

令和 4 年 9 月 14 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02170

研究課題名（和文）分極制御型超ワイドバンドギャップ半導体デバイスの開拓

研究課題名（英文）Research on Polarization-Controlled Ultra-Wide Bandgap Semiconductor Devices

研究代表者

西中 浩之（Nishinaka, Hiroyuki）

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・准教授

研究者番号：70754399

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では強誘電性のGa203による高電子移動度トランジスタに向けた検討を進めた。この相のGa203はGaNを大きく超える分極を持つことが予想されており、より低消費電力のパワースイッチング素子が期待されている。その相のGa203で最も大きな課題であった単ドメイン化に向けて、新しい基板 -GaFeO3を提案し、その基板を用いることで初めて単ドメイン化に成功した。また、この基板の -Ga203に対する格子不整合度は1%程度と小さく、この小さな格子不整合度は高品質な -Ga203の形成を可能とした。これらの成果は相のパワースイッチング素子の実現に繋がる成果であると考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は新しい強誘電体かつ半導体である -Ga203の結晶成長技術や基礎物性を明らかにする研究である。従来のGaNを大きく上回る分極の大きさや分極スイッチングは新しいパワースイッチングデバイスが実現できる可能性を有しており、その学術的意義は大きい。また、この大きな分極はより小さなオン抵抗が実現できるため、より低消費なスイッチング素子が実現できる。このより低消費なスイッチング素子は、超低消費電力社会に向けて大きな社会的意義があると考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated ferroelectric -Ga203 thin films for high-electron-mobility transistors. It shows a large polarization and hence high two-dimensional electron gas density, which makes it a highly promising candidate for low resistance power-switching applications. It is challenging to grow single-domain -Ga203 thin films using the conventional substrates. We proposed a novel substrate for obtaining single-domain -Ga203. The substrates allowed the growth of single-domain -Ga203 thin films. Furthermore, the lattice-mismatch exhibits as small as approximately 1%. This small lattice-mismatch also allowed the growth of high-quality -Ga203 thin films. We believe that these results pave the way for the high-electron-mobility transistors with low on-resistance.

研究分野：結晶工学

キーワード：酸化ガリウム 強誘電体 単ドメイン

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

## 1. 研究開始当初の背景

約 5.0eV の大きなバンドギャップを有する酸化ガリウム ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) 半導体は、炭化ケイ素 ( $\text{SiC}$ :3.2eV) や窒化ガリウム ( $\text{GaN}$ :3.4eV) を超える高耐圧半導体デバイスへの応用が期待されている。この  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  は 5 つの結晶多形 ( $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \kappa(\epsilon)$ ) を有するが、そのうち高品質な単結晶基板が利用できる  $\beta$  相が、同様に基板が利用できる  $\text{SiC}$  の代替として研究が進んできた。2018 年度には 1.85 kV の絶縁破壊電圧を持つ MOSFET が報告されるなど、その進展は目覚ましい。一方で、 $\text{GaN}$  で主に検討されている二次元電子ガス (2DEG) を利用した高周波デバイスに関しても、 $\beta$  相で高移動度電子トランジスタ (HEMT) の形成やヘテロ接合界面での量子ホール効果の観察に成功するなど、やはりその進展は著しい。そのような背景の下、我々は  $\text{GaN}$  と同様に 2DEG 層に分極によるドーピングが可能な  $\kappa(\epsilon)$ : 従来は  $\epsilon$  と呼ばれていたが、現在は  $\kappa$  が主流になっている) 相に着目して研究を進めてきた。この  $\kappa$  相は 2016 年に分極を有することが報告されたばかりの材料であるものの、その物性から多くの研究者の注目を浴びている。またその分極の大きさは  $\text{GaN}$  の 8 倍程度と理論的に示されており、 $\text{GaN}$  を上回る 2DEG 濃度が実現できるとされている。我々はミスト CVD 法を言う手法を用いて  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  の成膜とその材料開拓を行ってきた。このミスト CVD 法は、霧化した溶液を CVD 原料に利用する手法であり、原料となる溶液に目的の材料の前駆体を溶解することができれば、どのような材料も利用できるといった特徴がある。特に、2DEG 形成に必須のバンドギャップエンジニアリングについては、このミスト CVD 法の特徴を活かして、Al や In との混晶を世界に先駆けて報告しており、2DEG 研究で大きく先行している。しかしながら、まだまだ  $\kappa$  相の研究は始まったばかりであり、その応用である 2DEG や HEMT は実現されておらず、移動度などの基礎的な電気輸送特性なども全く未知の材料である。

## 2. 研究の目的

本研究では、大きな分極を有し、さらに分極のスイッチが可能な強誘電体である  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  による HEMT を作製して、 $\text{GaN}$  を超えるパワーデバイスを実現し、極限の省エネ社会への貢献を目的とする。この目的を達成するために、 $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  の特徴を活かしたデバイスの提案や、未知の物性を調査する。

