

次世代省エネ型デバイス関連技術の開発・実証事業
Development and demonstration project of next-generation
energy-saving device-related technology

代表研究責任者 東脇 正高 国立研究開発法人情報通信研究機構 未来 ICT 研究所
/ 公立大学法人大阪 大阪公立大学 大学院工学研究科

研究開発期間 令和3年度～令和5年度

【Abstract】

We have carried out comprehensive materials and device research and development on gallium oxide (Ga_2O_3), which is a promising next-generation energy-saving device semiconductor material. In material development, we concurrently proceeded with the development of melt growth of Ga_2O_3 single crystal bulks and its wafer manufacturing process technology, and various epitaxial Ga_2O_3 thin film growth technologies such as halide vapor phase epitaxy, metalorganic chemical vapor deposition, mist chemical vapor deposition, and molecular beam epitaxy. In addition, we developed fundamental device process technologies, fabricated devices, and evaluated their characteristics with the aim of increasing a breakdown voltage and reducing on-resistance of Ga_2O_3 vertical transistors and Schottky barrier diodes (SBDs) for power device applications. Regarding Ga_2O_3 SBDs, we also verified the deterioration of device characteristics due to energization. In addition, we developed a lateral high-frequency Ga_2O_3 transistors for use in extreme environments and investigated their operational stability under high temperatures and radiation.

1 研究開発体制

- **代表研究責任者** 東脇 正高 (国立研究開発法人情報通信研究機構/ 公立大学法人大阪 大阪公立大学)
- **研究分担者** 柴田 大輔 (Orbray 株式会社)
熊谷 義直 (国立大学法人東京農工大学)
田中 勝久 (国立大学法人京都大学)
藤村 紀文 (公立大学法人大阪 大阪公立大学)
西川 和康 (三菱電機株式会社)
- **総合ビジネスプロデューサー** 浜口 清 (国立研究開発法人情報通信研究機構)
- **ビジネスプロデューサー** 湯本 雅彦 (Orbray 株式会社)
中川 正樹 (国立大学法人東京農工大学)
石原 寛一 (国立大学法人京都大学)
増森 毅 (公立大学法人大阪 大阪公立大学)
佐竹 徹也 (三菱電機株式会社)

○ **研究開発期間** 令和3年度～令和5年度

○ **研究開発予算** 総額 976百万円

(内訳)

令和3年度	令和4年度	令和5年度
250百万円	364百万円	362百万円

2 研究開発課題の目的および意義

本研究開発では、Society 5.0の推進により、あらゆるものがICTでつながり電化していく社会においてエネルギーが制約要因にならないために、大幅な省エネ技術を確立することで情報通信由来のCO₂排出を減らす（Green of ICT）こと、及び次世代デバイスを用いた再生可能エネルギーの導入促進、情報通信機器の小型化、自動車等のワイヤーハーネスフリー化による軽量化、極限環境下で活動可能なロボットの実現による既存作業の高効率化等の様々な想定されうる用途においてCO₂排出を減らす（Green by ICT）ことを念頭におき、ワイドギャップ半導体の一種である酸化ガリウム（Ga₂O₃）を用いた次世代デバイス関連技術に取り組む。

上記の目的の実現に向けて、「超低消費電力」及び「極限環境下での情報通信」を実現しうる、Ga₂O₃を用いた様々な次世代デバイスの製品化に向けた民間事業者の事業予見性を高めるために必要な技術の開発・実証試験等を実施する。また、日本が開拓してきたGa₂O₃分野について、世界に伍する重要な技術分野に関する論文の発表・特許取得や技術的貢献等を実現することで、国際産業競争力や気候変動枠組み条約等での国際交渉におけるプレゼンス向上のコベネフィットを獲得することも目指す。

3 研究開発成果（アウトプット）

3. 1 ア）高品質な単結晶バルク、ウェハ製造技術の確立・実証

- ① 高品質酸化ガリウムウェハ製造のためには、酸化ガリウムが有する劈開性に留意した上で、バルク育成手法や切断・研磨等の基板加工技術を開発し、ウェハ量産化を念頭に当該技術を確立する。
- ② 2インチ以上のサイズの単結晶酸化ガリウムバルク育成、及び2インチ径以上の高品質酸化ガリウムウェハを製造する単結晶バルク、ウェハ製造技術の確立を目標とする。加えて、高品質酸化ガリウムウェハの試作、ウェハ品質評価（表面平坦性、転位・欠陥密度、電気的特性評価等）を実施し、その特性を確認するとともに、イ）とウ）と連携することで、高性能デバイスへの適用が可能な結晶品質を実現する。

- ① φ1インチサイズの円柱状（010）面バルク結晶育成条件の最適化と、φ1インチ（010）面ウェハへの加工技術の最適化を行い、ウェハ量産化を念頭にしたウェハ製造技術を確立した（図1）。

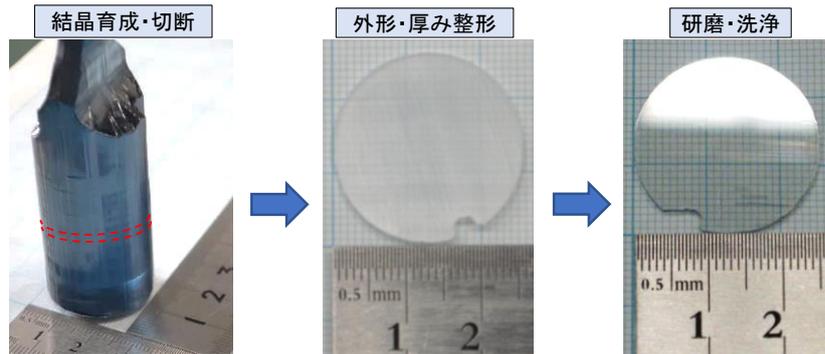


図1 φ1インチ結晶とウェハ加工 (n型)

② ①を基にして、さらにφ2インチサイズの円柱状(010)面バルク結晶育成手法の開発を行い、n型φ2インチ円柱状(010)面バルク結晶を得られる結晶育成技術を確立した(図2)。得られた結晶の品質は、多結晶やクラックや双晶が存在したものの、X線ロックアップカーブのピーク半値幅は300 arcsec以下と良好であった。一方、半絶縁型結晶のほうは、今回φ2インチサイズに広げることができず、およそ1インチサイズ止まりであった(図3)。n型結晶からφ2インチウェハへの加工実験を行ったところ、まだ加工に耐えうる結晶品質ではないため、新たにクラックや割れが発生し加工技術の確立はできなかった。

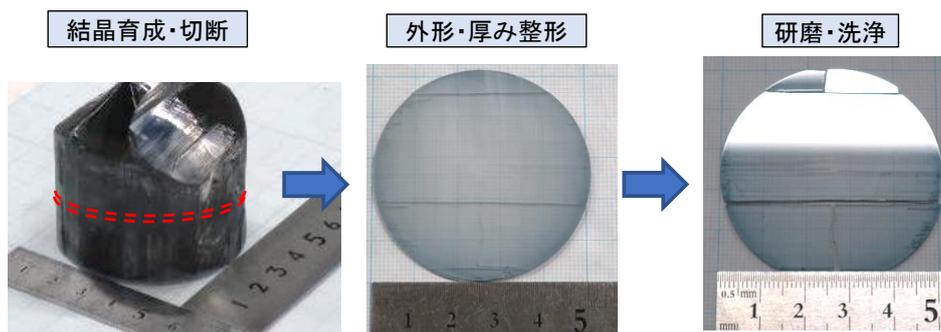


図2 φ2インチ結晶とウェハ加工 (n型)



図3 半絶縁型結晶

表1 n型と半絶縁型の電気的特性

n型			半絶縁型
抵抗率[Ωcm]	n型キャリア濃度[個/cm ³]	ホール移動度[cm ² /(V·S)]	抵抗率[Ωcm]
1.4×10^{-2}	5.6×10^{18}	8.8×10^1	10^{13}

ウェハ品質評価に関して、加工中にウェハが割れたため表面平坦性は評価できず、エッチピット密度は適した条件を見出せなかったため今回は評価できなかった。電気的特性の評価は行うことができ、目標値を達成していることを確認した(表1)。そして、n型10 mm × 15 mm 角形ウェハをイ)の担当チームへ提供した。

研究開発マネジメント上の工夫として、酸化ガリウムウェハマーケットへの参入に向け、ウェハ特性として必要とされる情報を随時更新して開発を進めた。

3. 2 イ) 薄膜エピタキシャル成長技術の確立・実証

ウ) で実施する酸化ガリウムパワーデバイスの実現に必要な HVPE 及び MOCVD を含む薄膜エピタキシャル成長技術の開発を行うとともに、複数の候補となる成長技術を比較し、量産を念頭においたデバイス製造の最適な条件を明らかにし、目的に応じた最適な薄膜エピタキシャル成長技術を見出すことを目標とする。優れたデバイス技術の実証・確立を念頭におき、上記の 2 手法に加えてミスト CVD、MBE を含めた各種成長技術を用いて、上記に記載の課題を解決し、高品質なエピ基板を作製し、ウ) において記載した事項と密接に連携（製造した基板の提供・デバイスの性能を最大化するために必要な薄膜成長プロセスの高度化に必要な試験等）し、量産に必要なデバイス製造基盤技術を確立することを目標とする。

3. 2. 1 一塩化ガリウム (GaCl) を Ga 源に用いる HVPE 成長技術に関する研究開発

HVPE 及び THVPE によって製造されるデバイスの性能評価においては、n 型ドーピングによる電子濃度制御を 10^{15} cm^{-3} 以下に制御することや、デバイスへの適用を念頭においた段差基板上の酸化ガリウム選択成長技術の確立等の高品質なエピ基板作製に必要な薄膜成長関連の技術開発を実施する。

(010)面基板上では、同条件下における(001)基板上に比べ成長速度が約 1/5 に低下することが分かった。また、成長速度増加のため原料供給濃度を高くすると、気相中から結晶粉体が降下する問題が生じた。これらの問題は、炉内にフローチャネルを導入しガス流速を高める（図 4）ことで抑制され、 1000°C において高純度(010)エピ膜を $12.6 \mu\text{m/h}$ という高速で成長できることが実証され、目標値 ($10 \mu\text{m/h}$ 以上) が達成された。

上記の結果を基に、 SiCl_4 を用いた n 型 Si ドーピング、 NO_2 を用いた p 型 N ドーピングが検討された。図 5 に SiCl_4 供給比 R_{Si} [GaCl 、 SiCl_4 供給分圧を P_{GaCl} 、 P_{SiCl_4} とする時、 $R_{\text{Si}} = P_{\text{SiCl}_4}/(P_{\text{GaCl}} + P_{\text{SiCl}_4})$] に対するエピ層のキャリア密度と Si 不純物濃度を示すが、キャリア密度は Si 濃度にほぼ等しく、 $10^{16} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の範囲で制御可能で目標が達成された。また、デバイス試作グループ（情報通信研究機構）への縦型フィン電界効果トランジスタ試作用のエピ基板（エピ厚 $10 \mu\text{m}$ 、キャリア密度 $\sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ）供給が開始された。N ドーピングでは、Si に比して N の低い取り込み率が明らかとなったが、 NO_2 供給比 R_{N} [O_2 および NO_2 の供給分圧を P_{O_2} 、 P_{NO_2} とする時、 $R_{\text{N}} = P_{\text{NO}_2}/(P_{\text{O}_2} + P_{\text{NO}_2})$] を高く設定 ($R_{\text{N}} = 2.8 \times 10^{-3}$) することで $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の N 濃度が得られ、さらに成長温度を 900°C に低下させると N 濃度は $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ に達しエピ層が半絶縁化することが確認され、目標（HVPE における N ドーピング技術確立）が達成された。

最後に、フィン電界効果トランジスタのフィン側壁および底面部への p 型 N ドープ領域成長を想定し、放射状にフィン構造（幅 $10 \mu\text{m}$ 、高さ $3 \mu\text{m}$ ）が形成された(010)基板上への HVPE 成長 (1000°C 、 $1.0 \mu\text{m/h}$ で 30 分) が検討された。その結果、(100)面から反時計回りに $\pm 82^{\circ}$ の範囲にある側壁では側壁が垂直に維持されるが、上記範囲外ではファセットが発達し、成長後断面が台形状となることが明らかになった（図 6）。以上、本技術をフィン電界効果トランジスタ作製に利用する場合、(001)面側壁[(100)面から 103.8° 回転]の使用は不適で、(100)面側壁とすることが好適であると判明した。

以上、すべての課題について目標が達成された。研究開発マネジメント上の工夫として、デバイス試作グループにエピ基板を供給するミッションも有していたことから、デバイス試作グループと密にデータをやり取りし、試料の供給要望時期から逆算して研究課題を進捗させるようにした。

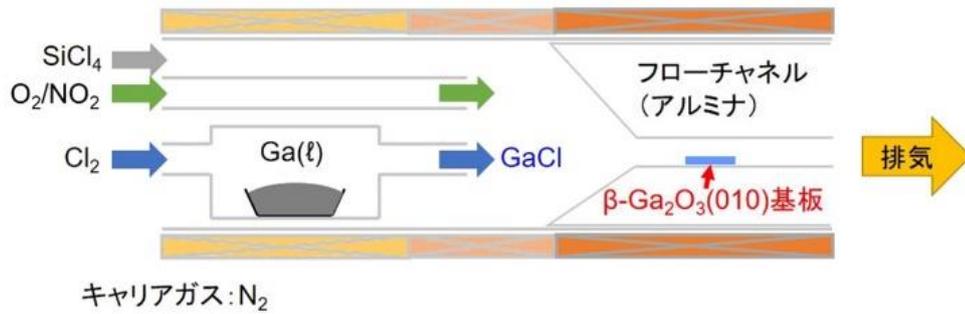


図4 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の HVPE 成長炉模式図

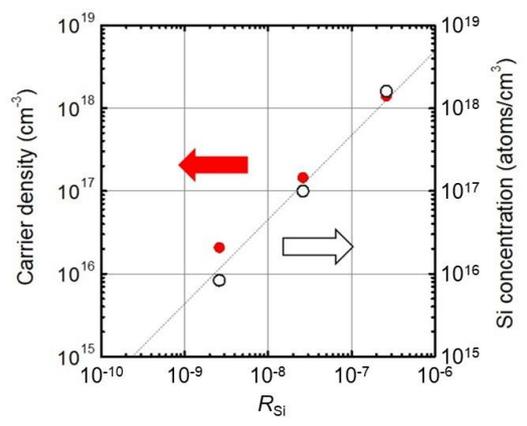


図5 Si ドープ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 層のキャリア密度および Si 濃度の SiCl_4 供給比 (R_{Si}) 依存

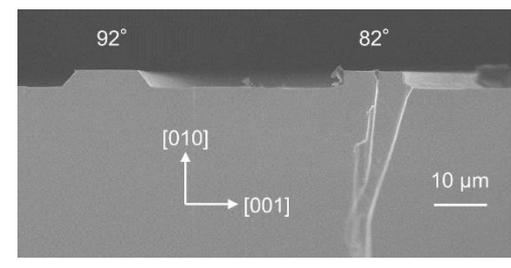


図6 (100)から反時計回りに回転した側壁を有すフィン上成長後の断面 SEM 像

3. 2. 2 THVPE 法による $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜成長の研究開発

- HVPE を用いた技術の場合は、一塩化ガリウムを用いた他の方法に比べて取扱が容易であり、量産性に優れる固体状の三塩化ガリウムをガリウム源とする新規酸化ガリウム HVPE 成長技術(THVPE)について、現行の HVPE を用いた酸化ガリウム層成長速度 ($5 \mu\text{m/h}$) を超える $10 \mu\text{m/h}$ 以上の成長速度の薄膜成長技術を確立する。
- HVPE 及び THVPE によって製造されるデバイスの性能評価においては、n 型ドーピングによる電子濃度制御を 10^{15}cm^{-3} 以下に制御することや、デバイスへの適用を念頭においた段差基板上の酸化ガリウム選択成長技術の確立等の高品質なエピ基板作製に必要な薄膜成長関連の技術開発を実施する。

GaCl に比して O_2 との反応時の自由エネルギー変化が小さく、気相中での粉体生成を抑制可能な Ga 源として三塩化ガリウム (GaCl_3) の利用が検討された。成長炉内で金属ガリウム (Ga) と塩素 (Cl_2) ガスを二段階で反応させて GaCl_3 を生成する炉内原料生成 THVPE 法、固体の GaCl_3 を充填した原料容器を炉外に接続し、温度と通過キャリアガス流量で GaCl_3 供給を制御する固体ソース THVPE 法の 2 方式を開発し、HVPE 法と同等の成長速度が可能な結晶成長技術が確立された。

