

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K05292

研究課題名(和文)窒化アルミニウム系超高耐压半導体素子作製のための基盤技術開発

研究課題名(英文) Development of fundamental technologies for fabrication of ultra-high voltage aluminum nitride semiconductor devices

研究代表者

上野 耕平 (Ueno, Kohei)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：90741223

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、次世代超高耐压・高出力パワーデバイスとして期待される窒化アルミニウム(AIN)および窒化アルミニウムガリウム(AlGaN)混晶の結晶成長・デバイスプロセス開発に取り組んだ。AIN結晶成長には高エネルギー粒子・紫外線照射による欠陥擬フェルミレベル制御というアプローチを導入し、パルススパッタ堆積法を用いて高品質AIN結晶成長・n絶型伝導性制御を実現した。さらに本手法を用いてAIN/AlGaN高電子移動度トランジスタを作製し、最大電流密度250 mA/mm、絶縁破壊電界が3.0 MV/cmの高出力・高耐压動作を実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、低コストかつ大面積に成膜可能なスパッタ法を用いて高品質なAIN・AlGaNエピタキシャル成長を実現した点で、産業応用上の価値が高いと考えている。また欠陥擬フェルミレベル制御によるAIN結晶高品質化の可能性を示したことは、結晶学上意義がある。さらにAlGaN混晶を用いた高移動度電子トランジスタの低抵抗化を世界に先駆けて実現し、高出力・高耐压動作を実証したことで、次世代パワーエレクトロニクス分野の開拓・進展に資する成果を得たといえる。

研究成果の概要(英文)：This study has developed crystal growth and device processes for aluminum nitride (AlN) and aluminum gallium nitride (AlGaN) alloys, promising for next-generation ultra-high voltage and high-power electron devices. The new approach of the defect-quasi Fermi level control by high-energy particle/ultraviolet irradiation during the pulsed sputtering deposition of AlN potentially enabled the epitaxial growth of high-quality AlN and its n-type doping. Furthermore, AlN/AlGaN high electron mobility transistors were fabricated using this method and demonstrated high-power and high-voltage operation with a maximum current density of 250 mA/mm and a breakdown field of 3.0 MV/cm.

研究分野：結晶成長、半導体デバイス

キーワード：半導体 電子デバイス 高電子移動度トランジスタ 結晶成長 パワーデバイス ドーピング スパッタリング

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

高温・放射線環境下において動作可能な超高耐压・高出力エレクトロニクス材料として、Ultra-Wide Bandgap 半導体が注目を集めている。このような材料は原子間の結合力が強いため、バンドギャップが大きいほど放射線のような高エネルギー粒子照射による衝突電離や格子変位に対して高い耐性を示す。Ultra-Wide Bandgap 半導体の中でも窒化アルミニウム (AlN) は最大の 6.2 eV のバンドギャップを有する直接遷移型半導体であり超高耐压エレクトロニクス材料として期待できる。また AlN の絶縁破壊電界はダイヤモンドや $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を凌ぐ 12 ~ 15.4 MV/cm にも達すると報告されており素子の高耐压化が可能である。<sup>[1]</sup>このような優れた材料物性を活かした AlN 系エレクトロニクスの構築には、適切なエピタキシャル成長手法と伝導性制御技術の開発が必要不可欠である。しかしながら AlN のような Ultra-Wide Bandgap 半導体材料では、バンドギャップが大きいほど補償型点欠陥の形成利得が大きいと、n 型 AlN では補償アクセプター型欠陥が、p 型 AlN では補償ドナー型欠陥が高濃度に形成される本質的な問題がある。実際に、従来の有機金属気相成長 (MOCVD) 法では、トリメチルアルミニウム原料由来の炭素不純物や、1000 を超える非常に高い結晶成長温度に起因した空孔型欠陥が補償中心として働くため、AlN の伝導性制御を困難にしていた。

