

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04135

研究課題名（和文）低温測定界面顕微光応答法による低障壁金属/半導体界面のオーミック電極形成機構解明

研究課題名（英文）Analysis of ohmic metal/semiconductor interfaces by low-temperature SIPM

研究代表者

塩島 謙次（Shiojima, Kenji）

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：70432151

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では我々が独自に開発した金属/半導体界面の2次元評価法（界面顕微光応答法）を低障壁で低抵抗な電極の電流輸送機構の解明に適用した。その成果として、(1)オーミック特性に近い非常にリーキーなNi/高ドープp-SiC電極に対して本手法が有効であることを示した、(2)100 Kまで0.1 nA以下の低リーク電流の測定系を構築した、(3)サンプルの裏面を温度可変ステージにマウントし、光を前面から照射するため、電極の薄層化を検討し、厚さ100 nm以下で光電流が得られることを実証した、(4)薄層電極に対して170から323 Kの温度領域で光電流スペクトル、および2次元像を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果として、リーキーで電気的特性の評価が困難であった高ドープ半導体材料への電極を本手法により広い温度範囲で2次元評価できることを示した。さらに同一薄層電極界面にプローブ光を前方、後方照射のいずれの方法でも光電流信号が検出されることは、金属膜、および半導体膜での光の吸収を分離して結果を解析できるので学術的にも興味深い。実用面では、パワーデバイスにおいてオーミック電極での電力消費は重要な課題である。実際のオーミック電極は電極金属の堆積後、熱処理による界面反応で低抵抗な接触を部分的に形成している。本手法によるオーミック電極の2次元評価はデバイス開発に大きな貢献がもたらされると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we applied our original characterization method, which can map metal/semiconductor interfaces (scanning internal photoemission microscopy), for low-barrier and low-resistance electrodes. We have obtained following results; (1) this method is available for very leaky Ni/heavily-doped p-SiC contacts, (2) a low-leakage measurement system was achieved down to 100 K, (3) photocurrents were detected in a front-illumination optical system by using very thin metal layers (< 100 nm) for the electrodes, (4) photocurrent spectra and 2-dimensional images were obtained for the thin contacts in a wide temperature range from 170 to 323 K.

研究分野：半導体（電極界面の評価）

キーワード：電極 界面顕微光応答法 2次元評価 ワイドバンドギャップ半導体

1. 研究開始当初の背景

SiC、GaAs、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等ワイドバンドギャップ半導体は従来III-V半導体材料よりもエネルギーバンドギャップ( $E_g$ )が大きく、絶縁破壊耐圧が大きいいため、ハイパワーエレクトロニクス応用として研究開発が進んでおり、GaN HEMTは携帯電話基地局用パワーアンプとして実用化され、SiC MOSFETは電車の駆動にも搭載されている。金属/半導体(M/S)界面に着目すれば、耐圧1kVを越えるショットキーダイオードがSiC、GaN、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の各材料で報告されている。その一方で、デバイスの高信頼化、大面積化のため、GaNでは自立基板による低転位化、SiCではキラ欠陥(基底面転位等)を1cm<sup>2</sup>以下にする検討が進められている。

一方、オーミックM/S界面は1990年代に表面処理技術、電極堆積法が盛んに検討されたが、それ以降大きな進展はない。 $E_g$ が大きい故に電極を堆積しただけでは障壁高さが大きいため、一般的には半導体表面に電極金属を堆積した後、熱処理による合金化で低障壁な界面を形成、さらに電極金属原子の一部をドーパントとして半導体表面に拡散するDeposition and Annealing(DA)法がオーミック形成に用いられている。電気的特性の評価は電極間の距離を変えた素子の電流-電圧( $I$ - $V$ )測定から接触抵抗を算出し、界面の構造は断面透過型電子顕微鏡等により微視的な評価が行われてきた。しかし、近年の大電流素子の開発や、構造の複雑化によりp形、n形両方に低抵抗なオーミック電極を形成することが課題となっている。実電極において界面反応は不均一であるため表面は凹凸の形状をもっており、**電気的特性と界面構造との相関を明らかにでき電極全体が見渡せるマクロで視野の広い2次元的な評価法が必要**である。

2. 研究の目的

本研究課題では、我々が独自に開発したM/S界面の2次元評価法(界面顕微光応答法)を用いてオーミック電極の形成メカニズム、電流輸送機構を明らかにすることを目的とした。オーミック電極は基本的に、(i)低障壁なM/S界面を形成する、もしくは(ii)半導体表面のドーピング濃度を高くして狭い空乏層を形成しトンネル電流を増加させる手法が取られている。しかし、実際にはこれらの現象が不均一に混在していると考えられる。一般的な $I$ - $V$ 法では(i)、(ii)の場合、電極特性がリーキーとなり、障壁高さを求めることは困難である。また、電極面内の障壁高さの低い一部の領域に電流が集中的に流れ、正しい障壁高さが求められないという問題も発生する。一方、本手法では単色光を電極面内に集光・走査することにより局所的に障壁を決定できるだけでなく、外部から電圧を印加しなくとも光電流が空乏層中の内部電界により発生するため(電流源駆動)、(ii)の場合でもトンネル電流の影響を受けないで本来の障壁を決定できるという特徴がある。研究成果は学術的に他の手法では明らかにできない価値のあるものになると考えられる。このように本研究課題は基礎物性とデバイス応用を結びつける役割を果たすものであり、基板結晶が高品質化するなかで最新の電極形成技術を提供することでワイドバンドギャップ電子デバイスの研究開発に大きく寄与すると思われる。

