

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02640

研究課題名(和文)多光子励起過程を用いた次世代半導体材料の新しい深部イメージング

研究課題名(英文) Nondestructive measurement of crystal defects using multiphoton excitation photoluminescence

研究代表者

谷川 智之 (Tomoyuki, Tanikawa)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90633537

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：多光子励起フォトルミネッセンス法を用いた次世代半導体の結晶欠陥の観察・分類・識別、三次元分布の可視化を行った。GaNとSiCでは転位の非輻射再結合中心の性質から転位を暗線として可視化でき、濃淡や三次元像から転位種を識別・分類できることが分かった。さらにSiCは貫通転位や基底面転位は積層欠陥が波長400～500 nm付近で発光面として観察されることが分かった。Ga2O3ではナノパイプを可視化でき、表面のヒロック成長との相関がみられた。ダイヤモンドは転位が発光線として観察され、ヘテロエピタキシャル成長中に複雑に屈曲しながら伝搬する挙動が明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多光子励起フォトルミネッセンス法による結晶欠陥評価技術は、次世代半導体に複雑に分布する結晶欠陥の三次元分布を非破壊で可視化できる強力なツールとして、GaN、SiC、Ga2O3、ダイヤモンドと4種類の材料について適用できることを本研究課題を通じて示すことができた。これらの成果を基に結晶工学の発展と、次世代半導体を用いた光デバイスや電子デバイスの性能向上や信頼性向上に貢献しうると期待している。

研究成果の概要(英文)：Observation, classification, and identification of crystal defects in widegap semiconductors were demonstrated using multiphoton excitation photoluminescence, and three-dimensional distribution of crystal defects was visualized. In GaN and SiC, dislocations can be visualized as dark lines due to the non-radiative recombination center nature of dislocations, and dislocation species can be identified and classified from shading and three-dimensional images. Furthermore, it was found that in SiC, through-plane dislocations and basal plane dislocations are observed as emission surfaces at wavelengths of around 400-500 nm for stacking faults. In Ga2O3, nanopipes can be visualized and correlated with surface hillock growth. In diamond, dislocations were observed as emission lines, revealing complex bending and propagation behavior during heteroepitaxial growth.

研究分野：結晶工学

キーワード：ワイドギャップ半導体 結晶欠陥 多光子励起フォトルミネッセンス 窒化ガリウム 酸化ガリウム  
ダイヤモンド シリコンカーバイド

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

AlN や GaN、SiC、および、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> などの次世代半導体を用いたデバイスは、電力や光を極めて高効率に変換し輸送するトランスフォーマティブエレクトロニクスとして未来社会を支える根幹である。これらの次世代半導体材料は、高品質な単結晶を作製するのが難しく、転位などの結晶欠陥が多数含まれており、デバイス特性に大きな影響を与える。既存材料の Si や GaAs に倣い、すべての結晶欠陥を排除できれば結晶欠陥が及ぼす影響を解決できるが、全ての欠陥を排除する方法論は確立していない。そのため、次世代半導体材料のデバイス開発では結晶欠陥とデバイス特性との相関を理解したうえで、欠陥の密度や分布を制御することが重要である。

多光子励起を利用したイメージング技術は、従来、バイオイメージング用途に開発されてきた。この用途では、生体組織を蛍光色素で染色し、色素から放出される可視蛍光を計測することで生体組織の三次元形状を観察する。生体組織に害を及ぼさないために、観察対象に対して透明度が高い「生体の窓」と呼ばれる波長域を利用して励起や検出を行う。半導体材料は、生体組織と異なり蛍光色素を意図的に注入することはできないため、材料固有の吸収特性や発光特性などの光物性に基づいた観察技術が求められる。特に、AlN や Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> などの材料は、そのバンドギャップエネルギーが深紫外に相当し、励起光の可視～赤外域から発光の深紫外の波長域までカバーする光学系を構築する必要がある。さらに、材料のエネルギーバンド構造によっても性質が異なる。GaN や AlN は直接遷移型半導体で発光効率が高い。一方、SiC や Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は間接遷移型半導体で発光効率が低く、点欠陥の準位を介したキャリア遷移に起因する低エネルギーの発光のほうが発出しやすい可能性がある。

