

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02614

研究課題名(和文) 固体塩化物を用いた気相法による 族窒化物擬似基板及びデバイスの単一プロセス作製

研究課題名(英文) Single-process fabrication of group-III nitride pseudo-substrates and devices via vapor phase epitaxy using solid chlorides

研究代表者

村上 尚 (Murakami, Hisashi)

東京農工大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90401455

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)：結晶の成長速度が極めて大きいトリハライド気相成長(THVPE)法の優位点と、デバイス作製の主力手法である有機金属気相成長(MOVPE)法の概念を取り入れた固体ソースTHVPE法を提案し、GaN種(下地)結晶基板作製のための高速成長モードとGaN/AlGa系デバイス作製のための超低速成長モードとを同時に達成する手法の確立を目的として研究を行った。加工サファイア基板上へのGaN厚膜成長とGaN/AlGaNの多層薄膜結晶を達成し、固体ソースTHVPE法による基板作製およびデバイス作製を同一装置内、同時作製の可能性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

GaN系のレーザダイオードやトランジスタは、HVPE等の成長速度の大きい結晶成長手法で土台となる基板(ウエハ)を作製し、その上にMOVPE等の成長速度の精密制御が可能で、多種の薄膜作製が可能な結晶成長手法でデバイス構造を作製する。本研究では、固体原料の飽和蒸気圧を利用して気化させた金属三塩化物を結晶成長炉内に導入することを可能とし、HVPE、MOVPEの両方の利点が得られる結晶成長手法を確立した。金属三塩化物とアンモニアの反応機構やGaN系結晶の成長挙動の学術的知見に加え、単一プロセスで従来のデバイス構造が作製可能であることを示したことは産業的・社会的に意義が大きい成果と考える。

研究成果の概要(英文)：A solid source tri-halide vapor phase epitaxy (THVPE) method that has the advantages of conventional THVPE method with its extremely high growth rate and the concept of metal organic vapor phase epitaxy (MOVPE), a method for device fabrication, to establish a method to simultaneously achieve a fast growth mode for fabricating GaN seed substrates and an ultra-slow growth mode for GaN/AlGaN-based thin film devices was proposed. I achieved thick GaN film growth on patterned sapphire substrates (PSS) and multilayered GaN/AlGaN thin crystals, and demonstrated the possibility of simultaneous substrate fabrication and device fabrication by solid source THVPE in the same equipment.

研究分野：結晶工学

キーワード：結晶成長 エピタキシャル成長 窒化物半導体 混晶

1. 研究開始当初の背景

我が国の1次エネルギーの約40%を占める電力エネルギー消費を削減し持続可能な社会を構築するためには、照明や電気機器類に搭載されている電力変換デバイス(パワーデバイス)といった大きな電力を扱うデバイスの損失を低減し高効率化をいち早く進めることが本質的に重要である。しかしながら、Siをはじめとする既存の半導体材料は物性に起因する性能限界があり、今後のさらなる低炭素・省エネルギー社会を支えるにはGaNをはじめとするワイドバンドギャップ半導体材料による超高効率発光デバイス、高耐圧・低損失のパワーデバイスの開発が必要である。研究開始当初の状況においては、デバイス作製に使用するGaN基板の口径は2インチと小さく、また結晶品質も転位(欠陥)密度が 10^6 cm^{-2} 台中盤と大きく、デバイスサイズが大きく、面積当たりの電流密度が大きいパワーデバイスへの適用は難しい状況であった。また、従来技術である一塩化ガリウムを原料に用いるHVPE法では、成長速度が $100 \sim 150 \mu\text{m/h}$ とやや小さく、成長膜厚の増加とともに結晶表面積が減少することが問題となり低コスト化の大きな壁となっていた。申請者は、従来のHVPE法の問題を解決する手段として、新しい原料分子を用いた気相成長、すなわちトリハライド気相成長(Tri-Halide Vapor Phase Epitaxy, THVPE)法により、結晶表面積減少の問題と成長速度の高速化を両立する手法の確立を提案し、従来法の2~3倍の成長速度で結晶表面積を減少させることなくGaN厚膜作製が可能であることを実証した。一方で、THVPE法で用いる GaCl_3 を生成し原料として用いるには二段階の反応ステップが必要であり、結晶成長装置(反応管構造)が複雑化・大型化する問題がある。また、THVPE法のもう一つの弱点として、成長速度が大きい代わりに膜厚制御性が低く急峻なヘテロ界面の形成ができないため、デバイス作製には不向きであることが挙げられる。

