

令和元年6月18日現在

機関番号：14303

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K17839

研究課題名(和文) ミストCVD法による ϵ -酸化ガリウムヘテロ接合デバイスに関する研究

研究課題名(英文) Hetero-junction devices of epsilon-Ga2O3 semiconductors by mist CVD technique

研究代表者

西中 浩之(Hiroyuki, Nishinaka)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・助教

研究者番号：70754399

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、 ϵ -酸化ガリウムの自発分極を利用したヘテロ接合デバイスを作製して、窒化ガリウム等の従来のパワーデバイスを超える省エネデバイスを実現することを目的としている。

その実現に向け、下記の成果を得た。

ミストCVD法により ϵ -酸化ガリウムの結晶成長技術から、バンドギャップエンジニアリングのための混晶化技術を達成した。結晶成長では、他の結晶相の成長の抑制のために、NiOバッファ層の挿入や、表面平坦性の改善のために成長条件の検討を行った。また混晶化技術では、AlやInとの混晶化を行うことで、バンドギャップを4.5～5.9eVまで変調することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、GaNを超える可能性のあるパワー半導体である ϵ -酸化ガリウムに関する研究であり、本研究を通じてデバイス応用に結晶成長技術の基礎が構築された。特にバンドギャップエンジニアリングはヘテロ接合デバイスに必須の技術であり、そのバンドギャップエンジニアリングに成功したこととその物性解明の学術的意義は大きい。また、本研究がさらに進展すれば、GaNを超えるパワー半導体が実現されることとなり、より低消費な省エネ社会への実現に貢献する社会的意義の大きな研究であると言える。

研究成果の概要(英文)：In this research, to achieve epsilon-Gallium oxide based hetero-junction transistor operation, the epitaxial growth and characterization of epsilon-Ga₂O₃ thin films grown by mist CVD were investigated in detail. The detailed results are as following; (1)The epitaxial epsilon Ga₂O₃ thin films exhibiting smooth surfaces were successfully grown by controlling the starting solution conditions and the single-phase epsilon-Ga₂O₃ thin films without other phases were grown by the insertion of NiO buffer layers. (2)The incorporation of Al and In into epsilon-Ga₂O₃ thin films allowed to control the bandgap of epsilon-Ga₂O₃ from 4.5 to 5.9 eV by simply dissolving the Al and In precursors in the starting solution with Ga precursor.

研究分野：結晶成長

キーワード：酸化ガリウム 強誘電体 混晶 ミストCVD 結晶成長

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

約 5.0 eV の大きなバンドギャップを有する酸化ガリウム (Ga_2O_3) 半導体は、窒化ガリウム (GaN :3.4 eV) や炭化珪素 (SiC :3.2 eV) を超える高耐圧半導体デバイスへ応用が期待されている。その Ga_2O_3 は高耐圧半導体デバイスに向けて、ショットキダイオードや MOSFET などが検討されている。また、 Ga_2O_3 は 5 つの結晶多形 ($\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$) が存在し、そのうち単結晶基板が利用可能な安定相の β 相や、ミスチ CVD 法で高品質な結晶が得られる α 相で良好なデバイス特性が得られている。また高耐圧半導体デバイスの高周波用途として重要な二次元電子ガス (2DEG) を利用したヘテロ接合デバイスに向けた検討もこれらの 2 つの相で検討が進んでいる。ここ数年で β 相では、変調ドーピングにより 2DEG のヘテロ接合デバイスが実現された。 α 相ではまだ 2DEG のヘテロ接合デバイスは実現されていないものの、ヘテロ接合に必要なバンドギャップエンジニアリングや不純物ドーピングなどの研究が進んでいる。一方で GaN ではその結晶構造に由来する自発分極を利用した 2DEG ヘテロ接合デバイスの研究が主流である。この分極を利用したヘテロ接合デバイスでは、その 2DEG キャリア密度は分極の大きさにより決定され、不純物濃度に制限されないなどの利点がある。また Ga_2O_3 では、これらの 2 つの相は結晶構造から分極が存在しないため、分極を利用した 2DEG の実現は不可能である。