## 2. 研究の目的

多光子励起を利用して次世代半導体から放出されるルミネッセンス（多光子励起フォトルミネッセンス）の検出に基づく欠陥の非破壊観察手法の確立を目的とし、(1)次世代半導体材料の欠陥観察を行うための多光子励起条件および検出条件の確立、(2)紫外材料の観察を行うための励起・検出手法の確立、(3)三次元イメージングに基づく転位伝搬機構の解明について研究を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 次世代半導体材料の欠陥観察を行うための多光子励起条件および検出条件の確立

次世代半導体における多光子励起フォトルミネッセンスの素過程を明らかにする。超短パルスを集光照射した際に生じる多光子励起過程と、励起キャリア拡散、再結合などの過程について、励起波長や励起強度依存性を調べ、欠陥を観察するための諸条件を明らかにする。また、貫通転位の特徴を抽出して、識別・分類するための方法を探索する。

### (2) 超ワイドギャップ材料の観察を行うための励起・検出手法の確立

AlGaN や Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> などバンドギャップエネルギーが極めて大きな材料の多光子励起 PL 測定では、励起光源の赤外波長から発光波長の紫外波長まで考慮した光学設計が必要になる。このような広い波長範囲の色収差や透過率を担保する対物レンズは存在せず、既存の光学系では測定が難しい。また、バンドギャップエネルギーが大きくなると、励起に関与する光子数が増えるため、励起確率が著しく低下してしまう。これらの問題を解決するために、第二高調波発生を利用した励起波長の短波長化と、材料の透明性を活用

した紫外光の検出光学系の構築を行う。

### (3) 三次元イメージングに基づく転位伝搬機構の解明

GaN の ELO 成長やダイヤモンドのステップフロー成長における転位伝搬の三次元的な性質を多光子励起フォトルミネッセンス法で評価し、転位低減機構の解明を目指す。

## 4. 研究成果

### (1) 次世代半導体材料の欠陥観察を行うための多光子励起条件および検出条件の確立

波長 1030 nm のフェムト秒レーザー光を集光照射したところ、GaN、SiC、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、ダイヤモンドのいずれの試料においてもフォトルミネッセンス発光が検出された。発光強度は励起光強度のべき乗に比例し、GaN と SiC は 3 乗、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は 4 乗、ダイヤモンドは 2 乗の関係があった。励起光エネルギーとバンドギャップエネルギーの関係から、ダイヤモンド以外は多光子吸収によるバンド間励起が生じており、ダイヤモンドは禁制帯内励起が生じていることが分かった。主たる発光は材料によって異なっており、GaN はバンド端発光とイエロールミネッセンス、SiC はバンド端発光と積層欠陥からの青色発光、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は自己束縛励起子と深い準位のグリーンルミネッセンス、ダイヤモンドは転位に起因した Band-A 発光と窒素-空孔複合欠陥に起因した発光が得られた。それぞれの発光特性に基づいて光学フィルタを選定し、光電子増倍管で発光強度を検出しながら励起光の焦点を三次元走査することで多光子励起フォトルミネッセンス像を取得したところ、GaN、SiC、ダイヤモンドについて貫通転位の三次元分布を発光コントラストとして可視化することができた。GaN の例を図 1 に示す。 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> はナノパイプに由来した特徴的なコントラストが得られ、ナノパイプの分布を可視化することができた (図 2)。