このような問題に対して、結晶成長中にバンドギャップより大きなエネルギーをもつ深紫外光を照射し欠陥の擬フェルミレベルを変調することで、補償型点欠陥の形成を抑制するという新しいアプローチが近年提案されている。<sup>[2]</sup> 実験的にも、MOCVD 法による n 型 GaN 結晶成長において、補償アクセプターである炭素不純物濃度の低減に有効であることが示されてきた。さらに、このような効果はバンドギャップの大きな材料ほど、また結晶成長温度が低いほど有効であることが理論的に示されている。

このような結晶成長における新たなアプローチは AlN・AlGa<sub>N</sub> 混晶の高品質化に有望であると考えられるが、実験的な試みは十分ではなく、同材料系を用いた超高耐压・高出力電子デバイスも実現していない状態であった。

## 2. 研究の目的

本研究では、深紫外線・高エネルギー照射による欠陥擬フェルミレベル制御というアプローチをもとに、パルススパッタ堆積法を用いて AlN・AlGa<sub>N</sub> 混晶の高品質結晶成長の実現し、超高耐压・高出力電子デバイス作製に向けた基盤プロセス技術を開発することを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) パルススパッタ堆積法を用いた AlN 高品質結晶成長

本研究では、深紫外線・高エネルギー粒子照射による欠陥擬フェルミレベル制御をもとにした補償欠陥制御という概念を実証するために、パルススパッタ装置を用いて AlN および AlGa<sub>N</sub> 混晶の結晶成長を実施した。パルススパッタ堆積装置内では、高密度の窒素プラズマ中に結晶成長用基板があるため、高エネルギーの荷電粒子・高強度の深紫外線照射下で結晶成長が進行する。

本装置を用いて AlN の n 型伝導性制御に取り組み、材料品質の指標として電子移動度を評価関数として結晶成長条件の最適化を行った。作製した AlN 薄膜の結晶品質や不純物濃度は X 線回折 (XRD)、透過電子顕微鏡 (TEM)、原子間力顕微鏡 (AFM)、二次イオン質量分析 (SIMS) を用いて評価を行った。電気特性はホール効果測定により評価を行った。

### (2) AlN/AlGa<sub>N</sub> ヘテロ界面を利用した高電子移動度トランジスタの開発

パルススパッタ堆積法を用いて AlN/AlGa<sub>N</sub> ヘテロ界面を利用した高移動度電子トランジスタ (HEMT) の開発を行い、高出力高耐压エレクトロニクスの実現可能性について検討を行った。

また、AlGa<sub>N</sub> 混晶は Al 組成増加とともに電子親和力が小さくなるため、同材料に効率よく電

子注入可能な材料は限られており、接触抵抗が素子性能を決定するボトルネックとなる。本研究ではパルススパッタ堆積法を用いて HEMT 素子のソース・ドレイン領域に高濃度縮退 n 型 GaN を選択エピ成長することで、AlN/AlGaIn HEMT 素子の接触抵抗の低減を行い、素子の高性能化に取り組んだ。素子作製にはフォトリソグラフィ、ドライエッチング、電子線蒸着等、標準的な半導体プロセスを用いた。

#### 4. 研究成果

##### (1) パルススパッタ堆積法を用いた AlN 高品質結晶成長

パルススパッタ堆積法を用いてサファイア上 AlN(0001)テンプレート基板に AlN 結晶成長を行った。図 1 には AlN 成長後の表面 AFM 像とその断面プロファイルを示す。原子層ステップからなる平坦な表面モフォロジーが観察され、表面平坦性に優れた AlN 薄膜が成長していることが分かった。AlN 薄膜の結晶性を X 線ロックアップ測定により評価したところ、0002 および 10-12 回折の半値幅はそれぞれ 49、175 arcsec と狭く、転位密度に換算すると、らせん転位成分は  $7.3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 、刃状転位成分は  $2.8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  と高品質な結晶が得られていることに対応する。このような薄膜の残留不純物濃度を SIMS により評価したところ、典型的な Si や O、C 等の不純物は 10ppm 以下と十分に低い濃度であることを明らかにした。