そこで結晶構造から分極を持つと考えられている $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ に注目した。この $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は 2015 年に単相のエピタキシャル成長に成功した新しい材料であり、その物性はほとんど明らかになっていない。そこで Ga_2O_3 の分極を利用したヘテロ接合デバイスの実現に向けて、分極を有する $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ について、その基礎物性の解明とヘテロ接合デバイスに必要な結晶成長技術の研究開発を行った。

2. 研究の目的

本研究では、 $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ヘテロ接合デバイスの実現に向けて、下記の 2 点を中心に研究を進める。これら 2 点の研究を進めることで、未知の材料である $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のヘテロ接合に向けた基礎物性の解明と、ヘテロ接合の形成技術の確立を行う。

①ヘテロ接合の形成技術

急峻な界面を有するヘテロ接合に向けて、最適基板の選定や成長条件の検討による原子レベルで平坦な $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の形成技術と、 $\epsilon\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ の結晶成長技術の確立に向けた検討を行う。

②ヘテロ接合に向けた基礎物性の解明

自発分極を有する $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のヘテロ接合デバイスに向けた基礎物性として、自発分極評価：分極ヒステリシス測定、ヘテロ接合の伝導帯バンドオフセット：X 線電子分光法 (XPS)、結晶構造解析：TEM などを行い、その自発分極によるヘテロ接合界面への 2DEG 誘起可能性を調査する。

3. 研究の方法

①ヘテロ接合の形成技術

ヘテロ接合の形成技術の確立に向けて、ミスチ CVD 法による $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の原子レベルで平坦な表面の形成及び、バンドギャップエンジニアリングとして $\epsilon\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ や $\epsilon\text{-(In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ の形成を検討した。

②ヘテロ接合に向けた基礎物性の解明

ヘテロ接合に向けた基礎物性の解明に向けて、ミスチ CVD 法で形成した $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の分極ヒステリシス測定や TEM による結晶構造解析、 $\epsilon\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ の伝導帯バンドオフセット評価を行った。

4. 研究成果

①ヘテロ接合の形成技術

①-1. $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の結晶成長技術

ミスチ CVD 法を用いて AlN テンプレート上に $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のエピタキシャル成長を検討した。ミスチ CVD 法での $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の成長において、原料濃度を調整することで平坦な表面の形成に成功した。また原料の溶媒には水を利用していることから、原料濃度は Ga/O 比を表すことになる。原料濃度と成長速度の解析を行った結果、ある濃度でストイキオメトリとなり、その濃度で平坦な表面が得られることが分かった (図 1)。図 1 を見てみると、低濃度の領域では成長速度は原料濃度に依存するが、高濃度では成長速度は一定になっている。これは高濃度領域では Ga 原料は飽和状態にあり、酸素源である水が律速していると考えられる。つまり酸素源である水が不足することで、大きなグレインが発生したと考えられる。またその時の表面平坦性は、AFM での測定より平均二乗粗さが 1.2 nm と平坦な膜であった。

次に化合物半導体成長でよく用いられているサファイア基板上への $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の成長を試みた。サファイア基板上の Ga_2O_3 の結晶成長では、 α, β, ϵ が成長することが可能なため、その結晶相の成長を制御する必要がある。そこで ϵ 相の結晶成長制御のために、立方晶 NiO(111)バッファ層を挿入することを行い、 $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の単相成長を検討した。図 2 は NiO バッファ層の有無によるサファイア基板上へ成長した Ga_2O_3 の XRD の結果である。図 2 より、NiO バッファ層を挿入することで、 $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ が優先的に成長することが分かった。これは以前の検討で行った立方晶

(111)基板上への $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の優先成長と同様の結果であり、サファイア上での結晶成長で立方晶(111)バッファ層の挿入が有効であることが示された。

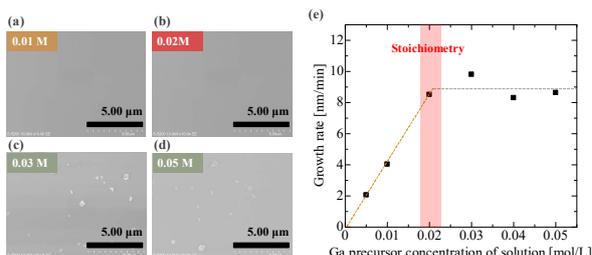


図 1. 原料濃度を変えた時の $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の表面 SEM 像と成長速度解析