2. 研究の目的

本研究では、上記の問題を解決する手段として、THVPE法の優位点を持ちつつ、デバイス作製の主力手法である有機金属気相成長(MOVPE)法を取り入れた固体ソースTHVPE法を提案し、種結晶基板作製のための高速成長モードとデバイス作製のための超低速成長モードとを同時に達成する新たな結晶成長手法の確立を目的とした。固体 GaCl_3 原料に加え、固体 AlCl_3 原料の供給システムを具備することで、一度のプロセスで擬似GaN基板作製からデバイス作製までを達成し、従来のデバイス作製スキームの変革を行い、デバイスの低コスト化に資する新たなプロセス技術を創出することを目指し研究を推進した。

3. 研究の方法

図1に本研究で用いた固体ソースTHVPE装置の概略を示す。固体の GaCl_3 および AlCl_3 原料をステンレス製の容器に充填したものを、石英製の反応管に接続した構造となっている。固体原料を充填した容器は外部から一定温度に恒温できるようにヒーターで覆い精密に温度制御を行った。固体原料の温度を一定に保つことにより原料の飽和蒸気圧が一義的に決まり、 N_2 ガスの流量を制御することで、所望の原料濃度で反応管に輸送した。固体原料の温度を増加すれば蒸気圧も増加するため、高濃度の原料供給も可能であるほか、低温に保つことで超薄膜の作製に適した低濃度の原料供給も可能となる。搬送用の N_2 ガスの流量の大きさによっても原料濃度を変化させることが可能であるほか、各原料の出口側にバルブを設けることで、急峻な原料供給切り替え(ON/OFF制御)ができるため、MOVPE法のような急峻なヘテロ界面制御ができる。2019年度には、GaN擬似基板の作製に向けて、比較的高い GaCl_3 供給濃度条件を用いて、加工サファイア基板上のGaN厚膜成長を実施した。その後、2020年度以降 AlCl_3 原料を装置に付加し $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 混晶成長の実証および原料低濃度条件による $\text{GaN}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 薄膜作製、ヘテロ界面制御の実証を進めた。

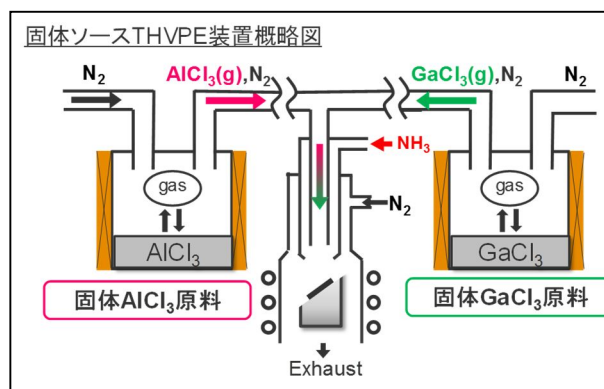


図1 本研究で構築・使用した固体ソースTHVPE結晶成長装置概略図

4. 研究成果

H31/R1年度においては、固体ソースTHVPE装置の装置改良を実施するとともに、窒化ガリウム結晶成長の実証、加工サファイア基板上高品質GaN結晶成長の実証実験を行い、目的である擬似GaN基板作製の可能性を見出す成果をあげた。THVPE成長における成長条件(GaCl_3 供給濃度、 NH_3 濃度、ガス総流量、成長温度)と成長速度との関係を体系的に調査し、実用的に採用で

