

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19H02166

研究課題名(和文) 超高耐圧素子実現に向けた窒化アルミニウム素子作製の技術基盤の構築

研究課題名(英文) Building of Technical Basis for fabrication of high-power AlN devices

研究代表者

奥村 宏典(okumura, hironori)

筑波大学・数理工学系・助教

研究者番号：80756750

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：省エネ化に向けて、低損失かつ高出力素子実現の社会的要請が高まっている。我々は、2019年に窒化アルミニウム(AIN)を用いたトランジスタの世界初動作に成功した。AINは絶縁破壊電界強度が最も大きい半導体であり、AINを用いた高耐圧素子作製は、半導体素子の性能限界への探求に繋がる。しかし、現在のAIN素子は、高い接触抵抗と不十分なSchottky障壁高さにより、AIN本来の性能が発揮できていない。本研究では、つくばエリアの共用設備環境を最大限活用して、超高耐圧素子実現に向けたAIN素子作製の技術基盤を構築する。独自手法として、超高温下でも分解しないAINの性質に着目した接触抵抗低減法を提案する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

AINは、現在、素子動作可能な半導体中で、絶縁破壊電界強度とバンドギャップが最も大きい材料である。絶縁体に分類される時さえあるAINを用いて高性能素子を作製することは、半導体材料の限界に挑戦する研究であり、学術的に意義深い。

AIN素子作製の技術基盤を構築することは、新規高耐圧素子用材料の分野開拓および普及に繋がる。AINの物性を最大限生かした超高耐圧・高温素子動作に成功すれば、既に実用化されているSiCやGaNよりも優れた耐圧とオン損失を有する素子の実現が期待できる。回路の究極的な小型化と低消費電力化に繋がり、地球の温暖化抑制に貢献できることから、社会的にも意義深い。

研究成果の概要(英文)：For saving energy, low-loss and high-power devices are highly demanded. In 2019, we achieved the first demonstration of transistors with an aluminum nitride (AlN) channel. AlN is a semiconductor with the highest critical electric field and the largest bandgap energy. The fabrication of AlN devices is challenge toward the operation limits of semiconductor devices. However, the AlN devices have suffered from the high contact resistance and insufficient Schottky barrier height. In this work, we establish the fabrication process for AlN devices by making maximum use of the open facility in the Tsukuba area (Tsukuba University, AIST, and NIMS). As a unique method, we try to reduce the contact resistivity by focusing on the material property of AlN, which does not decompose even at 1600 degree C.

研究分野：パワーデバイス

キーワード：AIN パワーデバイス イオン注入 MOSFET 高温デバイス SBD 不純物拡散 表面処理

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

地球の温暖化抑制に向けて、低消費電力を担う高出力素子の普及が急務である。現在使われている Si 素子は、物性値の理論限界に近づいており、更なる高出力化に向けた新たな半導体材料の利用が求められている。高耐圧かつ低損失の素子を実現するには、高い絶縁破壊電界強度( $E_c$ )をもつ材料が優位である。新規材料として、SiC や窒化ガリウム(GaN)、酸化ガリウム( $Ga_2O_3$ )、ダイヤモンド、AlN が有力である。中でも AlN は、既に実用されている GaN と比較して、 $E_c$  が 4 倍高く(12 MV/cm)、バンドギャップエネルギー( $E_g$ )が 2 倍近くあり(6.1 eV)、熱伝導率も 2 倍大きい(3 W/cmK)ため、高出力かつ高温素子用材料として非常に魅力的である。

AlN は、現在、素子動作可能な半導体中で、 $E_c$  と  $E_g$  が最も大きい材料である。絶縁体の性質に最も近い半導体である AlN は、素子を動作させること自体が難しい。特に、不純物イオン化エネルギーが大きいことから、室温で高いドナー濃度やアクセプタ濃度を得るのが困難である。そのため、AlN 素子作製時には、低いキャリア濃度やオーミック電極の接触抵抗の高さ、Schottky 電極の障壁高さ制御が大きな課題となっている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、超低損失かつ高耐圧素子の作製に向けて、AlN 素子作製の技術基盤を構築することである。AlN の物性を最大限生かした高耐圧素子として、トレンチ MOS バリア Schottky(TMBS)ダイオードがある(図 1)。TMBS 構造は、Schottky 障壁ダイオード(SBD)の優れた順方向特性を得ながら、