3. 研究の方法

我々は**M/S界面の電気的特性を2次元評価できる界面顕微光応答法**を1989年に発案した。〈引用文献①〉M/S界面に半導体側から $E_g$ 以下の光子エネルギーをもつ光を入射し、内部光電子放出効果による光電流( $I$ :光電子収率(単位照射光子数あたりの光電流))を測定する(図1)。異なる2つ以上の光子エネルギーで光電流を測定することにより図中のファウラーの式よりショットキー障壁高さを決定できる(光応答(Photoresponse:PR)法)。PR法では電極全面に単色光を照射し光電流スペクトルを得るが、界面顕微光応答法では入射光を界面で集光・走査することにより光電流と障壁高さの2次元像が得られる。**本手法は非破壊で厚い金属に埋もれた実デバイス電極全体の電気的特性(障壁高さの絶対値)とその面積を決定できる世界で唯一の手法であり、実用性、応用性が高い**。我々はこれまでに近赤外光、可視光を光源に用いて、Si、GaAs、GaN、SiC、 $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ショットキー電極の面内不均一性をプロセス誘起欠陥、汚染層の介在、界面反応による劣化の観点から2次元評価を行ってきた。〈引用文献②〉

本研究課題では、リーク電流の大きいオーミック電極に対して本手法が有効的に機能するように以下の4つの観点から実験を進めた。(1)高いドーピングを行なった半導体結晶の上に形成した電極への実証実験。(2)温度可変ステージを用いた低リーク電流な測定環境の実現。(3)電極の薄層化による前方照射光学系の実現。(4)最終的な温度可変界面顕微光応答測定の実施。

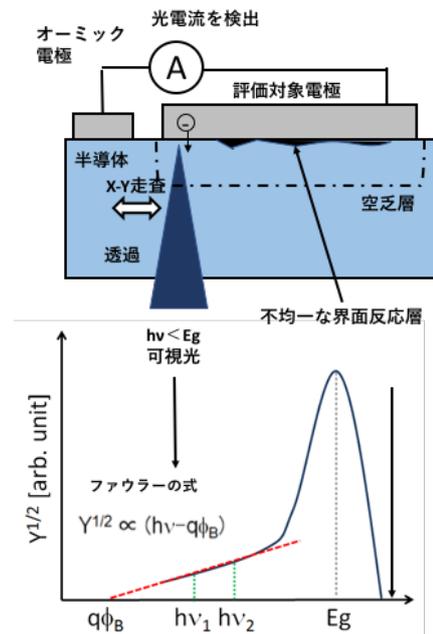


図1. 界面顕微光応答法の原理

#### 4. 研究成果

##### (1) 高ドーピング p-SiC 電極の評価 (引用文献③)

オーミック電極形成の1つの要因である高いドーピングを行なった p-SiC 層に Au/Ni 電極を形成し、PR 法、および界面顕微光応答法の有効性を室温で検証した。図 2 に示すように 4H-SiC 基板上に 4 種類の Al アクセプター濃度の異なる ( $1 \times 10^{18}$  から  $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ) p-SiC 層を結晶成長した。トータル厚さ 100 nm の Au/Ni 電極 (直径 200  $\mu\text{m}$ )、および InGa オーミック電極を形成した。Au/Ni 電極の  $I$ - $V$  特性は図 3 に示すように整流性が失われるほどリーキーであり、その度合いはドーピング濃度が増すにつれ大きくなっている。これらの試料に半導体側から光を照射する (後方照射 (BI)) PR 測定を行った結果を図 4 に示す。SiC の基礎吸収に対応する 3.3 eV 付近の大きなピーク、および内部光電子放出効果に起因する裾が Al 濃度  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  までの試料で観測された。ファウラーの式を用いて求めた障壁高さは 1.44 から 1.48 eV の妥当な値が求められた。図中に示した赤、緑の波長のレーザー光を用いて界面顕微光応答測定により光電流像を求めた結果を図 5 に示す。電極面内の信号分布は比較的均一で、ところどころ光電流の値が大きい 10  $\mu\text{m}$  大のスポットが存在した。このスポットの密度は Al 濃度によらず、 $10^2$  から  $10^3 \text{ cm}^{-2}$  で一定であり、エッチピット密度と同程度であることから、転位に Al 原子が凝集して局所的に障壁が低下したと考えられる。このようにリーキーな高ドープ試料でもこれらの手法は有効であり、不均一性の物理モデルを提案することができた。