まず炉内原料生成 THVPE 方式について、研究開発の効率化やコスト低減のため理論検討が行われた。熱流体解析による GaCl_3 の高効率生成が可能となる反応管の形状決定、原料輸送量および流速条件の解析によって原料発生部の設計が行われた。次に、実際に原料発生部構造を作製し、既存の HVPE 成長炉の原料部に組み込まれ実証実験が行われた。その結果、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(001)$ 上のホモエピ成長にて、 $10.6 \mu\text{m/h}$ の高成長速度が確認され、また二次イオン質量 (SIMS) 分析にて HVPE と同等 (Cl 以外の不純物は SIMS

装置のバックグラウンドレベル未満)の高純度結晶成長が確認された。

エピ基板量産化を念頭に置いた固体ソース THVPE 技術開発では、既存の HVPE 成長炉の配管改造を実施後、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(010)$ 基板上へのエピ成長が検討された。初期検討において、 $12.3\ \mu\text{m/h}$ の高成長速度が得られたものの、成長速度の増大に伴って結晶表面に多数のヒロックが形成されることが分かった。その対策として、化学機械研磨で意図的に表面オフ角をつけた基板を準備し成長挙動が調査された。その結果、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3\langle 102 \rangle$ に垂直な方向に僅か 0.2° のオフ角をつけることで $18.4\ \mu\text{m/h}$ という高い成長速度にも関わらずヒロック形成が大幅に抑制されることが明らかとなり、目標が達成された (図 7)。一方、吸湿性の高い固体 GaCl_3 の供給ラインの腐食に由来すると考えられる不純物金属(Fe, Cr)のエピ膜中への取り込みが見られた。

今後、原料供給ラインの改良により炉内原料生成 THVPE 法と同等の高純度エピ膜成長が可能となれば、固体ソース THVPE 法が量産性に優れた $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ エピ基板の製造技術として認知されるようになるものと考えられる。

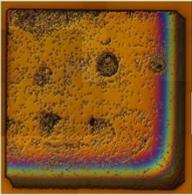
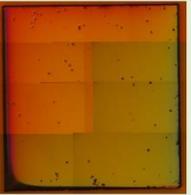
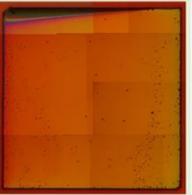
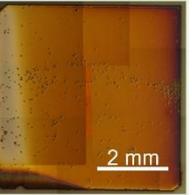
オフ角	0°	0.2°	0.5°	1.5°
NDIC像				
成長速度 ($\mu\text{m/h}$)	21.4	18.4	15.0	13.0

図 7 固体ソース THVPE 法で $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(010)$ 基板上に成長されたエピ膜の表面形態 (ノマルスキー微分干渉コントラスト (NDIC) 顕微鏡像) および成長速度の基板オフ角依存性

3. 2. 3 MOCVD 法による $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜成長の研究開発

- MOCVD を用いた技術の場合は、現行の MOCVD を用いた酸化ガリウム層成長速度 ($3\ \mu\text{m/h}$) を超える $5\ \mu\text{m/h}$ 以上の成長速度の薄膜成長技術を確認し、原料ガスとして用いる III 族有機金属原料由来の不純物の薄膜成長への影響を抑制する技術を始めとして、薄膜成長関連の技術開発を実施する。
- MOCVD によって製造されるデバイスの性能評価においては、アンドープ酸化ガリウム層中残留キャリア密度 $10^{15}\ \text{cm}^{-3}$ 以下の性能の実現を確認する等、高品質なエピ基板作製に必要な薄膜成長関連の技術開発を実施する。

従来のトリエチルガリウム (TEGa) を用いた $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の MOCVD 成長では、成長速度は低いものの、懸念されていた Ga の有機金属化合物原料に由来する炭素 (C) や水素 (H) によるエピ膜の汚染は見られないと報告されていた。本プロジェクトでは、まず有機金属原料供給システムと質量分析器のみが導入され、炭素 (C)、水素 (H) 不純物の取り込みメカニズム解析から着手することで $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 成長に適した MOCVD 成長炉開発を目指すよう工夫がされた。結果、TEGa が 450°C 以上で Ga ガスと炭化水素ガスに熱分解し、高温かつ過剰な O_2 供給下では炭化水素が完全燃焼し CO_2 および H_2O に転換されており、高純度な $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 成長が可能となるという重要な原理が見出された。

次年度、熱流体解析を併用し $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 成長炉体が設計・導入され、有機金属原料供給システムと結合された。TEGa よりも高い蒸気圧を有すトリメチルガリウム (TMGa) が Ga 源として採用され、前年度に得られた原理に従って、TMGa の熱分解温度 ($\sim 650^\circ\text{C}$) 以上に予備加熱可能で、高温 ($\sim 1000^\circ\text{C}$)

で過剰な O_2 と反応させることができる世界的に例の無い減圧・ホットウォール MOCVD 炉が実現された (図 8)。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(010)$ 基板上へのエピ成長を検討したところ、TMGa 供給速度の増加に伴って成長速度が増加し、前例の無い $15 \mu\text{m/h}$ を超える高速での C および H 不純物取り込みの見られないエピ膜成長が実現された (図 9)。

デバイス試作グループ (国立研究開発法人情報通信研究機構及び公立大学法人大阪 大阪公立大学) と連携し、アンドープエピ膜を用いた縦型ショットキーバリアダイオード試作・解析を行った結果、アンドープ膜の残留キャリア密度が $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ と極めて低いことが解明された。そこで、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 成長中にテトラメチルシラン (TMSi) をドーピングガスとして供給し、Si ドープ層成長が試みられた。その結果、Si 供給比 R_{Si} [TMGa および TMSi 供給分圧を P_{TMGa} 、 P_{TMSi} とする時、 $R_{\text{Si}} = P_{\text{TMSi}} / (P_{\text{TMGa}} + P_{\text{TMSi}})$] を変化させることで Si 濃度を $10^{15} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ で制御可能なこと、Si 濃度にほぼ等しい n 型キャリア密度が得られることが確認された (図 10)。本結果を受け、デバイス試作グループに対するエピ基板 (エピ厚 $10 \mu\text{m}$ 、キャリア密度 $10^{16} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 供給が開始された。一方、基板作製グループ (Orbray) とも連携し、Orbray 製 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(010)$ 基板上でエピ成長を検討する中で、基板表面にわずかなオフ角がついている場合に $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の MOCVD 成長で問題となっている表面ヒロック形成が抑制されるという今後の開発における重要な知見も得られている。

高品質エピ基板開発の要素技術開発として、バンドエンジニアリングを可能とする Al を含む混晶 $\beta\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ の MOCVD 成長も検討され、本プロジェクトで開発された減圧・ホットウォール MOCVD 炉を用い、トリメチルアルミニウム (TMAI) と TMGa を原料とすることで混晶成長およびその組成制御が可能なが確認されている。

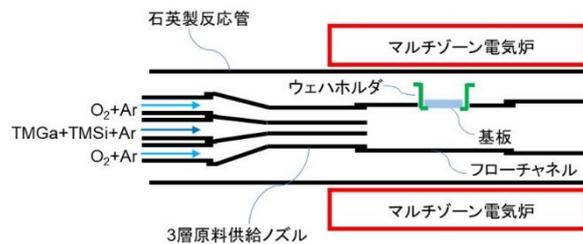


図 8 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の減圧・ホットウォール MOCVD 炉模式図

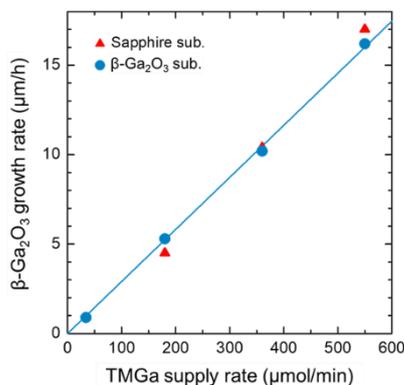


図 9 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(010)$ および c 面サファイア基板上の $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 成長速度

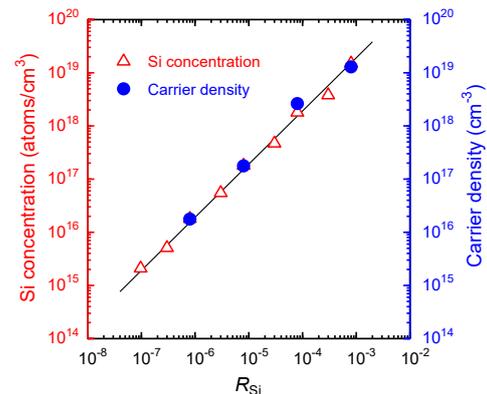


図 10 Si ドープ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 層の Si 濃度およびキャリア密度の Si 供給比 (R_{Si}) 依存

3. 2. 4 準安定 Ga₂O₃ のミスト CVD 成長技術の研究開発

ミスト CVD を用いた技術の場合は、準安定酸化ガリウム薄膜成長を安定して実現するために必要な技術の確立を行うとともに、n 型ドーピングによる電子濃度を $10^{16} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ で精密に制御することを実現し、高品質なエピ基板作製に必要な薄膜成長関連の技術開発を実施する。また、結晶欠陥による影響の制御や熱伝導性を考慮した膜厚の制御を始めとした優れたデバイスプロセスの確立に必要な技術開発を行う。

成長プロセスと結晶構造に関する研究では、ミスト CVD 法に用いる原料溶液中の酸の種類と濃度ならびに基板温度によって成長する結晶相にどのような違いが現れるかを検討した。Ga の原料は $[\text{Ga}(\text{acac})_3]$ とした。その結果、酸として塩酸を用いると、その濃度が高いほど $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ が単相で生成する温度範囲が広くなること、また、硝酸では α 相が安定化されないことを見いだした。これらの実験結果に基づき、想定される化学種とそれらの化学平衡を考察することで $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ が生成する原子・分子レベルでの機構を検討し、HCl が $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の成長に効果的に寄与する原因を推察した。

ミスト CVD 法による $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜のエピタキシャル成長ではサファイア ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 単結晶) が用いられるため格子不整合に基づく転位の発生が避けられない。転位はイオン化不純物などとともに電子の移動において散乱中心となるため、その構造を明らかにし、電気伝導に及ぼす影響を調べることは重要である。そこで、高分解能電子顕微鏡観察ならびに X 線回折測定を利用して転位の構造と種類を明らかにするとともに、移動度の温度依存性ならびに膜厚依存性を解析して転位と電気伝導との関係を調べた。図 11(a) は c 面サファイア上に成長させた $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜に生じた貫通転位の高角度散乱暗視野走査透過電子顕微鏡 (HAADF-STEM) 像であり、像の解析から、この転位が $[1\text{-}100]$ 方向の刃状成分と $[0001]$ 方向のらせん成分から成ることが示された。図 11(b) は HAADF-STEM 像から得られる逆フーリエ変換像で、(c) は (b) に基づいて見積もられたひずみの分布である。余剰半面が $[-1010]$ 方向に沿って挿入され、余剰半面がある箇所では圧縮ひずみが、反対の領域で引張ひずみが生じていることが実証された。一方、c 面および m 面サファイア基板上に膜厚の異なる $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜を成長させ、転位密度、移動度、キャリア密度を見積もった。図 12 は、(a) c 面サファイア、(b) m 面サファイア基板上に成長した薄膜における転位密度と移動度ならびにキャリア密度との関係であり、いずれも転位密度の増加にともない単調に減少している。これらの結果から、転位が電子の移動に対する散乱中心として働くこと、また、転位は帯電しておりアクセプターとして電子を捕獲する可能性があることが示唆された。加えて、移動度の温度依存性を解析することにより、電子の散乱中心としての寄与はフォノンやイオン化した不純物欠陥よりも転位の方が大きいことが明らかとなった。

$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のデバイス化においてキャリア密度と移動度の制御が重要である。これまで、n 型ドーパントとして Sn、Si、Ge が試みられてきた。たとえばミスト CVD 法で作製された Sn ドープ $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜ではキャリア密度を $10^{17} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の範囲で変えることが可能で、移動度は最大で $65 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ という値が報告されている。Ge ドーピングではパルスレーザー堆積法による製膜の例があるが、キャリア密度の制御範囲は $10^{18} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ と狭く、移動度は最大でも $40 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 以下である。本研究では、Ge の原料として有機ゲルマニウム化合物の一種であるビス[2-カルボキシエチルゲルマニウム(IV)]セスキオキドを用いることにより、キャリア密度が $8.2 \times 10^{16} \sim 1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の範囲で制御可能であること、移動度が最大で $99 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ に達すること (図 13) を見いだした。後者は $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 相における現状でのチャンピオンデータである。

電気伝導特性に優れた $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜が再現性良く合成できるようになったため、これを用いてショットキーバリアダイオード (SBD) を試作して、特性評価を行った。基板として m 面サファイアを用い、

その上に厚さが 600-900 nm の n⁺層 (Ge ドープ α-Ga₂O₃ 薄膜、キャリア密度は 1×10¹⁹ cm⁻³ 程度)、厚さが 500-600 nm の n-層 (ドープしていない α-Ga₂O₃ 薄膜) を製膜した。ショットキー電極として Ti/Au 電極を、また、オーミック電極として 2 種類の電極 (Ti/Au あるいは Ti/Al/Ti/Au) を用いた。オーミック電極を蒸着後、高速熱処理 (RTA) を施した。オーミック電極の種類と RTA 温度の異なる SBD の電流-電圧特性を図 14 に示す。整流比は最大で 10⁸ 程度、オン抵抗は 3.7 mΩ·cm² まで低減することができた。

以上の研究成果に関連して、『研究開発マネジメント』上の工夫として研究者や実験補助者が定期的かつ密なミーティングを実施することにより、合理的な研究計画を立て、研究を円滑に進めた。また、『費用対効果』分析を踏まえた効率性について、ミスト CVD 装置は大気圧下での薄膜合成が可能な製膜装置であるため安価であり、また、α-Ga₂O₃ 薄膜の成長に用いるサファイア基板も汎用的かつ安価であるため、それらの利用により費用対効果が得られた。

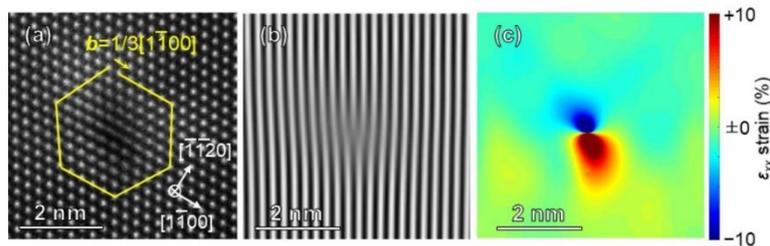


図 11 c 面サファイア基板上的 α-Ga₂O₃ 薄膜に生じた貫通転位の (a) HAADF-STEM 像、(b) その逆フーリエ変換像、(c) ひずみの分布

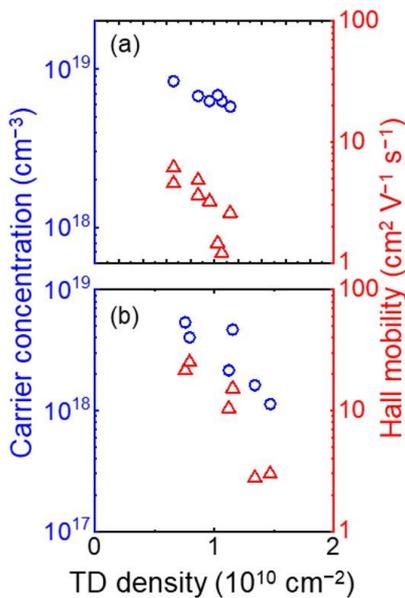


図 12 (a) c 面および (b) m 面サファイア基板上的 α-Ga₂O₃ 薄膜における転位密度とキャリア密度ならびに移動度の関係

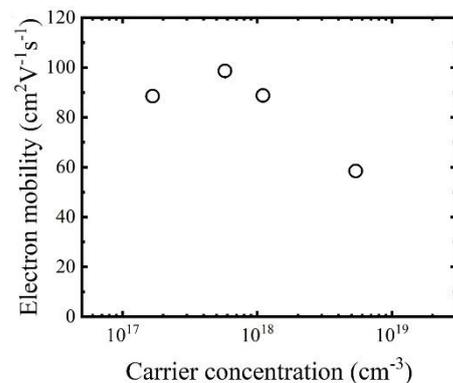


図 13 Ge ドープ α-Ga₂O₃ 薄膜のキャリア密度と移動度の関係

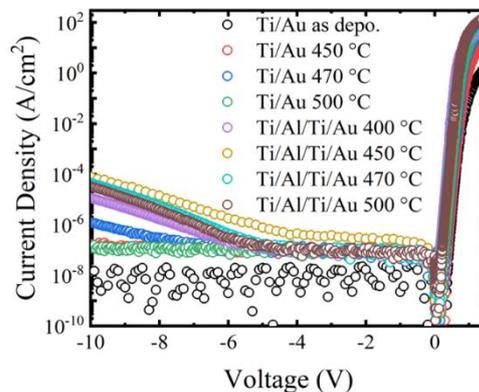


図 14 Ge ドープ α-Ga₂O₃ 薄膜を用いた SBD の電流-電圧特性

3. 2. 5 MBE 法による Ga₂O₃ 薄膜成長技術の研究開発

優れたデバイス技術の実証・確立を念頭におき、上記の3手法に加えて MBE 等を含めた各種成長技術を用いて、上記に記載の課題を解決し、高品質なエピ基板を作製し、ウ)において記載した事項と密接に連携（製造した基板の提供・デバイスの性能を最大化するために必要な薄膜成長プロセスの高度化に必要な試験等）し、量産に必要なデバイス製造基盤技術を確立することを目標とする。