電界集中箇所を Schottky 電極下から誘電体膜下の AlN 層に移すことで、AlN の高耐圧性能を生かすことができる。AlN TMBS ダイオード実現に向けた、素子作製の基盤技術を構築する。

### 3. 研究の方法

#### (1) AlN のオーミック接触実現と接触抵抗低減

縦型 Schottky ダイオードを作製するには、裏面側のオーミック接触が不可欠である。一般的なオーミック接触を得る方法として、高濃度不純物ドーピングによるトンネル効果と半導体の電子親和力と金属の仕事関数差 ( $\phi_M$ ) の低減が挙げられる。AlN に高濃度 Si をイオン注入し、注入条件と熱処理温度(1200-1700°C)を最適化することで  $n^+$ -AlN 層を実現する。また、 $n^+$ -AlN 層に最適なオーミック電極を探索する。同様の試みを N 極性面でも行う。

#### (2) 金属/AlN の Schottky 障壁の物性評価と SBD の作製

Al 極性面 AlN 上に Schottky 電極を蒸着する。電極には、 $n$ -AlN に対して  $\phi_M$  が大きい Pd, Ni, Au, Pt を用いる。特に、剥がれやすい Pd や高価な Au や Pt と比べて、Ni は実用性が高い。Si 濃度を  $10^{17}$ - $10^{19}$   $cm^{-3}$  の間で制御し、Si 濃度とドナー濃度、Schottky 障壁高さの関係を明らかにし、 $n$ -AlN における Schottky 電極としての Ni の有効性を調べる。

#### (3) 酸化膜の作製と酸化膜/AlN 界面の物性評価

AlN 素子に使用可能な絶縁酸化膜として、 $SiO_2$  と  $Al_2O_3$  が挙げられる。酸化膜を高耐圧 AlN 素子に用いるため、酸化膜の絶縁破壊耐性が重要となる。AlN を酸素雰囲気下で加熱(1000-1400°C)することで、 $Al_2O_3$  熱酸化膜の形成を試みる。熱酸化中は、AlN 層内部への酸素原子の拡散が懸念されることから、熱処理中の不純物拡散についても詳細に調べる。

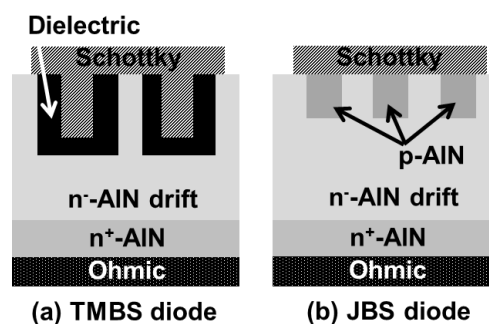


Fig. 1: Schematic figure of AlN devices

#### 4. 研究成果

##### (1) AlN のオーミック接触実現と接触抵抗低減

① (黒崎氏) DOWA Electronics Materials 社に MOCVD 法を用いて C 面サファイヤ基板上 1 ~ 3  $\mu\text{m}$  厚 AlN 結晶成長を行って頂いた。AlN 層に  $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$  のドーズ量で Si イオンを注入し、SIMS 測定によりおよそ 150 nm 深さに  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の Si が分布していることを確認した。Si<sup>+</sup>注入 AlN 試料を窒素雰囲気下 1200~1700°C で 30 分間熱処理した。Ti/Al/Ni/Au 電極を蒸着した後、800~1500°C の RTA により電極の合金化を行った。同じ RTA 温度では、図 2 左に示すように、1500°C の熱処理時に最大の電流が流れた。高温熱処理では DX センターが形成されて、電子濃度が低減するという報告と矛盾する。今回は、イオン注入損傷回復の効果がより大きかったものと思われる。同じ熱処理温度では、図 2 中に示すように、RTA 温度が 950°C の時に最大の電流が流れた。1150°C で RTA 後の試料を Ar スパッタにより削りながら XPS 測定した結果を図 2 右に示す。Ti、Ni、Au が AlN と反応し、AlN 層内部まで拡散していることが分かる。電極表面荒れも大きくなっていったことから、1050 度以上で抵抗が増大したものと思われる。更に、電極形成前の表面処理についても調べた。フッ酸および熱リン酸の場合はレジストが剥がれてしまった。塩酸に 1 分間浸すことにより電流値が増大した。BCl<sub>3</sub> プラズマ処理を行った場合、更に電流が増大した。電極形成前は、BCl<sub>3</sub> プラズマ処理が最も効果的であることが分かった。