このような高品質かつ高純度 AlN 結晶に対して、n 型ドーパントとして Si を添加することで n 型伝導性制御が可能になる。図 2(a)には Si を意図的に  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  添加した AlN 薄膜の温度依存ホール効果測定の結果を示す。室温での電子濃度および電子移動度はそれぞれ  $8.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  および  $141 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  と AlN としては良好な n 型伝導性が得られた。また電子濃度は測定温度に対して指数関数的に増減し、活性化エネルギーは 310 meV の値を得た。

次に電子移動度の温度依存性をフォノン散乱や不純物散乱等の各種散乱機構を考慮し、マティーンセン則をもとに解析を行った。図 2(b)に示すように実験値と計算結果はよく一致しており、室温付近ではイオン化不純物散乱が、380 K より高温側では極性光学フォノン散乱が電子移動度の主たる散乱要因になることが分かった。また本研究で作製した AlN 結晶の室温電子移動度 ( $141 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ) は他手法により作製した同程度のドーピング濃度の試料に比べて高い値が得られている。これはプラズマ中で結晶成長が進行することで欠陥擬フェルミレベルが変調され、イオン化不純物散乱中心として働く補償アクセプター欠陥濃度が低下した可能性を示唆している。

以上のようにパルススパッタ堆積法を用いて高品質 AlN 結晶成長および n 型伝導性制御を実現したことから、当初の計画通りの成果を得たと考えている。今後、深紫外線・高エネルギー粒子照射による欠陥擬フェルミレベル制御に関する実験的知見の蓄積、定量的な解析がさらに進めば、本アプローチは Ultra-Wide Bandgap 半導体結晶成長分野における有用な技術になると考えられる。

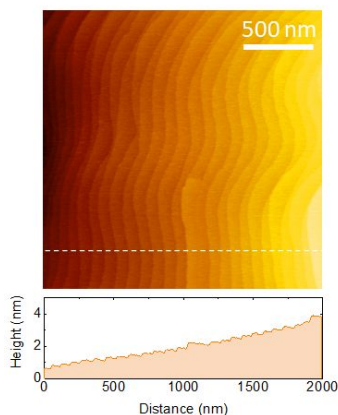


図 1 パルススパッタ成長した AlN の表面 AFM 像

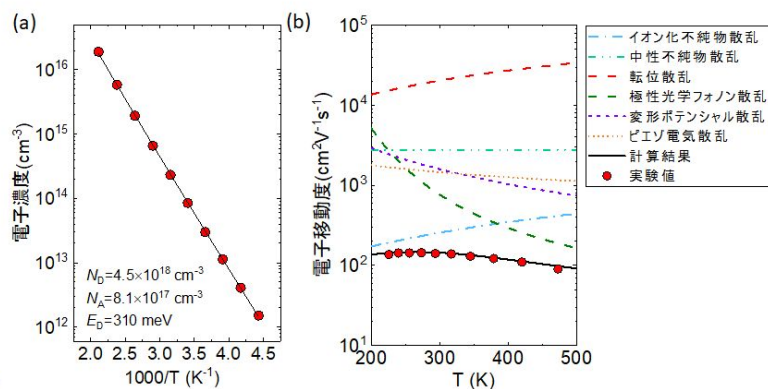


図 2 (a) Si 添加 AlN の電子濃度温度依存性 (b) 電子移動度の温度依存性と各種散乱機構を考慮した解析結果

## (2) AlN/AlGa<sub>0.5</sub>N ヘテロ界面を利用した高電子移動度トランジスタの開発

上記の結晶成長技術をもとに、*c* 面サファイア上 AlN テンプレート基板に AlN/Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N HEMT を作製した。図 3 には、デバイス構造断面図および作製した試料の XRD・AFM 測定結果を示す。図 3(b)に示す X 線逆格子マッピング測定の結果から、AlN/Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N ヘテロ構造はコヒーレント成長していることが分かった。また再表面の AlN バリア層の表面モフォロジーは原子レベルで平坦で、その表面平坦性をあらわす二乗平均平方根(RMS)値は 0.13 nm と極めて小さい値が得られた。またホール効果測定および容量測定の結果から AlN/Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N ヘテロ界面には  $1.7 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  の高密度の 2 次元電子ガスが発生しており、シート抵抗は 3.9 k $\Omega$ /sq.であった。このように、パルスパッタ堆積法を用いて高品質な AlN/AlGa<sub>0.5</sub>N HEMT 構造の作製が可能であることが分かった。