(Al_xGa_{1-x})₂O₃ バックバリア層の MBE 成長条件の最適化（国立研究開発法人情報通信研究機構）

Ga₂O₃ FET の高周波デバイス特性を向上させるためには、① 基板/エピタキシャル層界面を通るドレインリーク電流、② ゲート長の微細化に伴って生じる短チャネル効果、をいかに抑制するかが課題となっている。①、②両課題の解決策としては、(Al_xGa_{1-x})₂O₃ バックバリアの導入が挙げられる。

そこで前段階として、β-Ga₂O₃ (010)基板上に高品質な(Al_xGa_{1-x})₂O₃ 薄膜を MBE 成長する最適条件を調査した。その結果、臨界膜厚の考察も踏まえた上で、Al 組成は x~0.12、膜厚は 100 nm 程度が最適との指針を得た。代表的な実験データを以下に示す。サンプルとしては、Ga₂O₃(100 nm)/(Al_xGa_{1-x})₂O₃(110 nm)二層膜(x~0.12)を β-Ga₂O₃ (010)基板上に成長したものをを用いた。図 15(a), (b)に、MBE 成長直後の高エネルギー反射電子線回折 (RHEED) パターンと Ga₂O₃ 表面の原子間力顕微鏡 (AFM) 像をそれぞれ示す。共に、原子層レベルで平坦であることを示している。また、図 15(c)に示す θ-2θXRD パターンから、(010)配向で不純物相無く成長し、急峻な界面が形成されていることが分かった。さらに、図 15(d)の逆格子マッピングからは、エピタキシャル層はコヒーレントに成長しており格子緩和は起きていない。以上のように、デバイス作製に適した高品質なエピタキシャル層が得られた。実際に、(Al_xGa_{1-x})₂O₃ バックバリア層を導入して試作した短ゲート Ga₂O₃ MOSFET のデバイス特性については、以下に報告する。

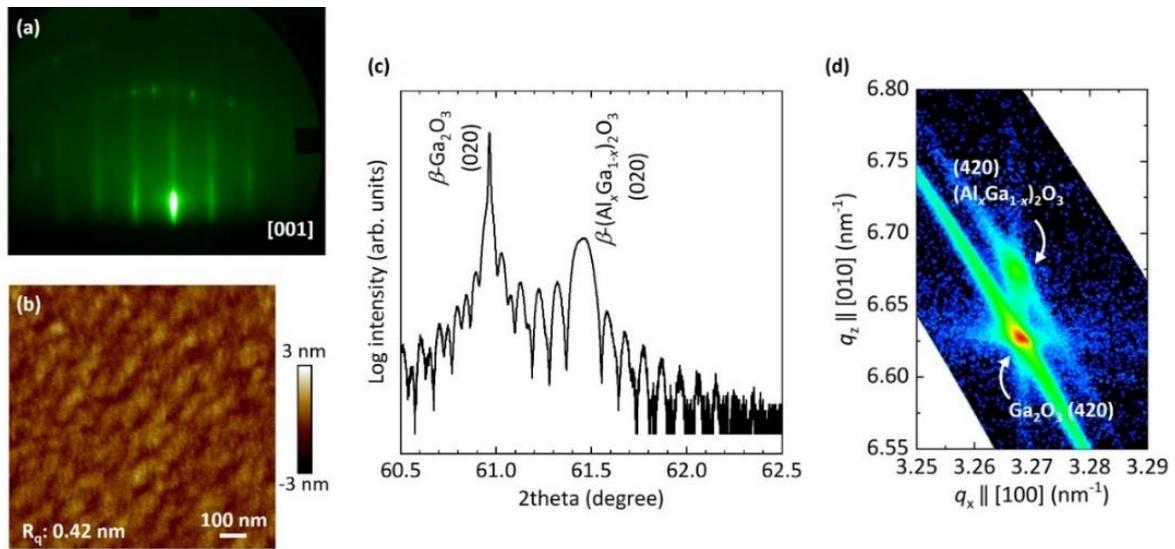


図 15 成長直後に行った Ga₂O₃(100 nm)/(Al_xGa_{1-x})₂O₃(110 nm)二層膜(x ~ 0.12)の結晶構造評価：
(a) RHEED パターン、(b) 表面 AFM 像、(c) θ-2θ XRD プロファイル、(d) 逆格子マッピング

MBE 装置 RF プラズマセルを用いた酸化ガリウムの表面窒化プロセス技術開発（国立研究開発法人情報通信研究機構、公立大学法人大阪 大阪公立大学 東協研究室）

Ga₂O₃ (100)フィン側壁への窒素 (N) ドーピングの初期検討として、令和 3 年度分子線エピタキシー (MBE) 結晶成長装置の RF プラズマセルを用いた超高真空中での N ラジカル照射による Ga₂O₃ の表面窒化を試み、その振る舞いを反射高速電子線回折 (RHEED) によるその場観察と、原子間力顕微鏡

(AFM) による表面モロロジー観察により評価した。続いて令和 4-5 年度は、実際に表面窒化を行ったノンドープ Ga_2O_3 (100) 基板の表面近傍の組成元素分析を XPS により評価した。また、表面を窒化した基板を用いてショットキーバリアダイオード (SBD) を試作し、その電気的特性を評価した。

窒化処理を行った場合、行わなかった場合の、 Ga_2O_3 (100) 基板表面からの Ga 3d XPS ピークの分析を行った。図 16(a), (b) に、それぞれ窒化処理を行わなかった場合、行った場合の Ga_2O_3 (100) 基板表面からの Ga 3d ピークを示す。窒化処理無しの場合、Ga-O 結合に関連するピーク、O 2s ピークの 2 つに分離することができる。なお初期値としては、文献値から Ga-O ピークおよび O 2s ピークのエネルギー値を、それぞれ 20.5, 23.0 eV とした。最小二乗法を用いた自己収束的フィッティングの結果、Ga-O 結合エネルギーは 19.8 eV、半値幅は 1.83 eV、O 2s 結合エネルギーは 21.1 eV、半値幅は 5.26 eV が導かれた。一方、窒化処理有りの場合、前述 2 つのピークに加えて、Ga-N 結合ピーク、N 2s ピークが観測される。同様の手法でピーク分離を行うと、Ga-N 結合エネルギーは 19.2 eV、半値幅は 1.78 eV、N 2s の結合エネルギーは 16.5 eV、半値幅は 4.26 eV となった。なお、ここでは、Ga-O と O 2s の結合エネルギーと半値幅は、窒化無しサンプルで得られた値をそのまま使用した。これらの結果から、N ラジカル照射により、組成オーダーの N 原子が表面近傍領域に取り込まれていることを表している。

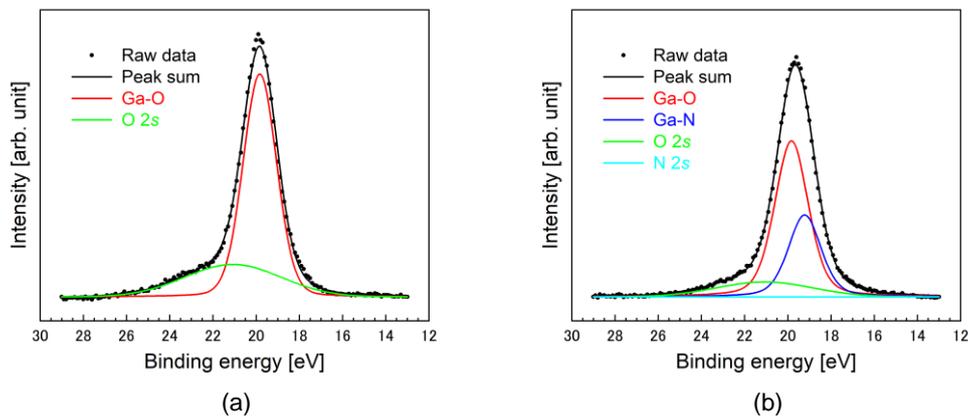


図 16 Ga_2O_3 (100) 基板表面から得られた XPS Ga 3d ピーク : (a) N ラジカル照射無し、(b) N ラジカル 120 分間照射

図 17 に、 Ga_2O_3 (100) 基板上に作製した SBD の断面構造模式図を示す。なお、容量-電圧 ($C-V$) 特性から、両基板の電子濃度は $n = 1 - 3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ であった。図 18(a), (b) に、それぞれ N ラジカル 120 分間照射した、窒化処理無し Ga_2O_3 (100) SBD の順方向電流密度-電圧 ($J-V$) 特性を示す。窒化処理無しの SBD ではターンオン電圧がばらついており、いくつかのデバイスではキックが見られる。一方、N ラジカル 120 分間照射した SBD では、ターンオン電圧がほぼ一定値であると共に、キックは皆無で良好な順方向ダイオード特性を示している。なお、理想係数 (ideality factor: η) は、窒化処理無しの場合 1.18 ± 0.04 であったのに対し、窒化処理有りでは 1.07 ± 0.01 であった。このように、N ラジカル 120 分間照射により、 Ga_2O_3 (100) 面上ショットキー特性だけでなく、その面内均一性も大幅に改善した。

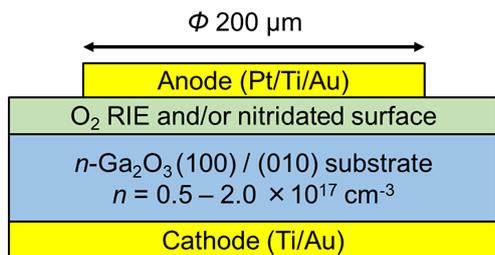


図 17 Ga₂O₃ SBD 断面構造模式図

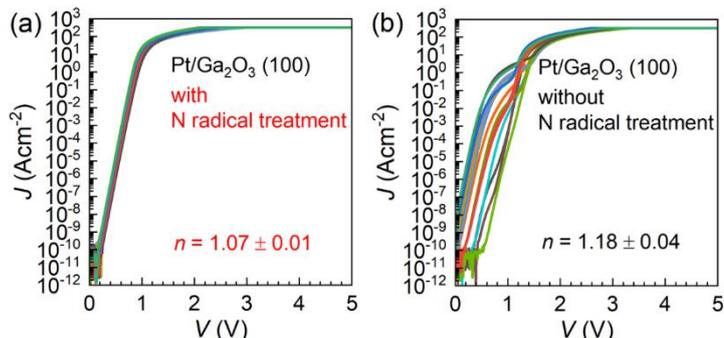


図 18 Ga₂O₃ (100) SBD の順方向 J - V 特性：
(a) 窒化処理 120 分間、(b) 窒化処理無し

3. 3 ウ) 次世代デバイス技術の確立・実証

3. 3. 1 縦型 Ga₂O₃ パワートランジスタに関する研究開発

縦型トランジスタについては、耐压性能に優れたフィン電界効果トランジスタ等の開発を通じて、オン抵抗 $20 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 以下、耐压 1 kV 以上のデバイス特性の実現を目標とするとともに、実用的なデバイスを見据えて熱設計、放熱性向上のための技術に関する調査・開発等も同時に検討する。

RF プラズマプロセスおよび大気圧プラズマプロセスを用いた酸窒化プロセスによる Ga₂O₃ の表面電子状態の評価 (公立大学法人大阪 大阪公立大学 藤村研究室)

縦型 Ga₂O₃ フィントランジスタ作製には、深堀エッチング技術、およびゲートを作製するエッチング側壁のダメージ除去技術が不可欠である。また、エッチングで形成したフィン側壁に、数 10 nm 程度の N ドープ p-Ga₂O₃ 層をゲート電極とチャネルとの間に挿入することで、N は Ga₂O₃ 中でディープアクセプタとして振る舞うことが予想されるため、ノーマリーオフ化に必要なゲートしきい値電圧の正方向へのシフトをもたらすことが期待される。このダメージ除去と閾値電圧の正方向のシフトの両方に効果的であると考えられる、RF プラズマおよび大気圧プラズマを用いた窒化プロセスを開発した。

令和 4 年度に、超高真空中でプラズマ照射できる ALD (原子層堆積) 装置が導入され、ALD 成長前の基板の前処理として窒化・酸窒化照射を行うことが可能になった。別予算で購入した ALD チャンバーを本研究費で購入したプラズマ照射チャンバーと連結し、真空搬送できるよう設計されており、費用対効果を考慮した大気非曝露評価が可能になっている。大気圧および RF 窒素プラズマを用いた照射実験を 50 W 以下の比較的マイルドな照射条件で行った結果、(010)Ga₂O₃ 基板の表面ラフネスは 0.2 nm 程度に減少し (図 19)、X 線光電子分光 (XPS) 測定で Ga 3d のピークシフトが確認され、窒素の混入が示唆された。(図 20) 大気圧プラズマ窒化に関しては、表面窒素は確認されるものの、酸素との置換を確認することはできなかった。これらの電気特性・誘電に関しては、明確なプラズマ照射効果を確認するには至らなかった (図 21)。今後、より高いエネルギーにおける照射効果や、数 10 nm 厚の Ga₂O₃ エピタキシャル膜成長時の窒素プラズマ照射による窒素ドーピングを行う必要がある。

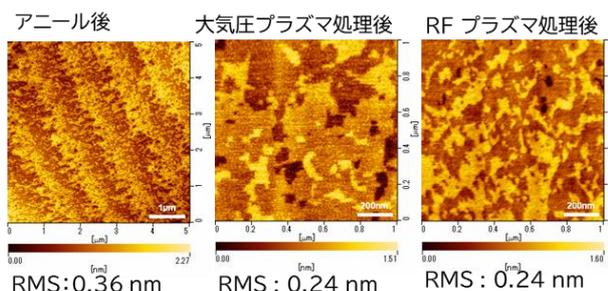


図 19 RF プラズマ処理後の AFM 像

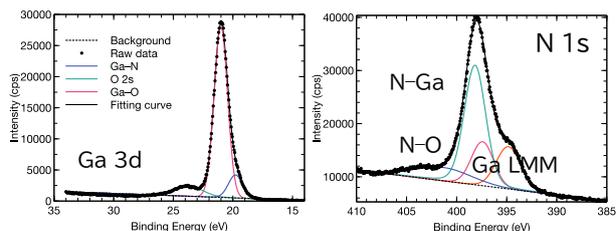


図 20 RF プラズマ処理後の XPS スペクトル

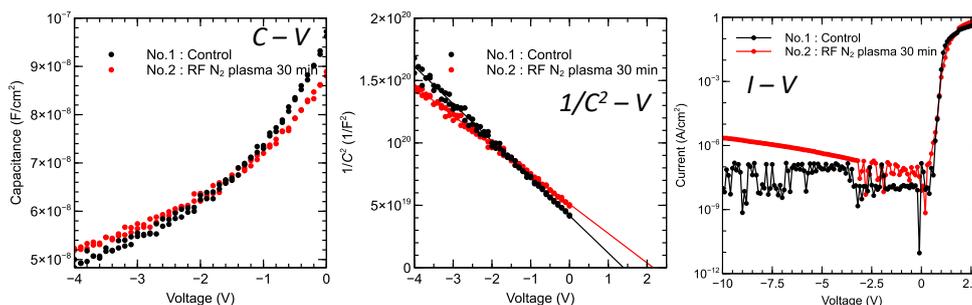


図 21 (010)基板の照射前後の C-V、 $1/C^2$ -V、I-V 特性

縦型 Ga₂O₃ フィントランジスタ研究開発 (国立研究開発法人情報通信研究機構、公立大学法人大阪 大阪公立大学 東協研究室)