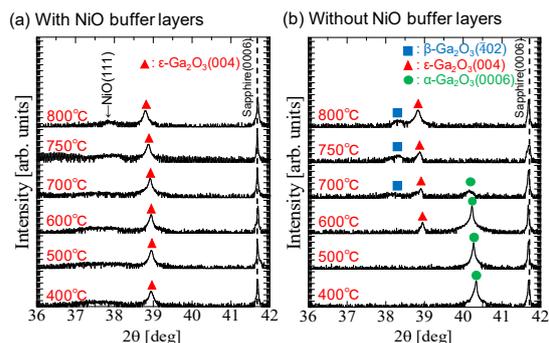


図 2. NiO バッファ層を用いた $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の結晶成長の結果 (XRD)

①-2. $\epsilon\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ と $\epsilon\text{-(In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ の結晶成長

ミスト CVD 法は原料溶液に同時に混晶材料を添加するだけで、混晶薄膜の形成が可能である。図 3 はミスト CVD 法で形成した $\epsilon\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ と $\epsilon\text{-(In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ の XRD の結果である。図のように、Al では $x=0.39$ まで混晶化に成功した。一方 In では $x=0.198$ まで混晶化に成功し、それ以上の濃度では bcc 相の相分離が見られた。このようにミスト CVD 法で $\epsilon\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ と $\epsilon\text{-(In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ の結晶成長に成功した。これらのバンドギャップを $(\alpha h\nu)^2$ プロットから光学バンドギャップを算出した。またその組成によるバンドギャップの結果を図 4 に示す。図 4 より $\epsilon\text{-(In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ と $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の混晶を形成することにより、バンドギャップは 4.5~5.9 eV の範囲で変調することに成功した。

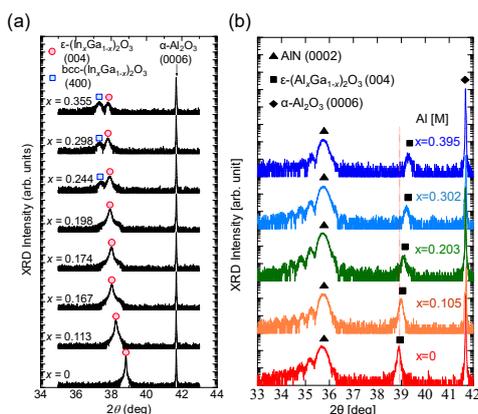


図 3. $\epsilon\text{-(In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ と $\epsilon\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ の XRD の結果

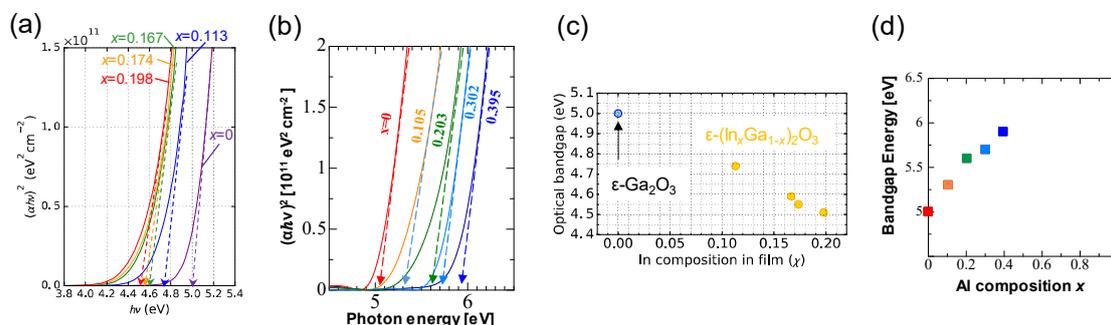


図 4. $\epsilon\text{-(In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ と $\epsilon\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ と光学バンドギャップの算出と組成によるバンドギャップ変調の結果