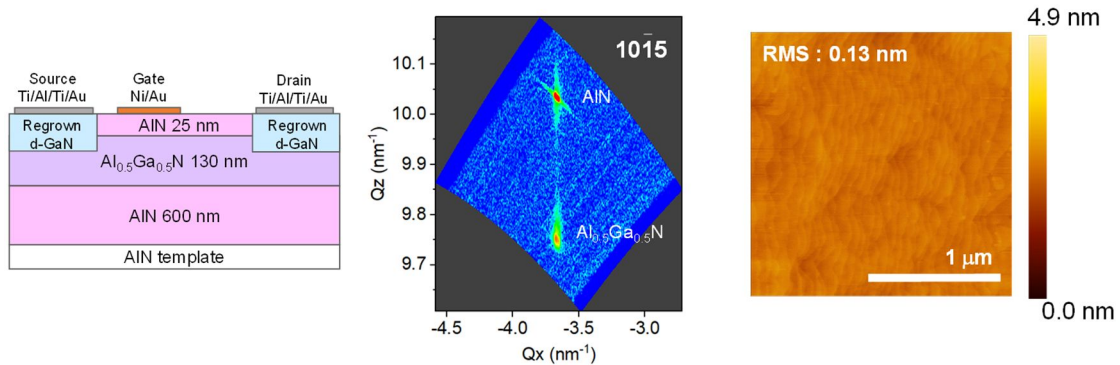


図 3 (a)AlN/Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N HEMT 構造断面図 (b) AlN/Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N HEMT 構造の 1015 回折近傍逆格子マッピング測定結果 (c) AlN/Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N HEMT 構造の表面 AFM 像

次に、このエピタキシャル試料を用いて AlN/AlGa<sub>0.5</sub>N HEMT 素子作製プロセスについて検討を行った。AlN/AlGa<sub>0.5</sub>N HEMT では、Ga<sub>0.5</sub>N HEMT で一般に用いられている金属アロイ電極を用いても良好なオーミック特性が得られないため、本研究ではソース・ドレイン領域にはパルスパッタ堆積法を用いて選択的再エピ成長した高濃度縮退 n 型 Ga<sub>0.5</sub>N を用いて 2 次元電子ガスに対するオーミック電極とした。高濃度縮退 n 型 Ga<sub>0.5</sub>N の電子濃度は  $2.6 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  と極めて高く、フェルミレベルが Ga<sub>0.5</sub>N の伝導帯下端より十分に高い位置にあるため AlGa<sub>0.5</sub>N チャンネル層に対して良好な電子注入層として働く。本構造を用いたコンタクト抵抗の値は 0.43  $\Omega$ mm であり、これは Ga<sub>0.5</sub>N HEMT の値と比較して遜色ない。AlGa<sub>0.5</sub>N HEMT に対してこのような低抵抗オーミックコンタクトが形成した例は世界的にみてもなく、当該分野における大きなブレイクスルーといえる成果である。

図 4(a)には、この HEMT のドレイン電流 - 電圧 ( $I_{DS}-V_{DS}$ ) 特性を示す。ゲート幅は 4.4  $\mu\text{m}$ 、ソース・ゲート間およびゲート・ドレイン間距離はそれぞれ 0.5 および 1.0  $\mu\text{m}$  である。ドレイン電流は線形に立ち上がっており、オン抵抗  $R_{ON}$  は 28  $\Omega$ mm と AlGa<sub>0.5</sub>N HEMT としては極めて低い値が得られており最大ドレイン電流は 250 mA/mm に達した。また図 4(b)に示すように、オンオフ比は 6 桁以上と高く、最大相互コンダクタンス( $g_m$ )は 32 mS/mm と良好な値が得られた。