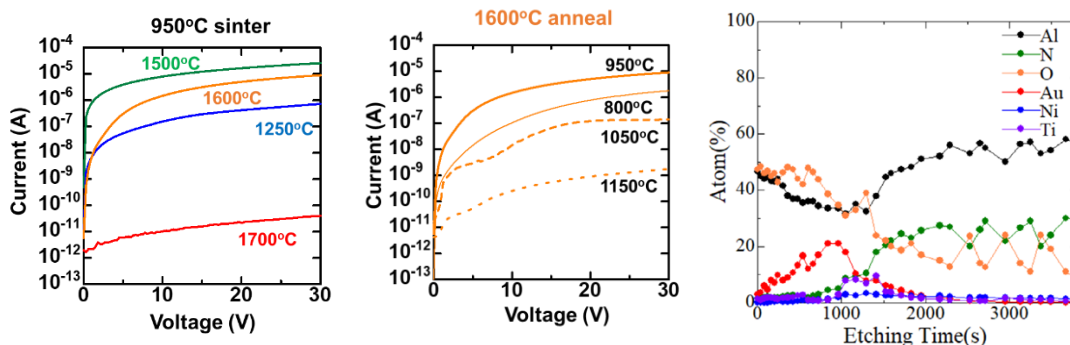


Fig. 2: (left) Current-voltage relation of Si-implanted AlN after various annealing temperatures and (middle) Si-implanted AlN with Ti/Al/Ni/Au electrodes sintered at various temperatures. (right) XPS data of Si-implanted AlN with Ti/Al/Ni/Au electrodes.

② AlN 層をチャンネルとした電界効果トランジスタ(MESFET)の作製を行った。(1)-①と同じ条件でイオン注入した AlN 試料に対して、1600°C で熱処理し、ソース/ドレイン電極を様々な温度で合金化した。RTA 温度を 800~1050°C としたときのドレイン電流-ドレイン電圧特性を図 3 に示す。1050°C での RTA 温度ではトランジスタ動作が得られなかった。従来の GaN 素子作製で用いられる 800°C での RTA と比べて、950°C での RTA においてドレイン電流が増大した。AlN 素子のオーミック電極形成には 850~950°C の RTA 処理が良いことが分かった。

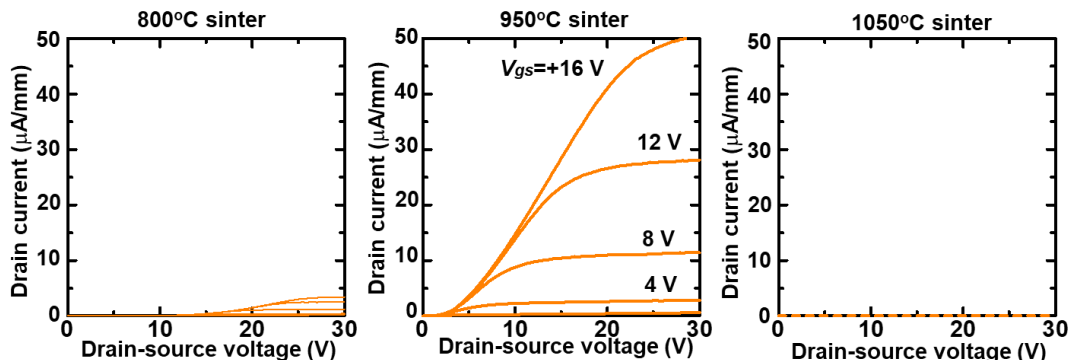


Fig. 3: DC output characteristics of Si-implanted AlN MESFET with source/drain contact sintered at (left) 800°C, (middle) 950°C, and (right) 1050°C.