### 1. 大きな分極による高濃度 2DEG キャリア密度の HEMT

$\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  は、 $\text{GaN}$  の 8 倍程度の分極を持つとされており、分極ドーピングにより 2DEG 層に誘起されるキャリア密度は  $\text{GaN}$  を大きく上回る可能性を有する。2DEG を用いたパワーデバイスでは、その 2DEG キャリア密度は 2DEG 輸送層の抵抗成分に影響する。より大きな 2DEG キャリア密度が実現できれば、素子の低抵抗化が可能となり、低消費電力のパワーデバイスにつながる。一方で  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  はその結晶構造から、容易に面内に  $120^\circ$  の回転を許容してしまうために、一般的に用いられている基板を用いると、その結晶は小さなドメインからなることが報告されている。この小さなドメインは横方向の電気伝導性を阻害してしまう。本研究では新しい基板を採用して、この回転の発生を防ぎ、単一ドメイン化することを検討する。

### 2. $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の基礎物性の解明

$\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  の結晶成長は 2016 年より盛んに報告されているものの、電気特性や光学特性などの基礎物性は全くと言っていいほど明らかになっていない。HEMT 応用に向けた高品質な単結晶成長を実現し、その基礎的な物性を評価することで、物性面から  $\text{GaN}$  との比較を行う。

## 3. 研究の方法

本研究ではミスト CVD 法を用いて  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  の形成の検討を行った。その新しい基板として  $\epsilon$ -

$\epsilon\text{-GaFeO}_3$  を新たに提案して、その基板を利用して成膜を行った。同じ結晶構造を持ち、かつ小さな格子不整合となる  $\epsilon\text{-GaFeO}_3$  は  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  の面内の回転を抑制できる可能性を持つ。そこでこの  $\epsilon\text{-GaFeO}_3$  を用いて、 $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  の成長を評価し回転を抑制して単一ドメイン化しているかどうか透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いて評価した。また、 $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  は安定相の  $(-201)\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  上にも成長する。準安定相がどのように安定相上に成長するか調査するため、 $(-201)\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  上に  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  を成長させた。その膜内の  $\beta$  と  $\kappa$  の分布を Automated Crystal Orientation Mapping (ACOM) -TEM を用いて評価した。

#### 4. 研究成果

##### 4-1. $\epsilon\text{-GaFeO}_3$ 基板上での $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の成長

図 1 は育成した  $\epsilon\text{-GaFeO}_3$  バルク単結晶と、切削研磨した  $\epsilon\text{-GaFeO}_3$  ウエハである。この  $\epsilon\text{-GaFeO}_3$  と  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  の格子定数とその格子不整合度を表 1 に示す。基板と  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  の格子不整合度は 1% 程度であり、エピタキシャル成長に良い基板であるといえる。この基板を用いてミス脱 CVD 法にて  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  の成長を行い、その結晶成長を評価した。図 2 は成膜時間を変えた時の  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  の XRD の結果である。図より分かるように、成膜時間が短い (膜厚が薄い) ところではラウエ振動が観察される膜が得られており、高品質かつ膜厚均一性の良い膜が得られていることが示された。この時の逆格子マッピング (RSM) の結果 (図 3) を見てみると、膜厚が薄いとこころではコヒーレント成長しており、膜厚が厚くなると緩和していることが見て取れる。この時の表面形状を原子間力顕微鏡 (AFM) にて評価した結果を図 4 に示す。図より成膜時間が短いときは、表面はステップテラス構造が見られることから、ステップフロー成長していることが分かった。また、成膜時間 1 min (39 nm) では表面に結晶粒が観察され、島状成長が起きていることが分かる。一方でこの時の RSM ではまだコヒーレント成長していることから、層状成長と島状成長が両方起きていると考えている。例えば 30 s (27 nm) 成長した AFM 像を見てみると、テラス上にいくつかの島が観察されている。これはテラス幅が広いために、テラス上でアドアトムの衝突による島成長が発生しているためと考えている。成膜時間が延びるに従い、島の数が増加して島成長が優先的になっていると考えている。また、コヒーレント成長した膜厚 27 nm の  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  薄膜の断面 TEM 観察の結果を図 5 に示す。図 5(a) より、コヒーレント成長した膜厚では明瞭な転位は観察されていない。また、高分解 TEM 像 (図 5(b)) を見てみるとほぼ原子配置が揃った格子像となっている。この時の制限視野電子回折像 (SAED) を見てみると、例えば 017 では面内の位置 (図横方向) は一致しており、成長方向に 2 つに分離している (図 5(c))。ここから得られた膜がコヒーレント成長していることが分かった。

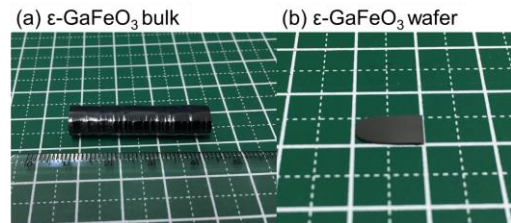


図 1.  $\epsilon\text{-GaFeO}_3$  のバルクとウエハ

表 1.  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  と  $\epsilon\text{-GaFeO}_3$  の格子定数