図 4(c)には、オフ状態耐電圧特性のゲート・ドレイン間距離依存性を示す。ゲート・ドレイン間距離は 5.4  $\mu\text{m}$ 、ゲート電圧は -10 V であり完全にピンチオフした状態で測定を行った。耐電圧はゲート・ドレイン間距離に対して線形に増加し、最大で 1635 V に達した。この傾きより絶縁破壊電界は 3.0 MV/cm と見積もられ、この値は一般的な Ga<sub>0.5</sub>N HEMT と比較して 3 倍以上高い値が得られている。<sup>[3,4]</sup> 以上の結果は、AlN/AlGa<sub>0.5</sub>N HEMT は次世代の超高耐圧・高出力電子デバイスとして極めて有望であることを示しており、当初の計画以上の成果を得たといえる。今後、AlGa<sub>0.5</sub>N チャンネル構造の最適化やマルチチャンネル構造の導入、ゲート微細化や 3 次元ゲート構造

の導入を行うことで更なる高性能化が可能と考えられる。

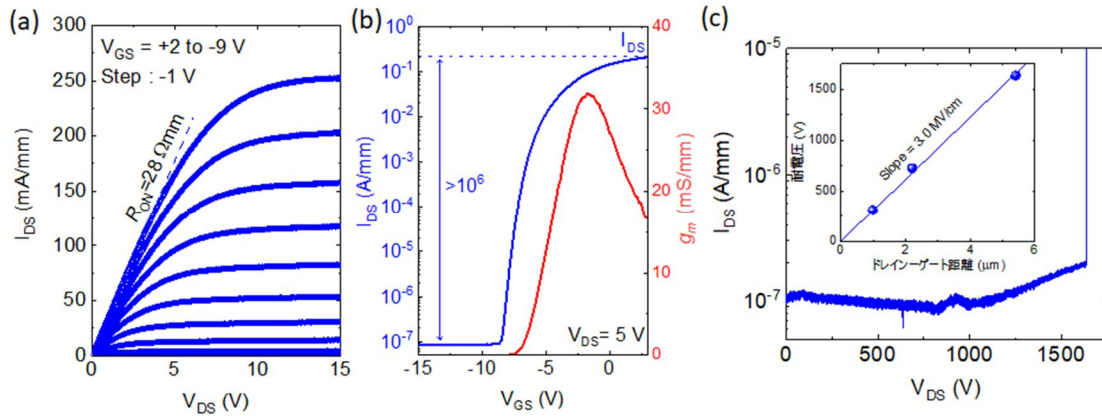


図 4(a) AlN/Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N HEMT の  $I_{DS}$ - $V_{DS}$  特性 (b)伝達特性とトランスコンダクタンス  
(c) オフ状態の 3 端子耐圧測定結果. 挿入図は耐圧のゲート・ドレイン間距離依存性を示す.

### 参考文献

- [1] J. Y. Tsao *et al.*, Adv. Electron. Mater. **4**, 1600501 (2018)
- [2] P. Peddy *et al.*, Appl. Phys. Lett. **111**, 152101 (2017).
- [3] J. -G. Lee *et al.*, Appl. Phys. Express **5** 066502 (2012).
- [4] M. Kuzuhara *et al* Jpn. J. Appl. Phys. **55** 070101 (2016).

