いるRF-MBE装置を使用した。このRF-MBE法では、MOCVD法、HPVE法と比較して成長温度をかなり低くできるため、高温での結晶成長が難しいInN系窒化物半導体の結晶成長が可能となる。一般的なMBE法の特徴として、分子線による原料供給によって分子層ごとの成長が行われ、原子層レベルでの膜厚制御や急峻な界面制御が可能となる。またこれらの成長の様子を高エネルギー反射電子回折(Reflection High Energy Electron Diffraction: RHEED)など様々なその場観察手法によって解析することもMBE法の大きな特徴の一つである。これらの特徴を有するRF-MBE法を駆使して、InN結晶を作成し、高圧高温アニールによる結晶性改善、転位密度低減を試みた。

はじめに、再現性よくInN結晶を得るための成長条件の検討を行った。特に、我々が見出したDERI(Droplet Elimination by Radical-beam Irradiation)法を用いたInN結晶成長の各種成長条件依存性と成長初期過程における成長メカニズム解明に取り組んだ。各項目の詳細な成長条件については、研究成果のところで述べる。得られたInN結晶の評価は、走査電子顕微鏡(SEM)、原子間力顕微鏡(AFM)、透過電子顕微鏡(TEM)、X線回折(XRD)、ホール効測定を用いて、表面

モフォロジー、結晶性、電気的特性（キャリア濃度、移動度）を調べた。

#### 4. 研究成果

##### (1) DERI 法 InN 結晶成長に対する各種成長条件依存性の検討

まず、RF-MBE 法を用いた InN 成長において、DERI 法による結晶成長への成長条件の影響を検討した。特に、これまで DERI 法を用いた InN 成長においてはあまり検討されてこなかった成長温度、プラズマパワー、膜厚について検討を行い、これらのパラメーターを最適化して、高温・高圧熱処理に最適な InN 結晶成長を目指した。

XRD と RHEED 強度変化の結果から、成長温度が 450°C を超えると InN が著しく分解することが確認できた。また、成長温度が 410°C 付近では、膜の結晶方位が向上していることが確認された。図 1 に示す SEM 像から、InN 試料を 440°C 以下の温度で成長させた場合、表面モフォロジーは平坦であることが観察できる。しかし、440°C と 450°C の温度で InN 試料を成長させると、表面形態は粗くなり、多数のピットと小さな隙間も表面に現れる。ホール効果測定の結果、成長温度が高くなるにつれてキャリア濃度は低下するが、移動度は期待したほど上昇せず、むしろ低下することがわかった。一方、成長温度が高くなるにつれて、(302) の FWHM は減少する良い傾向を示したが、(002) の FWHM は、440°C 以上の温度で成長した InN の分解による粗い表面のために増加する傾向があった。結論として、この実験では、440°C 以下の温度で成長させた InN 試料が、より優れた構造と電気特性を示した。実験結果によると、InN の成長には 410°C ~ 420°C 程度の成長温度が最適である。しかし、高温成長中の InN の分解を制御する方法が見つければ、InN の高温成長は高品質の膜を得る可能性がある。

次に InN の高温成長の可能性を探るため、より高温 (450°C) での結晶成長を行い、プラズマパワー (80 W、100 W、200 W) と成長時間 (0.5 h ~ 8 h) の変化が、InN の結晶性、電気的特性に及ぼす影響を検討した。図 2 に示すように、いずれのプラズマパワーを用いた InN 成長においても、成長時間 (膜厚) の増加に伴い、キャリア濃度は減少、移動度は増加し、電気的特性の改善が得られ、基板界面付近での欠陥の影響が大きいことが明らかとなった。また高温成長 (450°C) においても、高いプラズマパワーを用いて厚膜成長することで表面荒れを抑え、比較的良好 (キャリア濃度  $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 、移動度  $1600 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ) な電気的特性を得ることができた。