Lattice parameter [Å]	$\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$	$\epsilon\text{-GaFeO}_3$	Lattice mismatch [%]
a	5.046	5.077	-0.6
b	8.702	8.736	-0.4
c	9.283	9.377	-1.0

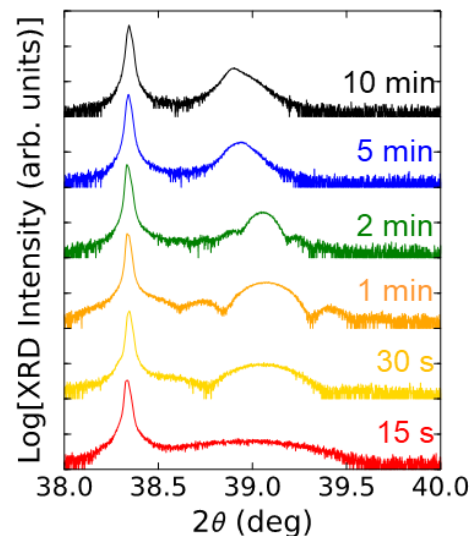


図 2.  $\epsilon\text{-GaFeO}_3$  上の  $\kappa\text{-Ga}_2\text{O}_3$  の XRD

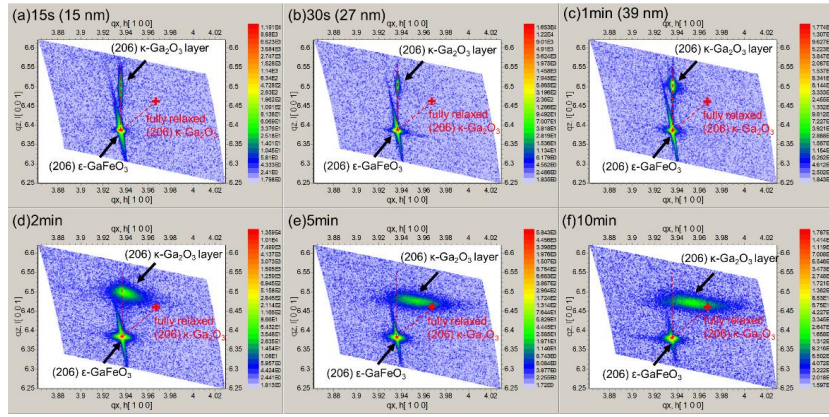


図 3.  $\epsilon$ -GaFeO<sub>3</sub> 上の  $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の RSM

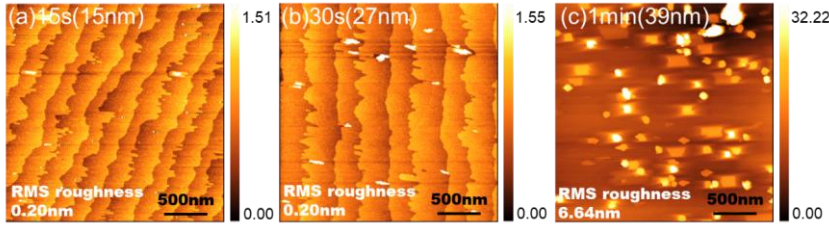


図 4.  $\epsilon$ -GaFeO<sub>3</sub> 上の  $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の AFM

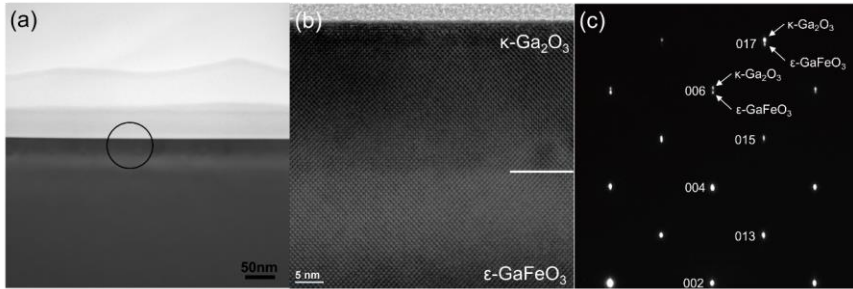


図 5.  $\epsilon$ -GaFeO<sub>3</sub> 上の  $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の TEM 観察結果

また、単一ドメインであることを確認するため、 $\epsilon$ -GaFeO<sub>3</sub> 上の  $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の平面 TEM 観察を行った。平面 TEM 観察の結果を図 6 に示す。同時に AlN テンプレート上の  $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の平面 TEM 観察結果も図 6 に示す。図のように AlN 上の  $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は小さなドメインからなる結晶である一方で、 $\epsilon$ -GaFeO<sub>3</sub> 上の  $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は単一ドメインの結晶であることが分かった。単一ドメインの  $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の形成に成功したのは、本研究が初めての報告であり、HEMT 応用に向けた下地が準備できたといえる。