きる成長速度にて結晶品質の劣化なく成長できる条件を明らかにした。NH₃ 濃度と GaCl₃ 濃度の比 (V/III 比)を保ったまま GaCl₃ 濃度を増加させたところ、GaN 成長速度は線形的に増加し、20 μm/h を超える高い値が得られた。本研究では、原料供給配管の閉塞や反応管口径の制約からこれ以上の高い原料供給濃度での実験は実施していないが、成長速度増加の線形性を加味するとさらなる増加が期待される。続いて、加工サファイア基板 (Patterned Sapphire Substrate; PSS)上 GaN 選択核形成条件を探索した。成長温度および原料供給量の組み合わせ、GaN 成長前の窒化プロセスの導入による結晶高品質化(低転位化)の指針を得ることができた。図 2 は、成長前窒化時間と GaN 結晶の X 線ロッキングカーブ半値幅との関係を示している。ここで、半値幅が小さいほど結晶中の転位密度が小さく高品質の結晶であることを意味している。図より、窒化時間 20 分において tilt 半値幅(らせん転位の密度を反映)、twist 半値幅(刃状転位の密度を反映)共に最小値を示し、PSS 上で GaN の横方向成長を促進し転位低減に寄与したことが考察される。また、図 2 中の挿入図として PSS 上に成長した GaN 厚膜の断面 SEM 像を示したが、PSS のコーンの直上に明瞭なポイドが形成されており、このポイドにより GaN 結晶層がサファイアから受ける応力が低減しクラック(割れ)の無い均一な膜形成に繋がった。さらに、PSS のパターン(コーン径、コーン配置間隔)を変更することにより、GaN 結晶にかかる応力が変化しクラックの抑制や欠陥生成に影響を与えることが明らかとなった。

続く R2 年度に、GaN 厚膜上の AlGa_xN 系デバイス作製のため固体 AlCl₃原料を現有装置に付加し、AlN および AlGa_xN 混晶成長実験を実施し、所望の AlGa_xN (組成 0% ~ 100%)結晶を得られることを確認した。図 3 は、PSS 上 GaN 結晶上に本研究で構築した固体ソース THVPE 装置により成膜した Al_xGa_{1-x}N 混晶の III 族原料供給比 ($R_{Al} = P_{AlCl_3}^0 / (P_{AlCl_3}^0 + P_{GaCl_3}^0)$) と固相 Al 組成との関係を表したものである。AlCl₃ 供給比の増加に伴って固相 Al 組成はほぼ線形的に増加し、全組成域での組成制御が可能であることが明らかとなった。この結果は事前に実施した熱力学解析による理論予測と良い一致を示し妥当と言える。R_{Al} に対して組成 x がやや大きい挙動は、GaN の結晶成長の系内に存在する H₂ ガスによる駆動力の低下の影響が大きいことに起因すると考察でき、THVPE による Al_xGa_{1-x}N 混晶成長の原料分子の違いによる挙動の変化が現れたことは科学的に興味深い。また、すべての原料分子を三塩化物(AlCl₃、GaCl₃)にて窒化物厚膜混晶を作製した事例はなく、さらなる厚膜化が達成されれば AlGa_xN 混晶基板の作製の可能性も広がることから社会的・産業的にもインパクトのある成果であると言える。

R3 年度は急峻なヘテロ界面形成に向けた AlGa_xN/GaN 多層膜結晶成長技術を行い、デバイス構造試作を実施した。前述の PSS 上 GaN 厚膜結晶成長が達成され、良好な結晶品質を有する窒素極性 GaN 層を得ることができたが、初期検討として GaN 基板上へ数十~数百 nm 厚の AlGa_xN および GaN 薄膜を交互に積層し、急峻なヘテロ界面の形成が可能であるかを検討した。図 4 は、固体ソース THVPE により形成した超薄膜積層構造の断面 SEM 像である。組成の異なる (Al 組成 0%および 10%)結晶層を厚み約 50nm の薄膜を高い再現性で繰り返し成長できていることが明らかとなった。これは、MOVPE や MBE 等の成長速度の小さい結晶成長手法の得意とする薄膜形成を THVPE で再現できた点に高いインパクトがあり、高純度結晶を得意とする THVPE の利点が付加されたデバイス作製技術として大きな成果である。本研究により THVPE によるデバイス作製の新たな応用や適用範囲を広げることができた。デバイス構造の最適化や不純物制御の問題があり、デバイス動作には至らなかったが、原料の高純度化や意図的なドーピング制御、デバイス構造の改良により目標が達成されると考えられ、実施期間終了後も研究を推進していく。