次に、多光子励起フォトルミネッセンス測定で観察された GaN 結晶中の転位種識別と分類を試みた。転位種識別のために KOH と NaOH の混合融液を用いてエッチピットを形成し、ピットの直径や形状から 5 種類に分類された。ピットのサイズはエッチピットのバーガスベクトル  $\mathbf{b}$  の大きさに依存することが知られており、主たる転位種である貫通刃状転位 ( $\mathbf{b} = 1\mathbf{a}$ )、貫通螺旋転位 ( $\mathbf{b} = 1\mathbf{c}$ )、貫通混合転位 ( $\mathbf{b} = 1\mathbf{a} + 1\mathbf{c}$ ) を識別することができた。次に多光子励起フォトルミネッセンス法によりエッチピットより深部の領域のイメージングを行い、貫通転位に対応する貫通転位のコントラストや性質を

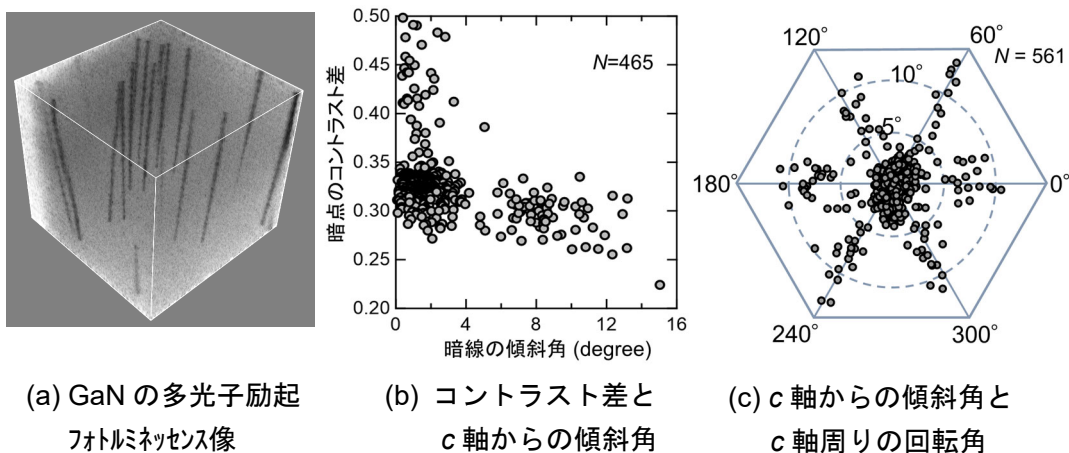


図 1 HVPE 成長 GaN 基板の多光子励起フォトルミネッセンス像と転位の統計分類結果

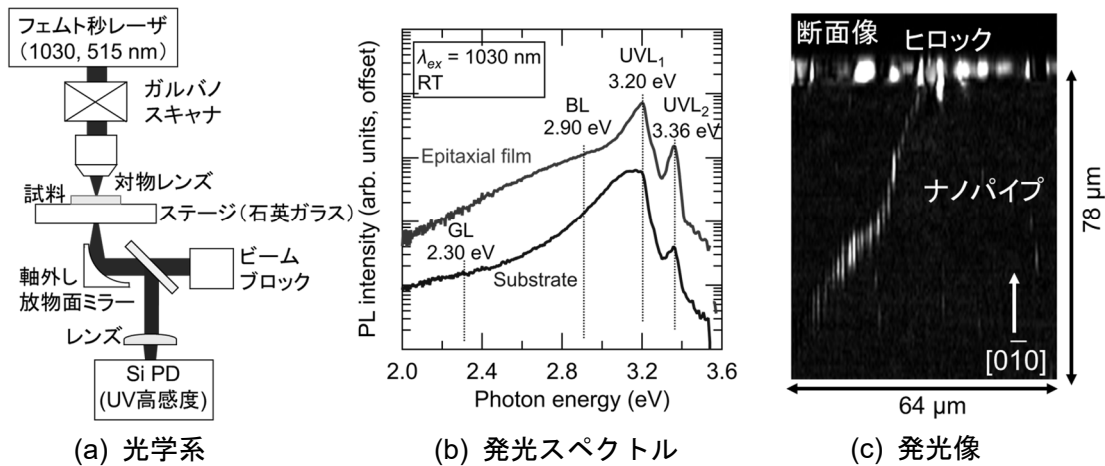


図2 紫外光検出のための光学系と  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  の発光スペクトルと発光像（コントラスト反転表示）