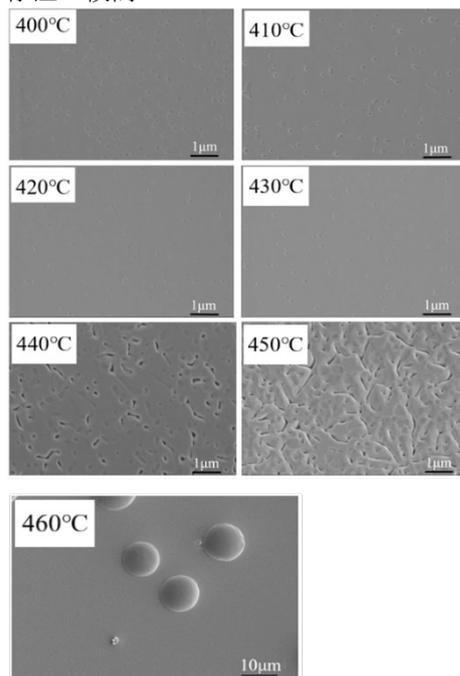


図1 異なる成長温度で成長した InN の表面 SEM 像

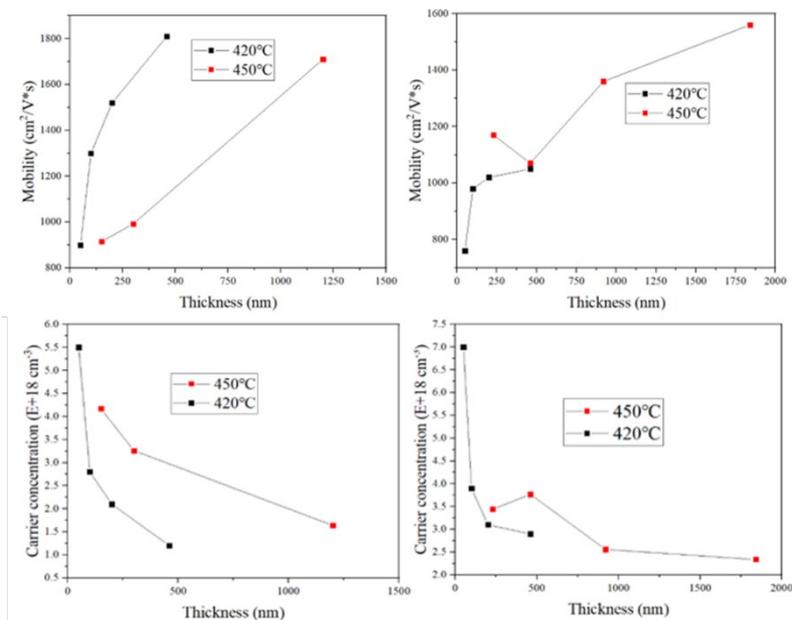


図2 プラズマパワー80W (左)、200W (右) で成長した InN の移動度、キャリア濃度の膜厚依存性

##### (2) DERI 法 InN 結晶成長の初期成長機構の解明

DERI 法成長 InN で観察された異常成長領域 (図 3) および平坦に成長した領域に対して TEM 観察を行うことで、異常成長領域の発生過程について検討した。初期過程を検討するための InN 結晶成長は以下の条件で行った。RF-MBE 法を用いて、GaN テンプレート (サファイア基板上 MOCVD 成長) 上に DERI 法により InN 薄膜を成長した。GaN テンプレート基板は有機洗浄後、MBE チャンバーに投入し、750°C、10 分のサーマルクリーニングを行った。650°C で GaN バッファ層を 3 分成長したあと、基板温度を 435°C まで降温し、InN 成長を行った。DERI 法の成長サイクルとして

は、MRGP を 20 分間行い、その後 N プラズマのみを照射する DEP を約 20 分間行った。この間、RHEED 強度変化をモニターすることで、MRGP で形成された In ドロップレットが除去されて平坦な InN 表面が得られることを確認している。この DERI 法プロセスを 2 回繰り返した。トータルの InN 成長時間は約 80 分で、膜厚は約 270 nm である。InN 薄膜の表面 SEM 像からは、平坦表面の領域と In ドロップレットの影響を受けて 3 次元成長が顕著な異常成長領域とが特徴的に現れていた。これらの領域における極微構造の比較を断面 TEM 観察により行った。