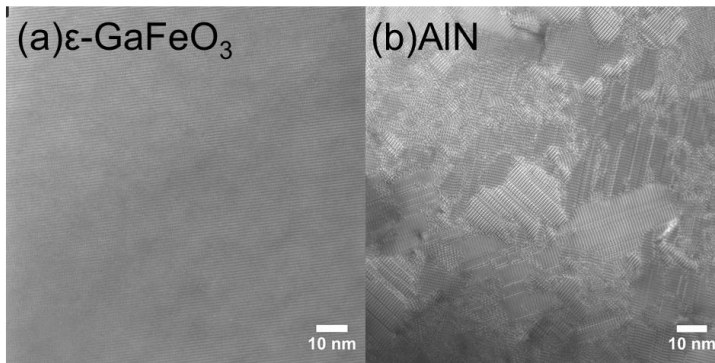


図 6.  $\epsilon$ -GaFeO<sub>3</sub> と AlN 上の  $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の平面 TEM 観察結果

#### 4-2. (-201) $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 基板上での $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の成長

準安定相の  $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は安定相の  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の(-201)面に成長することが知られている。その成長



において安定相から準安定相への移行することが考えられることから、どのように  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  と  $\kappa$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  が成長するかを知ることは単一相の  $\kappa$  相や  $\beta$  相を得るために重要である。そこで(-201) $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  基板の上にミスト CVD 法で  $\kappa$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  を成長し、その結晶成長を評価した。図 7 は成長温度を変えた時の(-201) $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  上に成長した  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  の XRD の結果である。図より分かるように低温では  $\kappa$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  が成長しており、成長温度を高くすると  $\kappa$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  のピークが小さくなり、900°Cでの成長で  $\kappa$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  のピークが見えなくなった。このように低温では  $\kappa$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  が優先的に成長し、高温では  $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  がホモエピタキシャル成長することが分かった。 $\kappa$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  が優先配向している 650°C成長した薄膜について、ACOM-TEM にて薄膜中の  $\kappa$  相と  $\beta$  相の分布を評価した(図 8)。その分布の評価では precession electron diffraction(PED)を利用して、その回折像から結晶構造を評価している。図 8(b)の phase reliability image では、コントラストが白い部分程信頼性が高く、黒い部分の信頼性が低い。例えば、図 7(d)のように  $\beta$  と  $\kappa$  が混ざっている部分では黒いコントラストになる。図 8(c)の phase map は  $\kappa$  相と  $\beta$  相の分布を示している。図 8(c)から分かるように基板界面では  $\beta$  相の割合が多く、徐々に  $\kappa$  相が主となってきている。一方で  $\beta$  相は膜中や表面付近にも観察される。これは  $\kappa$  相と  $\beta$  相が混在しやすいことを示している。単一相の  $\kappa$  相を得ることはそのデバイス応用に向けて重要なことである。そのためには、 $\beta$  相ができる条件を避ける必要がある。本検討のように(-201) $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  上に  $\kappa$  相は成長するものの、 $\beta$  相が薄膜中に存在してしまうために、デバイス応用には向かない。例えば c 面サファイア上でも初期に(-201) $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  が成長し、その後  $\kappa$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  が成長する。一方で立方晶の(111)面上では(-201) $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  が成長せずに、直接  $\kappa$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  が成長し単一相の  $\kappa$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  が得られる。このように単一相の  $\kappa$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  を得るには適切な基板の選定が重要である。

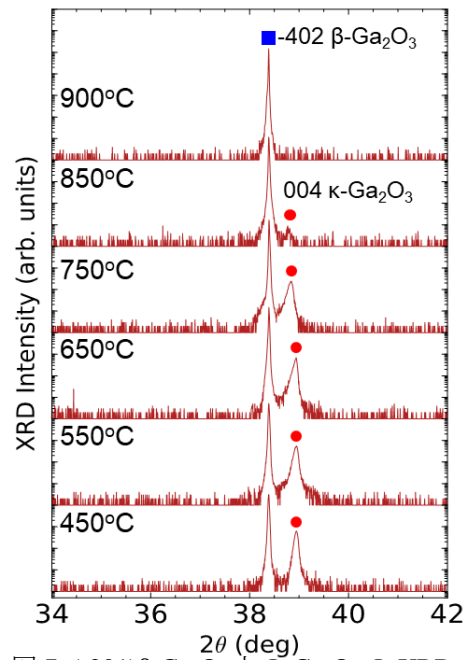


図 7. (-201) $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  上の  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  の XRD