上述表面窒化技術に代表される令和 3・4 年度に積み上げてきたデバイスプロセス技術、および東京農工大 熊谷研究室で開発された Ga₂O₃ (010) 基板上への高品質 Ga₂O₃ 薄膜の HVPE 技術を組み合わせ、令和 5 年度縦型 Ga₂O₃ (001) フィントランジスタを作製し、そのデバイス特性を評価した。これは、エピタキシャル基板が市販されていることも有り、これまで一般的に用いられてきた Ga₂O₃ (001) 基板上よりも、電子移動度、熱伝導率等の物性から判断して更に優れたデバイス特性が期待される、Ga₂O₃ (010) 基板上での世界初の縦型フィントランジスタ動作実証に当たる。図 22(a), (b)に、実際に作製した縦型 Ga₂O₃ (001) フィントランジスタ構造の断面模式図、および電子顕微鏡像をそれぞれ示す。また、フィン幅 400 nm のトランジスタの室温 DC ドレイン電流-ドレイン電圧 (I_d - V_d) 出力特性、およびトランスファ特性をそれぞれ図 23(a), (b)に示す。そのデバイス特性は、ノーマリーオフ動作、オン抵抗 6.9 mΩ cm²、サブスレッショルド係数 82 mV/decade、ドレイン電流 オン/オフ比 8 桁以上と、これまでの他機関からの報告と比較してもデバイスオン特性については世界最高レベルを記録した。一方、ゲートリーク電流が大きく、デバイスオフ特性には改善の余地が多く残されている。このように、オン抵抗についての目標は達成されたが、耐圧については未達である。今後、エピタキシャル成長技術、プロセス技術の最適化により、さらなるデバイス特性の改善を図っていく。

縦型フィントランジスタ開発、およびそのプロセス要素技術については、情報通信研究機構と大阪公立大グループが各項目を分担するとともに、密接な協力関係のもとで進められた点が良かったと考える。このほぼ同グループに近い密接な共同研究は、費用対効果という面でも有効に働いた。

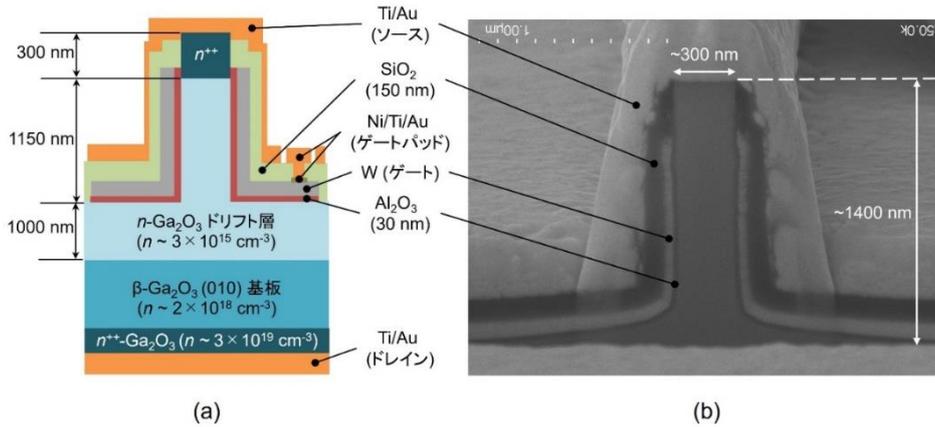


図 22 縦型 Ga₂O₃ フィントランジスタ構造の(a) 断面模式図、(b) 断面電子顕微鏡像

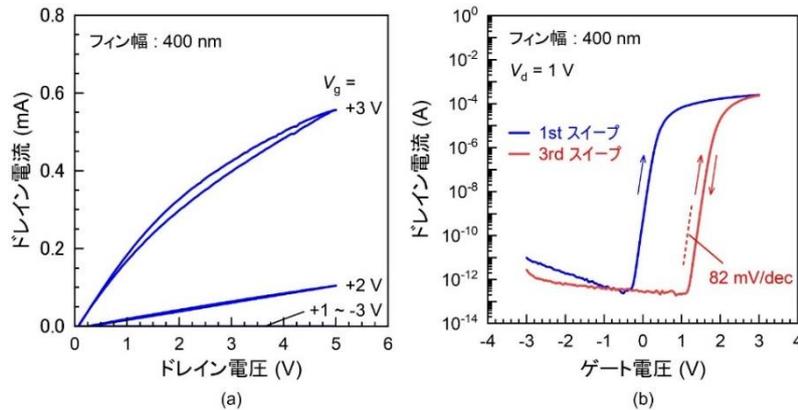


図 23 縦型 Ga₂O₃ フィントランジスタ構造の(a) I_d - V_d 出力特性、(b) トランスファー特性

熱設計、放熱性向上のための技術に関する調査・開発（国立研究開発法人情報通信研究機構）

Ga₂O₃ デバイスの放熱特性改善のための手法として、SiC 基板との直接接合および Ga₂O₃ 基板の薄層化を試みた。表面活性化接合法により作製した n-Ga₂O₃ (001)/SiC 接合基板の有効熱伝導率の Ga₂O₃ 基板厚依存性について、周期加熱放射測温法を用いて評価した結果を図 24 に示す。Ga₂O₃ を薄層化するに従い熱伝導率は単調に増大した。実際、Ga₂O₃ 基板厚 20 μm において Si の 168 W/mK と同等の 170 W/mK、Ga₂O₃ 基板厚 10 μm において GaN の 200 W/mK を上回る 250 W/mK が得られた。これらの値は、図 24 中に破線で示す Ga₂O₃、SiC 両基板の熱伝導率および厚みの比例配分による計算値とほぼ等しい。このことは、接合界面の熱抵抗が小さいことを意味している。以上の結果から、Ga₂O₃ デバイスの放熱特性改善のための手法として、SiC 基板との直接接合および Ga₂O₃ 基板の薄層化が有効であった。

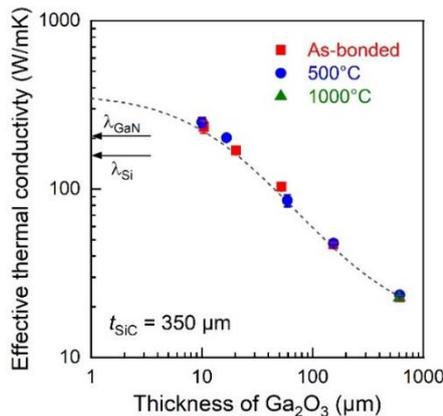


図 24 n-Ga₂O₃ (001)/SiC 接合基板の有効熱伝導率の Ga₂O₃ 基板厚依存性

3. 3. 2 縦型 Ga₂O₃ ショットキーバリアダイオード(SBD)に関する研究開発

縦型 SBD については、オン抵抗 10 mΩcm²以下、耐圧 2 kV 以上のデバイス特性を実現し、実際の製品として重要視される信頼性、耐久性試験を実施する。耐久性試験においては、500 時間以上の通電試験を行い、通電試験後のデバイスの状態、特性、劣化が具合を検証する。

高耐圧、低オン抵抗 Ga₂O₃ SBD に関する研究開発において、令和 3 年度に、TCAD シミュレーションを活用し、デバイスの電界集中点における電界強度の緩和について検討した(図 25)。Ga₂O₃ の絶縁破壊電界はバンドギャップから 8 MV/cm と考えられているが、先行文献を基に算出した絶縁破壊電界は 5 MV/cm 程度である。本研究開発におけるデバイスの設計指針として、電界集中点における電界強度の最大値を 5 MV/cm 以下に設定した。エピ濃度とエピ膜厚をそれぞれ 1.0×10¹⁶ cm⁻³、10 μm としてシミュレーションしたところ、1 段フィールドプレート構造を備えた SBD における最大電界強度は 5 MV/cm を超えており、耐圧 2 kV を超える SBD の作製が困難であることがわかった。一方、2 段フィールドプレート構造では、1 段目のフィールド酸化膜厚を 150 nm 程度、2 段目のフィールド絶縁膜厚を 600~700 nm に設定することにより、各電界集中点における最大電界強度を 5 MV/cm 以下に抑えられることが分かった。令和 4 年度には、2 段フィールドプレート構造の SBD を実現するために、フィールド酸化膜のエッチングによる 2 段フィールドプレート構造の作製プロセスを確立した。2 段フィールドプレート構造の SBD を試作し、オン抵抗率 9.9 mΩcm²、破壊電圧が 2055 V を実証した。またアノード電極端部のフィールド酸化膜のテーパ形状を計算に反映した結果、アノード電極端部の破壊電界は設計基準に近い 5.5 MV/cm が見積もられた。令和 5 年度は、複数のエピウェハを用いて 2 段フィールドプレート構造の SBD を試作し、オン抵抗率 6.9 mΩcm²、破壊耐圧 2082 V を実証した(図 26)。

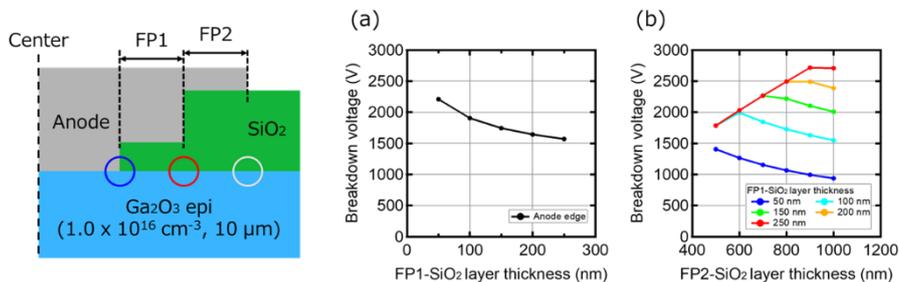


図 25 2 段フィールドプレート構造におけるフィールド絶縁膜厚と破壊電圧の関係

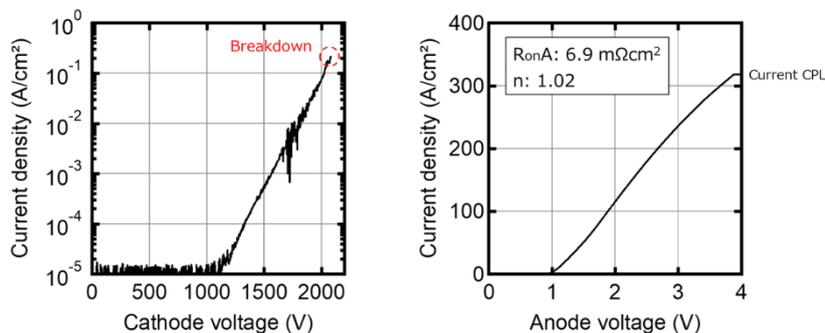


図 26 SBD の逆方向特性と順方向特性

SBD の通電による特性変動検証において、令和 3 年度に、SBD の特性変動を検証するための連続通電試験環境を構築した。まず、ダイシングによるチップ化やワイヤーボンド工程後の電気特性を評価し、簡易モジュールへのアセンブリによる特性変動がないことを確認した。続いて簡易モジュールを用いて 150°C、100 時間の高温保持試験を行い、顕著なオン抵抗の増加がないことを確認した。令和 4 年度に

は、Pt 電極と Ni 電極の熱安定性の確認をおこなった。Pt 電極に比べ Ni 電極は熱の影響を受けやすく、Ni 電極では 150°C 以上、Pt 電極では 250°C 以上の加熱によりデバイスの特性が変動することを確認した。また、簡易モジュールを用いて、室温、印加電圧 300 V、試験時間 100 時間の CBS (Cold Bias Stability) 試験を実施し、試験時間の経過に伴うリーク電流の変動を確認した。令和 5 年度は、500 時間の連続通電試験を実施し、SBD の特性変動量を調べた (図 27)。Pt 電極を用いた SBD の場合、通電による熱量が 430 W/cm² を超えると電気特性がわずかに変動することがわかった。順方向特性の温度依存性から、このときの接合温度は 200°C 程度と見積もられた。また熱量が 660 W/cm² では接合温度は 300°C 程度になり、試験サンプルの一部が破壊に至り、熱量が 880 W/cm² を超えると接合温度は 500°C 程度になり、全てのサンプルが破壊に至った。300°C 以上では放熱不良が発生していると推測でき、パワーデバイスとして利用するには放熱手法を検討することが重要との結論を得た。

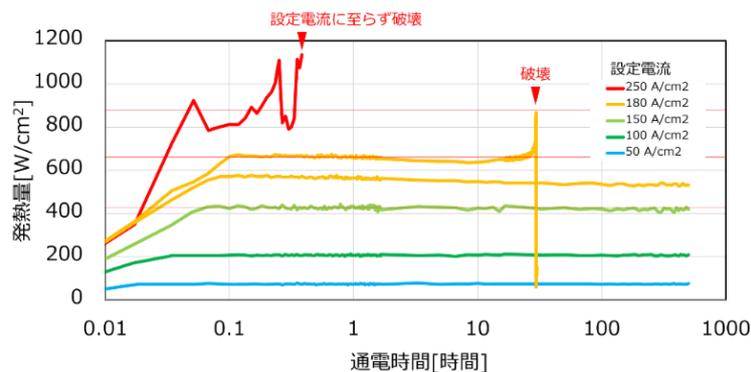


図 27 通電時間に対する発熱量の変化

SiC をはじめとする従来材料に比べ、酸化ガリウムは依然としてエピウェハの品質バラツキが大きく、エピ品質がデバイス特性に直接影響する縦型デバイスの試作において、所望の結果が得られないことが多々あった。そのため最終年度である令和 5 年度では、計画していた人件費の計上を取りやめ、物品費を増額した他、社内の有休設備活用により外注費用を抑制し、エピウェハ購入に充当した。結果、試作において当初算出した電気特性を実証することができた。

3. 3. 3 極限環境用途に向けた横型高周波 Ga₂O₃ トランジスタ

極限環境用の横型トランジスタについては、宇宙空間等の高放射線下での通信を長期間可能とするため、最大発振周波数 20 GHz 以上の高周波電界効果トランジスタにおいて、ガンマ線耐量 1 MGy 以上を実現する。また、地熱発電施設や砂漠での再生可能エネルギー発電施設の無線通信制御並びに機械エンジン部位周辺での無線通信制御等を実現可能とするために必要とされる 300°C 以上における高温環境での動作信頼性を評価する。

横型 Ga₂O₃ トランジスタの開発に向けた多結晶 HfO₂ 系酸化物の薄膜成長と強誘電性の評価等 (公立大学法人大阪 大阪公立大学 藤村研究室)

HfO₂ は、大きなバンドギャップを有するため、CMOS プロセスの high-k 絶縁膜として利用されているが、準安定相である直方晶相が強誘電性を示すことから、Y、Al のドーピングや ZrO₂ との混晶化などの準安定相を得るための研究が盛んに行われている。本研究では、縦型 Ga₂O₃ フィントランジスタのノーマリーオフ動作を実現する手法として、N プラズマ処理により形成する N ドープ Ga₂O₃ を主たるプロセスとして考えている。しかしながら、同プロセスでは所望の特性が得られなかった場合に備えた補完

プロセスとして、強誘電体極薄膜の巨大分極を利用した界面バンドオフセット制御（ノーマリーオフ化）に関する検討も行った。

原子層堆積法（ALD）による強誘電性(Hf,Zr)O₂薄膜の形成プロセス開発では、(-210) Ga₂O₃ 基板への(Hf,Zr) O₂ 薄膜（10 nm）の ALD 成長を行った。結果、非平衡層である直方晶系(Hf,Zr)O₂ 薄膜の形成に成功した（図 28）。さらに、界面分極やトラップなどの影響を分離して考察するために、C-V 測定の掃引速度を 0.05~30 Hz と変化させる高速 C-V 測定やダブルパルス印可分極測定などで強誘電性分極を電気的に確認した（図 29）。この界面の分極量は 9 μC/cm² 程度であり、ノーマリーオフ化には十分な分極量であった。