## 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 4件）

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Fudetani Taiga, Ueno Kohei, Kobayashi Atsushi, Fujioka Hiroshi  | 4. 巻<br>118                   |
| 2. 論文標題<br>Heavily Si-doped pulsed sputtering deposited GaN for tunneling junction contacts in UV-A light emitting diodes | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>072101 ~ 072101 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/5.0040500   | 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>Ueno Kohei, Shibahara Keita, Kobayashi Atsushi, Fujioka Hiroshi   | 4. 巻<br>118                   |
| 2. 論文標題<br>Vertical p-type GaN Schottky barrier diodes with nearly ideal thermionic emission characteristics              | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>022102 ~ 022102 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/5.0036093   | 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>Kobayashi Atsushi, Ueno Kohei, Fujioka Hiroshi  | 4. 巻<br>117                   |
| 2. 論文標題<br>Autonomous growth of NbN nanostructures on atomically flat AlN surfaces  | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Letters   | 6. 最初と最後の頁<br>231601 ~ 231601 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/5.0031604   | 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>Jeong Dayeon, Kobayashi Atsushi, Ueno Kohei, Fujioka Hiroshi  | 4. 巻<br>10                    |
| 2. 論文標題<br>Growth of InN ultrathin films on AlN for the application to field-effect transistors                           | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>AIP Advances  | 6. 最初と最後の頁<br>125221 ~ 125221 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/5.0035203   | 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>Ma Bei, Tang Mingchuan, Ueno Kohei, Kobayashi Atsushi, Morita Ken, Fujioka Hiroshi, Ishitani Yoshihiro | 4. 巻<br>117                   |
| 2. 論文標題<br>Combined infrared reflectance and Raman spectroscopy analysis of Si-doping limit of GaN               | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Letters  | 6. 最初と最後の頁<br>192103 ~ 192103 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/5.0023112  | 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>Kobayashi Atsushi, Ueno Kohei, Fujioka Hiroshi   | 4. 巻<br>13                    |
| 2. 論文標題<br>Coherent epitaxial growth of superconducting NbN ultrathin films on AlN by sputtering | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Physics Express  | 6. 最初と最後の頁<br>061006 ~ 061006 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1882-0786/ab916e  | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                          |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名<br>Nakamura Kyohei, Kobayashi Atsushi, Ueno Kohei, Ohta Jitsuo, Fujioka Hiroshi        | 4. 巻<br>9                |
| 2. 論文標題<br>AlN/InAlN thin-film transistors fabricated on glass substrates at room temperature | 5. 発行年<br>2019年          |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports  | 6. 最初と最後の頁<br>6254-1 ~ 6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-019-42822-6  | 査読の有無<br>有               |
| オープンアクセス<br>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<br>-                |

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Ueno Kohei, Kobayashi Atsushi, Fujioka Hiroshi  | 4. 巻<br>9                     |
| 2. 論文標題<br>Characteristics of unintentionally doped and lightly Si-doped GaN prepared via pulsed sputtering | 5. 発行年<br>2019年               |
| 3. 雑誌名<br>AIP Advances  | 6. 最初と最後の頁<br>075123 ~ 075123 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1063/1.5103185   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Ueno Kohei, Taiga Fudetani, Kobayashi Atsushi, Fujioka Hiroshi                                    | 4. 巻<br>9               |
| 2. 論文標題<br>Optical characteristics of highly conductive n-type GaN prepared by pulsed sputtering deposition | 5. 発行年<br>2019年         |
| 3. 雑誌名<br>Scientific Reports  | 6. 最初と最後の頁<br>20242-1~5 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1038/s41598-019-56306-0  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>-               |

