

次世代省エネ型デバイス関連技術の開発・実証事業（第二期）
Development and demonstration project of next-
generation energy-saving device-related technology
(second period)

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

研究開発期間 令和6年度～令和7年度

【Abstract】

This study conducted comprehensive research and development on materials and devices involving gallium oxide (Ga_2O_3), which is a promising semiconductor for next-generation energy-saving applications. In the material development phase, the melt growth of Ga_2O_3 bulk single crystals and their corresponding wafer manufacturing processes were advanced concurrently with various epitaxial thin-film growth technologies, such as halide vapor phase epitaxy (HVPE), metalorganic chemical vapor deposition (MOCVD), and mist chemical vapor deposition (mist-CVD). Furthermore, fundamental device processing technologies were established, including surface nitridation, hot ion implantation doping, and laser dicing. Vertical Ga_2O_3 field-effect transistors (FETs) and Schottky barrier diodes (SBDs) were fabricated and evaluated, focusing on enhancing breakdown voltage and minimizing on-resistance for power applications. Regarding power SBDs, the degradation of device characteristics under electrical stress was also investigated. Additionally, lateral high-frequency Ga_2O_3 transistors for extreme environments and high-frequency vertical SBDs for wireless power transmission were developed. Most of the technologies developed in this project are the state-of-the-art on a global scale.

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）
 - 松尾 大輔（日新イオン機器株式会社）
 - 平岡 知己（株式会社レーザーシステム）
 - 綿引 達郎（三菱電機株式会社）
- **総合ビジネスプロデューサ** 益山 克宏（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** 湯本 雅彦（Orbray 株式会社）

田中 剛（国立大学法人東京農工大学）
 藤田 静雄（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）
 阪本 崇（日新イオン機器株式会社）
 土内 彰（株式会社レーザーシステム）
 西川 和康（三菱電機株式会社）

○ 研究開発期間 令和 6 年度～令和 7 年度

○ 研究開発予算 総額 7 8 8 百万円

（内訳）

令和 6 年度	令和 7 年度
¥391,076,000	¥397,084,000

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、次世代半導体市場での発言力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）高品質単結晶バルク、ウェハ製造技術の確立・実証（Orbray）

- ・ 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、ウェハ製造技術を、X 線ロッキングカーブ測定のパーク半値幅が 350 arcsec 以下である全面単結晶で確立し、高品質酸化ガリウムウェハを試作する
- ・ 結晶品質評価（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。

Si ドープ n 型結晶は、φ 2 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を行うことで、多結晶を無くすことができ、結晶粒界や双晶、クラックは完全に無くすことはできなかったが低減

可能な育成条件を確立できた。結晶性は、エッチピット密度（EPD）は部分的に目標値を達成できなかったが、X線ロッキングカーブ測定の半値幅は 350 arcsec 以下であることは達成した。一方、Fe ドープ高抵抗型結晶のほうは、φ2 インチ径まで広げられず、上記結晶欠陥の抑制までは至らず、また EPD や X線ロッキングカーブの半値幅は目標を未達成に終わった（図 1）。

φ2 インチ（010）面ウェハ製造技術では、クラックを含有しているためウェハ加工中に割れてしまう円柱状結晶の代わりに、回転しない EFG 法で育成した結晶を用いて、φ2 インチウェハ加工条件の最適化を行い、割れないエピレディウェハ製造条件を確立した（図 2）。

ウェハ品質評価の結果を下図に示す。いずれも目標値を達成した。そして、n 型 φ2 インチウェハをイ）の担当チームへ提供し、問題なくホモエピタキシャル成長できることを確認し、Ga₂O₃ パワーデバイスの産業化に向け大きく前進できた。

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。

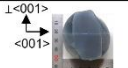
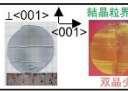
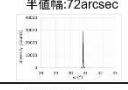
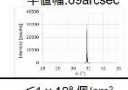
結晶種類	Siドープn型	Feドープ高抵抗型
結晶回転数	0.3 rpm	2 rpm
引上げ速さ	5 mm/h	10 mm/h
結晶写真		
		
(010)面観察	 結晶粒界有 双晶少	 結晶粒界有 双晶少
(020) <001> X線入射	 半値幅:72arcsec	 半値幅:1551 arcsec
(020) ⊥<001> X線入射	 半値幅:69arcsec	 半値幅:1459 arcsec
EPD	≤1×10 ⁸ 個/cm ²	≤1×10 ⁸ 個/cm ²