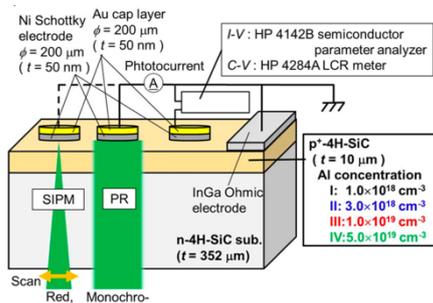


図 2、試料構造と測定系。

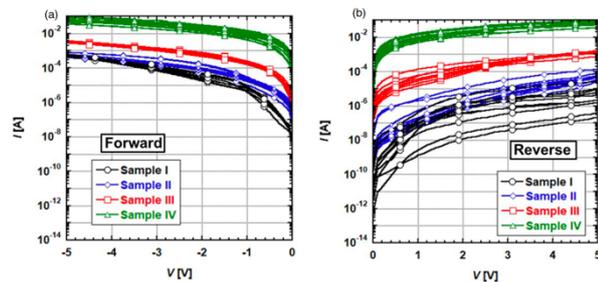


図 3、Au/Ni 電極の (a) 順方向、(b) 逆方向  $I$ - $V$  特性。

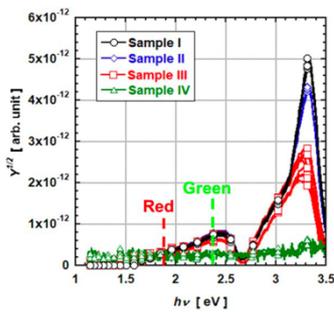


図 4、PR スペクトル。

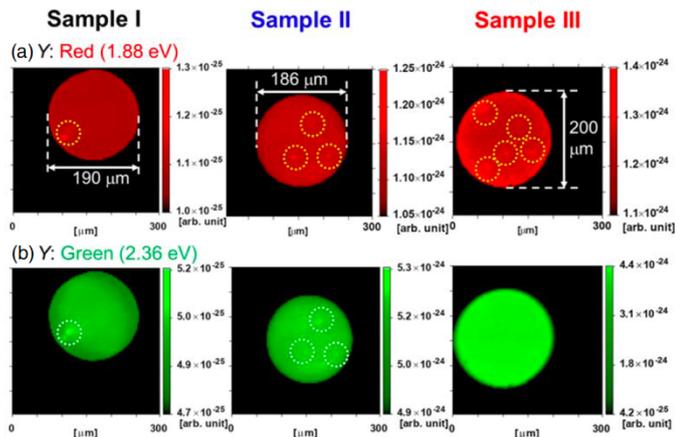


図 5、(a) 赤、(b) 緑のレーザー光を用いて測定した光電流像。

##### (2) 温度可変ステージの動作検証

オーミック電極形成のもう 1 つの要因である低障壁な界面では光電流の駆動源である内蔵電界が小さく信号がノイズに埋もれてしまう恐れがある。対策として低温での測定が行える実験系を構築した。液体窒素を循環して冷却する温度可変ステージを採用した。単純に装置を駆動しただけでは低温時に試料表面が結露してしまい、光照射測定が正常に行われない問題が発生した。ステージ内の水蒸気をプレヒートにより追い出し、置換として乾燥窒素を導入した。その結果、図 6 に示すように 190 K においても結露なしで Si 基板試料を冷却することができた。さらに、Au/Ni/n-GaN ショットキー電極を用いて 100 K から 370 K まで 5 K/min のレートで昇温しながら  $I$ - $V$  測定を行った結果を図 7 に示す。温度の上昇とともに緩やかに電流の増加がみられ、幅広い温度領域で正常な特性が確認できた。

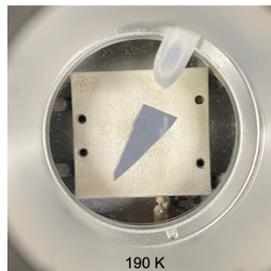


図 6、190 K までの Si 基板の冷却。

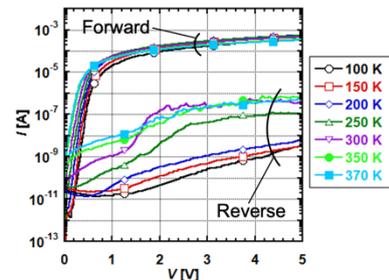


図 7、n-GaN ショットキー電極の  $I$ - $V$  特性の温度依存性。

### (3) 電極の薄層化による前方照射光学系の実現

通常の PR、界面顕微光応答測定では図 2 に示す後方照射の配置をとる。しかし、温度可変ステージを用いた場合は光を電極側から照射する前方照射(FI)の配置を取らざるを得ない。このため、従来までの 100 nm 以上の厚い電極ではなく、光を透過する薄層電極を用いる検討を行った。シミュレーションにより光の透過率が 30%となる膜厚を 15 nm 程度と見積もり、図 8 に示す n-GaN エピ層上に Au(厚さ 5 nm)/Ni(10 nm)の薄層電極を形成した。はじめに、室温で I-V 測定、および BI-PR 測定を行い、厚膜試料と同様な良好な整流性、PR スペクトルを得ることができた。次に 170 から 370 K の広い温度範囲で FI-PR 測定を行った結果を BI-PR と比較する形で図 9 に示す。BI-PR においては GaN の  $E_g=3.4$  eV 付近において、入射光の基礎吸収により空乏層中での電子-正孔対(光電流)の発生と i-GaN/n-GaN エピ膜での光の減衰が同時に起こるため、シャープなピークが現れている。一方、FI-PR においてはピークの低エネルギー側は同様な形状をもつが、高エネルギー側は基板での吸収がないため大きく膨らんでいる。また、光子エネルギーが 3.2 eV 以下の領域では金属膜中では光の吸収のため信号の大きさは BI-PR より小さいが、内部光電子放出効果による光電流が検出できた。これらの現象は光励起が原動力であるため、温度依存性は小さいことも確認できた。このように電極の薄膜化を行っても FI 照射の特徴を示すリーソナブルな結果が得られ、評価に値する試料構造であることを実証した。