## (2) 金属/AlN の Schottky 障壁の物性評価と SBD の作製

AlN SBD の作製を行った。(1)-②と同じ条件でイオン注入および熱処理した AlN 試料に対して、カソード電極を 950°C で合金化した後、アノード電極として様々な材料の円形電極を蒸着した。Ni と Pt 電極を用いた場合の SBD の電流-電圧特性を図 4 に示す。測定温度の上昇と共に順方向の電流が増大した。これは AlN 中の Si のイオン化エネルギーが大きいため、測定温度の上昇と共に電子濃度が増えたためと考えられる。両者の試料ともに 1150 K でも動作し、 $10^3$  以上の on/off 比が得られた。これは AlN の真性キャリア密度が小さいためである。1150 K は、SBD の動作温度としては世界最高温度である。熱電子放出モデルより見積もった Ni 電極の Schottky 障壁高さは 3.4 eV であった。この大きい Schottky 障壁高さと熱的安定性も高温動作に寄与したと考えられる。アノード電極は 1150 K 以上で劣化が見られた。更なる高温動作には、最適なアノード電極の模索が必要である。電極材料として、500 K 以下では有意な差はなかったが、測定温度の上昇に伴い、Pt の方が立ち上がり電圧の変移が大きくなった。Ni/AlN SBD のオン電圧は 1.5 V であり、耐圧は 610 V であった。

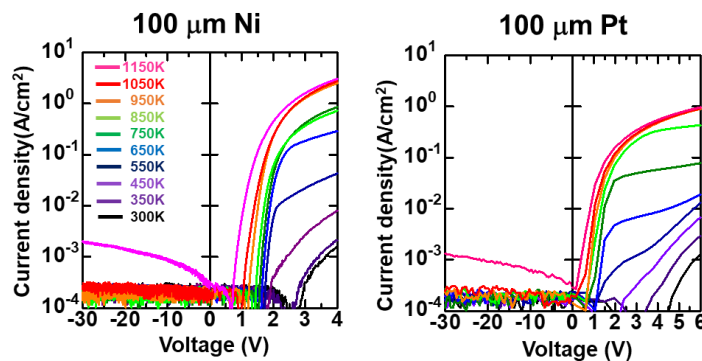


Fig. 4:  $J$ - $V$  characteristics of (left) Ni/AlN and (right) Pt/AlN SBDs.

## (3) 酸化膜の作製と酸化膜/AlN 界面の物性評価

①(山田氏) AlN 層上に酸化膜の形成を行った。AlN 層を酸素雰囲気 1050°C で熱酸化を行った。1 時間以上熱酸化した試料は、XRD 測定において  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  とされるピークが観察された。しかし、XRR でフリンジが見られず、酸化膜厚の測定には至らなかった。更なる高温での熱酸化を行うために酸素雰囲気に大気を混ぜて 1400°C で熱酸化を行ったところ、XRR でフリンジが見られた。熱酸化時間と膜厚の関係を図 5 左に示す。60 分間の熱酸化で 14 nm 程度の膜が表面に得られている。結晶かアモルファスかは同定できなかった。熱酸化法による酸化膜/AlN 構造や AlN MOSFET の作製は困難であると思われる。

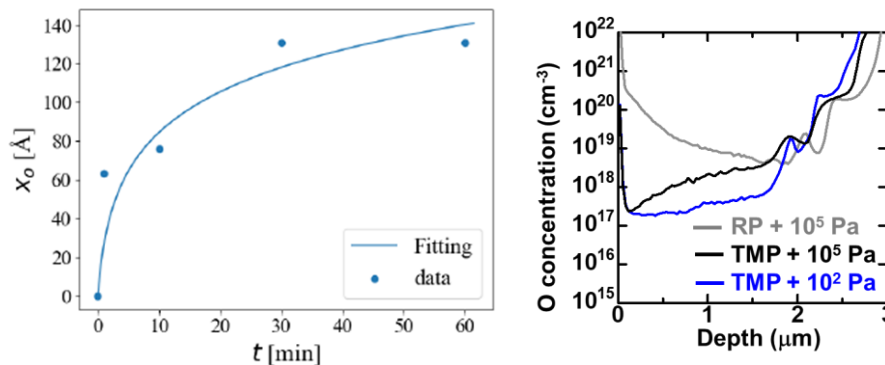


Fig. 5: (left) Oxidation thickness vs oxidation time of AlN. (right) Oxygen concentration in AlN after annealing after pumping at various conditions.