②ヘテロ接合に向けた基礎物性の解明

②-1. 分極ヒステリシス測定

$\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の自発分極評価の為、分極ヒステリシス測定を行った。評価したサンプルの構造とその分極ヒステリシス測定の結果を図 5 に示す。下地層の SnO_2 はヒステリシス特性を行うための導電層として利用している。この SnO_2 もミスト CVD 法で形成した。そのヒステリシス測定

の結果は、明瞭な強誘電体特性を示していた。この結果は既報の報告と同様である。またその残留分極値 $2P_r$ は 7 nC/cm^2 と小さい値であった。この小さな値の原因は、形成した下地層の SnO_2 の抵抗が十分に低くなかったため、測定での実効面積が電極面積に対して小さくなっていたためと想定している。

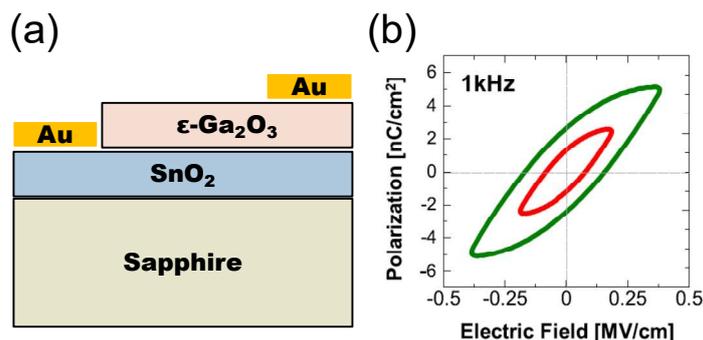


図 5. 分極ヒステリシス評価のサンプル構造と評価結果

②-2. $\epsilon\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ と $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のバンドオフセット解析

ヘテロ接合デバイスの形成には $\epsilon\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ と $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のバンドオフセットについて調査することは重要である。そこで XPS と光学バンドギャップよりこのバンドオフセットの解析を行った。図 6 は解析した $\epsilon\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ と $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のバンドオフセットの概念図である。図 6 に示すように $x=0.395$ の時の伝導帯のバンドオフセットは 0.7 eV であり、その Type-I であることが分かった。この結果により $\epsilon\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3/\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のヘテロ接合デバイスにとって十分なバンドオフセットを有することが示された。

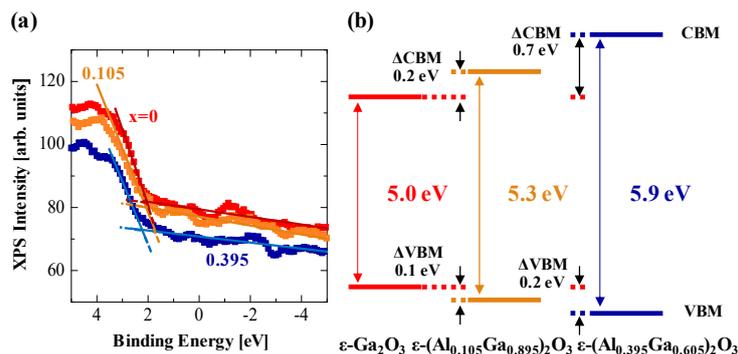


図 6. $\epsilon\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ と $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の XPS による評価結果とバンドラインナップ