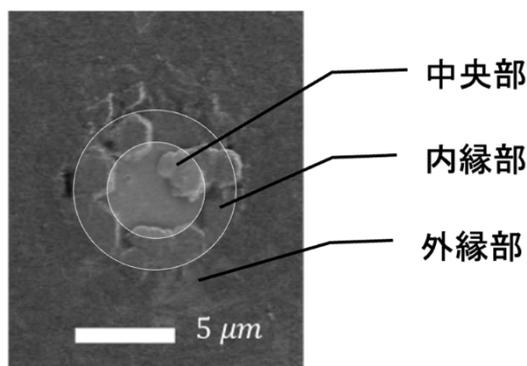


図3 DERI法成長InN異常成長領域の様子

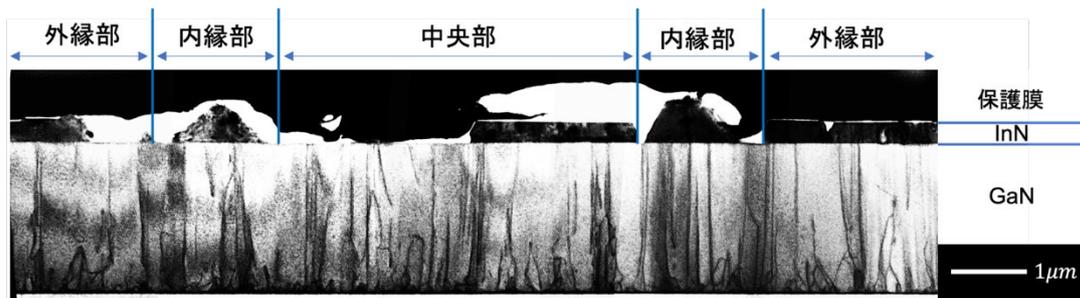


図4 DERI法成長InN異常成長領域の断面TEM像

図 4 に示す TEM 観察の結果から、異常成長領域は 3 つの領域に分けられると考えた。この異常成長領域は、InN が部分的にのみ成長している中央部、六角形状をした三次元島状成長が顕著な内縁部、平坦な領域と連続している外縁部から構成されている。以下それぞれの領域について、断面 TEM 観察を行った結果について述べる。異常成長領域の中央部の特徴は、GaN 上に InN の成長していない領域が存在することである。ただし、中央部の全てが InN の存在していない領域ではなく、一部に InN が成長している領域も存在している。この InN の膜厚は約 270 nm であり、InN が平坦に成長している領域の InN の膜厚とほとんど同じである。この領域では InN の成長が阻害される要因が存在していた結果、InN の成長が不均一になったと考えられる。異常成長領域の内縁部の特徴は、六角形グレイン形状を有した 3 次元成長 InN である。これらを TEM で観察した結果、2 つの特徴があることがわかった。1 つは六角形状の島状グレイン InN が主に (0001) 面と {1-101} 面からなる台形構造を形成していることである。もう一つは InN の膜厚が平坦領域や中央部と比較して大きいことである。内縁部で観察された 3 次元島状成長 InN はさまざまな膜厚で成長していたが、平坦に成長した領域における 270 nm 前後の膜厚よりも大きいという共通点がある。つまりこの領域では InN の成長が成長方向に促進される要因があったと考えられる。異常成長領域の外縁部の特徴は、異常成長領域の中央から遠ざかるにつれて InN の膜厚が減少していることである。異常成長領域中央部から異常成長領域外側へ向けて、InN が段階上になり膜厚が段階的に減少していく様子が観察された。