調べた。その結果、転位種と暗線の性質に対応関係があることが分かった。多光子励起フォトルミネッセンス像から転位種を分類するためにコントラストや貫通転位の伝搬の性質を調べた（図 1(b), 1(c)）その結果、貫通螺旋転位は他の転位と較べコントラストが暗く、混合転位は  $c$  軸から傾斜して伝搬する性質があることが分かり、多光子励起フォトルミネッセンス測定によって転位の分布を可視化するだけでなく、転位種の識別や分類も可能であることが示された。

### (2) 超ワイドギャップ材料の観察を行うための励起・検出手法の確立

$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  などの超ワイドギャップ材料を観察するために BBO 結晶を用いた第二高調波発生により励起光波長を半分の 515 nm に変換して試料へ集光照射したところ、従来の波長 1030 nm の 4 光子励起の場合と較べて低い励起光強度で発光が得られた。発光強度は励起光強度の 2 乗に比例して増加した。2 光子励起を介した発光が得られた。また、図 2(a)の紫外検出系を用いることにより、波長 350 nm 以下の発光を検出できるようになった。この領域の発光は、図 2(b)のスペクトルでピークを有する UVL2 の高エネルギー側の裾と、1030 nm 励起の場合は第三高調波発生による発光を得ることができた。

### (3) 三次元イメージングに基づく転位伝搬機構の解明

オフ角  $10^\circ$  程度の(001)ヘテロエピタキシャルダイヤモンド基板の貫通転位の特異な伝搬挙動を評価した。図 3 に示す三次元発光像から、貫通転位は、オフ角に対応して表面から  $10^\circ$  傾斜して伝搬する領域と、 $30^\circ$  程度傾斜して伝搬する領域が交互に現れた。これらはそれぞれ、オフ角の大きな基板の上の成長の際に表面に現れるテラス領域とライザーと呼ばれるマクロステップの領域に対応しており、ライザーがステップフロー方向に進行する際に転位が屈曲する様子が観察された。