②AlN 層中の不純物拡散について調べた。Mg は非常に拡散しやすく、1600°C 30 分間の熱処理で AlN/サファイヤ界面に到達した。Si や Ge の拡散は比較的小さく、深さ 500 nm 程度までであった。一方、想定外に大きい拡散が見られたのが O であった。1500°C 以上の熱処理でサファイヤが分解され、O がサファイヤ基板側から AlN 表面側に拡散することが分かった。イオン注入損傷回復には 30 分間程度の熱処理が必要であるが、AlN 層の膜厚を 3 μm 以上にするこゝで、チャンネル領域への到達を阻止することに成功した。また、熱処理前に熱処理装置内部の真空度を十分に高めておかないと、AlN 層表面からも O が混入することが分かった。RP のみで真空引きした場合、図 5 右に示すように、 $10^{20} \text{ cm}^{-3}$  以上の O 濃度が得られた。熱処理前に TMP で  $10^{-3} \text{ Pa}$  以下まで真空引きすることで、この問題を解決できた。

上記(1)~(3)の通り、当初計画通り、4 年間で AlN 素子作製に必要な電極形成と酸化膜について多くのことを明らかにし、素子作製の基盤技術を構築した。得られた技術を駆使して、AlN MESFET の性能向上を図り、高温動作を調べた。(2)-②より、比較的安価で良好な高温動作可能な Ni をゲート電極とし、(3)-②より、AlN 膜厚を 3 μm とし、MESFET を作製した(図 6 左)。750°C および 850°C でのドレイン電流-ドレイン電圧特性を示す。850°C ではゲート電圧で制御できているものの、漏れ電流が大きく、素子はオフしなかった。700°C ではオフすることに成功し、これは MESFET の動作温度として世界最高温度である。

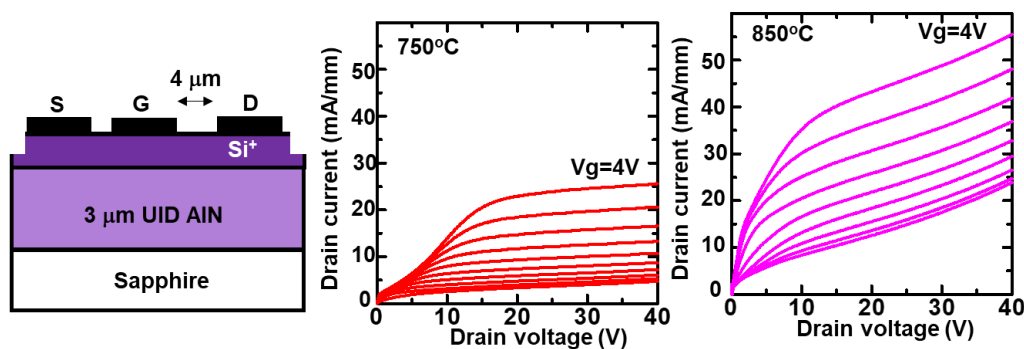


Fig. 6: (left)structure and DC output of AlN MESFET at (middle) 750°C and (right)850°C.

AlN TMBS ダイオード実現に向けて、MOSFET を試作した(図 7 左)。(3)-①より、熱酸化が難しいことから、ゲート酸化膜には PECVD で SiO<sub>2</sub> を堆積した。しかし、ゲートの漏れ電流が大きく、素子はオフしなかった。AlN と SiO<sub>2</sub> の伝導帯底のエネルギー差が小さいことと酸化膜の品質が十分でないと考えられる。今後、良好な酸化膜が見つければ、AlN MOSFET 動作実現に繋がる。また、AlN 素子の縦型動作ができれば、AlN TMBS ダイオード実現の可能性もある。