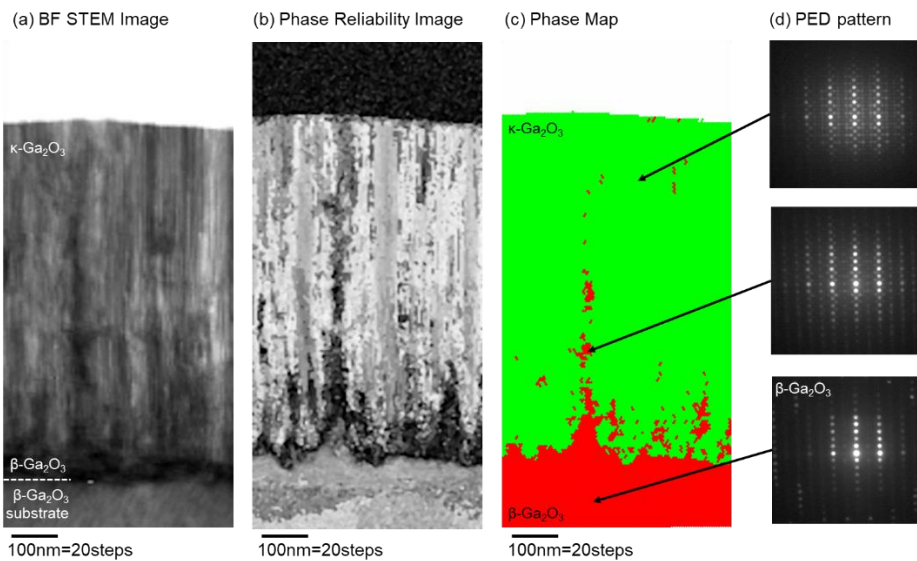


図 8. (-201) $\beta$ - $\text{Ga}_2\text{O}_3$  上の  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  の ACOM-TEM 観察結果