図 1 φ2 インチ結晶

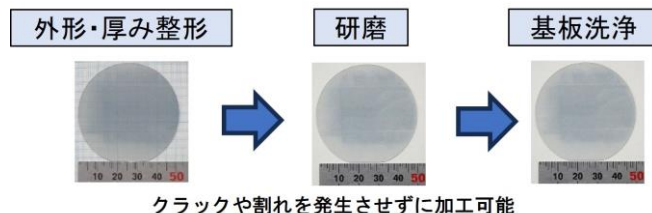


図 2 φ2 インチウェハ

表 1 ウェハ品質評価結果

n型結晶				高抵抗型結晶
平坦度（反り P-V）[μm]	抵抗率[Ωcm]	n型キャリア密度[個/cm ³]	移動度[cm ² /(V・s)]	抵抗率[Ωcm]
 4	0.017	5.4×10 ¹⁸	68	10 ¹⁴

3. 2. イ）Ga₂O₃ 薄膜エピタキシャル成長技術に関する研究開発（東京農工大学）

エ）「Ga₂O₃ デバイス技術に関する研究開発」で必要となる HVPE および MOCVD 法による Si ドープホモエピタキシャル層付ウェハ供給のため、その製造技術開発を行うと共に、ホモエピタキシャル層付ウェハの量産化技術確立を念頭におき、基板サイズを従来の小片（10×15 mm²）から 2 インチ径に拡大することを目標とする。HVPE 法と MOCVD 法の優劣比較と並行し 2 インチ基板面内の膜厚および不純物濃度の分布を最小化し、量産に用いることが可能な技術を確立することを目標とする。

3. 2. 1. HVPE 法による β-Ga₂O₃ (010) ホモエピタキシャル薄膜成長技術開発

・ GaCl₃ を Ga 源とする THVPE 法によるアンドープ層のホモエピタキシャル成長で、残留キャリア密度 $n < 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ を達成する。

- ・ THVPE 法において SiCl_4 供給による意図的な Si ドーピングで、n 型キャリア密度 10^{15} cm^{-3} 以上の範囲での制御を達成する。また、原料の高純度化により Si 以外の不純物の取り込みを SIMS のバックグラウンド未満に低減する。
- ・ THVPE 法で 2 インチ径基板上に高速で $10 \text{ } \mu\text{m}$ 以上の厚さの Si ドープホモエピタキシャル薄膜を成長可能な成長炉を開発する。

O_2 との反応時の自由エネルギー変化が GaCl に比して小さく、気相中での粉体生成抑制が可能な三塩化ガリウム (GaCl_3) を Ga 源に使用する常圧 THVPE 法を用い、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(010)$ 基板上へのホモエピタキシャル層成長において、成長層のキャリア密度制御技術の確立を検討した。成長炉内で金属ガリウム (Ga) と塩素 (Cl_2) ガスを二段階反応させ GaCl_3 を生成する炉内原料生成 THVPE 法、固体の GaCl_3 を充填した容器を炉外に接続し、容器温度と通過キャリアガス流量で GaCl_3 供給を制御する原料外部供給 THVPE 法の 2 方式で検討を行った。

炉内原料生成 THVPE では、アンドープで残留キャリア密度 $n < 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ であった。そこで SiCl_4 供給を $R_{\text{Si}} [= P^{\circ}_{\text{SiCl}_4} / (P^{\circ}_{\text{GaCl}_3} + P^{\circ}_{\text{SiCl}_4})]$ ($P^{\circ}_{\text{SiCl}_4}$ および $P^{\circ}_{\text{GaCl}_3}$ はそれぞれ SiCl_4 と GaCl_3 の供給分圧) を変化させ供給し、Si 濃度 (キャリア密度) への影響を調査した。その結果、Si 以外の不純物濃度は二次イオン質量分析 (SIMS) のバックグラウンド未満で、かつ Si 濃度に等しい 10^{16} 台中盤 $\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ のキャリア密度を達成できた (図 3)。炉内原料生成 THVPE では原料外部供給 THVPE に比べ、Si 取り込み率の減少が見られるが、これは炉内原料生成 THVPE (ホットウォール加熱) では気相中で SiCl_4 消費 (O_2 との反応) が進むのに対し、原料外部供給 THVPE (コールドウォール加熱) ではそれが抑制されるためと考えられる。よって精密なドーピング制御にはコールドウォール加熱方式や減圧炉の採用が必須と思われる。原料外部供給 THVPE においては、キャリア密度の線形的な制御が達成できたものの、Si のバックグラウンド濃度 ($9.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) が高いという問題が課題として残った。原因は原料容器への GaCl_3 充填時のハンドリング、グローブボックス内の露点等に起因すると考えられ、今後、充填工程の環境管理の徹底で、目標とする 10^{15} cm^{-3} 未満の残留キャリア密度が達成可能と考えられる。