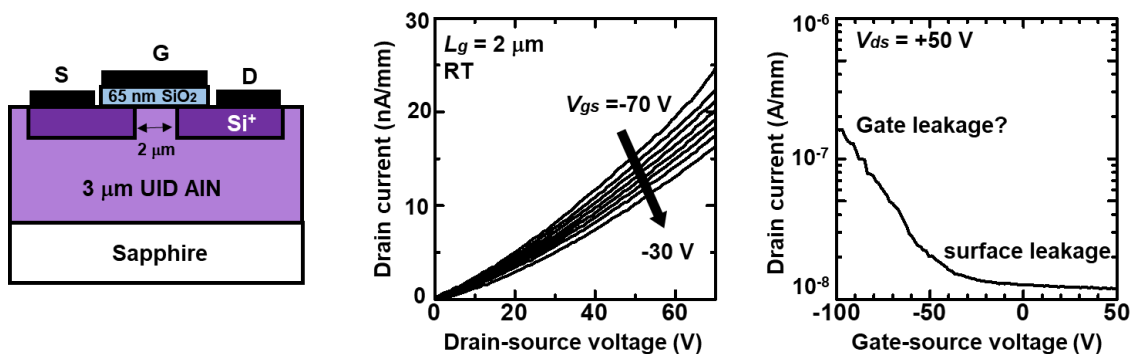


Fig. 7: (left)structure, DC output, and transfer characteristics of AlN MOSFET.

本研究を進めるにあたり、多大なご協力を賜りました DOWA Electronics Materials 社に感謝申し上げます。また、素子作製と特性評価には筑波大 OF と産総研 NPF の共用設備を用いました。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Okumura Hironori, Watanabe Yasuhiro, Shibata Tomohiko, Yoshizawa Kohei, Uedono Akira, Tokunaga Hiroki, Koseki Shuuichi, Arimura Tadanobu, Suihkonen Sami, Palacios Tomas	4. 巻 61
2. 論文標題 Impurity diffusion in ion implanted AlN layers on sapphire substrates by thermal annealing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 026501 ~ 026501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac47aa	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 該当する

1. 著者名 Jori Lemettinen, Nadim Chowdhury, Hironori Okumura, Iurii Kim, Sami Suihkonen, Tomas Palacios	4. 巻 40
2. 論文標題 Nitrogen-Polar Polarization-Doped Field-Effect Transistor Based on Al <sub>0.8</sub> Ga <sub>0.2</sub> N/AlN on SiC With Drain Current Over 100 mA/mm	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Electron Device Letters	6. 最初と最後の頁 1245-1248
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LED.2019.2923902	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 該当する

1. 著者名 Okumura Hironori	4. 巻 58
2. 論文標題 Fabrication of an AlN ridge structure using inductively coupled Cl <sub>2</sub> /BCl <sub>3</sub> plasma and a TMAH solution	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 026502 ~ 026502
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/1347-4065/aaf78b	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3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hironori Okumura, Yuji Kato, Takayoshi Oshima, Tomas Palacios
2. 発表標題 Demonstration of (AlGa)203-channel MOSFETs
3. 学会等名 2019 International Workshop on Gallium Oxide and related materials（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hironori Okumura
2. 発表標題 (AlGa)203/Ga203 resonant tunneling diodes
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Alpha-particle detectors with GaN PiN homoepitaxial layer
2. 発表標題 Okumura, Hironori, Ogawara, Yohei, Togawa, Maanbu, Miyahara, Masaya, Nishinaga, Jiro, Imura, Masataka, Isobe, Tadaaki
3. 学会等名 2021 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 導電性AlNエピタキシャル膜付き基板及びその製造方法	発明者 奥村 宏典, 柴田 智彦, 渡邊 康弘	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2022-084473	取得年 2022年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

<p>ワイドギャップ半導体研究室  <a href="https://sites.google.com/view/okumura">https://sites.google.com/view/okumura</a></p> <p>AlN素子作製プロセス  <a href="https://researchmap.jp/h_okumura/openfacility">https://researchmap.jp/h_okumura/openfacility</a></p>
---

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
研究協力者	柴田 智彦  (Shibata Tomohiko)	DOWAエレクトロニクス社	
研究協力者	渡邊 康弘  (Watanabe Yasuhiro)	DOWAエレクトロニクス社	
研究協力者	吉澤 康平  (Yoshizawa Kohei)	DOWAエレクトロニクス社	
研究協力者	黒崎 雄太  (Kurosaki Yuta)	筑波大学・数理物質系・学生	
研究協力者	山田 紘士  (Yamada Hiroshi)	筑波大学・応用理工学類・学生	

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			
米国	MIT			
フィンランド	Aalto			