異常成長領域における GaN テンプレート中の転位種類判別を実施した結果から、GaN テンプレート中のらせん転位が起点となって In ドロップレットが発生し、In ドロップレットが影響して異常成長領域が形成されたと考えられる。らせん転位が In ドロップレット発生起点となる理由は以下のように推察する。らせん転位が存在する GaN テンプレート表面には、原子ステップが形成されており、この表面上のステップに余剰 In が集まることによって In ドロップレットがらせん転位が存在する箇所が大きくなっていくと考えている。In ドロップレットが大きくなった後、どのように In ドロップレットが InN 成長に影響し、異常成長領域が形成されるのか考察する。ドロップレットが関与する結晶成長については、いくつかの報告がなされている。Reyes らは Ga ドロップレットから発生させた GaAs ナノ構造を解析した結果、ナノ構造形成を決定する 3 つのプロセス (Wicking, Crystallization, Nucleation) があると報告している。Wicking はドロップレット中の Ga 原子が As 圧下で毛細管現象によりドロップレットから周辺の基板上に毛管作用で運ばれることである。Crystallization はドロップレット中に拡散した As 原子が液相-固相界面で成長する GaAs に付着して結晶化することである。Nucleation は As 原子が気相-液相界面で核生成することである。さらに、Zheng らは InGaN 結晶成長中に発生した In ドロップレットをエッチングすると、その跡にはリング上に成長した InGaN が存在しており、ドロップレットの端部で成長レートが高くなることでリング構造が発生すると報告している。これらの考察をふまえて考えられる In ドロップレットによる InN 異常成長領域の形成過程を図 5 に示す。図 5 上図はらせん転位を起点として In ドロップレットが発生している様子である。その後、図 5 下図のように、In ドロップレットの存在が影響して、異なる形態での InN が成長している

と考えられる。In ドロップレットの外縁部では毛細管現象による In の移動により In の供給が多くなったことで、InN 膜厚が In ドロップレットに近いほど大きくなる。In ドロップレットの内縁部では成長レートの高いドロップレットの端部であるため、InN 膜厚が平坦領域に比べて大きくなる。一方で、In ドロップレットの中央部では InN が成長しない部分が発生している。これは、In ドロップレットの中央部では、成長界面に届く N 濃度が低くなることで InN 成長の妨げになっていると考えている。これらの現象が複合的に発生することで、メタルリッチ条件下での InN 成長においては、In ドロップレットの存在が影響し、異常成長領域が形成されることが考えられる。