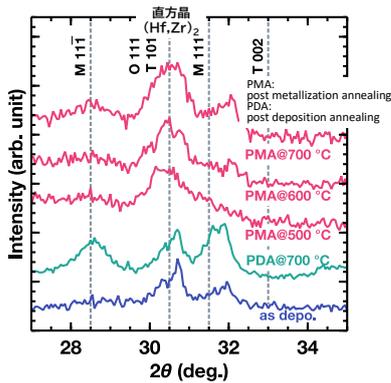


図 28 (Hf,Zr)O₂ 薄膜の熱処理前後の XRD プロファイル

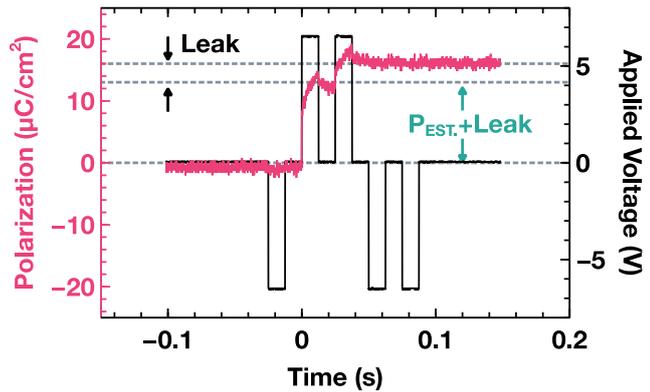


図 29 (Hf,Zr)O₂ 薄膜のダブルパルス電界印可時の分極変化

(Al_xGa_{1-x})₂O₃ バックバリア層を導入した横型高周波 Ga₂O₃ MOSFET の試作と評価（国立研究開発法人情報通信研究機構、公立大学法人大阪 大阪公立大学 東協研究室）

上述、(Al_xGa_{1-x})₂O₃ バックバリア層を導入した短ゲート Ga₂O₃ MOSFET を試作し、そのデバイス特性を評価した。図 30(a)がデバイス構造である。また、ゲート長 $L_g = 150$ nm、ソースドレイン間距離 $L_{s-d} = 2$ μm の MOSFET の DC ドレイン電流-ドレイン電圧 (I_d-V_d) 出力特性とトランスファー特性を図 30(b),(c)にそれぞれ示す。図 30(b)に示すように、ゲート電圧 $V_g = +4$ V、ドレイン電圧 $V_d = +10$ V において、約 230 mA/mm の高いオン電流が得られた。

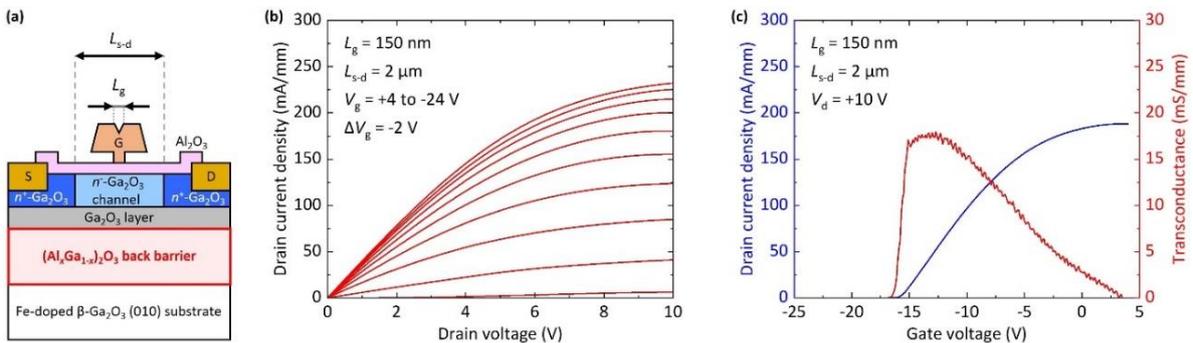


図 30 Ga₂O₃ MOSFET の(a) デバイス構造断面模式図、(b) I_d-V_d 出力特性、(c) トランスファー特性

続いて、同じ MOSFET に対して測定した RF 小信号特性を図 31(a)に示す ($V_d = +10$ V, $V_g = -12$ V)。電流利得 ($|H_{21}|^2$)、最大安定利得/最大有能電力利得 (MSG/MAG)、最大単方向電力利得 (U_g) は S-パラメータから求めた。電流利得遮断周波数 (f_c) は $|H_{21}|^2$ を減衰傾度 -20 dB/decade でフィッティングしたもの

のを外挿することで、また最大発振周波数(f_{max})は MAG と U_g がともに 0 となる周波数として求められ、それぞれ $f_T \sim 10$ GHz、 $f_{max} \sim 24$ GHz であった。また、図 31(b)には、 f_T および f_{max} の L_g 依存性を示している。 f_T および f_{max} は、 L_g が 1 μm から短くなるにつれて単調に増加するが、 $L_g = 120\text{--}150$ nm で最大となった後、次第に減少していった。ここで、過去に我々のグループで試作した、 $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ バックバリア層が無い場合の結果と比較して f_T および f_{max} の値は遜色の無いものが得られた。そして、 f_{max} が最大となるのは、バックバリア層がない場合は $L_g \sim 200$ nm であったのに対し、今回バックバリア層を導入した場合は $L_g = 120\text{--}150$ nm と約 50–80 nm 短ゲート長側にきている。以上のことから、バックバリア層の導入は、短チャネル効果の抑制に関しても一定の効果があったと考えられる。

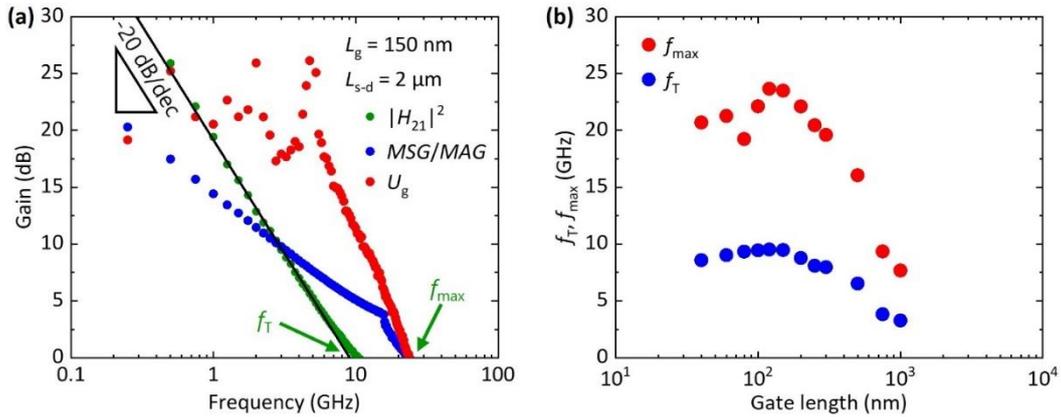


図 31 Ga_2O_3 MOSFET の高周波特性： (a) RF 小信号特性、(b) f_T および f_{max} の L_g 依存性

続いて、現状無線通信に最も一般的に用いられる L 帯 (0.5–1.5 GHz) での使用を想定した Ga_2O_3 MOSFET 構造設計、試作を行った。そして、高周波 Ga_2O_3 MOSFET の 1 GHz でのロードプル測定による RF 大信号デバイス特性評価を実施した。総合的に見て最も優れたデバイス特性が得られた、ゲート長 300 nm の Ga_2O_3 MOSFET の RF 入出力電力特性を図 32 に、出力電力密度、電力利得、電力付加効率のゲート長依存性を図 33(a)–(c)に示す。ゲート長 300 nm で、出力電力密度 5.9 dBm、電力利得 19.5 dB、電力付加効率 8.1%と、優れた RF 出力特性が得られた。なお今回の測定は、評価した Ga_2O_3 MOSFET の入力インピーダンスが高く、マッチング条件が取れていない条件下で実施したため、得られたデバイス特性は最適な条件下で得られるはずのレベルには届いておらず、やや過小評価されたものである。今後、測定環境を改善した後、総ゲート幅の拡大、ドレイン電圧の増大を図ることで RF 出力電力の向上を目指す。

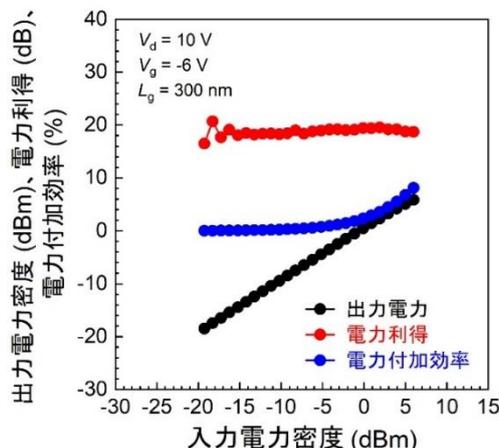


図 32 Ga_2O_3 MOSFET の RF 入出力電力特性 ($L_g = 300$ nm)

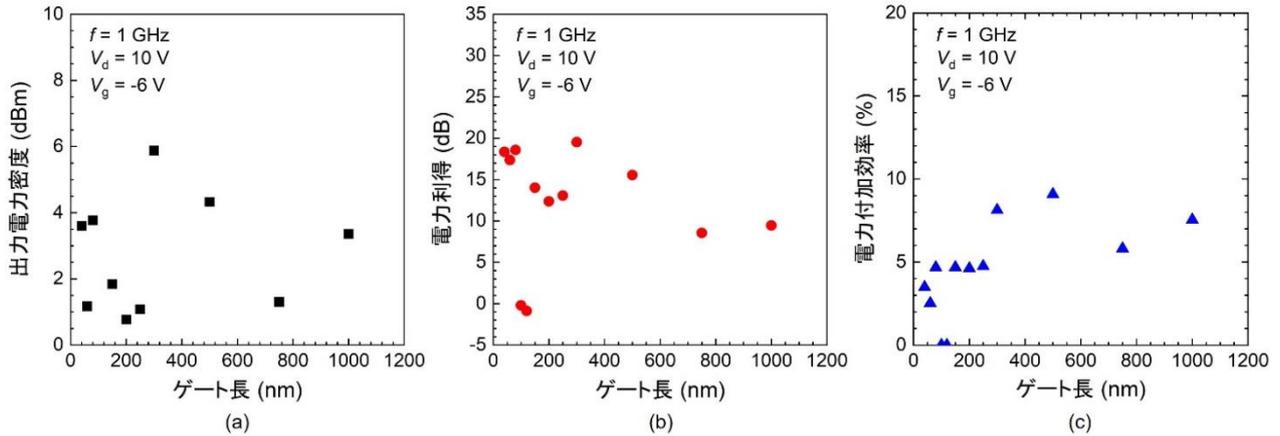


図 33 (a) 出力電力密度、(b) 電力利得、(c) 電力付加効率の L_g 依存性

高周波 Ga_2O_3 FET の高温および放射線下における動作安定性の調査 (公立大学法人大阪 大阪公立大学 東協研究室、国立研究開発法人情報通信研究機構)

また、短ゲート Ga_2O_3 MOSFET のガンマ線照射耐性試験について実施した結果、ゲート長 $4 \mu\text{m}$ の Ga_2O_3 MOSFET では積算照射ドーズ量 1MGy を超えてもほとんどデバイス特性に変化がなかったのに対し、短ゲート Ga_2O_3 MOSFET では 0.1MGy 程度の小さな積算ドーズ量で既にデバイス特性の劣化が認められた。これは、デバイスプロセス (特にイオン注入ドーピング) 技術の最適化が必要であることを示唆している。

極限環境 Ga_2O_3 トランジスタ開発への適用が期待される、東京農工大学で開発中の MOCVD 成長したノンドープ Ga_2O_3 エピタキシャル薄膜の電気的特性評価を実施した。図 34 に示す SBD 構造を試作し、室温における電流-電圧、容量-電圧特性、およびそれらの 300°C までの温度依存性を評価した。 300°C までの温度領域でデバイス特性は安定していると同時に、膜厚 $10 \mu\text{m}$ の MOCVD 成長したノンドープ Ga_2O_3 エピタキシャル薄膜は、熱平衡状態で完全空乏化していることから、その残留電子濃度が $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ 以下と非常に高品質であることが確認された (図 35(a), (b))。

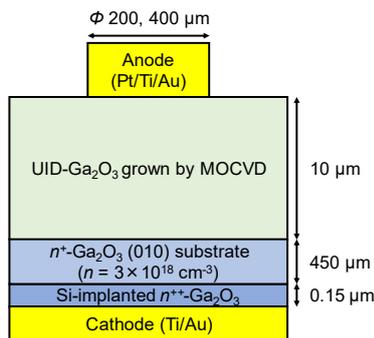


図 34 アンドープ Ga_2O_3 MOCVD エピ膜電気的特性評価用 SBD 構造の断面模式図

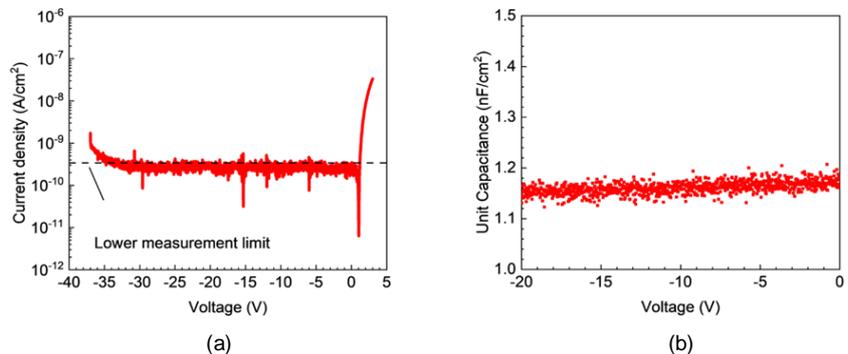


図 35 アンドープ Ga_2O_3 MOCVD エピ膜を用いた SBD の (a) J - V 特性、(b) C - V 特性 (室温)

最大発振周波数 20GHz 以上の Ga_2O_3 FET の試作は達成したが、同デバイスにおいてはガンマ線耐量 1MGy 以上は実現できなかった。今後、微細ゲート FET におけるガンマ線耐性を下げる要因を探り、デバイスプロセス技術の最適化で耐性向上を試みる。また、その利便性から、今後高周波 Ga_2O_3 MOSFET

試作に活用することを予定する MOCVD エピタキシャル膜の高温安定性を確認することができた。

縦型フィントランジスタ開発と同様に、本高周波トランジスタ開発に於いても、情報通信研究機構と大阪公立大グループが各項目を分担するとともに、密接な協力関係のもとで進められた点が良かったと考える。このほぼ同グループに近い密接な共同研究は、費用対効果という面でも有効に働いた。加えて、ガンマ線照射については、大阪公立大学内の施設を無料で利用できたことは、実施予算削減につながった。

4 政策目標（アウトカム目標）の達成に向けた取組みの実施状況

ここでは、各機関における政策目標（アウトカム目標）の達成に向けた取組みの実施状況を報告する。

Orbray 株式会社

Ga₂O₃ 関連マーケット調査

現状、ウェハメーカーはほぼ 1 社独占となっており、当社からウェハが販売されるようになれば、上記観点から大きなメリットであるとのことで、ウェハマーケット参入の余地はあると考えられる。

ユーザーの多くは、企業、大学に問わず研究開発に携わる方々が多く、希望は 2 インチ径サイズであることが判明した。

今後も継続して展示会・学会等を情報収集の場として積極的に参加し、より具体的なウェハ販売内容の検討を行うために引き続きマーケット調査を行っていく予定である。

Ga₂O₃ (010) ウェハ製造手法に関する基本特許となりうる重要知財の獲得

現在、2 件出願を予定している。

国立大学法人東京農工大学

得られた成果に関する特許出願を 1 件実施した。また、査読付き英文学術論文誌に論文 4 件が掲載され、内 3 件は注目度の高さからスポットライト論文に選出されている。MOCVD 法による高純度結晶の高速成長に関しては、論文公開に合わせ報道発表を実施し、新聞および雑誌で取り上げられた。研究成果は 20 件の学会発表（内 4 件は国際会議）で広く公開され、2 件で発表学生が学会賞を受賞している。