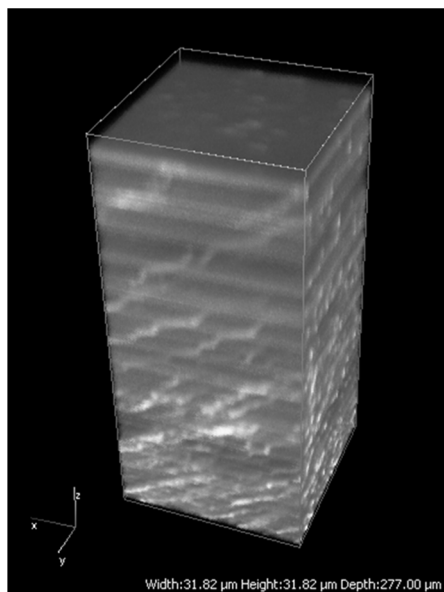


図3 ヘテロエピダイヤモンドの多光子励起フォトルミネッセンス像

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7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<br>Yoshida Shin, Shojiki Kanako, Miyake Hideto, Uemukai Masahiro, Tanikawa Tomoyuki, Katayama Ryuji                                       | 4. 巻<br>61                    |
| 2. 論文標題<br>Emission color modulation of InGaN/GaN multiple quantum wells by selective area metalorganic vapor phase epitaxy on hexagonal windows | 5. 発行年<br>2022年               |
| 3. 雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>030904 ~ 030904 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/ac55e5  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Ogura Akio, Tanikawa Tomoyuki, Takamoto Tatsuya, Oshima Ryuji, Sugaya Takeyoshi, Imaizumi Mitsuru  | 4. 巻<br>14                    |
| 2. 論文標題<br>Nondestructive characterization of threading dislocations in graded buffer layers of inverted metamorphic solar cells by two-photon excitation spectroscopy | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Express  | 6. 最初と最後の頁<br>111002 ~ 111002 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1882-0786/ac2d10  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Tsukakoshi Mayuko, Tanikawa Tomoyuki, Yamada Takumi, Imanishi Masayuki, Mori Yusuke, Uemukai Masahiro, Katayama Ryuji                            | 4. 巻<br>14                    |
| 2. 論文標題<br>Identification of Burgers vectors of threading dislocations in freestanding GaN substrates via multiphoton-excitation photoluminescence mapping | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Express  | 6. 最初と最後の頁<br>055504 ~ 055504 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1882-0786/abf31b  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Tanikawa Tomoyuki  | 4. 巻<br>-            |
| 2. 論文標題<br>Multiphoton Microscopy  | 5. 発行年<br>2020年      |
| 3. 雑誌名<br>Characterization of Defects and Deep Levels for GaN Power Devices, edited by Tetsuo Narita and Tetsu Kachi [AIP Publishing (online), Melville, New York, 2020] | 6. 最初と最後の頁<br>1 ~ 22 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/9780735422698_007  | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Ogura Akio, Tanikawa Tomoyuki, Takamoto Tatsuya, Oshima Ryuji, Suzuki Hidetoshi, Imaizumi Mitsuru, Sugaya Takeyoshi                       | 4. 巻<br>-               |
| 2. 論文標題<br>Observation of Dislocations in Graded Buffer Layers of IMM Single Junction InGaAs Solar Cells by Two-Photon Excitation Photoluminescence | 5. 発行年<br>2020年         |
| 3. 雑誌名<br>Proc. IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)  | 6. 最初と最後の頁<br>0273-0276 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/PVSC40753.2019.8981390  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Nishikawa Tomoka, Goto Ken, Murakami Hisashi, Kumagai Yoshinao, Uemukai Masahiro, Tanikawa Tomoyuki, Katayama Ryuji          | 4. 巻<br>62                    |
| 2. 論文標題<br>Observation of nanopipes in edge-defined film-fed grown -Ga203 substrate and their effect on homoepitaxial surface hillocks | 5. 発行年<br>2023年               |
| 3. 雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics  | 6. 最初と最後の頁<br>SF1015 ~ SF1015 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/acc18e  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                                 |
|--|---------------------------------|
| 1. 著者名<br>Murata Tomotaka, Ikeda Kazuhisa, Yamasaki Jun, Uemukai Masahiro, Tanikawa Tomoyuki, Katayama Ryuji | 4. 巻<br>2023                    |
| 2. 論文標題<br>Polarity Inversion of GaN via AlN Oxidation Interlayer Using Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy    | 5. 発行年<br>2023年                 |
| 3. 雑誌名<br>physica status solidi (b)  | 6. 最初と最後の頁<br>2200583 ~ 2200583 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1002/pssb.202200583   | 査読の有無<br>無                      |
| オープンアクセス<br>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<br>-                       |