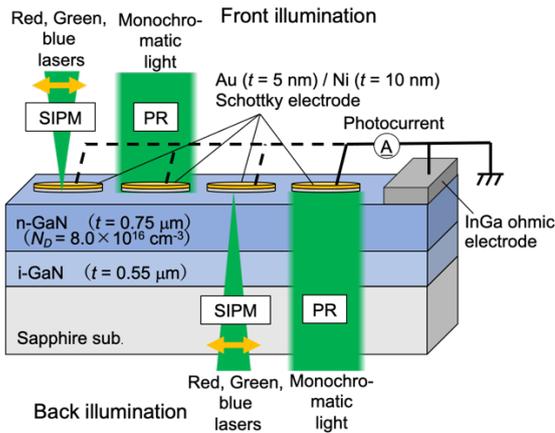


図 8、GaN 薄層電極の前方・後方照射測定系。

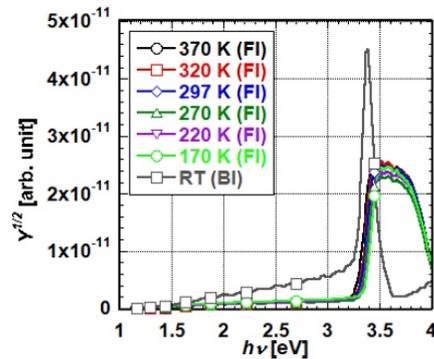


図 9、GaN 薄層電極の温度可変前方・後方照射 PR スペクトル。

### (4) 温度可変界面顕微光応答測定の実施

FI-PR の結果を踏まえ、本検討の最終目標である温度可変 FI 界面顕微光応答測定を図 8 に示した試料に対して 24、40、50°C の温度で赤色、緑色、青色のレーザを用いて行った。図 10 に測定した電極のノマルスキー像、測定時の実体顕微鏡像、および各温度で三色のレーザで光電流を測定しファウラーの式を用いて障壁高さ像を算出した結果を示す。実体顕微鏡像に示すように直径 500 μm の電極左中央部で金属探針が電極に接触しているため、入射が遮られ、この領域では光電流が検出されず、正しい障壁高さの値が得られなかった。しかし、他の領域では比較的均一な障壁高さが得られており、ノマルスキー像で観察された測定履歴を経たことによる表面の汚

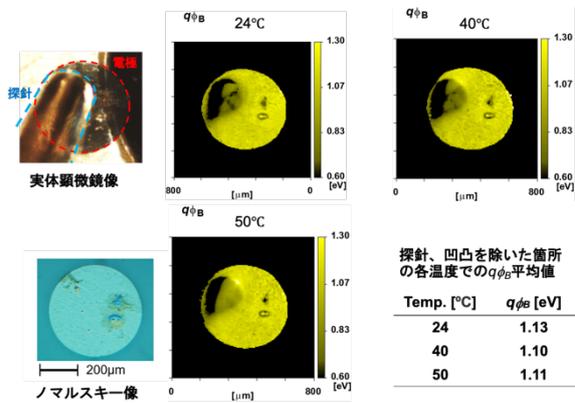


図 10、GaN 薄層電極の顕微鏡像、および 24、40、50°C における前方照射界面顕微障壁高さ像。

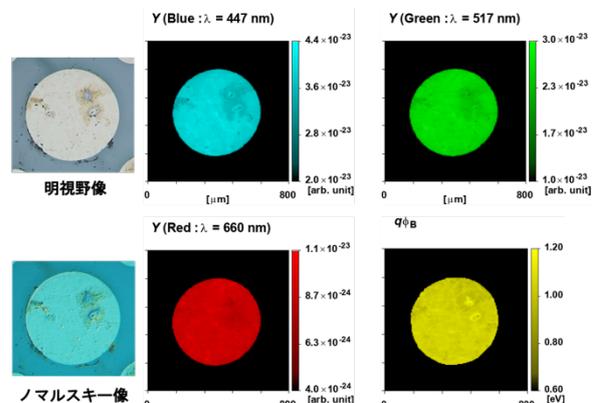


図 11、GaN 薄層電極の顕微鏡像、および室温における後方照射界面顕微光応答電流像、障壁高さ像。

れに対応したパターンも現れている。探針の影、表面汚れを除いた部分での障壁高さの平均値は温度によらず 1.11 eV 近傍であり、図 9 に示した PR スペクトルの温度依存に対応する結果が得られた。さらにこの実験結果の信憑性を確認するため、この測定を行った後に同一電極を BI の光学系で測定した結果を図 10 に示す。BI のため探針の影は現れておらず、汚れのパターンは FI と同様に現れており、薄層電極を用いた FI 測定の有効性が確認できた。

#### (5) 総括およびその他の成果

このように低温測定系の整備、電極の薄層化による前面照射光学系の適応により、リーキーな電極に対して温度可変界面頭微光応答測定が実施できる見通しを得た。さらに、GaN 電極の 2 次元像をいくつかの温度で得ることができた。今後は DA 法によりオーミック電極が形成される過程を、温度を変えた熱処理と測定を繰り返すことにより解明したいと考えている。この技術はワイドバンドギャップ半導体の研究開発に大きく貢献するものであり、将来的には装置の販売で信頼性評価の基準を示すマクロな 2 次元評価ツールとして普及する可能性があると思われる。界面頭微光応答法を用いた電極の 2 次元評価に関するその他の成果としては、GaN 表面の溶液処理・電極堆積後の熱処理の影響、代表的なワイドバンドギャップショットキー電極の均一性、GaN 表面における電気化学エッチングの影響、印刷法により形成した Ni 電極の評価、電極周辺部のエッジの評価、超高压下で熱処理し GaN 表面の評価、および表面に薄層 p-GaN を有した GaN ショットキー電極の評価〈引用文献④-⑩〉が論文として採択された。これらの実績が認められ国内 3 件海外 2 件の招待講演を行い、レビュー招待論文も 2 件〈引用文献⑪, ⑫〉が採択され、学術的に高い評価を受けた。