[学会発表] 計22件(うち招待講演 2件/うち国際学会 2件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>上野耕平、小林篤、藤岡洋                 |
| 2. 発表標題<br>スパッタ法による窒化物半導体への不純物添加制御とデバイス |
| 3. 学会等名<br>第49回結晶成長学会国内会議(招待講演)         |
| 4. 発表年<br>2020年                         |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>上野耕平, 柴原啓太, 小林篤, 藤岡洋              |
| 2. 発表標題<br>低濃度p型GaN縦型ショットキー バリアダイオード構造の作製と評価 |
| 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>小林篤、上野耕平、藤岡洋                  |
| 2. 発表標題<br>AlN 上にコヒーレント成長したNbN 極薄膜の超伝導特性 |
| 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>藤岡洋、上野耕平、小林篤                       |
| 2. 発表標題<br>AlGa <sub>N</sub> 系透明結晶の欠陥と電気特性の制御 |
| 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>ジョン ダヨン、小林 篤、上野 耕平、藤岡 洋   |
| 2. 発表標題<br>Growth of ultrathin InN films on Al-polar AlN and its application to field-effect transistors |
| 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>藤岡洋、上野耕平、小林篤          |
| 2. 発表標題<br>非平衡状態を利用した窒化物結晶の合成と応用 |
| 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>小林 篤, 上野 耕平, 藤岡 洋           |
| 2. 発表標題<br>AlN原子ステップを利用したNbNナノ構造の自己組織化 |
| 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>森川 創一朗、上野 耕平、小林 篤、藤岡 洋        |
| 2. 発表標題<br>トンネル接合を用いたモノリシック多色 LED の作製と評価 |
| 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>前田 亮太、上野 耕平、小林 篤、藤岡 洋             |
| 2. 発表標題<br>コヒーレントAlN/AlGaInヘテロ構造の作製とトランジスタ応用 |
| 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>青山 航平、上野 耕平、小林 篤、藤岡 洋           |
| 2. 発表標題<br>縦型p型GaIn SBD構造を用いたショットキー障壁高さの評価 |
| 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>紀平 俊矢、小林 篤、上野 耕平、藤岡 洋        |
| 2. 発表標題<br>表面処理を施したAlN上に成長させたNbNの結晶方位解析 |
| 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>馬 ベイ, 湯 明川, 森田 健, 上野 耕平, 小林 篤, 藤岡 洋, 石谷 善博 |
| 2. 発表標題<br>高Si ドープGaN薄膜の断面ラマン分光測定                     |
| 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>森川 創一朗, 上野 耕平, 小林 篤, 藤岡 洋     |
| 2. 発表標題<br>高濃度Si添加半極性面GaN(20-21)薄膜の作製と評価 |
| 3. 学会等名<br>第80回応用物理学会秋季学術講演会             |
| 4. 発表年<br>2019年                          |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>小林 篤, 中野 はるか, 上野 耕平, 藤岡 洋  |
| 2. 発表標題<br>族結晶配向層を用いたガラス基板上への窒化物半導体成長 |
| 3. 学会等名<br>第80回応用物理学会秋季学術講演会          |
| 4. 発表年<br>2019年                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>トンネル接合コンタクトを用いた半極性面(20-21)緑色LEDの作製 |
| 2. 発表標題<br>上野 耕平, 森川 創一朗, 小林 篤, 藤岡 洋          |
| 3. 学会等名<br>第80回応用物理学会秋季学術講演会                  |
| 4. 発表年<br>2019年                               |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Fudetani Taiga, Ueno Kohei, Kobayashi Atsushi, Fujioka Hiroshi                                       |
| 2. 発表標題<br>Characteristics of GaN Tunnel Junction Contacts for LEDs Prepared by Pulsed Sputtering               |
| 3. 学会等名<br>7th Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Application (LEDIA ' 19) (招待講演) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Sakurai Yuya, Ueno Kohei, Uesugi Kenjiro, Miyake Hideto, Fujioka Hiroshi                                    |
| 2. 発表標題<br>Structural and Electrical Properties of AlN Films Prepared on Sapphire Substrates with Sputtering Technique |
| 3. 学会等名<br>7th Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Application (LEDIA ' 19) (国際学会)               |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>上野耕平、森川創一朗、小林篤、藤岡洋                         |
| 2. 発表標題<br>スパッタ・エビによる半極性面緑色InGaN LED上へのトンネル接合コンタクトの形成 |
| 3. 学会等名<br>第48回結晶成長国内会議                               |
| 4. 発表年<br>2019年                                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>柴原啓太、上野耕平、小林篤、藤岡洋            |
| 2. 発表標題<br>トンネル接合を用いた低濃度p型GaN縦型SBD構造の作製 |
| 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>柴原啓太、上野耕平、小林篤、藤岡洋            |
| 2. 発表標題<br>縦型p型GaN SBDを用いたショットキー障壁高さの評価 |
| 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>上野耕平、森川創一朗、柴原啓太、小林篤、藤岡洋 |
| 2. 発表標題<br>スパッタ法によるGaNへの不純物添加と素子応用 |
| 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>小林篤、上野耕平、藤岡洋                 |
| 2. 発表標題<br>スパッタ法によるAlN上NbN極薄膜のエピタキシャル成長 |
| 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                         |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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

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