〔学会発表〕 計37件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 11件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Tomoyuki Tanikawa  |
| 2. 発表標題<br>Polarity inversion of GaN films by metalorganic vapor epitaxy using an AlN interlayer  |
| 3. 学会等名<br>The 3rd International Workshop on Materials Science and Advanced Electronics Created by Singularity/ The 2nd International Symposium on Wide Gap Semiconductor Growth, Process and Device Simulation (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Tanikawa, A. Ogura, M. Uemukai, and R. Katayama   |
| 2. 発表標題<br>Nondestructive Characterization of Dislocations Using Multiphoton-Excitation Photoluminescence |
| 3. 学会等名<br>SemiconNano2021 (招待講演) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>谷川智之、塚越真悠子、宇佐美茂佳、今西正幸、森 勇介、川崎晟也、田中敦之、本田善央、天野 浩、上向井正裕、片山竜二 |
| 2. 発表標題<br>GaN縦型pnダイオード中の特異なフォトルミネッセンス発光                             |
| 3. 学会等名<br>第69回応用物理学会春季学術講演会   |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>西河巴賀、塚越真悠子、後藤 健、村上 尚、熊谷義直、上向井正裕、谷川智之、片山 竜二 |
| 2. 発表標題<br>EF6成長 (010) -Ga203結晶中のナノパイプの三次元形状          |
| 3. 学会等名<br>第69回応用物理学会春季学術講演会                          |
| 4. 発表年<br>2022年                                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>谷川智之、大曲新矢、上向井正裕、片山竜二            |
| 2. 発表標題<br>ヘテロエピタキシャル成長ダイヤモンド基板中の貫通転位の伝搬挙動 |
| 3. 学会等名<br>第69回応用物理学会春季学術講演会               |
| 4. 発表年<br>2022年                            |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>西河巴賀、塚越真悠子、後藤 健、村上 尚、熊谷義直、上向井正裕、谷川智之、片山竜二                               |
| 2. 発表標題<br>多光子励起フォトルミネッセンス法による $\alpha$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 結晶のナノパイプ観察 |
| 3. 学会等名<br>第13回ナノ構造エピタキシャル成長講演会  |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>安田悠馬、谷川智之、上向井正裕、片山竜二                                   |
| 2. 発表標題<br>フルカラー InGaN多重量子井戸の作製に向けた接合可能な非極性Ga <sub>N</sub> 平坦膜の成長 |
| 3. 学会等名<br>第13回ナノ構造エピタキシャル成長講演会                                   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>吉田 新, 正直花奈子, 三宅秀人, 谷川智之, 上向井正裕, 片山竜二                  |
| 2. 発表標題<br>気相拡散効果を利用したマルチカラー InGa <sub>N</sub> 多重量子井戸の有機金属気相選択成長 |
| 3. 学会等名<br>第50回結晶成長国内会議 (JCCG-50)                                |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>池田和久, 村田知駿, 上向井正裕, 谷川智之, 片山竜二                       |
| 2. 発表標題<br>サファイア基板上N極性Ga <sub>N</sub> 薄膜の有機金属気相成長法における平坦化条件の探索 |
| 3. 学会等名<br>第50回結晶成長国内会議 (JCCG-50)                              |
| 4. 発表年<br>2021年  |