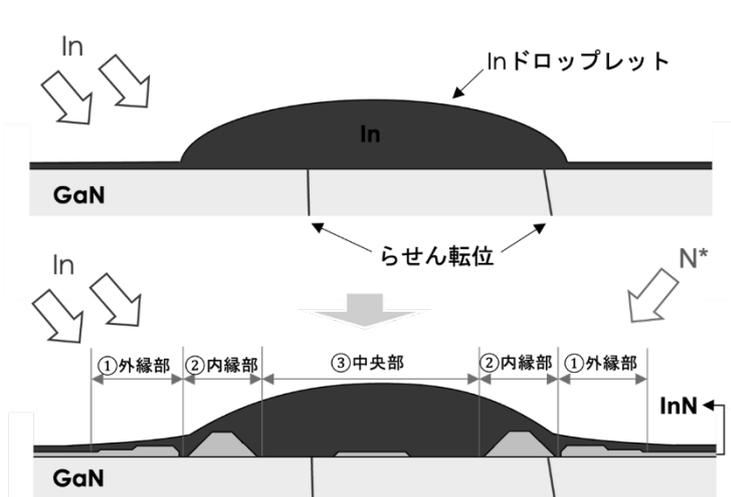


図5 Inドロップレットが関与するInN異常成長領域の形成過程

### (3) InN 結晶に対する高温・高圧熱処理実験の検討

課題1年目に作成した InN 結晶の中から比較的電气的特性に優れた (キャリア濃度  $18 \times 10^{18}$  乗台前半、移動度  $1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$  以上) InN (図6) に対して、高温・高圧熱処理実験を試みた。当初計画では、山口県宇部市の (株) 超高温材料研究センターが有する超高温 HIP (Hot Isostatic Pressing: 熱間等方圧加圧法) 装置を利用する計画であったが、コロナ禍の影響により実施することができなかった。そこで、熱処理は、量子科学技術研究開発機構 SPring8 内のビームライン BL14 にて実施した。InN 結晶 10mm 角試料をダイシングにより 1mm 角にカットし、ダイヤモンドアンビルに封入後、圧力 9.5GPa、時間 30 分、温度 650、750、850°C の 3 条件で高温・高圧熱処理実験を行った。850°C では InN の分解・剥離が見られ十分な評価ができなかった。650°C、750°C で処理した試料を X 線回折測定で評価を行ったが、明瞭な結晶性の改善は得られなかった。InN 薄膜の剥離が影響して、正確に熱処理後の InN 結晶からの情報を得ることができなかったのが原因である。また、TEM 観察の結果においても、熱処理後に InN 薄膜の GaN テンプレート界面からの剥離が確認されていた。観察領域においては、InN 中に発生している貫通転位の融合による転位密度減少などの効果は見いだせなかった。高温・高圧熱処理実験のおおまかな条件範囲を検討することはできたが、本実験装置では試料サイズが 1mm 角に限られたため、熱処理後の試料の分析が困難であったことは課題である。