国立大学法人京都大学

成果の公表として、査読付きの国際的な学術雑誌に 3 報の論文が、また、査読のない論文として IEEE のプロシーディングスに 1 報が掲載された。さらに、学会発表として国際会議において 8 件、国内学会において 8 件の発表を行った。

公立大学法人大阪 大阪公立大学 藤村研究室

国際社会への脱炭素化に向けた技術イノベーションの創出には、Ga₂O₃ 縦型トランジスタや縦型ショットキーバリアダイオードの低消費電力動作が必要となる。そのためには、深堀エッチング側壁、電極および絶縁体界面におけるダメージ除去技術やノーマリーオフ化に向けた取組みが適切に実施されている。査読付き英文学術論文誌に論文 3 件が掲載された。また、口頭発表論文 8 件（うち査読付き発表 1

件)で広く公開され、3件の受賞(うち1件は学生の講演に対する受賞)があった。

三菱電機株式会社

社内連絡会や国際会議等を通じてユーザーニーズを収集し、ビジネスプロデューサー会議にて情報展開した。社内連絡会等を通じた情報収集では、低価格ウェハによるコストメリットを活かした SiC の置き換えへの期待とともに、SiC に対するコスト面での優位性を確保のために、早期のウェハ大口径化への期待が高いことを報告した。また酸化ガリウム特有の課題として、熱伝導率の低さについて懸念の声が多く、放熱のための加工費を反映したデバイスコストが重要になる。また IWGO2022 をはじめとした各種会議での情報収集の結果として、メインターゲットの一つになり得る車載用途として、デバイスメーカーの共通認識として熱伝導率の低さが課題であり、多くのメーカーにおいて開発着手に様子見の状況であることや、ウェハの大口径化を機にデバイスメーカーでの開発加速とその後の自動車メーカーでの採用検討の連鎖が起こることへの期待が高いことを報告した。本プロジェクトにおける三菱電機の成果物としては、各種学会、論文誌での発表 3 件と、基本特許となりうる重要知財の出願 1 件が完了した。

国立研究開発法人情報通信研究機構、公立大学法人大阪 大阪公立大学 東協研究室

得られた成果を元にした論文 4 編を出版した(1件アクセプト済み、出版準備中)。また、学会発表 47 件(国際会議:招待講演 10 件、一般講演 6 件、国内会議:招待講演 14 件、一般講演 17 件)。これら学会および研究会に参加した際に、国内外の Ga_2O_3 研究開発状況等についての情報収集も合わせて行った。また、受賞も 6 件ある。

アウトリーチ活動としては、上述論文、学会発表による情報発信により、内容に興味を持った 10 社程度の企業の訪問を受けた。その際の打ち合わせ等を通じて、企業による製品化に向けた研究開発の重要性を訴えた。加えて、ビジネスプロデューサー会議の取りまとめを行い、今後の Ga_2O_3 デバイスの産業化・実用化に向けた指針を探った。

5 政策目標(アウトカム目標)の達成に向けた計画

Orbray 株式会社

今後は、自己資金による開発で、2030 年までに 2 インチ径ウェハの量産化及び 4 インチ径ウェハの開発を目指す。予測される波及効果として、他の結晶(例えば、YAG やサファイア)への応用展開が考えられる。

国立大学法人東京農工大学

既に $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のエピ基板の量産技術になるものと目される 2 手法を開発している。特許出願および学術論文発表により独自の結晶成長炉構造が $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のエピ成長に適した基本構造であることが認識されつつある。小片基板から大口径基板に移行し、電機メーカーへのエピ基板供給による我が国における $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ パワーデバイス研究の加速のための後継プロジェクトが第 2 期として採択されている。

国立大学法人京都大学

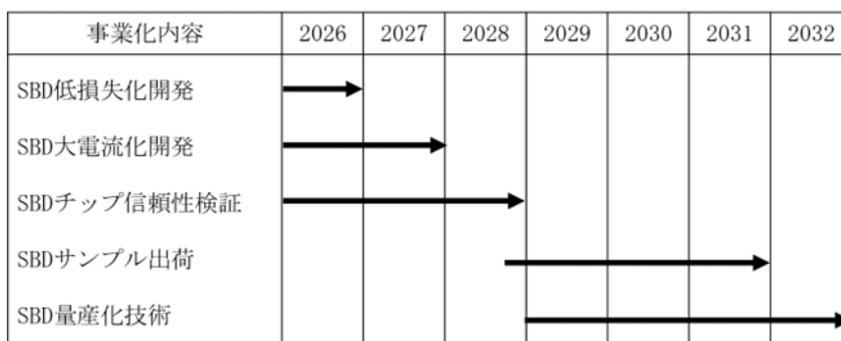
当初目標としていた α - Ga_2O_3 薄膜におけるキャリア密度の制御、高い移動度の実現、比較的良い性能を持つ SBD の作製は達成できているが、より良いデバイスの作製のためには移動度を制限する転位密度の低減が必須である。これはバッファ層の導入により改善できると考えられ、現在、 α 型の Ga_2O_3 と Al_2O_3 から成る混晶の薄膜をミスト CVD 法によりサファイア基板上に作製し、臨界膜厚の組成依存性を調べている。加えて SBD の構造（各層の膜厚や電極のサイズなど）も最適化を目指した研究を続けている。

公立大学法人大阪 大阪公立大学 藤村研究室

情報通信社会のグリーン化を実現しうる次世代デバイスを実社会に実装するために必要な技術を確認するとともに、国際社会への脱炭素化に向けた技術イノベーションの創出を目標とし、 Ga_2O_3 縦型トランジスタや縦型ショットキーバリアダイオードの低消費電力動作を達成することが必要となる。そのためには、深堀エッチング側壁、電極および絶縁体界面におけるダメージ除去技術やノーマリーオフ化に向けた RF プラズマおよび大気圧プラズマを用いた窒化プロセスの最適化および巨大な自発分極を有する強誘電体との接合界面を開発するという研究計画とそのために必要な装置開発が適切に計画されている。

三菱電機株式会社

三菱電機は、縦型ショットキーバリアダイオード(SBD)について、本プロジェクトでの成果と自己資金による開発成果をマージし、高性能化・高信頼性化開発を継続、2030 年までの製品化を目指す（以下の線表を参照）。製品化に必要な信頼性検証に向けて、第一期では通電試験技術を、第二期では耐量評価技術を確立する。本成果は、将来の β - Ga_2O_3 デバイス信頼性に関する規格・標準化に関する議論の土台となる。



アウトカム指標（追跡調査に向けたベンチマーク）

アウトカム指標	目標年度	数値目標等	調査方法	終了条件
製品用途・仕様決定	令和 9 年 (2027)	出荷サンプル仕様決定	ヒアリング	製品の用途・仕様が決定したとき

国立研究開発法人情報通信研究機構 / 公立大学法人大阪 大阪公立大学 東脇研究室

今後も Ga_2O_3 デバイス研究開発成果の発信、および直接的なアウトリーチ活動を通じて、 Ga_2O_3 デバイスの早期実用化・産業化への道筋を付けるべく活動していく。

6 査読付き誌上発表論文リスト

国立大学法人東京農工大学

[1] Kazutada Ikenaga, Nami Tanaka, Taro Nishimura, Hiroataka Iino, Ken Goto, Masato Ishikawa, Hideaki Machida, Tomo Ueno, and Yoshinao Kumagai, “Effect of high temperature homoepitaxial growth of β -Ga₂O₃ by hot-wall metalorganic vapor phase epitaxy”, Journal of Crystal Growth Vol.582 pp126520 1-5 (2022年3月15日) :

[2] Kazutada Ikenaga, Takahito Okuyama, Haruka Tozato, Taro Nishimura, Shogo Sasaki, Ken Goto, Masato Ishikawa, Yoshihiko Takinami, Hideaki Machida, and Yoshinao Kumagai, “Mass spectrometric study of β -Ga₂O₃ growth process by metalorganic vapor phase epitaxy”, Japanese Journal of Applied Physics Vol.62 No.SF ppSF1019 1-6 (2023年4月12日) :

[3] Ken Goto, Taro Nishimura, Masato Ishikawa, Takahito Okuyama, Haruka Tozato, Shogo Sasaki, Kazutada Ikenaga, Yoshihiko Takinami, Hideaki Machida, and Yoshinao Kumagai, “Comparison of triethylgallium and diethylgallium ethoxide for β -Ga₂O₃ growth by metalorganic vapor phase epitaxy”, Journal of Vacuum Science & Technology A Vol.41 No.4 pp042704 1-9 (2023年6月1日) :

[4] Junya Yoshinaga, Haruka Tozato, Takahito Okuyama, Shogo Sasaki, Guanxi Piao, Kazutada Ikenaga, Ken Goto, Yuzaburo Ban, and Yoshinao Kumagai, “High-speed growth of thick high-purity β -Ga₂O₃ layers by low-pressure hot-wall metalorganic vapor phase epitaxy”, Applied Physics Express Vol.16 No.9 pp095504 1-5 (2023年9月28日) :

国立大学法人京都大学

[1] Takeru Wakamatsu, Hitoshi Takane, Kentaro Kaneko, Tsutomu Araki, and Katsuhisa Tanaka, “Influence of HCl concentration in source solution and growth temperature on formation of α -Ga₂O₃ film via mist-CVD process”, Japanese Journal of Applied Physics Vol.62 ppSF1024 1-7 (2023年4月3日) :

[2] Hitoshi Takane, Hirokazu Izumi, Hajime Hojo, Takeru Wakamatsu, Katsuhisa Tanaka, and Kentaro Kaneko, “Effect of dislocations and impurities on carrier transport in α -Ga₂O₃ on m-plane sapphire substrate”, Journal of Materials Research Vol.38 No.10 pp2645-26540 (2023年5月12日) :

[3] Takeru Wakamatsu, Yuki Isobe, Hitoshi Takane, Kentaro Kaneko, and Katsuhisa Tanaka, “Ge doping of α -Ga₂O₃ thin films via mist chemical vapor deposition and their application in Schottky barrier diodes” , Journal of Applied Physics Vol.135 No.15 pp155705 1-8 (2024) (2024年4月21日) :

公立大学法人大阪 大阪公立大学 藤村研究室

[1] K. Naito, K. Yamaguchi, T. Yoshimura, and N. Fujimura, “The ferroelectric orthorhombic phase formation of Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂ thin films on (-201) β -Ga₂O₃ substrate by atomic layer deposition” , Japanese Journal of Applied Physics Vol.62 No.SM ppSM1018 1-5 (2023年8月9日) :

[2] Md. Earul Islam, Kento Shimamoto, Takeshi Yoshimura, Norifumi Fujimura, “Low-temperature homoepitaxial growth of β -Ga₂O₃ thin films by atmospheric pressure plasma-enhanced chemical vapor deposition technique” , AIP Advances Vol.13 No.11 pp115224 1-5 (2023年11月23日) :

[3] Md. Earul Islam, Kento Shimamoto, Takeshi Yoshimura, Norifumi Fujimura, “Dielectric properties of low-temperature-grown homoepitaxial (-201) β -Ga₂O₃ thin film by atmospheric pressure plasma-

assisted CVD” , AIP Advances Vol.14 No.4 pp045003 1-5 (2024 年 4 月 1 日) :

三菱電機株式会社

[1] Yohei Yuda, Kohei Ebihara, Takuma Nanjo, Masayuki Furuhashi, Tatsuro Watahiki, and Kazuyasu Nishikawa, “A simulation study of vertical Ga₂O₃ Schottky barrier diodes using field plate termination”, Japanese Journal of Applied Physics Vol.63 No.2 pp02SP66 1-6 (2024 年 1 月 23 日) :

国立研究開発法人情報通信研究機構 / 公立大学法人大阪 大阪公立大学 東脇研究室

[1] Sandeep Kumar, Hisashi Murakami, Yoshinao Kumagai, and Masataka Higashiwaki, “Vertical β-Ga₂O₃ Schottky barrier diodes with trench staircase field plate”, Applied Physics Express Vol.15 No.5 pp054001 1-3 (2022 年 4 月 8 日) :

[2] Takumi Ohtsuki and Masataka Higashiwaki, “Crystallinity degradation and defect development in (Al_xGa_{1-x})₂O₃ thin films with increased Al composition”, Journal of Vacuum Science Technology A Vol. 41 No.4 pp042712 1-6 (2023 年 6 月 26 日) :

[3] Takumi Ohtsuki, Takafumi Kamimura, and Masataka Higashiwaki, “Suppression of drain current leakage and short-channel effect in lateral Ga₂O₃ RF MOSFETs using (Al_xGa_{1-x})₂O₃ back-barrier”, IEEE Electron Device Letters Vol.44 No.11 pp1829-1832 (2023 年 10 月 24 日) :

[4] Masataka Higashiwaki and Man Hoi Wong, “Beta-gallium oxide material and device technologies”, Annual Review Materials Research, *in press* (2024 年 6 月出版予定) : [招待レビュー論文]

7 査読付き口頭発表論文（印刷物を含む）リスト

公立大学法人大阪 大阪公立大学 藤村研究室

[1] 内藤 圭吾, 山口 晃一, 吉村 武, 藤村 紀文, “ワイドバンドギャップ半導体 Ga₂O₃ 基板上への Hf_xZr_{1-x}O₂ 薄膜の ALD 成長”、第 40 回強誘電体会議 2023、2pages (2023 年 5 月 27 日) :

三菱電機株式会社

[1] Yohei Yuda, Kohei Ebihara, Takuma Nanjo, Masayuki Furuhashi, Tatsuro Watahiki, and Kazuyasu Nishikawa, “A simulation study of vertical Ga₂O₃ Schottky barrier diodes using field plate termination”, Extended Abstracts of the 2023 International Conference on Solid State Devices and Materials, Nagoya, pp621-622 (2023 年 9 月 8 日) :

8 その他の誌上発表リスト

国立大学法人東京農工大学

[1] 熊谷義直、吉永純也、Zhenwei Wang、東脇正高, “MOVPE 法による高純度 β-Ga₂O₃ ホモエピタキシャル層の成長”、情報通信研究機構 2023 年度先端 ICT デバイスラボ成果報告書 pp16 1-2 (2024 年 2 月 29 日) :

国立大学法人京都大学

[1] Takeru Wakamatsu, Yuki Isobe, Hitoshi Takane, Kentaro Kaneko, and Katsuhisa Tanaka, “Schottky barrier diode based on Ge-doped α-Ga₂O₃ films grown by mist-CVD method”, 2023 IEEE CPMT

Symposium Japan (ICSJ) pp192-195 (2023年12月11日) :

国立研究開発法人情報通信研究機構 / 公立大学法人大阪 大阪公立大学 東協研究室

[1] 東脇 正高、“ベータ酸化ガリウムパワー半導体に関する研究開発の動向と課題”、工業材料 Vol.71 No.4 (2023年夏号) pp6-7 (2023年8月1日) :

9 口頭発表リスト

国立大学法人東京農工大学

[1] 熊谷義直、池永中正、石川真人、後藤健、村上尚、町田英明、倉又朗人、山腰茂伸、東脇正高、“ β -Ga₂O₃ 結晶の気相エピタキシャル成長の現状と展望”、化学工学会反応工学部会 CVD 反応分科会主催第 36 回シンポジウム「ワイドバンドギャップ新材料の開拓」(オンライン開催)(2022年7月1日) : [招待講演]

[2] 後藤健、西村太郎、外里遥、池永中正、佐々木捷悟、石川真人、町田英明、熊谷義直、“トリエチルガリウムおよびジエチルガリウムエトキシドをⅢ族原料に用いた β -Ga₂O₃ の MOVPE 成長の比較”、第 83 回応用物理学会秋季学術講演会(オンライン開催)(2022年9月20日)

[3] 池永中正、西村太郎、後藤健、石川真人、町田英明、上野智雄、熊谷義直、“MOVPE 法による β -Ga₂O₃ 基板上ホモエピタキシャル成長の成長温度依存性”、第 83 回応用物理学会秋季学術講演会(オンライン開催)(2022年9月20日)

[4] 外里遥、西村太郎、池永中正、佐々木捷悟、後藤健、石川真人、町田英明、熊谷義直、“飛行時間型質量分析による β -Ga₂O₃ の有機金属気相成長の解析”、第 83 回応用物理学会秋季学術講演会(オンライン開催)(2022年9月21日)