|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>M. Tsukakoshi, T. Tanikawa, M. Uemukai and R. Katayama   |
| 2. 発表標題<br>Correlation Between MPPL and Raman Mapping Images of GaN for Nondestructive Identification of Threading Dislocations |
| 3. 学会等名<br>第40回電子材料シンポジウム   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Murata, T. Tanikawa, M. Uemukai and R. Katayama   |
| 2. 発表標題<br>Fabrication of GaN Polarity Inverted Structure via Ultrathin AlN Oxidation Interlayer using Metalorganic Vapor Phase Epitaxy |
| 3. 学会等名<br>第40回電子材料シンポジウム   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>村田知駿、谷川智之、上向井正裕、片山竜二             |
| 2. 発表標題<br>有機金属気相成長法を用いたGaNエピタキシャル極性反転技術の開発 |
| 3. 学会等名<br>第82回応用物理学会秋季学術講演会                |
| 4. 発表年<br>2021年                             |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>西河巴賀、塚越真悠子、後藤 健、村上 尚、熊谷義直、谷川智之、上向井正裕、片山竜二                        |
| 2. 発表標題<br>多光子励起フォトルミネッセンス法による -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 結晶の三次元イメージング |
| 3. 学会等名<br>第82回応用物理学会秋季学術講演会  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>谷川智之                        |
| 2. 発表標題<br>窒化物半導体の波長変換デバイス応用           |
| 3. 学会等名<br>応用物理学会中国四国支部・若手半導体研究会（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2021年                        |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>谷川智之   |
| 2. 発表標題<br>多光子励起過程を利用した次世代半導体材料の欠陥評価技術                        |
| 3. 学会等名<br>日本学術振興会第R032委員会 第2回研究会「R032委員会キックオフ研究会：結晶作製」（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>谷川智之                         |
| 2. 発表標題<br>多光子顕微鏡による化合物半導体の欠陥解析         |
| 3. 学会等名<br>日本学術振興会第R026委員会 第7回研究会（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2021年                         |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Tanikawa, M. Tsukakoshi, M. Uemukai, R. Katayama   |
| 2. 発表標題<br>Nondestructive characterization of GaN by multiphoton-excitation photoluminescence mapping    |
| 3. 学会等名<br>SPIE Photonics West: Conference 11686 -Gallium Nitride Materials and Devices XVI-（招待講演）（国際学会） |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Kiguchi, Y. Kodama, Y. Hayasaka, T. Tanikawa, and T. J. Konno                         |
| 2. 発表標題<br>Core structure of threading dislocations in GaN  |
| 3. 学会等名<br>The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-8) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>M. Tsukakoshi, T. Tanikawa, M. Uemukai, R. Katayama  |
| 2. 発表標題<br>Classification of threading dislocations in HVPE-grown n-type GaN substrates by multiphoton-excitation photoluminescence imaging |
| 3. 学会等名<br>The 8th Asian Conference on Crystal Growth and Crystal Technology (CGCT-8) (招待講演) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>M. Tsukakoshi, T. Tanikawa, M. Uemukai, R. Katayama   |
| 2. 発表標題<br>Correlation between etch pit size and threading dislocation propagation habit in GaN substrate observed by multiphoton-excitation photoluminescence |
| 3. 学会等名<br>8th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Application (LEDIA2020) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>谷川智之   |
| 2. 発表標題<br>多光子励起フォトルミネッセンスによる結晶欠陥の非侵襲観察                     |
| 3. 学会等名<br>2021年2月24日新学術領域研究 特異構造の結晶科学 オンライン成果報告・連絡会 (Zoom) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>谷川智之、足立真理子、寺田陸斗、塚越真悠子、上向井正裕、片山竜二                  |
| 2. 発表標題<br>GaN結晶中の貫通転位の非破壊分類に向けた多光子励起PLマッピング像とラマンマッピング像の相関解析 |
| 3. 学会等名<br>第68回応用物理学会春季学術講演会                                 |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>M. Tsukakoshi, T. Tanikawa, M. Uemukai, R. Katayama   |
| 2. 発表標題<br>Comparative study of dislocation classification in HVPE-grown GaN by etch pit method and multiphoton-excitation photoluminescence imaging |
| 3. 学会等名<br>第39回電子材料シンポジウム  |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>塚越真悠子、谷川智之、上向井正裕、片山竜二                        |
| 2. 発表標題<br>多光子励起フォトルミネッセンス法によるHVPE-GaN結晶の貫通転位の観察と分類 (2) |
| 3. 学会等名<br>第81回応用物理学会秋季学術講演会                            |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>塚越真悠子、谷川智之、上向井正裕、片山竜二                               |
| 2. 発表標題<br>多光子励起フォトルミネッセンス測定における 集光スポットサイズを考慮した GaN結晶中の貫通転位の判別 |