#### 〈引用文献〉

- ① T. Okumura and K. Shiojima, "Scanning Internal-Photoemission Microscopy: New Mapping Technique to Characterize Electrical Inhomogeneity of Metal-Semiconductor Interface," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 28, pp. L1108-L1111, (1989).
- ② K. Shiojima, S. Yamamoto, Y. Kihara, and T. Mishima, "Nondestructive imaging of buried interfaces in SiC and GaN Schottky contacts using scanning internal photoemission microscopy," *Applied Physics Express*, vol. 8, p. 046502 (2015).
- ③ H. Imabayashi, H. Sawazaki, H. Yoshimura, M. Kato, and K. Shiojima, "Photoelectrical characterization of heavily doped p-SiC Schottky contacts", *Japanese Journal of Applied Physics*, **63**, p. 04SP71 (6 pages) (2024).
- ④ K. Shiojima, R. Tanaka, S. Takashima, K. Ueno, and M. Edo, "Effects of surface treatment and annealing for Au/Ni/n-GaN Schottky barrier diodes", *Japanese Journal of Applied Physics*, **60**, 056503 (9 pages) (2021).
- ⑤ K. Shiojima, Y. Kawasumi, F. Horikiri, Y. Narita, N. Fukuhara, T. Mishima, and T. Shinohe, "Uniformity characterization of SiC, GaN, and  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky contacts using scanning internal photoemission microscopy", *Japanese Journal of Applied Physics*, **60**, 108003 (4 pages) (2021).
- ⑥ K. Shiojima, R. Matsuda, F. Horikiri, Y. Narita, N. Fukuhara, and T. Mishima, "Mapping of Contactless Photoelectrochemical Etched GaN Schottky Contacts Using Scanning Internal Photoemission Microscopy --- Difference in Electrolytes ---", *Japanese Journal of Applied Physics*, **61**, SC1059 (11 pages) (2022).
- ⑦ K. Shiojima, Y. Kawasumi, Y. Yasui, Y. Kashiwagi, and T. Tamai, "Estimation of uniformity in Schottky contacts between printed Ni electrode and n-GaN by scanning internal photoemission microscopy", *Japanese Journal of Applied Physics*, **61**, 0856506 (6 pages) (2022).
- ⑧ H. Imabayashi, Y. Yasui, F. Horikiri, Y. Narita, N. Fukuhara, T. Mishima, and K. Shiojima, "Characterization of peripheries of n-GaN Schottky contacts using scanning internal photoemission microscopy", *Japanese Journal of Applied Physics*, **62**, SA1012 (7 pages) (2023).
- ⑨ H. Imabayashi, K. Shiojima, T. Kachi, "Mapping of ultra-high-pressure annealed n-GaN Schottky contacts using scanning internal photoemission microscopy", *Materials Science in Semiconductor Processing*, **162**, 107536 (8 pages), (2023).
- ⑩ H. Imabayashi, H. Yoshimura, F. Horikiri, Y. Narita, H. Fujikura, H. Ohta, T. Mishima, and K. Shiojima, "Two-Dimensional Characterization of Au/Ni/Thin Heavily-Mg-Doped p-/n-GaN Structure under Applied Voltage by Scanning Internal Photoemission Microscopy", *Phys. Status Solidi B*, p. 2400033 (7 pages), (2024).
- ⑪ K. Shiojima, "Two-Dimensional Characterization of Wide-Bandgap Materials and Contact Interfaces by Using Scanning Internal Photoemission Microscopy", *ECS Transactions*, Vol. **104**, No. 4, pp. 69-82 (2021).
- ⑫ K. Shiojima, "Characterization of Metal/GaN Schottky Contacts --Review from the Early Days--", *ECS Transactions*, Vol. **112**, No. 1, pp. 89-107 (2023).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 4件）