[5] K. Goto, T. Nishimura, H. Tozato, S. Sasaki, K. Ikenaga, M. Ishikawa, H. Machida, and Y. Kumagai, “Comparison of metalorganic vapor phase epitaxy of β -Ga₂O₃ using triethylgallium and diethylgallium ethoxide”, The 4th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (IWGO 2022) (長野県長野市)(2022年10月24日)

[6] K. Ikenaga, T. Nishimura, K. Goto, M. Ishikawa, H. Machida, T. Ueno, and Y. Kumagai, “Temperature dependence of homoepitaxial layer growth by MOVPE on (010) β -Ga₂O₃ substrate”, The 4th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (IWGO 2022) (長野県長野市)(2022年10月24日)

[7] 西村太郎、外里遥、池永中正、佐々木捷悟、石川真人、町田英明、後藤健、熊谷義直、“トリエチルガリウムまたはジエチルガリウムエトキシドを用いた有機金属気相成長法による β -Ga₂O₃ 成長の比較”、日本結晶成長学会ナノ構造・エピタキシャル成長分科会第 14 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会(山口県宇部市)(2022年11月24日)

[8] 田中舞、三浦大、後藤健、熊谷義直、“HVPE 法による β -Ga₂O₃ (010)基板上への N ドープ層のホモエピタキシャル成長”、日本結晶成長学会ナノ構造・エピタキシャル成長分科会第 14 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会(山口県宇部市)(2022年11月24日)

[9] 外里遥、西村太郎、池永中正、佐々木捷悟、後藤健、石川真人、町田英明、熊谷義直、“飛行時間型質量分析器を用いた β -Ga₂O₃ 有機金属気相成長のその場解析”、日本結晶成長学会ナノ構造・エピタキシャル成長分科会第 14 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会(山口県宇部市)(2022年11月24日)

[10] 後藤健、熊谷義直、東脇正高、“HVPE 法を用いた β -Ga₂O₃ (010)ホモエピタキシャル成長における Si

および N ドーピング制御”、フォトニックネットワークシンポジウム 2023（東京都小金井市）（2023 年 2 月 22 日）

[11] 奥山貴仁、外里遥、池永中正、佐々木捷悟、石川真人、町田英明、後藤健、熊谷義直、“高分解能質量分析によるトリエチルガリウムとジエチルガリウムエトキシドの熱分解・燃焼メカニズムの比較”、日本結晶成長学会ナノ構造・エピタキシャル成長分科会第 15 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会（山形県山形市）（2023 年 6 月 15 日）

[12] 新田恭平、後藤健、村上尚、熊谷義直、“ β -Ga₂O₃ (010) オフ基板を用いたホモエピタキシャル成長”、日本結晶成長学会ナノ構造・エピタキシャル成長分科会第 15 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会（山形県山形市）（2023 年 6 月 15 日）

[13] 後藤健、池永中正、外里遥、奥山貴仁、佐々木捷悟、朴冠錫、吉永純也、石川真人、町田英明、熊谷義直、“MOVPE 法による高純度 β -Ga₂O₃ 結晶成長の化学反応メカニズム”、日本結晶成長学会ナノ構造・エピタキシャル成長分科会第 15 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会（山形県山形市）（2023 年 6 月 16 日）：[招待講演]

[14] K. Goto, J. Yoshinaga, G. Piao, K. Ikenaga, H. Tozato, T. Okuyama, H. Murakami, Y. Kumagai, “High-rate growth of pure β -Ga₂O₃ thick layers on 2-inch-diameter substrates by hot-wall metalorganic vapor phase epitaxy”, The 20th International Conference on Crystal Growth and Epitaxy (ICCGE20) (Naples, Italy) (2023 年 8 月 3 日)

[15] K. Ikenaga, J. Yoshinaga, P. Guanxi, H. Tozato, T. Okuyama, K. Goto, Y. Kumagai, “Fast Growth and Characterization of Undoped β -Ga₂O₃ on 2-Inch Substrates Using a Horizontal Hot-Wall MOVPE System”, The 6th U.S. Gallium Oxide Workshop (GOX 2023) (Buffalo, NY, U.S.A.) (2023 年 8 月 15 日)

[16] 吉永純也、朴冠錫、池永中正、外里遥、奥山貴仁、後藤健、熊谷義直、“ホットウォール有機金属気相成長法による 2 インチ基板上高純度 β -Ga₂O₃ 厚膜の高速成長”、第 84 回応用物理学会秋季学術講演会（熊本県熊本市）（2023 年 9 月 19 日）

[17] 新田恭平、後藤健、村上尚、熊谷義直、“ β -Ga₂O₃ (010) 基板上ホモエピタキシャル成長の基板オフ角依存性”、第 84 回応用物理学会秋季学術講演会（熊本県熊本市）（2023 年 9 月 20 日）

[18] 田中舞、河野有佑、後藤健、熊谷義直、“HVPE 法による β -Ga₂O₃ (010) 基板上 Si ドープ β -Ga₂O₃ 層の成長”、第 84 回応用物理学会秋季学術講演会（熊本県熊本市）（2023 年 9 月 20 日）

[19] 吉永純也、佐々木捷悟、後藤健、Zhenwei Wang、東脇正高、熊谷義直、“MOVPE 法による高純度 β -Ga₂O₃ ホモエピタキシャル層の成長”、先端 ICT デバイスラボコラボレーションミーティング 2024（東京都小金井市）（2024 年 1 月 19 日）

[20] 吉永純也、朴冠錫、池永中正、外里遥、奥山貴仁、後藤健、熊谷義直、“(第 55 回講演奨励賞受賞記念講演) 減圧ホットウォール MOVPE 法による高純度ベータ酸化ガリウム厚膜の高速成長及びデバイス応用に向けた今後の展望”、第 71 回応用物理学会春季学術講演会（東京都世田谷区）（2024 年 3 月 23 日）：[招待講演]

国立大学法人京都大学

[1] 高根倫史、泉宏和、金子健太郎、“m 面サファイア基板上 α -Ga₂O₃ のキャリア輸送における転位散乱の影響”、日本材料学会 半導体エレクトロニクス部門委員会／ナノ材料部門委員会 合同研究会（オンライン）（2021 年 11 月 13 日）

[2] 高根倫史、泉宏和、若松岳、田中勝久、金子健太郎、“m 面サファイア上 α -Ga₂O₃ におけるキャリア輸送

- 特性と転位による影響”, 第 69 回応用物理学会春季学術講演会 (神奈川) (2022 年 3 月 25 日)
- [3] 若松岳, 高根倫史, 金子健太郎, 田中勝久, “ α -Ga₂O₃ 厚膜の作製”, 第 69 回応用物理学会春季学術講演会 (オンライン) (2022 年 3 月 25 日)
- [4] Hitoshi Takane, Hirokazu Izumi, and Kentaro Kaneko, “Effects of dislocation on carrier transport in α -Ga₂O₃ on m-plane sapphire substrate”, 2022 MRS Spring Meeting (オンライン) (2022 年 5 月 23 日)
- [5] 高根倫史, 泉宏和, 若松岳, 田中勝久, 金子健太郎, “サファイア基板上 α -Ga₂O₃ のキャリア輸送特性におけるドーピング濃度変化の影響”, 第 16 回日本セラミックス協会関西支部学術講演会 (オンライン) (2022 年 7 月 1 日)
- [6] Hitoshi Takane, Takeru Wakamatsu, Kentaro Kaneko, and Katsuhisa Tanaka, “Depth-dependent dislocation density and electrical properties of α -Ga₂O₃ film on sapphire substrate”, E-MRS 2022 Fall Meeting (Warsaw, Poland) (2022 年 9 月 20 日)
- [7] Takeru Wakamatsu, Hitoshi Takane, Kentaro Kaneko, Tsutomu Araki, and Katsuhisa Tanaka, “Influence of synthesis conditions on growth of α -Ga₂O₃ film in Mist-CVD process”, The 4th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (Nagano) (2022 年 10 月 24 日)
- [8] Hitoshi Takane, Hirokazu Izumi, Hajime Hojo, Takeru Wakamatsu, Katsuhisa Tanaka, and Kentaro Kaneko, “Effect of dislocation and impurity on electrical properties of Si-doped α -Ga₂O₃ on sapphire substrate”, The 4th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (Nagano, Japan) (2022 年 10 月 25 日)
- [9] 若松岳, 磯部優貴, 高根倫史, 金子健太郎, 田中勝久, “ミスト CVD 法による Ge ドープ α -Ga₂O₃ 薄膜の作製と電気伝導特性評価”, 第 17 回日本セラミックス協会 関西支部 学術講演会 (東大阪) (2023 年 7 月 14 日)
- [10] 若松岳, 磯部優貴, 高根倫史, 金子健太郎, 田中勝久, “Ge ドープ α -Ga₂O₃ 薄膜の電気伝導特性とショットキーバリアダイオードへの応用”, 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会 (熊本) (2023 年 9 月 19 日)
- [11] Hitoshi Takane, Shinya Konishi, Yuichiro Hayasaka, Takeru Wakamatsu, Yuki Isobe, Kentaro Kaneko, and Katsuhisa Tanaka, “Dislocation and electrical properties of α -Ga₂O₃ film on sapphire substrate”, The 37th International Korea-Japan Seminar on Ceramics (Gwangju, Korea) (2023 年 11 月 17 日)
- [12] T. Wakamatsu, Y. Isobe, H. Takane, K. Kaneko, K. Tanaka, "Schottky barrier diode based on Ge-doped α -Ga₂O₃ films grown by mist-CVD method", 12th IEEE CPMT Symposium Japan (ICSJ2023) (Kyoto) (2023 年 11 月 17 日)
- [13] T. Wakamatsu, Y. Isobe, H. Takane, K. Kaneko, and K. Tanaka, "Schottky Barrier Diode and MESFET based on Ge-Doped α -Ga₂O₃ Thin Film Grown by Mist-CVD", 2023 MRS Fall Meeting & Exhibit (Boston) (2023 年 11 月 30 日)
- [14] T. Wakamatsu, Y. Isobe, H. Takane, K. Kaneko, and K. Tanaka, "Electrical properties of Ge-doped α -Ga₂O₃", MRM2023/IUMRS-ICA2023 (Kyoto) (2023 年 12 月 13 日)
- [15] 高根倫史, 小西伸弥, 早坂祐一郎, 大多亮, 若松岳, 磯部優貴, 金子健太郎, 田中勝久, “サファイア基板上 α -Ga₂O₃ 薄膜における貫通転位の構造”, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会 (東京) (2024 年 3 月 23 日)

[16] 磯部優貴, 若松岳, 高根倫史, 金子健太郎, 田中勝久, “Hf ドープ α -Ga₂O₃ 薄膜の電気伝導特性”, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会 (東京) (2024 年 3 月 23 日)

公立大学法人大阪 大阪公立大学 藤村研究室

[1] 内藤 圭吾, 山口 晃一, 吉村 武, 藤村 紀文, “ALD 法により Ga₂O₃ 基板上に作製した Hf_xZr_{1-x}O₂ 薄膜の結晶化過程”, 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 (仙台市) (2022 年 9 月 21 日)

[2] 内藤 圭吾, 山口 晃一, 吉村 武, 藤村 紀文, “ALD 法により Ga₂O₃ 基板上に作製した Hf_xZr_{1-x}O₂ 薄膜の結晶化過程 II”, 第 70 回応用物理学会学術講演会 (東京都千代田区) (2023 年 3 月 17 日)

[3] 内藤圭吾, 吉村 武, 藤村 紀文, “ワイドバンドギャップ半導体 Ga₂O₃ 基板上への Hf_xZr_{1-x}O₂ 薄膜の ALD 成長”, 40 回強誘電体会議 (京都市) (2023 年 5 月 27 日)

[4] 内藤 圭吾, Islam Md Earul, 市川 龍斗, 吉村 武, 藤村 紀文, “非平衡窒素プラズマを用いた酸化ガリウム基板の窒化処理手法に関する検討”, 日本材料学会 半導体エレクトロニクス部門委員会 2023 年度 第 1 回研究会 (大阪市) (2023 年 7 月 29 日)

[5] 内藤 圭吾, 山口 晃一, 吉村 武, 藤村 紀文, “Ga₂O₃ 基板上に作製した Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂ 薄膜の強誘電性の評価”, 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会 (熊本市) (2023 年 9 月 21 日)

[6] K. Naito, K. Yamaguchi, I. M. Earul, R. Ichikawa, T. Yoshimura, and N. Fujimura, “Dielectric Characterization of Metal/Ferroelectric-HZO/Ga₂O₃ Interface”, 第 42 回電子材料シンポジウム (奈良市) (2023 年 10 月 12 日)

[7] 高井 亮汰, Md Earul Islam, 内藤 圭吾, 市川 龍斗, 吉村 武, 藤村 紀文, “(010)および(001)β-Ga₂O₃ 基板表面への RF 窒素プラズマ照射効果: ショットキー界面の電気特性”, 日本材料学会 半導体エレクトロニクス部門委員会 2023 年度 第 3 回研究会 (鳥取市) (2024 年 1 月 20 日)

三菱電機株式会社

[1] 湯田 洋平, 海老原 洪平, 南條 拓真, 古橋 壮之, 綿引 達郎, 西川 和康, “縦型 Ga₂O₃ フィールドプレートショットキーバリアダイオードの研究”, 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会 (熊本市) (2023 年 9 月 23 日)

国立研究開発法人情報通信研究機構 / 公立大学法人大阪 大阪公立大学 東脇研究室

[1] Sandeep Kumar, Hisashi Murakami, Yoshinao Kumagai, and Masataka Higashiwaki, “Vertical trench field plated Ga₂O₃ Schottky barrier diodes”, 第 69 回応用物理学会春季学術講演会 (神奈川県相模原市) (2022 年 3 月 22 日)

[2] Masataka Higashiwaki, “Ga₂O₃ for Power Electronics”, IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD 2022) (カナダ バンクーバー / オンライン) (2022 年 5 月 22 日): [ショートコース講演]

[3] 東脇 正高, “酸化ガリウム材料・デバイスの技術動向”, 応用物理学会システムデバイスロードマップ産学連携委員会 (SDRJ) 2022 年度 第 2 回 BC, MtM 合同委員会 (オンライン) (2022 年 6 月 21 日): [招待講演]

[4] 東脇 正高, “酸化ガリウムデバイス技術の研究開発”, 第 1 回サイエンス・サロン ～ナノテクノロジー・新材料技術における最先端研究～ (オンライン) (2022 年 6 月 22 日): [招待講演]

[5] Masataka Higashiwaki, “Gallium oxide: traditional but emerging semiconductor”, International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2022) (オーストラリア シドニー) (2022 年 6 月 29 日)

日) : [プレナリー講演]

[6] Masataka Higashiwaki, Takafumi Kamimura, Sandeep Kumar, Zhenwei Wang, Takahiro Kitada, Jianbo Liang, Naoteru Shigekawa, Hisashi Murakami, and Yoshinao Kumagai, "Ga₂O₃ device technologies: Power switching and high-frequency applications, and beyond", 5th U.S. Gallium Oxide Workshop (GOX 2022) (アメリカ アーリントン) (2022年8月8日) : [キーノート講演]

[7] Masataka Higashiwaki, Takafumi Kamimura, Sandeep Kumar, Zhenwei Wang, Takahiro Kitada, Jianbo Liang, Naoteru Shigekawa, Hisashi Murakami, and Yoshinao Kumagai, "Ga₂O₃ device physics and engineering for power electronics and new directions", 15th Asia Pacific Physics Conference (APPC15) (オンライン) (2022年8月25日) : [招待講演]

[8] Takafumi Kamimura and Masataka Higashiwaki, "Development of etching process for fabrication of Ga₂O₃ MOSFETs with self-aligned recessed gate", 14th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM 2022) (広島県広島市) (2022年8月30日)

[9] 大槻 匠、東脇 正高、"Al 組成の増加に伴う (Al_xGa_{1-x})₂O₃ 薄膜の欠陥の発達"、第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 (宮城県川内市/オンライン) (2022年9月20-23日)

[10] 上村 崇史、東脇 正高、"セルフアラインリセスゲート Ga₂O₃ MOSFET 作製に向けた エッチングプロセスの開発"、第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 (宮城県川内市/オンライン) (2022年9月20-23日)

[11] 東脇 正高、"酸化ガリウムの基礎とパワーデバイスの開発動向"、サイエンス&テクノロジーセミナー「酸化ガリウムの基板製造・薄膜結晶成長技術およびパワーデバイスの開発動向 (オンライン) (2022年9月30日) : [招待講演]