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Horie Ryuto, Nishinaka Hiroyuki, Tahara Daisuke, Yoshimoto Masahiro	4. 巻 851
2. 論文標題 Epitaxial growth of $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})\text{Ga}_2\text{O}_3$ alloy thin films on spinel substrates via mist chemical vapor deposition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Alloys and Compounds	6. 最初と最後の頁 156927 ~ 156927
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jallcom.2020.156927	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 Nishinaka Hiroyuki, Nagaoka Tatsuji, Kajita Yuki, Yoshimoto Masahiro	4. 巻 128
2. 論文標題 Rapid homoepitaxial growth of (010) $\text{Ga}_2\text{O}_3$ thin films via mist chemical vapor deposition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Materials Science in Semiconductor Processing	6. 最初と最後の頁 105732 ~ 105732
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mssp.2021.105732	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 ARATA Yuta, NISHINAKA Hiroyuki, SHIMAZOE Kazuki, YOSHIMOTO Masahiro	4. 巻 70
2. 論文標題 Growth of Metastable $\text{Ga}_2\text{O}_3$ Epitaxial Thin Film on Flexible Synthetic Mica by Insertion of $\text{Fe}_2\text{O}_3$ Buffer Layer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 738 ~ 744
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2472/jjsms.70.738	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 Nishinaka Hiroyuki, Ueda Osamu, Ito Yusuke, Ikenaga Noriaki, Hasuike Noriyuki, Yoshimoto Masahiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Plan-view TEM observation of a single-domain $\text{Ga}_2\text{O}_3$ thin film grown on $\text{GaFeO}_3$ substrate using $\text{GaCl}_3$ precursor by mist chemical vapor deposition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 018002 ~ 018002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac3e17	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 Ogura Yuri, Arata Yuta, Nishinaka Hiroyuki, Yoshimoto Masahiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Alloying In2O and Ga2O3 on AlN templates for deep-ultraviolet transparent conductive films by mist chemical vapor deposition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1037 ~ SC1037
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac4688	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 Kajita Yuki, Nishinaka Hiroyuki, Yoshimoto Masahiro	4. 巻 24
2. 論文標題 Observing the microstructure of a (001) -Ga2O3 thin film grown on a (-201) -Ga2O3 substrate using automated crystal orientation mapping transmission electron microscopy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 CrystEngComm	6. 最初と最後の頁 3239 ~ 3245
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D2CE00042C	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 Shimazoe Kazuki, Nishinaka Hiroyuki, Watanabe Keisuke, Yoshimoto Masahiro	4. 巻 147
2. 論文標題 Epitaxial growth of metastable c-plane rhombohedral indium tin oxide using mist chemical vapor deposition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Science in Semiconductor Processing	6. 最初と最後の頁 106689 ~ 106689
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.mssp.2022.106689	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 西中 浩之	4. 巻 90
2. 論文標題 混晶と格子整合性からアプローチする 相, 相酸化ガリウムの結晶成長技術	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 360 ~ 364
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/oubutsu.90.6_360	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 Nishinaka Hiroyuki, Ueda Osamu, Tahara Daisuke, Ito Yusuke, Ikenaga Noriaki, Hasuike Noriyuki, Yoshimoto Masahiro	4. 巻 5
2. 論文標題 Single-Domain and Atomically Flat Surface of $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Thin Films on FZ-Grown $\text{-GaFeO}_3$ Substrates via Step-Flow Growth Mode	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ACS Omega	6. 最初と最後の頁 29585 ~ 29592
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.0c04634	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 Shimazoe Kazuki, Nishinaka Hiroyuki, Arata Yuta, Tahara Daisuke, Yoshimoto Masahiro	4. 巻 10
2. 論文標題 Phase control of $\text{-}$ and $\text{-Ga}_2\text{O}_3$ epitaxial growth on $\text{LiNbO}_3$ and $\text{LiTaO}_3$ substrates using $\text{-Fe}_2\text{O}_3$ buffer layers	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 055310 ~ 055310
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0006137	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 Arata Yuta, Nishinaka Hiroyuki, Shimazoe Kazuki, Yoshimoto Masahiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Epitaxial Growth of Bendable Cubic $\text{NiO}$ and $\text{In}_2\text{O}_3$ Thin Films on Synthetic Mica for p- and n-type Wide-Bandgap Semiconductor Oxides	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 MRS Advances	6. 最初と最後の頁 1 ~ 9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1557/adv.2020.85	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 Arata Yuta, Nishinaka Hiroyuki, Tahara Daisuke, Yoshimoto Masahiro	4. 巻 59
2. 論文標題 van der Waals epitaxy of ferroelectric $\text{-gallium}$ oxide thin film on flexible synthetic mica	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 025503 ~ 025503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab6b70	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 Tahara Daisuke, Nishinaka Hiroyuki, Arata Yuta, Shimazoe Kazuki, Yoshimoto Masahiro	4. 巻 -