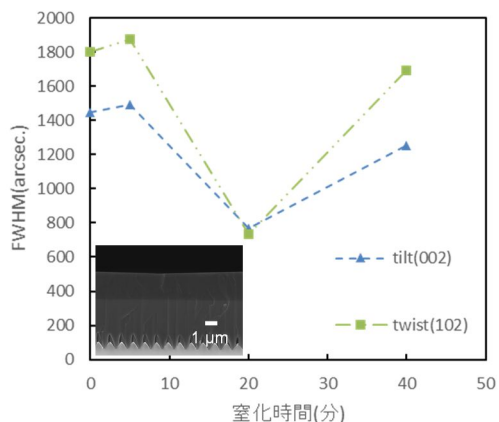


図 2 PSS 上 GaN 成長層の XRC 半値幅の窒化時間依存性および成長層断面 SEM 像

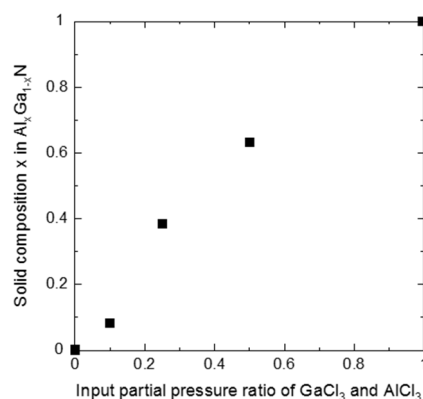


図 3 固体ソース THVPE 法による Al_xGa_{1-x}N 混晶組成の AlCl₃、GaCl₃ 供給分圧比依存性

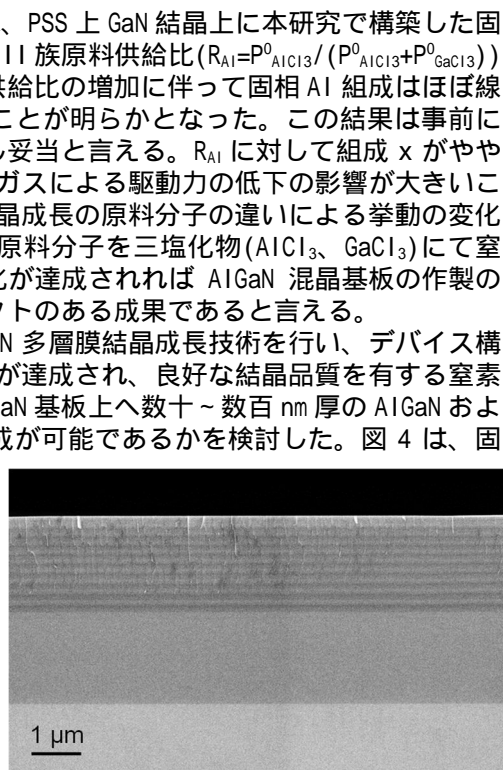


図 4 固体ソース THVPE 法による Al_{0.10}Ga_{0.90}N/GaN 多層膜構造の作製例。GaN 基板上に uid-GaN を積層した後、各層を 10 層ずつ製膜した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10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 Kentaro Ema, Ryohei Hieda, Hisashi Murakami	4. 巻 60
2. 論文標題 Growth of lattice-relaxed InGaN thick films on patterned sapphire substrates by tri-halide vapor phase epitaxy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 105501-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac1e46	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 村上尚、瀧澤明伯	4. 巻 48
2. 論文標題 トリハライド気相成長法によるGaN結晶成長の進展	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本結晶成長学会誌	6. 最初と最後の頁 03-1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 K. Goto, H. Murakami, A. Kuramata, S. Yamakoshi, M. Higashiwaki, Y. Kumagai	4. 巻 120
2. 論文標題 Effect of substrate orientation on homoepitaxial growth of -Ga_{203} by halide vapor phase epitaxy	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 APPLIED PHYSICS LETTERS	6. 最初と最後の頁 102102-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0087609	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 Sandeep Kumar, Hisashi Murakami, Yoshinao Kumagai, Masataka Higashiwaki	4. 巻 15
2. 論文標題 Vertical -Ga_{203} Schottky barrier diodes with trench staircase field plate	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 054001-1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1882-0786/ac620b	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 K. Ema, K. Sasaki, A. Kuramata, H. Murakami	4. 巻 564
2. 論文標題 Homo- and hetero-epitaxial growth of -gallium oxide via GaCl3-O2-N2 system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Crystal Growth	6. 最初と最後の頁 126129-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jcrysgro.2021.126129	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 Daichi Yoshio, Yuriko Matsuo, Akira Kusaba, Pawel Kempisty, Yoshihiro Kangawa, Hisashi Murakami, Akinori Koukitu	4. 巻 23
2. 論文標題 Facet stability of GaN during tri-halide vapor phase epitaxy: an ab initio-based approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 CrystEngComm	6. 最初と最後の頁 1423-1428
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D0CE01683G	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 Yamaguchi Akira, Oozeki Daisuke, Kawamoto Naoya, Takekawa Nao, Bulsara Mayank, Murakami Hisashi, Kumagai Yoshinao, Matsumoto Koh, Koukitu Akinori	4. 巻 257
2. 論文標題 Growth of Highly Crystalline GaN at High Growth Rate by Trihalide Vapor Phase Epitaxy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 physica status solidi (b)	6. 最初と最後の頁 1900564-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/pssb.201900564	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 Ema Kentaro, Uei Rio, Murakami Hisashi, Koukitu Akinori	4. 巻 58