[12] 東脇 正高、"酸化ガリウムの物性と電子デバイス応用"、ワイドギャップ半導体学会 特別公開シンポジウム「ワイドギャップ半導体光・電子デバイスの最前線」(愛知県名古屋市/オンライン) (2022年10月7日) : [チュートリアル講演]

[13] Takumi Ohtsuki and M. Higashiwaki, "Development of defects in (Al_xGa_{1-x})₂O₃ thin films associated with Al solubility limit observed by atomic force microscopy", 4th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (IWGO-4) (長野県長野市) (2022年10月27日)

[14] 東脇 正高、"Beyond 5G における酸化ガリウムデバイスの役割と可能性"、応用物理学会 薄膜・表面物理分科会 第 51 回薄膜・表面物理 基礎講座「Beyond 5G と薄膜・表面物理の接点」(神奈川県横浜市/オンライン) (2022年10月31日) : [招待講演]

[15] 東脇 正高、"酸化ガリウムデバイス開発の現状と今後の展望"、第 28 回 電子デバイス界面テクノロジー研究会 (静岡県三島市) (2023年2月3日) : [招待講演]

[16] 上村 崇史、東脇 正高、"セルフアラインリセスゲート β-Ga₂O₃ MOSFET 作製に向けたエッチングプロセスの開発"、フォトニックネットワークシンポジウム 2023 (東京都小金井市) (2023年2月21日)

[17] 大槻 匠、東脇 正高、"Al 組成の増加に伴って発達する (Al_xGa_{1-x})₂O₃ 薄膜の欠陥"、フォトニックネットワークシンポジウム 2023 (東京都小金井市) (2023年2月21日)

[18] Masataka Higashiwaki, Zhenwei Wang, Kohki Eguchi, Shota Sato, Syoki Taniguchi, Kura Nakaoka, and Takahiro Kitada, "Effects of nitridation on electrical properties of Ga₂O₃ surface", 58th Annual Workshop on Compound Semiconductor Materials and Devices (WOCSEMMAD 2023) (アメリカ サンアントニオ) (2023年2月20日) : [招待講演]

- [19] 東脇 正高、“酸化ガリウム材料・デバイス研究開発の現状”、第 157 回 東工大フロンティア材料研究所学術講演会「低炭素社会に向けた次世代パワエレ最前線 ～材料からデバイスまで～」(オンライン) (2023 年 2 月 27 日) : [招待講演]
- [20] Zhenwei Wang, Takahiro Kitada, Sandeep Kumar, and Masataka Higashiwaki, “Improvement in electrical properties of Ga₂O₃ Schottky barrier diodes by nitrogen radical treatment” , 第 70 回応用物理学会春季学術講演会、第 70 回応用物理学会春季学術講演会 (東京都世田谷区) (2023 年 3 月 16 日)
- [21] 大槻 匠、上村 崇史、東脇 正高、“(Al_xGa_{1-x})₂O₃ バックバリアを用いた横型 Ga₂O₃ MOSFET の高周波特性”、第 70 回応用物理学会春季学術講演会 (東京都世田谷区) (2023 年 3 月 17 日)
- [22] Masataka Higashiwaki, “Current status of gallium oxide material and device technologies” , 35th International Conference on Microelectronic Test Structures (ICMTS-35) (東京都文京区) (2023 年 3 月 27 日) : [チュートリアル講演]
- [23] 東脇 正高、“酸化ガリウムパワー半導体の特性と実用化への展望”、シーエムシー出版セミナー「次世代パワー半導体の高性能化と開発動向」(東京都千代田区) (2023 年 5 月 26 日) : [依頼講演]
- [24] Masataka Higashiwaki, Ken Goto, Hisashi Murakami, and Yoshinao Kumagai, “Ion implantation doping technology for Ga₂O₃ and its application to device fabrication” , The 21st International Workshop on Junction Technology (IWJT2023) (京都府京都市) (2023 年 6 月 8 日) : [招待講演]
- [25] 東脇 正高、上村 崇史、大槻 匠、Sandeep Kumar、Zhenwei Wang、江口 輝生、佐藤 翔太、谷口 奨季、中岡 蔵、村上 尚、熊谷 義直、“ベータ酸化ガリウムデバイス開発の最近の進展”、応用電子物性分科会/結晶工学分科会 合同研究会「次世代ワイドギャップパワーデバイスの最前線」(愛知県名古屋市) (2023 年 6 月 12 日) : [招待講演]
- [26] 東脇 正高、“酸化ガリウム：材料・デバイス技術の現在地”、第 15 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会 (山形県山形市) (2023 年 6 月 15 日) : [チュートリアル講演]
- [27] Masataka Higashiwaki, “Advances and prospects of gallium oxide material and device technologies” , 51st International School & Conference on the Physics of Semiconductors (Jaszowiec 2023) (ポーランド シュチルク) (2023 年 6 月 21 日) : [チュートリアル講演]
- [28] T. Ohtsuki, T. Kamimura, and M. Higashiwaki, “Application of (Al_xGa_{1-x})₂O₃ as back barrier in lateral Ga₂O₃ radio-frequency field-effect transistors”, 65th Electronic Materials Conference (EMC) (アメリカ ゴリータ) (2023 年 6 月 28 日)
- [29] Zhenwei Wang, Sandeep Kumar, Takahiro Kitada, and Masataka Higashiwaki, “Improvement of Ga₂O₃ Schottky barrier diode characteristics by nitrogen radical treatment” , 65th Electronic Materials Conference (EMC) (アメリカ ゴリータ) (2023 年 6 月 29 日)
- [30] 東脇 正高、“酸化ガリウムパワーデバイスの最新技術・研究開発動向と今後の展開”、R&D 支援センターセミナー「酸化ガリウムパワーデバイスの最新技術・研究開発動向と今後の展開」(オンライン) (2023 年 8 月 7 日) : [依頼講演]
- [31] Kura Nakaoka, Syoki Taniguchi, Takahiro Kitada, and Masataka Higashiwaki, “Structural properties of Ga₂O₃ surfaces treated by nitrogen radical irradiation” , 6th U.S. Workshop on Gallium Oxide (GOX 2023) (アメリカ バッファロー) (2023 年 8 月 14 日)
- [32] Shota Sato, Kohki Eguchi, Zhenwei Wang, Takahiro Kitada, and Masataka Higashiwaki, “Effects of oxygen reactive ion etching and nitrogen radical irradiation on electrical properties of Ga₂O₃

- “Schottky barrier diodes”, 6th U.S. Workshop on Gallium Oxide (GOX 2023) (アメリカ バッファロー)
(2023年8月15日)
- [33] 東脇 正高、“ベータ型酸化ガリウムデバイスの開発動向とダイオード、トランジスタ応用への展望”、技術情報協会講演会セミナー「次世代パワーデバイスに向けたデバイス化技術と要素技術の展望」(オンライン)(2023年9月12日): [依頼講演]
- [34] 谷口 奨季、中岡 蔵、東脇 正高、“窒素ラジカルを照射した Ga_2O_3 表面の構造評価”、第84回応用物理学会秋季学術講演会(熊本)(2023年9月20日)
- [35] 江口 輝生、佐藤 翔太、Zhenwei Wang、東脇 正高、“窒素ラジカル照射が Ga_2O_3 ショットキーバリアダイオードの電気的特性に及ぼす影響”、第84回応用物理学会秋季学術講演会(熊本)(2023年9月20日)
- [36] 中岡 蔵、谷口 奨季、東脇 正高、“Effect of nitrogen radical irradiation on Ga_2O_3 surface structures”、第42回電子材料シンポジウム(EMS-42)(奈良県橿原市)(2023年10月12日)
- [37] 佐藤 翔太、江口 輝生、Zhenwei Wang、東脇 正高、“Investigation on effects of oxygen reactive ion etching and nitrogen radical irradiation on Ga_2O_3 (100) and (010) Schottky barrier diodes”、第42回電子材料シンポジウム(EMS-42)(奈良県橿原市)(2023年10月12日)
- [38] 東脇 正高、“酸化ガリウムデバイス技術の現状と今後”、透明酸化物光・電子材料研究会 第6回研究会「新しい機能材料と潮流」(東京都千代田区)(2023年10月20日): [招待講演]
- [39] 江口 輝生、佐藤 翔太、Zhenwei Wang、東脇 正高、“窒素ラジカル照射による Ga_2O_3 (100), (010) ショットキーバリアダイオード電気的特性の改善”、応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第10回講演会(石川県金沢市)(2023年11月30日)
- [40] 谷口 奨季、中岡 蔵、東脇 正高、“窒素ラジカル照射処理を施した Ga_2O_3 表面構造の評価”、応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第10回講演会(石川県金沢市)(2023年11月30日)
- [41] 東脇 正高、大槻 匠、上村 崇史、Zhenwei Wang、佐藤 翔太、江口 輝生、中岡 蔵、谷口 奨季、村上 尚、熊谷 義直、“ β - Ga_2O_3 電子デバイス開発の進展”、学振 R032 委員会 第15回研究会(三重県四日市市)(2024年1月12日): [招待講演]
- [42] Masataka Higashiwaki, Zhenwei Wang, Sandeep Kumar, Takafumi Kamimura, Hisashi Murakami, and Yoshinao Kumagai, “Vertical Ga_2O_3 (010) FinFETs”, 59th Annual Workshop on Compound Semiconductor Materials and Devices (WOCSEMMAD 2024) (アメリカ ラスベガス)(2024年2月21日): [招待講演]
- [43] Masataka Higashiwaki, Zhenwei Wang, Sandeep Kumar, Shota Sato, Kohki Eguchi, Kura Nakaoka, Syoki Taniguchi, Hisashi Murakami, and Yoshinao Kumagai, “Development of vertical Ga_2O_3 power devices and their processing technologies”, 8th IEEE Electron Devices Technology and Manufacturing Conference (IEEE EDTM 2024) (インド ベンガルール)(2024年3月5日): [招待講演]
- [44] Zhenwei Wang, Sandeep Kumar, Takafumi Kamimura, Hisashi Murakami, Yoshinao Kumagai, Masataka Higashiwaki, “ Ga_2O_3 (010) FinFETs with On-Axis (100) Gate Sidewall”, 第71回応用物理学会春季学術講演会(東京都世田谷区)(2024年3月25日)
- [45] 佐藤翔太、峰山 滉正、Wang Zhenwei、東脇正高、“酸素反応性イオンエッチング、窒素ラジカル照射が Ga_2O_3 (010)ショットキーバリアダイオードの温度依存電気的特性に与える影響”、第71回応用物理学会春季学術講演会(東京都世田谷区)(2024年3月25日)

[46] 森原淳、稲嶋仁、Wang Zhenwei、吉永純也、佐藤翔太、江口輝生、熊谷義直、東脇正高、“減圧ホットウォール MOCVD 成長したノンドープ Ga_2O_3 薄膜の電気的特性 (1)”、第 71 回応用物理学会春季学術講演会 (東京都世田谷区) (2024 年 3 月 25 日)

[47] 稲嶋仁、森原淳、Wang Zhenwei、吉永純也、佐藤翔太、江口輝生、熊谷義直、東脇正高、“減圧ホットウォール MOCVD 成長したノンドープ Ga_2O_3 薄膜の電気的特性 (2)”、第 71 回応用物理学会春季学術講演会 (東京都世田谷区) (2024 年 3 月 25 日)

10 出願特許リスト

国立大学法人東京農工大学

[1] 吉永純也、朴冠錫、池永正、熊谷義直、後藤健、佐々木捷悟、結晶膜の製造方法、気相成長装置、及び β -酸化ガリウム結晶膜、日本国、2023 年 5 月 23 日

三菱電機株式会社

[1] 湯田洋平、綿引達郎、海老原洪平、古橋壮之、半導体装置および半導体装置の製造方法、PCT、2024 年 1 月

11 取得特許リスト

特に無し

12 国際標準提案・獲得リスト

特に無し

13 参加国際標準会議リスト

特に無し

14 受賞リスト

国立大学法人東京農工大学

[1] 外里遥、日本結晶成長学会ナノ構造・エピタキシャル成長分科会第 14 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会発表奨励賞、“飛行時間型質量分析器を用いた β - Ga_2O_3 有機金属気相成長のその場解析”、2022 年 11 月 25 日

[2] 吉永純也、第 55 回 (2023 年秋季) 応用物理学会講演奨励賞、“ホットウォール有機金属気相成長法による 2 インチ基板上高純度 β - Ga_2O_3 厚膜の高速成長”、2024 年 3 月 22 日

国立大学法人京都大学

[1] Hitoshi Takane, Young Ceramist Award (Best Oral Presentation), “Dislocation and electrical properties of α - Ga_2O_3 film on sapphire substrate”, 2023 年 11 月 17 日

公立大学法人大阪 大阪公立大学 藤村研究室

[1] 藤村 紀文、フルラス・岡崎記念会 第 15 回岡崎清賞、“電子機能性薄膜材料の研究”、2021 年 11 月

[2] 内藤圭吾、第 40 回強誘電体会議学生最優秀発表賞、“ワイドバンドギャップ半導体 Ga_2O_3 基板上への

Hf_xZr_{1-x}O₂ 薄膜の ALD 成長”、2023 年 11 月

[3] 藤村 紀文、第 78 回日本セラミックス協会「学術賞」、 “機能性セラミックス薄膜プロセッシングと物性制御に関する研究”、2023 年 11 月 30 日

国立研究開発法人情報通信研究機構 / 公立大学法人大阪 大阪公立大学 東脇研究室

[1] 東脇 正高、Clarivate Analytics: Highly Cited Researcher 2021、2021 年 11 月 16 日

[2] 東脇 正高、第 54 回市村学術賞 貢献賞、“酸化ガリウムデバイスの先駆的研究開発”、2022 年 4 月 15 日

[3] 東脇 正高、IEEE Fellow、“For contributions to gallium oxide electronics and millimeter-wave gallium nitride transistors”、2023 年 1 月 1 日

[4] 東脇 正高、Research.com: Electronics and Electrical Engineering Leader Award、2023 年 3 月 7 日

[5] 東脇 正高、Clarivate Analytics Highly Cited Researcher 2023、2023 年 11 月 15 日

[6] 上村 崇史、IOP Outstanding Reviewer Awards 2023、2024 年 2 月 29 日

1 5 報道発表リスト

国立大学法人東京農工大学

(1) 報道発表実績

[1] “高純度 β 型酸化ガリウム結晶の高速成長を有機金属気相成長法で実現”、2023 年 9 月 28 日

(2) 報道掲載実績

[1] “β 型酸化ガリウム結晶 半導体向け高速成長法”、日刊工業新聞 25 面、2023 年 10 月 5 日

[2] “次世代半導体 安価に 東京農工大が新製法”、日経産業新聞 7 面、2023 年 10 月 6 日

[3] “大陽日酸 酸化ガリウムの高速成長技術、東京農工大と共同開発”、ガスレビュー No.1018 p18、2023 年 10 月 15 日

[4] “Scientists grown Ga₂O₃ films with MOVPE”, Compound Semiconductor News (Web), 2023 年 10 月 18 日

[5] “Tokyo University of Agriculture and Technology and Taiyo Nippon Sanso achieve high-speed growth of high-purity gallium oxide films”, Semiconductor Today (Web), 2023 年 10 月 18 日

[6] “東京農工大学と大陽日酸 MOVPE 法で酸化ガリを成長”、電子デバイス産業新聞 11 面、2023 年 10 月 19 日

1 6 ホームページによる情報提供

特に無し

研究開発による成果数

	令和3年度	令和4年度	令和5年度	合計
査読付き誌上発表 論文数	1件 (1件)	1件 (1件)	13件 (13件)	15件 (15件)
査読付き口頭発表 論文数 (印刷物を含む)	0件 (0件)	0件 (0件)	2件 (1件)	2件 (1件)
その他の誌上発表 数	0件 (0件)	0件 (0件)	3件 (1件)	3件 (1件)
口頭発表数	4件 (0件)	38件 (14件)	49件 (14件)	91件 (28件)
特許出願数	0件 (0件)	0件 (0件)	2件 (1件)	2件 (1件)
特許取得数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)
国際標準提案数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)
国際標準獲得数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)
受賞数	2件 (1件)	4件 (2件)	6件 (3件)	12件 (6件)
報道発表数	0件 (0件)	0件 (0件)	1件 (0件)	1件 (0件)
報道掲載数	0件 (0件)	0件 (0件)	6件 (2件)	6件 (2件)