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Imabayashi Hiroki, Shiojima Kenji, Kachi Tetsu  | 4. 巻<br>162                   |
| 2. 論文標題<br>Mapping of ultra-high-pressure annealed n-GaN Schottky contacts using scanning internal photoemission microscopy                                       | 5. 発行年<br>2023年               |
| 3. 雑誌名<br>Materials Science in Semiconductor Processing   | 6. 最初と最後の頁<br>107536 ~ 107536 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.mssp.2023.107536  | 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>Shiojima Kenji  | 4. 巻<br>112                   |
| 2. 論文標題<br>(Invited) Characterization of Metal/GaN Schottky Contacts - Review from the Early Days   | 5. 発行年<br>2023年               |
| 3. 雑誌名<br>ECS Transactions  | 6. 最初と最後の頁<br>89 ~ 107        |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1149/11201.0089ecst  | 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>Imabayashi Hiroki, Yoshimura Haruto, Horikiri Fumimasa, Narita Yoshinobu, Fujikura Hajime, Ohta Hiroshi, Mishima Tomoyoshi, Shiojima Kenji              | 4. 巻<br>-                     |
| 2. 論文標題<br>Two Dimensional Characterization of Au/Ni/Thin Heavily Mg Doped p /n GaN Structure under Applied Voltage by Scanning Internal Photoemission Microscopy | 5. 発行年<br>2024年               |
| 3. 雑誌名<br>physica status solidi (b)   | 6. 最初と最後の頁<br>-               |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1002/pssb.202400033  | 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>Imabayashi Hiroki, Sawazaki Hitose, Yoshimura Haruto, Kato Masashi, Shiojima Kenji  | 4. 巻<br>63                    |
| 2. 論文標題<br>Photoelectrical characterization of heavily doped p-SiC Schottky contacts  | 5. 発行年<br>2024年               |
| 3. 雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>04SP71 ~ 04SP71 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/ad32e0   | 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>Shiojima Kenji, Kawasumi Yuto, Yasui Yuto, Kashiwagi Yukiyasu, Tamai Toshiyuki  | 4. 巻<br>61                  |
| 2. 論文標題<br>Estimation of uniformity in Schottky contacts between printed Ni electrode and n-GaN by scanning internal photoemission microscopy | 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>086506-1 ~ -6 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/ac7bc5   | 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>SHIOJIMA Kenji, IMABAYASHI Hiroki, MISHIMA Tomoyoshi  | 4. 巻<br>71              |
| 2. 論文標題<br>Effect of Surface Treatment in Au/Ni/ n-GaN Schottky Contacts Formed on Cleaved m-Plane Surfaces of Free-Standing n-GaN Substrates | 5. 発行年<br>2022年         |
| 3. 雑誌名<br>Journal of the Society of Materials Science, Japan  | 6. 最初と最後の頁<br>819 ~ 823 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.2472/jsms.71.819   | 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>Imabayashi Hiroki, Yasui Yuto, Horikiri Fumimasa, Narita Yoshinobu, Fukuhara Noboru, Mishima Tomoyoshi, Shiojima Kenji | 4. 巻<br>62                  |
| 2. 論文標題<br>Characterization of peripheries of n-GaN Schottky contacts using scanning internal photoemission microscopy           | 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>SA1012-1 ~ -7 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/ac8d6f  | 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>Shiojima Kenji, Tanaka Ryo, Takashima Shinya, Ueno Katsunori, Edo Masaharu          | 4. 巻<br>60                  |
| 2. 論文標題<br>Effects of surface treatment and annealing for Au/Ni/n-GaN Schottky barrier diodes | 5. 発行年<br>2021年             |
| 3. 雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>056503-1 ~ -9 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/abf5ab   | 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>Shiojima Kenji   | 4. 巻<br>104           |
| 2. 論文標題<br>(Invited) Two-Dimensional Characterization of Wide-Bandgap Materials and Contact Interfaces by Using Scanning Internal Photoemission Microscopy | 5. 発行年<br>2021年       |
| 3. 雑誌名<br>ECS Transactions   | 6. 最初と最後の頁<br>69 ~ 82 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1149/10404.0069ecst   | 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>Shiojima Kenji, Kawasumi Yuto, Horikiri Fumimasa, Narita Yoshinobu, Fukuhara Noboru, Mishima Tomoyoshi, Shinohe Takashi                     | 4. 巻<br>60                  |
| 2. 論文標題<br>Uniformity characterization of SiC, GaN, and $\text{-Ga}_{2\text{O}_3}$ Schottky contacts using scanning internal photoemission microscopy | 5. 発行年<br>2021年             |
| 3. 雑誌名<br>Japanese Journal of Applied Physics   | 6. 最初と最後の頁<br>108003-1 ~ -4 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/ac2917   | 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>Shiojima Kenji, Matsuda Ryo, Horikiri Fumimasa, Narita Yoshinobu, Fukuhara Noboru, Mishima Tomoyoshi  | 4. 巻<br>61                   |
| 2. 論文標題<br>Mapping of contactless photoelectrochemical etched GaN Schottky contacts using scanning internal photoemission microscopy?difference in electrolytes | 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>SC1059-1 ~ -11 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.35848/1347-4065/ac4c6e   | 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>Bhuiyan Ashraful G., Terai Taiji, Katsuzaki Tomohiro, Takeda Naoki, Hashimoto Akihiro                      | 4. 巻<br>548                   |
| 2. 論文標題<br>Growth of single crystalline Si on graphene using RF-MBE: Orientation control with an AlN interface layer | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Applied Surface Science  | 6. 最初と最後の頁<br>149295 ~ 149295 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.apsusc.2021.149295   | 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>該当する                  |

[学会発表] 計37件(うち招待講演 4件/うち国際学会 10件)