②-3. 結晶構造解析

$\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の結晶構造を詳細に解析するため、XRD と透過型電子顕微鏡 (TEM) による評価を行った。 $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は六方晶構造と直方晶構造の二つの可能性が報告されてきた。どちらの構造かを決定することは、その結晶成長を制御するうえで重要である。そこで XRD の ϕ スキャンを用いて、この構造の解析方法を示した。図 7 は六方晶構造と直方晶構造の $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の XRD の 2θ と χ の面方位ごとの位置を示したものである。図より六方晶の点はすべて直方晶の点と一致している。一方で直方晶の他の点は単独でしか存在しない。つまり、直方晶構造でしか現れない点を観察することで、その $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の結晶構造が判別できる。図 8 に六方晶構造と直方晶構造の両方が現れる面 (b) の ϕ スキャンの結果と、直方晶構造でしか観察されない面 (a) の ϕ スキャンの結果である。図のように直方晶構造でしか観察されない面でピークが観察されていることから、この $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は直方晶構造であったと分かった。この評価方法で近年 $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の結晶構造解析が行われているが、ほとんどの $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ が直方晶構造である。また、図の直方晶の $\{122\}$ 面は単結晶の場合 4 個のピークしか現れないが、12 個のピークが観察された。これは 3 つの回転ドメインが挿入されていることが示唆される。この回転ドメインの評価を行うため、TEM による結晶構造解析を行った結果、形成した $\epsilon\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は 10 nm 程度の小さな柱状のドメインからなることが分かった。横方向デバイスであるヘテロ接合デバイスを実現するためには、電気的な特性を阻害する回転ドメインを抑制する必要がある。

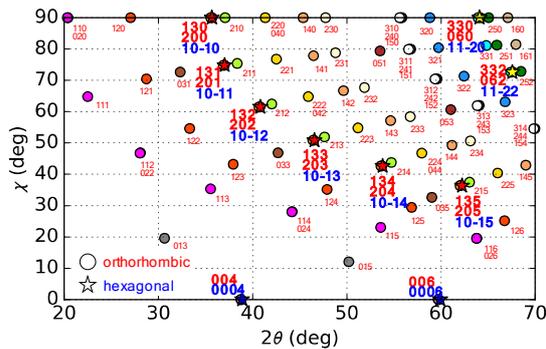


図 7. 直方晶構造と六方晶構造の XRD の 2θ と χ の位置関係

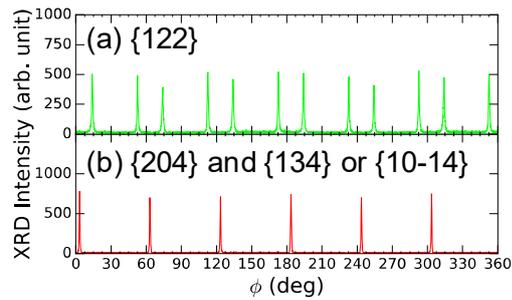


図 8. ϵ - Ga_2O_3 の ϕ スキャンの結果
(a)直方晶のみ観察される、(b)直方晶六方晶どちらでも観察される

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- ① Shota Morimoto, Hiroyuki Nishinaka, Masahiro Yoshimoto, “Growth and characterization of F-doped α - Ga_2O_3 thin films with low electrical resistivity”, *Thin Solid Films*, 査読有, 682 (2019), pp.16-23.
DOI: 10.1016/j.tsf.2019.04.051
- ② Hiroyuki Nishinaka, Hiroki Komai, Daisuke Tahara, Yuta Arata, Masahiro Yoshimoto, “Microstructures and rotational domains in orthorhombic ϵ - Ga_2O_3 thin films”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, 57 (2018), 115601.
DOI: 10.7567/JJAP.57.115601
- ③ Yuta Arata, Hiroyuki Nishinaka, Daisuke Tahara, Masahiro Yoshimoto, “Heteroepitaxial growth of single-phase ϵ - Ga_2O_3 thin films on c-plane sapphire by mist chemical vapor deposition using a NiO buffer layer”, *Crystengcomm*, 査読有, 20 (2018), pp.6236-6242.
DOI: 10.1039/c8ce01128a
- ④ Daisuke Tahara, Hiroyuki Nishinaka, Minoru Noda, Masahiro Yoshimoto, “Use of mist chemical vapor deposition to impart ferroelectric properties to ϵ - Ga_2O_3 thin films on SnO_2 /c-sapphire substrates” *Materials Letters*, 査読有, 232 (2018), pp.47-50.
DOI: 10.1016/j.matlet.2018.08.082
- ⑤ Daisuke Tahara, Hiroyuki Nishinaka, Shota Morimoto, Masahiro Yoshimoto, “Heteroepitaxial growth of ϵ - $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ alloy films on c-plane AlN templates by mist chemical vapor deposition”, *Applied Physics Letters*, 査読有, 112 (2018), pp.152102.
DOI: 10.1063/1.5021296
- ⑥ Hiroyuki Nishinaka, Nobutaka Miyauchi, Daisuke Tahara, Shota Morimoto, Masahiro Yoshimoto, “Incorporation of indium into ϵ -gallium oxide epitaxial thin films grown via mist chemical vapour deposition for bandgap engineering”, *Crystengcomm*, 査読有, 20 (2018) pp.1882-1888.
DOI: 10.1039/c7ce02103h
- ⑦ Daisuke Tahara, Hiroyuki Nishinaka, Shota Morimoto, Masahiro Yoshimoto, “Heteroepitaxial growth of ϵ - Ga_2O_3 thin films on cubic (111) GGG substrates by mist chemical vapor deposition”, 2017 IEEE International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, 査読無, (2017), pp.48-49.
DOI: 10.1109/IMFEDK.2017.7998036
- ⑧ Daisuke Tahara, Hiroyuki Nishinaka, Shota Morimoto, Masahiro Yoshimoto, “Stoichiometric control for heteroepitaxial growth of smooth ϵ - Ga_2O_3 thin films on c-plane AlN templates by mist chemical vapor deposition”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, 56 (2017), pp.078004.
DOI: 10.7567/JJAP.56.078004