2. 論文標題 Influence of intermediate layers on thick InGaN growth using tri-halide vapor phase epitaxy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1027-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab112c	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 Iso Kenji, Oozeki Daisuke, Ohtaki Syoma, Murakami Hisashi, Koukitu Akinori	4. 巻 58
2. 論文標題 Growth of GaN on a three-dimensional SCAATM bulk seed by tri-halide vapor phase epitaxy using GaCl ₃	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1024-1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab1479	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 Takekawa Nao, Takahashi Machi, Kobayashi Mayuko, Kanosue Ichiro, Uno Hiroyuki, Takemoto Kikuro, Murakami Hisashi	4. 巻 58
2. 論文標題 GaN growth via tri-halide vapor phase epitaxy using solid source of GaCl ₃ : investigation of the growth dependence on NH ₃ and additional Cl ₂	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SC1022-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1347-4065/ab09da	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45件 (うち招待講演 11件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 I. Kobayashi, K. Ema, R. Hieda, H. Murakami and A. Koukitu
2. 発表標題 InGaN growth on ScAlMgO ₄ substrate via tri-halide vapor phase epitaxy
3. 学会等名 第40回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Yamaguchi, K. Sasaki, A. Kuramata, H. Murakami
2. 発表標題 Growth of α -Ga ₂ O ₃ layers by solid-source tri-halide vapor phase epitaxy
3. 学会等名 第40回電子材料シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上尚、瀧澤明伯
2. 発表標題 トリハライド気相成長法によるGaN結晶成長
3. 学会等名 第50回日本結晶成長学会バルク成長分科会シンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口八輝、佐々木公平、倉又朗人、村上尚
2. 発表標題 固体ソースTHVPE法を用いた α -Ga ₂ O ₃ 高速エピタキシャル成長
3. 学会等名 第13回ナノ構造エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丸谷敦哉、畑田諒、根本幸太、村上尚、瀧澤明伯
2. 発表標題 THVPE法におけるGaNホモエピタキシャル成長界面の制御
3. 学会等名 第13回ナノ構造エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Iori Kobayashi, Ryohei Hieda, Hiroto Murata, Hisashi Murakami
2. 発表標題 Influence of intermediate layer on the growth of InGaN on ScAlMgO ₄ through tri-halide vapor phase epitaxy
3. 学会等名 9th International Conference on Light Emitting Devices and their Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Bando, S. Matsuoka, K. Ohnishi, K. Goto, S. Nitta, H. Murakami, Y. Kumagai
2. 発表標題 Modification of thermodynamic analysis model for HVPE growth of GaN at high temperatures
3. 学会等名 9th International Conference on Light Emitting Devices and their Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 R. Nagano, K. Ema, K. Sasaki, A. Kuramata, H. Murakami
2. 発表標題 -Ga2O3 homoepitaxial growth using GaCl3-O2-N2 system