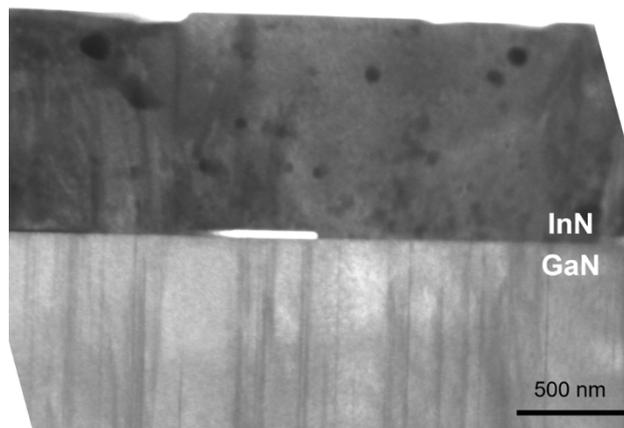


図6 高温・高圧熱処理実験に用いたDERI法成長InN on GaN templateの断面TEM像

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 T. Araki, F. Abas, N. Goto, R. Fujita, and S. Mouri	4. 巻 71
2. 論文標題 Nitrogen Radical Beam Irradiation on InN Film for Surface Modification	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 824-829
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.71.824	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 T. Araki, S. Kayamoto, Y. Wada, Y. Kuroda, D. Nakayama, N. Goto, M. Deura, S. Mouri, T. Fujii, T. Fukuda, Y. Shiraishi, and R. Sugie	4. 巻 16
2. 論文標題 Direct growth of GaN film on ScAlMg04 substrate by radio-frequency plasma- excited molecular beam epitaxy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 25504/1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/acb894	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 T. Araki, F. Abas, R. Fujita and S. Mouri	4. 巻 70
2. 論文標題 Repeatability and Mechanisms of Threading Dislocation Reduction in InN Film Grown with In Situ Surface Modification by Radical Beam Irradiation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 732-737
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.70.732	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 Y. Wada, M. Deura, Y. Kuroda, N. Goto, S. Kayamoto, T. Fujii, S. Mouri, T. Araki	4. 巻 260
2. 論文標題 Substrate Terrace Width Dependence of Direct Growth of GaN on ScAlMg0<sub>4</sub> by Radio Frequency Molecular Beam Epitaxy	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 2300029/1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.202300029	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 N. Mokutani, M. Deura, S. Mouri, K. Shojiki, S. Xiao, H. Miyake, and T. Araki	4. 巻 260
2. 論文標題 Control of Metal Rich Growth for GaN/AlN Superlattice Fabrication on Face to Face Annealed Sputter Deposited AlN Templates	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 230061/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.202300061	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 荒木努, 出浦桃子, 藤井高志, 毛利真一郎	4. 巻 92
2. 論文標題 分子線エピタキシー法を用いた窒化物半導体結晶成長の最前線	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 622-626
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 荒木努, 出浦桃子, 藤井高志	4. 巻 72
2. 論文標題 RF-MBE法によるScAlMgO4基板上窒化物半導体の結晶成長と評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 689 ~ 694
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.72.689	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. Deura, Y. Wada, T. Fujii, T. Araki	4. 巻 261
2. 論文標題 Suppression of Mixing of Metastable Zincblende Phase in GaN Crystal Grown on ScAlMgO4 Substrates by Radio Frequency Plasma Assisted Molecular Beam Epitaxy	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 2400047/1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.202400047	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 荒木 努, 中村 亮佑, 後藤 直樹, 毛利 真一郎	4. 巻 73
2. 論文標題 RF-MBE法を用いた窒化インジウム成長過程の極微構造評価	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 材料	6. 最初と最後の頁 351-355
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jsms.73.351	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38件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 山田 泰弘, 中村 亮佑, 後藤 直樹, 毛利 真一郎, 出浦 桃子, 荒木 努
2. 発表標題 RF-MBE 成長 DERI 法における InN の初期成長機構
3. 学会等名 2022 年度 半導体エレクトロニクス部門委員会 第 1 回研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榊原 匠海, 出浦 桃子, 毛利 真一郎, 荒木 努
2. 発表標題 RF-MBE 法を用いた GaN 成長に対する GaN 自立基板の微小オフ角依存性
3. 学会等名 2022 年度 半導体エレクトロニクス部門委員会 第 1 回研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田 泰弘, 中村 亮佑, 後藤 直樹, 毛利 真一郎, 出浦 桃子, 荒木 努
2. 発表標題 RF-MBE成長DERI法におけるInNの初期成長機構
3. 学会等名 2022年秋季第83回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 榊原 匠海, 出浦 桃子, 毛利 真一郎, 荒木 努
2. 発表標題 GaNのRF-MBE成長におけるGaN自立基板の微小オフ角依存性
3. 学会等名 2022年秋季第83回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田 邑一, 黒田 悠弥, 後藤 直樹, 藤井 高志, 毛利 真一郎, 出浦 桃子, 荒木 努
2. 発表標題 RF-MBE法を用いたScAlMgO4基板上GaN成長における成長初期過程の検討
3. 学会等名 2022年秋季第83回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒田 悠弥, 和田 邑一, 後藤 直樹, 藤井 高志, 毛利 真一郎, 出浦 桃子, 荒木 努
2. 発表標題 ScAlMgO4基板上へのGaNのRF-MBE成長における基板表面窒化の効果
3. 学会等名 2022年秋季第83回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 栞谷 直哉, 和田 邑一, 毛利 真一郎, 出浦 桃子, 正直 花奈子, 三宅 秀人, 荒木 努
2. 発表標題 極薄GaN/AlN超格子構造の作製におけるGaN層の膜厚依存性
3. 学会等名 2022年秋季第83回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中山 大輝, 今村 涼, 荒木 努, 毛利 真一郎
2. 発表標題 自立GaN基板上にRF-MBE法で再成長したGaNの発光特性
3. 学会等名 2022年秋季第83回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 荒木努, 後藤直樹, 出浦桃子, 黒田悠弥, 和田邑一, 藤井高志, 毛利真一郎, 白石裕児, 福田承生
2. 発表標題 RF-MBE法を用いたScAlMgO4基板上 GaN成長
3. 学会等名 第51回結晶成長国内会議 (JCCG-51)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田 邑一, 黒田 悠弥, 後藤 直樹, 久保 祐太, 出浦 桃子, 藤井 高志, 毛利 真一郎, 荒木 努
2. 発表標題 ScAlMgO4基板上GaNのRF-MBE成長における準安定相混在の抑制
3. 学会等名 2023年春季第70回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Araki, N. Goto, M. Deura, Y. Kuroda, Y. Wada, T. Fujii, S. Mouri, Y. Shiraishi, T. Fukuda
2. 発表標題 Growth of GaN on ScAlMgO4 Substrate by RF-MBE
3. 学会等名 International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications (ISPlasma 2023) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 張 同舟, 後藤 直樹, 毛利 真一郎, 荒木 努
2. 発表標題 DERI法を用いたInN結晶成長の成長温度依存性に関する研究
3. 学会等名 2021年秋季第82回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Wada, Y. Kuroda, S. Kayamoto, N. Goto, T. Fuji, S. Mouri, Y. Shiraishi, T. Fukuda and T. Araki
2. 発表標題 Microstructural Characterization of Nitride Semiconductor Films Grown on ScAlMgO <sub>4</sub> Substrate by RF-MBE
3. 学会等名 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials(ISPlasma 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 N. Mokutani, Y. Wada, S. Mouri, K. Shojiki, S. Xiao, H. Miyake and T. Araki
2. 発表標題 Growth of Ultra-Thin GaN/AlN Superlattice Structure toward Deep-UV Emission
3. 学会等名 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials(ISPlasma 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 後藤直樹, 栢本聖也, 黒田悠弥, 和田邑一, 藤井高志, 毛利真一郎, 白石佑児, 福田承生, 荒木努
2. 発表標題 RF-MBE法を用いたScAlMgO <sub>4</sub> 基板上InGaNエピタキシャル成長
3. 学会等名 2021年秋季第82回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 李谷 直哉, 和田 邑一, 毛利 真一郎, 正直 花奈子, 三宅 秀人, 荒木 努
2. 発表標題 RF-MBE法による極薄GaN/AlN超格子構造の作製
3. 学会等名 2021年秋季第82回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 篠田 悠平, 福田 安莉, 橘 秀紀, 毛利 真一郎, 正直 花奈子, 三宅 秀人, 荒木 努
2. 発表標題 RF-MBE法を用いたN極性AlNテンプレート基板上InN結晶成長
3. 学会等名 2021年秋季第82回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中山 大輝, 毛利真一郎, 福田安莉, 高林佑介, 正直花奈子, 三宅秀人, 荒木努
2. 発表標題 AlNテンプレート基板上にRF-MBE法で成長したInNの発光特性
3. 学会等名 2021年秋季第82回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 荒木 努
2. 発表標題 ScAlMgO4基板上窒化物半導体結晶RF-MBE 成長の最近の進展
3. 学会等名 第13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 2021年