[学会発表] (計 24 件)

- ① 田原大祐, 西中浩之, 新田悠汰, 吉本昌広, “ミスト CVD 法による α - $(\text{In}_x\text{Al}_{1-x})_2\text{O}_3$ の混晶薄膜の結晶成長”, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 2019
- ② 新田悠汰, 田原大祐, 西中浩之, 吉本昌広, “ミスト CVD 法を用いた van der Waals epitaxy によるフレキシブルな ϵ - Ga_2O_3 薄膜のエピタキシャル成長”, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 2019
- ③ 新田悠汰, 西中浩之, 田原大祐, 吉本昌広, “Effect of NiO buffer layers on epitaxial growth of ϵ - Ga_2O_3 thin films on c-plane sapphire”, *MRS-J*, 2018
- ④ S. Morimoto, H. Nishinaka, M. Yoshimoto, “Fabrication of F doped α - Ga_2O_3 thin film with low

- electrical resistivity”, 7th International Symposium on Transparent Conductive Materials, 2018
- ⑤D. Tahara, H. Nishinaka, Y. Arata, M. Yoshimoto, “Growth and characterization of ϵ -Ga₂O₃ films grown on (100) TiO₂ substrates by mist chemical vapor deposition”, The 37th Electronic Materials Symposium, 2018
- ⑥Y. Arata, H. Nishinaka, D. Tahara, S. Morimoto, M. Yoshimoto, “Heteroepitaxial growth of single-phase ϵ -Ga₂O₃ thin films on c-plane sapphire by insertion of NiO buffer layers”, The 37th Electronic Materials Symposium, 2018
- ⑦新田悠汰, 西中浩之, 田原大祐, 森本尚太, 吉本昌広, NiO バッファ層を用いた c 面サファイア基板上への ϵ -Ga₂O₃ 薄膜の単相成長, 日本材料学会半導体エレクトロニクス部門委員会平成 30 年度第 1 回研究会, 2018
- ⑧D. Tahara, H. Nishinaka, M. Yoshimoto, “Epitaxial Growth Mechanism of Inserted Rotation Domain for Orthorhombic ϵ -Ga₂O₃ Film on (100) TiO₂ Substrate by Mist Chemical Vapor Deposition”, Compound Semiconductor week 2018, 2018
- ⑨田原大祐, 西中浩之, 野田実, 吉本昌広, 超ワイドバンドギャップ HEMT 応用に向けた ϵ -Ga₂O₃ 薄膜の結晶成長と電気的特性評価, 応用物理学会関西支部平成 30 年度第 1 回講演会, 2018
- ⑩田原大祐, 西中浩之, 森本尚太, 吉本昌広, ミスト CVD 法による AlN テンプレート基板上 ϵ -(Al_xGa_{1-x})₂O₃ の結晶成長, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018
- ⑪新田悠汰, 田原大祐, 森本尚太, 西中浩之, 吉本昌広, ミスト CVD 法による c 面サファイア基板上への ϵ -Ga₂O₃ 薄膜成長における NiO バッファ層の効果, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018
- ⑫田原大祐, 西中浩之, 野田実, 吉本昌広, ミスト CVD 法による ϵ -Ga₂O₃ 薄膜の結晶成長とその電気的特性評価, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018
- ⑬宮内信宇, 中村昌幸, 小林貴之, 西中浩之, 田原大祐, 森本尚太, 本山慎一, 吉本昌広, GaN テンプレート上 ϵ -Ga₂O₃ 薄膜のドライエッチング, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018