2. 論文標題 Microstructures of $\text{-Ga}_{203}$ thin film on (100) $\text{TiO}_2$ substrate by mist chemical vapor deposition	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Xplore (IMFEDK)	6. 最初と最後の頁 79 ~ 80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IMFEDK48381.2019.8950694	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 Morimoto Shota, Nishinaka Hiroyuki, Yoshimoto Masahiro	4. 巻 682
2. 論文標題 Growth and characterization of F-doped $\text{-Ga}_{203}$ thin films with low electrical resistivity	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Thin Solid Films	6. 最初と最後の頁 18 ~ 23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tsf.2019.04.051	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48件 (うち招待講演 7件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 K. Shimazoe, H. Nishinaka, and M. Yoshimoto
2. 発表標題 Growth of corundum structured oxides and their alloy for lattice matched applications
3. 学会等名 The 2021 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Ogura, Y. Arata, H. Nishinaka, and M. Yoshimoto
2. 発表標題 Epitaxial Growth of Indium-Gallium-Oxide-Alloy Thin Films on AlN Templates by Mist Chemical Vapor Deposition
3. 学会等名 2021 International Conference on Solid State Devices and Materials (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西中浩之
2. 発表標題 ミストCVD法によるパワー半導体応用に向けたGa2O3の形成技術
3. 学会等名 FlOTコンソーシアム令和3年度第3回機能性フレキシブルとインクジェット技術分科会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 谷口 陽子, 島添 和樹, 西中 浩之, 吉本 昌広
2. 発表標題 Bi添加In2O3の光学的特性評価
3. 学会等名 第31回日本MRS年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 島添 和樹, 西中 浩之, 石野 貴之, 渡邊 啓佑, 吉本 昌広
2. 発表標題 ミストCVD法によるスズ添加酸化インジウム及びフッ素添加酸化スズ薄膜のエピタキシャル成長
3. 学会等名 第31回日本MRS年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石野 貴之, 島添 和樹, 西中 浩之, 吉本 昌広
2. 発表標題 ミストCVD法による -Al2O3基板上的rh-IMO薄膜のエピタキシャル成長とその評価
3. 学会等名 第31回日本MRS年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西中浩之
2. 発表標題 ミスTVD法での 相および 相Ga203結晶の成長と評価
3. 学会等名 (独)日本学術振興会「結晶加工と評価技術」第145 委員会 第173 回研究会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西中浩之
2. 発表標題 ミスTVD法による省エネパワーデバイスGa203の形成技術
3. 学会等名 関西広域連合グリーン・イノベーション研究成果企業化フォーラム(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小倉有莉, 池之上卓己, 新田悠汰, 西中浩之, 吉本昌広
2. 発表標題 ミスTVD法による深紫外透明導電膜への応用に向けた(InxGa1-x)203混晶薄膜の成長
3. 学会等名 材料学会半導体エレクトロニクス部門委員会第2回研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石野 貴之, 島添 和樹, 西中 浩之, 吉本 昌広
2. 発表標題 ミスTVD法を用いたYSZ(111)面基板上のIMO薄膜のエピタキシャル成長とその評価
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金子 真大, 堀江 竜斗, 梶田 優気, 西中 浩之, 吉本 昌広
2. 発表標題 ミスT CVD 法による $(Al_xGa_{1-x})_2O_3$ 混晶薄膜成長
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 島添 和樹, 藤原 悠希, 新田 悠汰, 西中 浩之, 吉本 昌広, 野田 実
2. 発表標題 ミスT CVD法を用いたrh-ITOエピタキシャル薄膜上へのHf <sub>x</sub> Zr <sub>1-x</sub> O <sub>2</sub> 薄膜成長
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小倉 有莉, 新田 悠汰, 池之上 卓己, 西中 浩之, 吉本 昌広
2. 発表標題 深紫外透明導電膜への応用に向けた $(In_xGa_{1-x})_2O_3$ 混晶薄膜の成長とその評価
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梶田 優気, 西中 浩之, 吉本 昌広
2. 発表標題 ミスT CVD法を用いた $(In_xGa_{1-x})_2O_3$ 薄膜のエピタキシャル成長
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Shimazoe, H. Nishinaka, Y. Arata, Y. Ito, and M. Yoshimoto
2. 発表標題 Growth of Rhombohedral Indium Oxide Thin Films on LiTaO <sub>3</sub> Substrate for Fabrication of Lattice Matched Indium Gallium Oxide Power Devices
3. 学会等名 The 2021 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai Satellite event (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Arata, H. Nishinaka, and M. Yoshimoto
2. 発表標題 Epitaxial Growth of ZnO Thin Films on Flexible Substrates and Characteristics of Optical Properties by Bending
3. 学会等名 The 2021 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai Satellite event (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西中浩之
2. 発表標題 ミスTCVD法によるGa <sub>2</sub> O <sub>3</sub> のエピタキシャル成長技術
3. 学会等名 日本板硝子材料工学助成会 第38回無機材料に関する最近の研究成果発表会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西中浩之
2. 発表標題 Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> の中間準位を利用した p 型伝導に向けた検討
3. 学会等名 日本学術振興会 結晶加工と評価技術 第145委員会 第169回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西中浩之
2. 発表標題 HEMT応用に向けた $\text{-Ga}_{203}$ の結晶成長技術
3. 学会等名 電子情報通信学会 SDM/EID/ITE-IDY 研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西中浩之
2. 発表標題 ミストCVDによる $\text{-酸化ガリウム}$ のエピタキシャル成長
3. 学会等名 第71回CVD研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Arata, H. Nishinaka, K. Shimazoe, Y. Ito, and M. Yoshimoto
2. 発表標題 Epitaxial growth of various p- and n-type oxide thin films on flexible synthetic mica using mist chemical vapor depositio
3. 学会等名 The 39th Electronic Materials Symposium
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Shimazoe, H. Nishinaka, Y. Arata, Y. Ito, and M. Yoshimoto
2. 発表標題 Growth of Metastable Rhombohedral Structured Oxides Using Alpha- $\text{Fe}_{203}$ Buffer Layers via Mist CVD Method
3. 学会等名 The 39th Electronic Materials Symposium
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 新田悠汰, 西中浩之, 吉本昌広
2. 発表標題 ミスT-CVD法を用いたフレキシブルなZnO薄膜のエピタキシャル成長および光学的特性の評価
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梶田優気, 西中浩之, 新田 悠汰, 吉本昌広
2. 発表標題 ミスT-CVD法を用いて(-201) -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 基板上に成長した -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 薄膜の構造解析
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 島添 和樹, 西中浩之, 新田 悠汰, 伊藤 雄祐, 吉本昌広
2. 発表標題 ミスT-CVD法によるLiTaO <sub>3</sub> 基板上へのバッファ層を用いないrh-ITOエピタキシャル薄膜の成長とその評価
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀江 竜斗, 田原大祐, 西中浩之, 吉本昌広
2. 発表標題 スピネル基板上に格子整合して成長した -(Al <sub>1-x</sub> Ga <sub>1-x</sub> ) <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 混晶薄膜の界面の結晶構造解析
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 島添 和樹, 西中浩之, 新田 悠汰, 伊藤 雄祐, 吉本昌広
2. 発表標題 酸化鉄を用いた準安定酸化物半導体の結晶相制御