1 . 発表者名 Y. Wada, Y. Kuroda, S. Kayamoto, D. Nakayama, N. Goto, S. Mouri, T. Fujii, Y. Shiraishi, T. Fukuda, and T. Araki
2 . 発表標題 RF-MBE Growth and Microstructural Characterization of Nitride Semiconductors on ScAlMgO4 Substrate
3 . 学会等名 The 9th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (LEDIA 2022) (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 T. Araki, N. Goto, M. Deura, Y. Kuroda, Y. Wada, T. Fujii, S. Mouri, Y. Shiraishi, T. Fukuda
2 . 発表標題 International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications (ISPlasma 2023)
3 . 学会等名 Growth of GaN on ScAlMgO4 Substrate by RF-MBE (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 T. Araki, Y. Wada, Y. Kuroda, S. Kayamoto, N. Goto, M. Deura, T. Fuji, Y. Shiraishi, T. Fukuda
2 . 発表標題 RF-MBE Growth of GaN on ScAlMgO4 Substrate
3 . 学会等名 23rd American Conference on Crystal Growth(ACCGE-23) and Epita (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 T. Araki, Y. Wada, Y. Kuroda, N. Goto, Y. Kubo, M. Deura, S. Mouri, T. Fujii
2 . 発表標題 Suppression of Metastable Cubic Phase Inclusion in GaN Growth on ScAlMgO4 Substrates by RF-MBE
3 . 学会等名 14th International Conference on Nitride Semiconductors(ICNS-14) (国際学会)
4 . 発表年 2023年