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hiroki Imabayashi, Hitose Sawazaki, Haruto Yoshimura, Masashi Kato, Kenji Shiojima   |
| 2. 発表標題<br>Photoelectrical Characterization of Heavily-doped p-SiC Schottky Contacts            |
| 3. 学会等名<br>International conference on Solid State Devices and Materials 2023 (SSDM2023) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hiroki Imabayashi, Haruto Yoshimura, Fumimasa Horikiri, Yoshinobu Narita, Hajime Fujikura, Hiroshi Ohta, Tomoyoshi Mishima, and Kenji Shiojima                 |
| 2. 発表標題<br>Two-Dimensional Characterization of Au/Ni/Thin Heavily-Mg-Doped p-/n-GaN Schottky Contacts under Applied Voltage by Scanning Internal Photoemission Microscopy |
| 3. 学会等名<br>14th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-14) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>塩島謙次                       |
| 2. 発表標題<br>金属/GaNショットキー電極評価の変遷        |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会電子部品・材料研究会(CPM)研究会 |
| 4. 発表年<br>2023年                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>吉村 遥翔, 今林 弘毅, 堀切 文正, 成田 好伸, 藤倉 序章, 太田 博, 三島 友義, 塩島 謙次    |
| 2. 発表標題<br>電圧印加界面顕微光応答法によるAu/Ni/薄層高濃度Mgドープp-GaN/n-GaNショットキー接触の二次元評価 |
| 3. 学会等名<br>第84回応用物理学会秋季学術講演会  |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>吉村 遥翔、今林 弘毅、堀切 文正、成田 好伸、藤倉 序章、太田 博、三島 友義、塩島 謙次            |
| 2. 発表標題<br>電圧印加界面顕微光応答法によるAu/Ni/薄層高濃度Mgドープp-GaN/n-GaN ショットキー接触の二次元評価 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会電子部品・電子デバイス(ED)研究会                                |
| 4. 発表年<br>2023年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>今林 弘毅、吉村 遥翔、太田 博、三島 友義、塩島 謙次                           |
| 2. 発表標題<br>電圧印加界面顕微光応答法によるAu/Ni/薄層高濃度Mgドープp-/n-GaN ショットキー接触の二次元評価 |
| 3. 学会等名<br>先進パワー半導体分科会 第10回講演会                                    |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>塩島謙次  |
| 2. 発表標題<br>界面顕微光応答法によるGaNショットキー電極界面の2次元評価                  |
| 3. 学会等名<br>応用物理学会 半導体の結晶成長と加工および評価に関する産学連携委員会 第4回研究会(招待講演) |
| 4. 発表年<br>2024年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>今林 弘毅、川西 健太郎、太田 博、三島 友義、塩島 謙次       |
| 2. 発表標題<br>Ni/n-GaN ショットキー接触のI-V 特性における変位電流の評価 |
| 3. 学会等名<br>第71回応用物理学会春季学術講演会                   |
| 4. 発表年<br>2024年                                |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroki Imabayashi, Kenji Shiojima, and Tetsu Kachi  |
| 2. 発表標題<br>Mapping of Ultra-High-Pressure Annealed n-GaN Schottky Contacts Using Internal Photoemission Microscopy |
| 3. 学会等名<br>9th International Symposium on Control of Semiconductor Interface (ISCSI-IX) (国際学会)                     |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Hiroki Imabayashi, Fumimasa Horikiri, Yoshinobu Narita, Noboru Fukuhara, Tomoyoshi Mishima and Kenji Shiojima  |
| 2. 発表標題<br>Two-dimensional characterization of the edge structure of Ni/n-GaN Schottky contacts under applied voltage by scanning internal photoemission microscopy |
| 3. 学会等名<br>International conference on Solid State Devices and Materials 2022 (SSDM2022) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Hiroki Imabayashi, Minato Umeda, Kenji Shiojima, Tatsuya Umenishi, Yoriko Tominaga, Mitsuki Yukimune, Fumitaro Ishikawa, Osamu Ueda |
| 2. 発表標題<br>Internal Photoemission Characterization for Low-Temperature-Grown GaAsBi Layers   |
| 3. 学会等名<br>Advanced Metallization Conference 2022 31st Asian Session (ADMETA Plus 2022) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>今林 弘毅, 塩島 謙次, 加地 徹                    |
| 2. 発表標題<br>界面顕微光応答法による超高压アニールn-GaNショットキー接触の二次元評価 |
| 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                                  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>今林 弘毅, 堀切 文正, 成田 好伸, 福原 昇, 三島 友義, 塩島 謙次      |
| 2. 発表標題<br>電圧印加界面顕微光応答法によるNi/n-GaNショットキー接触の電極端面構造の二次元評価 |
| 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   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>今林弘毅, 堀切文正, 成田好伸, 福原 昇, 三島友義, 塩島謙次    |
| 2. 発表標題<br>電圧印加界面顕微光応答法によるn-GaNショットキー接触の電界集中の可視化 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会電子部品・電子デバイス(ED)研究会            |
| 4. 発表年<br>2022年                                  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>今林 弘毅, 三島 友義, 塩島 謙次                        |
| 2. 発表標題<br>電圧印加界面顕微光応答法による裾を引いたNi/n-GaNショットキー電極の二次元評価 |
| 3. 学会等名<br>先進パワー半導体分科会 第9回講演会                         |
| 4. 発表年<br>2022年                                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>今林 弘毅, 塩島 謙次, 加地 徹                    |
| 2. 発表標題<br>界面顕微光応答法による超高压アニールn-GaNショットキー接触の二次元評価 |
| 3. 学会等名<br>先進パワー半導体分科会 第9回講演会                    |
| 4. 発表年<br>2022年                                  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>塩島 謙次  |
| 2. 発表標題<br>界面顕微光応答法による電極界面の2次元評価 - この7年間の進捗 -           |
| 3. 学会等名<br>日本材料学会 2022年度第4回半導体エレクトロニクス部門委員会第3回研究会（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2023年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>今林 弘毅、堀切 文正、成田 好伸、福原 昇、三島 友義、塩島 謙次      |
| 2. 発表標題<br>電圧印加界面顕微光応答法による n-GaN ショットキー接触の電界集中の可視化 |
| 3. 学会等名<br>日本材料学会2022年度第4回半導体エレクトロニクス部門委員会第3回研究会   |
| 4. 発表年<br>2023年                                    |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>梅田 皆友、今林 弘毅、塩島 謙次、梅西 達哉、富永 依里子、行宗 詳規、石川 史太郎、上田 修 |
| 2. 発表標題<br>低温 MBE 成長 GaAsBi 層の光電評価                          |