3. 学会等名 9th International Conference on Light Emitting Devices and their Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松岡 聖、坂東 もも子、大西 一生、後藤 健、新田 州吾、村上 尚、熊谷 義直
2. 発表標題 GaN高温HVPE成長のための熱力学解析モデルの修正
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hisashi Murakami, Yoshinao Kumagai, Akinori Koukitu
2. 発表標題 Tri-Halide Vapor Phase Epitaxy
3. 学会等名 GaN Consortium Webinar on Crystal Growth and Analysis (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 江間研太郎, 小川直紀, 佐々木公平, 倉又朗人, 村上尚
2. 発表標題 GaCl ₃ -O ₂ -N ₂ 系を用いた GaAs 酸化ガリウム成長
3. 学会等名 日本結晶成長学会ナノエピ分科会「第12回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林洋美, 立華岬, 村上尚, 瀧澤明伯
2. 発表標題 金属Cdを用いた気相成長法によるGaAs基板上CdTe成長の基板面方位依存性
3. 学会等名 日本結晶成長学会ナノエピ分科会「第12回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 日永田 亮平、江間 研太郎、村上 尚、瀧澤 明伯
2. 発表標題 PSS上GaN中間層によるInGa _N 厚膜の格子緩和状態の制御
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 小林 伊織、江間 研太郎、日永田 亮平、村上 尚、瀧澤 明伯
2. 発表標題 THVPE法によるSCAM ₀ 基板上InGa _N 成長
3. 学会等名 第3回結晶工学 × ISYSE合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長野理紗、江間研太郎、佐々木公平、倉又朗人、村上尚
2. 発表標題 GaCl ₃ を原料に用いた β -Ga ₂ O ₃ 成長における / 比依存性
3. 学会等名 第3回結晶工学 × ISYSE合同研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林 伊織、江間 研太郎、日永田 亮平、村上 尚、瀧澤 明伯
2. 発表標題 THVPE法によるSCAMO基板上InGa _N 成長
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長野 理紗、江間 研太郎、佐々木 公平、倉又 朗人、村上 尚
2. 発表標題 GaCl ₃ 気体原料を用いた β -Ga ₂ O ₃ ホモエピタキシャル成長
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Ema, R. Uei, M. Kawabe, H. Murakami, Y. Kumagai and A. Koukitu
2. 発表標題 Growth of lattice-relaxed InGa _N thick films by tri-halide vapor phase epitaxy
3. 学会等名 The 7th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications '19 (LEDIA '19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東脇 正高, Man Hoi Wong, 林 家弘, 湯田 洋平, 綿引 達郎, 山向 幹雄, 後藤 健, 村上 尚, 熊谷 義直
2. 発表標題 イオン注入ドーピングを用いた Ga203縦型パワーデバイス開発
3. 学会等名 独立行政法人日本学術振興会ワイドギャップ半導体光・電子デバイス第162委員会第113回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Man Hoi Wong, Ken Goto, Hisashi Murakami, Yoshinao Kumagai, and Masataka Higashiwaki
2. 発表標題 -Ga203 MOSFETs with Nitrogen-Ion-Implanted Back-Barrier: DC Performance and Trapping Effects
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (CSW 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chia-Hung Lin, Yohei Yuda, Man Hoi Wong, Mayuko Sato, Nao Takekawa, Keita Konishi, Tatsuro Watahiki, Mikio Yamamuka, Hisashi Murakami, Yoshinao Kumagai, and Masataka Higashiwaki
2. 発表標題 Vertical Ga203 Schottky Barrier Diodes with Guard Ring Formed by Nitrogen-Ion Implantation
3. 学会等名 Compound Semiconductor Week 2019 (CSW 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Higashiwaki, M. H. Wong, K. Goto, H. Murakami, and Y. Kumagai
2. 発表標題 Vertical Ga203 Transistors Fabricated By Ion Implantation Doping
3. 学会等名 235th ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東脇 正高, ワン マンホイ, 林 家弘, 湯田 洋平, 綿引 達郎, 山向 幹雄, 後藤 健, 村上 尚, 熊谷 義直