| 3. 学会等名<br>日本結晶成長学会ナノエピ分科会「第12回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会」              |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>塚越真悠子、谷川智之、上向井正裕、片山竜二                    |
| 2. 発表標題<br>多光子励起フォトルミネッセンス法によるHVPE-GaN結晶中貫通転位の観察と分類 |
| 3. 学会等名<br>第67回応用物理学会春季学術講演会                        |
| 4. 発表年<br>2020年                                     |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Nishikawa, M. Tsukakoshi, K. Goto, H. Murakami, Y. Kumagai, M. Uemukai, T. Tanikawa, and R. Katayama       |
| 2. 発表標題<br>3D Imaging of $\alpha$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Crystal Using Multiphoton-Excitation Photoluminescence |
| 3. 学会等名<br>2022 MRS Spring Meeting & Exhibit (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Murata, K. Ikeda, J. Yamasaki, T. Tanikawa, M. Uemukai, and R. Katayama                    |
| 2. 発表標題<br>Polarity inversion of GaN via AlN oxidation interlayer using metalorganic vapor phase epitaxy |
| 3. 学会等名<br>International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2022) (国際学会)                             |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Tanikawa, Y. Ishii, M. Tsukakoshi, R. Terada, M. Adachi, M. Uemukai, R. Katayama  |
| 2. 発表標題<br>Identification of Burgers vectors of threading dislocations in HVPE-Grown GaN using Multiphoton-Excitation Photoluminescence |
| 3. 学会等名<br>International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN2022) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>T. Tanikawa, R. Katayama, S. Ohmagari   |
| 2. 発表標題<br>Three-dimensional characterization of threading dislocations in heteroepitaxial diamond substrate using multiphotonexcitation photoluminescence |
| 3. 学会等名<br>32nd International Conference on Diamond and Carbon Materials (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>T. Nishikawa, M. Tsukakoshi, K. Goto, H. Murakami, Y. Kumagai, M. Uemukai, T. Tanikawa, and R. Katayama  |
| 2. 発表標題<br>Observation of nanopipes in edge-defined film-fed grown -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> substrate and their effect on homoepitaxial surface hillocks |
| 3. 学会等名<br>The 4th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (IWGO2022) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>三浦祐樹, 小澤祐市, 谷川智之, 上杉祐貴, 佐藤俊一                    |
| 2. 発表標題<br>光ニードル顕微鏡法を用いたGaN結晶内転位の3次元可視化における球面収差補正と空間分解能の評価 |
| 3. 学会等名<br>第70回応用物理学会春季学術講演会                               |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>長谷川大輔, 本田達也, 上山智, 高橋伸明, 三浦仁嗣, 上向井正裕, 谷川智之, 片山竜二 |
| 2. 発表標題<br>DCパルススパッタリング法によるGaNの選択成長                        |
| 3. 学会等名<br>第70回応用物理学会春季学術講演会                               |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>西河巴賀, 谷川智之, 本田啓人, 後藤 健, 村上 尚, 熊谷義直, 田中敦之, 本田善央, 天野 浩, 上向井正裕, 片山竜二 |
| 2. 発表標題<br>多光子励起過程を利用した -Ga203の時間分解フォトルミネッセンス分光                              |
| 3. 学会等名<br>第70回応用物理学会春季学術講演会   |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>安田悠馬, 上向井正裕, 谷川智之, 片山竜二          |
| 2. 発表標題<br>a面GaN/c面GaNの表面活性化接合に向けた表面平坦化プロセス |
| 3. 学会等名<br>第14回ナノ構造エピタキシャル成長講演会             |
| 4. 発表年<br>2022年                             |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>K. Ikeda, T. Murata, S. Ichikawa, Y. Fujiwara, T. Tanikawa, M. Uemukai, and R. Katayama  |
| 2. 発表標題<br>Fabrication of GaN transverse quasi phase matching photon pair generation device using MOVPE-based epitaxial polarity inversion technology |
| 3. 学会等名<br>第41回電子材料シンポジウム   |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>池田和久, 村田知駿, 市川修平, 藤原康文, 上向井正裕, 谷川智之, 片山竜二     |
| 2. 発表標題<br>MOVPEエピタキシャル極性反転技術を用いたGaN横型擬似位相整合光子対発生デバイスの作製 |
| 3. 学会等名<br>第83回応用物理学会秋季学術講演会                             |
| 4. 発表年<br>2022年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

使える次世代半導体の実現。GaN 半導体の結晶欠陥を非破壊で識別する技術  
<https://www.eng.osaka-u.ac.jp/wp-content/uploads/2021/04/PR20210428.pdf>

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)        | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)        | 備考 |
|-------|----------------------------------|------------------------------|----|
| 研究協力者 | 片山 竜二<br><br>(Katayama Ryuji)    | 大阪大学・工学研究科・教授<br><br>(14401) |    |
| 研究協力者 | 上向井 正裕<br><br>(Uemukai Masahiro) | 大阪大学・工学研究科・助教<br><br>(14401) |    |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|