1. 発表者名 M. Deura, S. Hattori, T. Araki
2. 発表標題 RF-MBE growth and characterization of InGaN thermoelectric thin film
3. 学会等名 14th International Conference on Nitride Semiconductors(ICNS-14) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Hattori, T. Araki, M. Deura
2. 発表標題 RF-MBE growth of InAlN thermoelectric thin film
3. 学会等名 14th International Conference on Nitride Semiconductors(ICNS-14) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Kawakami, Y. Yamada, M. Deura, T. Araki
2. 発表標題 Al/N Ratio Dependence of Low Temperature AlN Growth by RF-MBE
3. 学会等名 14th International Conference on Nitride Semiconductors(ICNS-14) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Kubo, Y. Yamada, M. Deura, T. Fujii, T. Araki
2. 発表標題 Control of In content in InGaN on ScAlMgO4 substrates using RF-MBE
3. 学会等名 14th International Conference on Nitride Semiconductors(ICNS-14) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 服部 翔太, 荒木 努, 出浦 桃子
2. 発表標題 InAlNのRF-MBE成長における原料フラックス依存性
3. 学会等名 第15回ナノ構造エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 久保 祐太, 山田 泰弘, 後藤 直樹, 出浦 桃子, 藤井 高志, 荒木 努
2. 発表標題 ScAlMgO4基板上InGaNのRF-MBE成長におけるIn組成の成長温度依存性
3. 学会等名 第15回ナノ構造エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 山田泰弘, 久保祐太, 和田邑一, 出浦桃子, 藤井高志, 荒木努
2. 発表標題 ScAlMgO4基板上RF-MBE成長InGaN薄膜の極微構造評価
3. 学会等名 2023年秋季第84回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 河上結馬, 荒木努, 出浦桃子
2. 発表標題 RF-MBE法を用いた低温AlN成長のAl/N比依存性
3. 学会等名 2023年秋季第84回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 服部 翔太, 荒木 努, 出浦 桃子
2. 発表標題 InAlN熱電薄膜のRF-MBE成長
3. 学会等名 2023年秋季第84回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 出浦 桃子, 服部 翔太, 荒木 努
2. 発表標題 InGaN熱電薄膜の結晶成長と特性評価
3. 学会等名 2023年秋季第84回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 出浦 桃子, 久保 祐太, 山田 泰弘, 藤井 高志, 荒木 努
2. 発表標題 ScAlMgO <sub>4</sub> 基板上InGaNのRF-MBE成長におけるIn組成制御
3. 学会等名 2023年秋季第84回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Kawakami, Y. Yamada, M. Deura, T. Araki
2. 発表標題 Study on Al/N ratio dependence of low-temperature AlN growth using RF-MBE
3. 学会等名 第 42 回電子材料シンポジウム(EMS-42)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 S. Hattori, M. Deura, T. Araki
2. 発表標題 RF-MBE and characterization of InGaN and InAlN thermoelectric films
3. 学会等名 第 42 回電子材料シンポジウム(EMS-42)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 榊原匠海, 出浦桃子, 荒木努
2. 発表標題 RF-MBE法によるp型GaN実現に向けた成長条件の検討
3. 学会等名 第52回結晶成長国内会議 (JCCG-52)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 笠井 遼太郎、田中 練、出浦 桃子、漆山 真、赤池 良太、中村 孝夫、三宅 秀人、荒木 努
2. 発表標題 低転位密度AlNテンプレート基板上へのAlGaInのRF-MBE成長
3. 学会等名 2024年春季第71回応用物理学会学術講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 窒化物半導体膜育成用テンプレート、及びその製造方法、並びにそれを用いて製造される窒化物半導体、及びその製造方法	発明者 1. 荒木努、出浦桃子、藤井高志、福田承生	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-017376	出願年 2023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	毛利 真一郎  (Mouri Shinichiro)  (60516037)	立命館大学・理工学部・准教授    (34315)	

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