2. 発表標題 p型酸化ガリウムの形成とそのデバイス応用
3. 学会等名 独立行政法人日本学術振興会先端ナノデバイス・材料テクノロジー第151委員会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東脇 正高, Man Hoi Wong, 後藤 健, 村上 尚, 熊谷 義直
2. 発表標題 酸化ガリウムトランジスタ開発の進展
3. 学会等名 2019年日本結晶成長学会特別講演会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 江間 研太郎, 植井 里緒, 川邊 充希, 村上 尚, 熊谷 義直, 瀧 明伯
2. 発表標題 トリハライド気相成長法による格子緩和したInGaN厚膜成長
3. 学会等名 第11回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山野邊 咲子, 後藤 健, 村上 尚, 山腰 茂伸, 熊谷 義直
2. 発表標題 水素・窒素気流中における $-Ga_{203}(001)$, (010) , (-201) 基板の熱的・化学的安定性の検討
3. 学会等名 第11回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 後藤 健, 三浦 遼, 加茂 崇, 竹川 直, 村上 尚, 熊谷 義直
2. 発表標題 ベータ酸化ガリウムHVPE成長における成長温度および供給VI/III比の影響
3. 学会等名 第11回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Man Hoi Wong, Hisashi Murakami, Yoshinao Kumagai, and Masataka Higashiwaki
2. 発表標題 Enhancement-Mode Current Aperture Vertical Ga203 MOSFETs
3. 学会等名 77th Device Research Conference (77th DRC) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kentaro Ema, Rio Uei, Mitsuki Kawabe, Hisashi Murakami, Yoshinao Kumagai and Akinori Koukitu
2. 発表標題 Growth of Lattice-Relaxed InGaN Thick Films on Patterned Sapphire Substrates by Tri-Halide Vapor Phase Epitaxy
3. 学会等名 The 13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Yamaguchi, Daisuke Oozeki, Naoya Kawamoto, Nao Takekawa, Mayank Bulsara, Hisashi Murakami, Yoshinao Kumagai, Koh Matsumoto and Akinori Koukitu
2. 発表標題 Growth of High Crystalline Quality GaN with High Growth Rate by THVPE
3. 学会等名 The 13th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS-13) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Y. Kumagai, K. Konishi, K. Goto, H. Murakami, A. Kuramata, S. Yamakoshi, B. Monemar, and M. Higashiwaki
2 . 発表標題 Growth of Gallium Oxide by HVPE
3 . 学会等名 2019 International Workshop on Gallium Oxide and Other Related Materials (IWGO 2019) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 K. Goto, R. Miura, T. Kamo, N. Takekawa, H. Murakami, and Y. Kumagai
2 . 発表標題 Influence of growth temperature and input VI/III ratio on crystallinity in homoepitaxy of α -Ga ₂ O ₃ by halide vapor phase epitaxy
3 . 学会等名 2019 International Workshop on Gallium Oxide and Other Related Materials (IWGO 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 C. De Santi, A. Nardo, M. H. Wong, K. Goto, A. Kuramata, S. Yamakoshi, H. Murakami, Y. Kumagai, M. Higashiwaki, G. Meneghesso, E. Zanoni, M. Meneghini
2 . 発表標題 Comparison between lateral and vertical Ga ₂ O ₃ isolation structures
3 . 学会等名 2019 International Workshop on Gallium Oxide and Other Related Materials (IWGO 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 C.-H. Lin, A. Takeyama, M. Sato, N. Takekawa, K. Konishi, Y. Yuda, T. Watahiki, M. Yamamuka, H. Murakami, Y. Kumagai, T. Ohshima, and M. Higashiwaki
2 . 発表標題 Impact of electron-beam irradiation on the performance of α -Ga ₂ O ₃ Schottky barrier diodes