| 3. 学会等名<br>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>今林 弘毅、澤崎 仁施、吉村 遥翔、伊藤 夏輝、加藤 正史、塩島 謙次   |
| 2. 発表標題<br>界面顕微光応答法によるAu/Ni/p+-SiCショットキー接触の二次元評価 |
| 3. 学会等名<br>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>犬飼将成、橋本明弘                         |
| 2. 発表標題<br>多機能 2 次元形成過程におけるAlN層被覆率のN2ガス流量依存性 |
| 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                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Kenji Shiojima, and Masashi Kato   |
| 2. 発表標題<br>Mapping of Schottky Contacts on p-4H-SiC Wafers Using Scanning Internal Photoemission Microscopy |
| 3. 学会等名<br>Compound Semiconductor Week (CSW) 2021 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>K. Shiojima, R. Matsuda, F. Horikiri, Y. Narita, N. Fukuhara and T. Mishima  |
| 2. 発表標題<br>Mapping of Contactless Photoelectrochemical Etched GaN Schottky Contacts Using Scanning Internal Photoemission Microscopy --<br>- Difference in Electrolytes --- |
| 3. 学会等名<br>International conference on Solid State Devices and Materials 2021 (SSDM2021) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Kenji Shiojima   |
| 2. 発表標題<br>Two-Dimensional Characterization of Wide-Bandgap Materials and Contact Interfaces by Using Scanning Internal Photoemission<br>Microscopy |
| 3. 学会等名<br>240th Electrochemical society (ECS) Meeting (招待講演) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Masahiro Uchida, Yuto Kawasumi, Hiroki Imabayashi, and Kenji Shiojima   |
| 2. 発表標題<br>Two-dimensional characterization on Schottky contacts on AlGaN / GaN HEMTs by scanning internal photoemission microscopy              |
| 3. 学会等名<br>14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma 2022)<br>(国際学会) |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yuto Yasui, Fumimasa Horikiri, Yoshinobu Narita, Noboru Fukuhara, Tomoyoshi Misima, Hiroki Imabayashi, and Kenji Shiojima             |
| 2. 発表標題<br>Characterization of peripheries of n-GaN Schottky contacts using scanning internal photoemission microscopy                           |
| 3. 学会等名<br>14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma 2022)<br>(国際学会) |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>川角優斗, 堀切文正, 福原昇, 三島友義, 四戸孝, 塩島謙次       |
| 2. 発表標題<br>界面光顕微応答法によるワイドバンドギャップ半導体ショットキー接触の均一性評価 |
| 3. 学会等名<br>日本材料学会令和3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<br>2021年                                   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>塩島謙次, 川角優斗, 堀切文正, 福原昇, 三島友義, 四戸孝                             |
| 2. 発表標題<br>界面光顕微応答法によるSiC、GaN、 $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ショットキー接触の均一性の評価 |
| 3. 学会等名<br>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>塩島謙次、田中 亮、高島信也、上野勝典、江戸雅晴                  |
| 2. 発表標題<br>表面処理の異なるAu/Ni/n-GaNショットキー電極の界面顕微光応答法による評価 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会電子部品・電子デバイス(ED)研究会                |
| 4. 発表年<br>2021年                                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>川角 優斗, 堀切 文正, 福原 昇, 三島 友義, 四戸 孝, 塩島 謙次  |
| 2. 発表標題<br>界面顕微光応答法によるSiC、GaN、 $\alpha$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ショットキー接触の面内均一性評価 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会電子部品・電子デバイス(ED)研究会  |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>今林 弘毅, 塩島 謙次, 田中 亮, 高島信也, 上野勝典, 江戸雅晴       |
| 2. 発表標題<br>表面処理の異なるAu/Ni/n-GaNショットキー電極の熱処理による電気的特性の改善 |
| 3. 学会等名<br>先進パワー半導体分科会第8回講演会                          |
| 4. 発表年<br>2021年                                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>塩島 謙次, 川角 優斗, 堀切 文正, 福原 昇, 三島 友義, 四戸 孝, 今林 弘毅 |
| 2. 発表標題<br>界面顕微光応答法を用いたワイドギャップ半導体/金属ショットキー接触界面の面内均一性評価   |
| 3. 学会等名<br>先進パワー半導体分科会第8回講演会                             |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>塩島 謙次                              |
| 2. 発表標題<br>金属 / GaNショットキー電極の評価 - 黎明期からの振り返り - |
| 3. 学会等名<br>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<br>2022年                               |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>川角 優斗, 今林 弘毅, 塩島 謙次                  |
| 2. 発表標題<br>界面顕微光応答法を用いたdoped-AlNのフォーミング現象の二次元評価 |
| 3. 学会等名<br>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>安井 悠人, 堀切 文正, 成田 好伸, 福原 昇, 三島 友義, 今林 弘毅, 塩島 謙次 |
| 2. 発表標題<br>電圧印加界面顕微光応答法によるn-GaNショットキー接触の電界の二次元評価          |
| 3. 学会等名<br>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>山下 雄大, 勝崎 友裕, 水野 裕介, 橋本 明弘                   |
| 2. 発表標題<br>AlN/エピタキシャルグラフェン/SiC構造形成におけるAlN膜厚及びステップ高さの影響 |
| 3. 学会等名<br>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>水野 裕介, 山下 雄大, 犬飼 将成, 橋本 明弘 |
| 2. 発表標題<br>ポーラスSiCを用いた多機能2次元構造の形成     |
| 3. 学会等名<br>応用物理学会秋季学術講演会              |
| 4. 発表年<br>2021年                       |

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

|  |              |               |
|--|--------------|---------------|
| 産業財産権の名称<br>評価方法、評価システム、半導体素子の製造方法、及び半導体素子 | 発明者<br>塩島謙次  | 権利者<br>同左     |
| 産業財産権の種類、番号<br>特許、特願2021-086773            | 出願年<br>2021年 | 国内・外国の別<br>国内 |

〔取得〕 計0件

〔その他〕

|  |
|--|
| 福井大学工学部電気電子情報工学科電気・電子工学講座半導体表面界面（塩島・今林）研究室のホームページ<br><a href="http://fuee.u-fukui.ac.jp/~shiojima/integrated.html">http://fuee.u-fukui.ac.jp/~shiojima/integrated.html</a> |
|--|

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 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 橋本 明弘<br><br>(Hashimoto Akihiro)<br><br>(10251985) | 福井大学・学術研究院工学系部門・教授<br><br><br><br>(13401) |    |

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