- ⑭森本尚太, 田原大祐, 西中浩之, 吉本昌広, GaN テンプレート表面が ϵ -Ga₂O₃ 薄膜に及ぼす影響, 応用物理学会関西支部平成 29 年度第 3 回講演会, 2018
- ⑮N. Miyauchi, D. Tahara, S. Morimoto, H. Nishinaka, M. Yoshimoto, “Alloying of ϵ -In_{2x}Ga_{2-2x}O₃ epitaxial thin films grown on AlN templates by mist-CVD”, The 36th Electronic Materials Symposium, 2017
- ⑯D. Tahara, H. Nishinaka, S. Morimoto, N. Miyauchi, M. Yoshimoto, “Epitaxial growth of ϵ -Al_{2x}Ga_{2-2x}O₃ alloy films on c-plane AlN templates by mist chemical vapor deposition”, The 36th Electronic Materials Symposium, 2017
- ⑰S. Morimoto, D. Tahara, N. Miyauchi, H. Nishinaka, M. Yoshimoto, “The epitaxial growth of ϵ -Ga₂O₃ thin films by mist chemical vapor deposition using the GaCl₃ precursor solutions”, The 36th Electronic Materials Symposium, 2017
- ⑱N. Miyauchi, H. Nishinaka, D. Tahara, S. Morimoto, M. Yoshimoto, “Indium incorporation into ϵ -Ga₂O₃ epitaxial thin films grown by mist chemical vapor deposition”, 2nd International Workshop on Ga₂O₃ and Related Materials, 2017
- ⑲S. Morimoto, D. Tahara, H. Nishinaka, M. Yoshimoto, “ ϵ -Ga₂O₃ epitaxial growth on AlN and GaN templates using GaCl₃ precursor by mist chemical vapor deposition”, 2nd International Workshop on Ga₂O₃ and Related Materials, 2017
- ⑳D. Tahara, H. Nishinaka, S. Morimoto, N. Miyauchi, M. Yoshimoto, “Epitaxial growth of ϵ -Al_{2x}Ga_{2-2x}O₃ alloy films on c-plane AlN templates by mist chemical vapor deposition”, 2nd International Workshop on Ga₂O₃ and Related Materials, 2017
- ㉑宮内信宇, 田原大祐, 森本尚太, 西中浩之, 吉本昌広, ミスト CVD 法による ϵ -In_{2x}Ga_{2-2x}O₃ 混晶薄膜の成長, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017
- ㉒森本尚太, 田原大祐, 宮内信宇, 西中浩之, 吉本昌広, ミスト CVD 法による塩化物原料を用いた GaN テンプレート上への ϵ -Ga₂O₃ 薄膜成長, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017
- ㉓田原大祐, 西中浩之, 森本尚太, 宮内信宇, 吉本昌広, ミスト CVD 法による AlN テンプレート基板上 ϵ -Ga_{2x}Ga_{2-2x}O₃ の結晶成長, 第 12 回日本セラミックス協会関西支部 学術講演会, 2017
- ㉔D. Tahara, H. Nishinaka, S. Morimoto, M. Yoshimoto, “Heteroepitaxial growth of ϵ -Ga₂O₃ thin films on cubic (111) GGG substrates by mist chemical vapor deposition”, IEEE The 2017 International Meeting for Future of Electron Devices, Kansai, 2017

※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、研究者個人に帰属されます。