3 . 学会等名 2019 International Workshop on Gallium Oxide and Other Related Materials (IWGO 2019) (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 R. Togashi, S. Yamanobe, K. Goto, H. Murakami, S. Yamakoshi, and Y. Kumagai
2. 発表標題 Investigation of Thermal and Chemical Stabilities of (001), (010), and (-201) -Ga ₂ O ₃ substrates in a flow of either N ₂ or H ₂
3. 学会等名 2019 International Workshop on Gallium Oxide and Other Related Materials (IWGO 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 森山 匠、和才 容子、竹川 直、村上 尚
2. 発表標題 THVPE法で成長した -Ga ₂ O ₃ 膜の分光エリプソメトリーによる物性評価
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 後藤 健、三浦 遼、加茂 崇、竹川 直、村上 尚、熊谷 義直
2. 発表標題 HVPE法を用いた -Ga ₂ O ₃ 成長における成長温度と供給VI/III比の影響
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 江間 研太郎、竹川 直、後藤 健、村上 尚、熊谷 義直
2. 発表標題 トリハライド気相成長法によるa面sapphire基板上への -Ga ₂ O ₃ 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 林 家弘、武山 昭憲、湯田 洋平、綿引 達郎、村上 尚、熊谷 義直、大島 武、東脇 正高
2. 発表標題 -Ga ₂ O ₃ ショットキーバリアダイオードの電子線照射に対する耐性
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 Yoshinao Kumagai, Ken Goto, Keita Konishi, Hisashi Murakami, Akito Kuramata, Shigenobu Yamakoshi, Bo Monemar, and Masataka Higashiwaki
2. 発表標題 Homoeptaxial growth of -Ga ₂ O ₃ by halide vapor phase epitaxy for the preparation of epitaxial wafers for vertical power device application
3. 学会等名 Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Erina Miyata, Syoma Ohtaki, Kenji Iso, Hisashi Murakami, and Akinori Koukitu
2. 発表標題 Impact of the Growth Temperature on GaN Crystal Characteristics by Trihalide Vapor Phase Epitaxy
3. 学会等名 Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Schubert, A. Mock, S. Knight, M. Hilfiker, M. Stokey, V. Darakchieva, A. Papamichail, R. Korlacki, M.J. Tadjer, Z. Galazka, G. Wagner, N. Blumenschein, A. Kuramata, K. Goto, H. Murakami, Y. Kumagai, M. Higashiwaki, A. Mauze, Y. Zhang, and J. S. Speck
2. 発表標題 Phonons, free charge carriers, excitons and band-to-band transitions in beta Ga ₂ O ₃ and related alloys determined by ellipsometry and optical Hall effect
3. 学会等名 Asia-Pacific Workshop on Widegap Semiconductors 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hisashi Murakami, Naoya Kawamoto, Yoshinao Kumagai, Akinori Koukitu
2. 発表標題 Recent progress of thick GaN and its related alloys via HVPE and THVPE
3. 学会等名 SPIE Photonics West 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 日永田 亮平、江間 研太郎、村上 尚、纈纈 明伯
2. 発表標題 THVPE法を用いたInGaN厚膜成長における緩和状態の制御
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 江間 研太郎、小川 直紀、佐々木 公平、倉又 朗人、村上 尚
2. 発表標題 トリハライド気相成長法を用いた -酸化ガリウム成長
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

〔図書〕 計1件

1. 著者名 村上尚、熊谷義直	4. 発行年 2022年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 414ページ
3. 書名 次世代パワー半導体の開発・評価と実用化	

〔産業財産権〕

〔その他〕

東京農工大学村上尚研究室ホームページ
<http://murakamilab.jp.org/>

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------