3. 学会等名 日本材料学会半導体エレクトロニクス部門委員会令和2年度第1回研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西中浩之、田原大祐、新田悠汰、島添和樹、野田実、吉本昌広
2. 発表標題 新しい強誘電体 -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> のエピタキシャル成長技術
3. 学会等名 第36回強誘電体応用会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Ito, D. Tahara, Y. Arata, H. Nishinaka, M. Yoshimoto
2. 発表標題 Effect of plasma treatment of GaN templates on -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> epitaxial growth by mist chemical vapor deposition
3. 学会等名 3rd International Workshop on Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> and Related Materials (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新田悠汰、西中浩之、田原大祐、島添和樹、伊藤雄祐、吉本昌広
2. 発表標題 合成雲母上へのバッファ層の挿入による曲げられる -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 薄膜のエピタキシャル成長
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 伊藤雄祐、田原大祐、新田悠汰、西中浩之、吉本昌広
2. 発表標題 GaNテンプレート基板上的自然酸化膜処理が及ぼすミスTVD法による -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 薄膜成長への影響
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田原大祐、西中浩之、新田悠汰、長谷川将、吉本昌広
2. 発表標題 ミスTVD法によるGa <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 薄膜成長におけるピスマス添加の効果
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 島添和樹、西中浩之、田原大祐、新田悠汰、吉本昌広
2. 発表標題 LiNbO <sub>3</sub> , LiTaO <sub>3</sub> 基板上的 , -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 薄膜のエピタキシャル成長
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Tahara, H. Nishinaka, Y. Arata, S. Hasegawa, M Yoshimoto
2. 発表標題 Bismuth-assisted effect for the growth of -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> films grown on c-plane sapphire substrates by mist chemical vapor deposition
3. 学会等名 The 38th Electronic Materials Symposium
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Arata, H. Nishinaka, D. Tahara, K. Shimazoe, Y. Ito, M. Yoshimoto
2. 発表標題 Van der Waals epitaxy of flexible $\text{In}_2\text{O}_3$ and $\text{Ga}_2\text{O}_3$ films on cleaved mica by mist chemical vapor deposition
3. 学会等名 11th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Shimazoe, H. Nishinaka, M. Yoshimoto
2. 発表標題 Growth And Characterization of Single-Phase Metastable Rhombohedral Indium Tin Oxide Epitaxial Films on Various Plane $\text{Al}_2\text{O}_3$ Substrates with $\text{Fe}_2\text{O}_3$ Buffer Layers
3. 学会等名 11th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 D. Tahara, H. Nishinaka, Y. Arata, K. Shimazoe, M Yoshimoto
2. 発表標題 Microstructures of $\text{Ga}_2\text{O}_3$ Thin Film on (100) $\text{TiO}_2$ Substrate by Mist Chemical Vapor Deposition
3. 学会等名 The 2019 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Shimazoe, H. Nishinaka, D. Tahara, Y. Arata, M. Yoshimoto
2. 発表標題 Growth of $\text{In}_2\text{O}_3$ and $\text{Ga}_2\text{O}_3$ Epitaxial Thin Films on $\text{LiTaO}_3$ Substrate
3. 学会等名 The 2019 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Arata, H. Nishinaka, D. Tahara, K. Shimazoe, Y. Ito, M. Yoshimoto
2 . 発表標題 Fabrication of Flexible and Epitaxial Metastable Ga2O3 Thin Films on Synthetic Mica Using Oxide Buffer Layer
3 . 学会等名 The 2019 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 D. Tahara, H. Nishinaka, Y. Arata, K. Shimazoe, Y. Ito, M. Noda, M. Toshimoto
2 . 発表標題 Growth and Characterization of Orthorhombic $\alpha$ -Ga2O3 Thin Films Fabricated via Mist Chemical Vapor Deposition Technique
3 . 学会等名 2019 Materials Research Society Fall meeting (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Shimazoe, H. Nishinaka, D. Tahara, Y. Arata, M. Yoshimoto
2 . 発表標題 Growth and Characterization of Corundum Structure Oxide Semiconductor on $\alpha$ -Fe2O3 Buffer Layers by The Mist CVD Method
3 . 学会等名 2019 Materials Research Society Fall meeting (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Arata, H. Nishinaka, D. Tahara, K. Shimazoe, Y. Ito, M. Yoshimoto
2 . 発表標題 Fabrication of Flexible and Epitaxial Oxide Thin Films on Cleaved Synthetic Mica Using Mist Chemical Vapor Deposition
3 . 学会等名 2019 Materials Research Society Fall meeting (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 新田悠汰、西中浩之、田原大祐、吉本昌広
2. 発表標題 曲げられる準安定Ga203薄膜のエピタキシャル成長
3. 学会等名 応用物理学会関西支部 2019年度 第2回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 堀江竜斗、田原大祐、西中浩之、吉本昌広
2. 発表標題 ミスTVD法による $(Al_xGa_{1-x})_2O_3$ 混晶薄膜成長
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 島添和樹、西中浩之、田原大祐、新田悠汰、吉本昌広
2. 発表標題 ミスTVD法による準安定相rh-ITO薄膜のエピタキシャル成長と評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 梶田優気、西中浩之、田原大祐、新田悠汰、吉本昌広
2. 発表標題 ミスTVD法による $-Ga_2O_3(-201)$ 基板上への $-Ga_2O_3$ 薄膜のエピタキシャル成長
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 新田悠汰、西中浩之、島添和樹、田原大祐、吉本昌広
2. 発表標題 ミストCVD法を用いたフレキシブルなワイドギャップ酸化物半導体のエピタキシャル成長
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤雄祐、藤原悠希、西中浩之、田原大祐、島添和樹、新田悠汰、野田実、吉本昌広
2. 発表標題 ミストCVD法によるrh-ITO上の $\text{-Ga}_{203}$ 薄膜成長と電気的特性評価
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 岩室 憲幸 監修 西中浩之 分担執筆	4. 発行年 2022年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 414
3. 書名 次世代パワー半導体の開発・評価と実用化 第4章第5節 ミストを用いた半導体製造装置	

1. 著者名 Hiroyuki Nishinaka(分担)	4. 発行年 2020年
2. 出版社 Springer, Cham	5. 総ページ数 13 (764)
3. 書名 Gallium Oxide (Chapter: Mist Chemical Vapor Deposition 2 Heteroepitaxial Growth of $\text{-Ga}_{203}$ on Various Substrates)	

〔産業財産権〕

〔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	上田 修  (Ueda Osamu)  (50418076)	明治大学・研究・知財戦略機構(生田)・客員教授   (32682)	
研究分担者	池永 訓昭  (Ikenaga Noriaki)  (30512371)	金沢工業大学・工学部・准教授   (33302)	
研究分担者	蓮池 紀幸  (Hasuike Noriyuki)  (40452370)	京都工芸繊維大学・電気電子工学系・助教   (14303)	

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