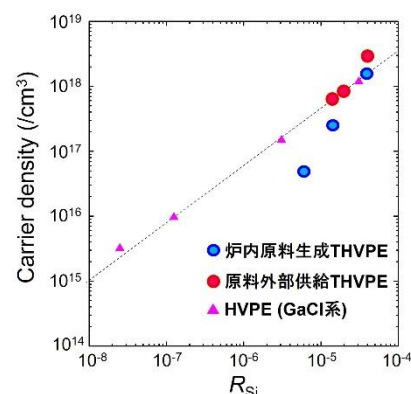


図 3 炉内原料生成 THVPE および原料外部供給 THVPE 成長ホモエピタキシャル層のキャリア密度の R_{Si} 依存性

上述の結果を受け、2 インチ径基板を収容可能で減圧下成長が可能な THVPE 成長炉を設計・稼働させた。本炉の基板近傍構造は後述の減圧・ホットウォール MOCVD 炉と同一で、両炉の結果を化学反応の見地から対等に比較できるよう工夫した。まず、 GaCl を Ga 源とする HVPE モードで成長を検証した。炉内圧力 95 kPa、成長温度 1000°C、 GaCl 供給速度 180 $\mu\text{mol/min}$ にて O/Ga 供給比 10~100 で 2 インチ径 c 面サファイア基板上に $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 成長を行った。図 4 に各成長層表面のノマルスキー微分干渉コントラスト顕微鏡像を示す。O/Ga 供給比 10 では粉体降下が無いが、20 以上では粉体降下が生じ、O/Ga 供給比の増加によって粉体降下は激化した。一般に常圧 (101 kPa) HVPE による $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 成長では粉体降下のため O/Ga 供給比が 10 程度に制限されるが、本炉でも同様の挙動が見られることが確認できた。

結晶中の O 空孔形成抑制の見地からは高い O/Ga 供給比での成長が望ましい。そこで O/Ga 供給比 100 において成長部の圧力を低下させ、成長速度と粉体降下の有無を原料ノズルからの距離に対し解析した (図 5)。図横軸で 70 mm の位置が 2 インチ径基板の中心に該当し、本検討では基板回転を止め各

位置における成長速度を得た。本結果より O/Ga 供給比 100 であっても、炉内を減圧し原料分子の速度を上げることでノズルから基板に至る過程で臨界核半径を超えることが無くなり、粉体降下が抑制されることが確認された。現状、粉体降下無しでの成長速度は減圧・ホットウォール MOCVD 炉において同等の Ga 原料供給速度を用いた時の値 ($4.7 \mu\text{m/h}$) に比べ小さいが、炉内のガスフローの調整で増速が可能と期待される。図 6 に炉内圧力 40 kPa で成長した後のサファイア基板の全景写真を示す。基板全面に $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 成長が見られたが、膜厚均一性は (最大膜厚－最小膜厚) / 平均膜厚で 15.6% であった。この値は成長中に基板を回転させる、また、ホモエピタキシャル成長にすることで小さくできると期待される。以上、2 インチ径基板上に $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 成長可能な HVPE (THVPE) 炉の開発を達成した。

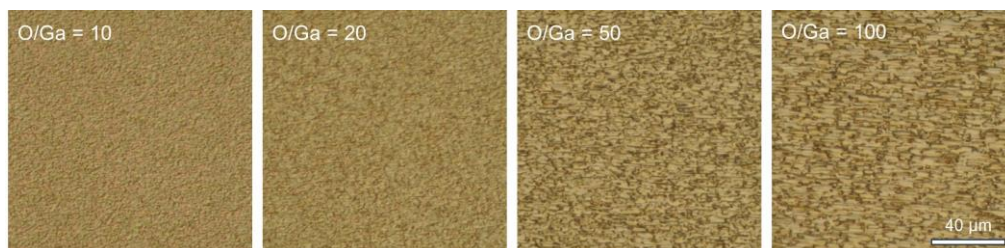


図 4 サファイア基板上に炉内圧力 95 kPa で成長した $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の表面モロロジーの O/Ga 供給比依存性

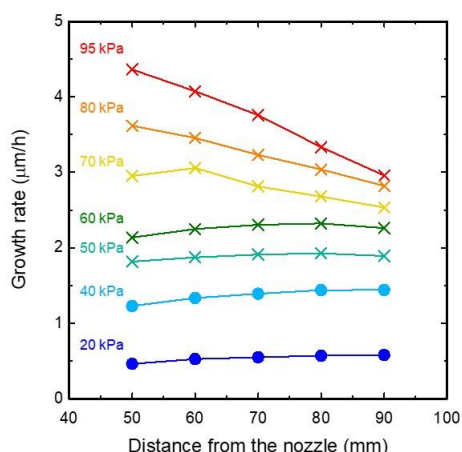


図 5 成長速度の炉内位置および圧力依存性 (×は粉体降下有、●は無し)

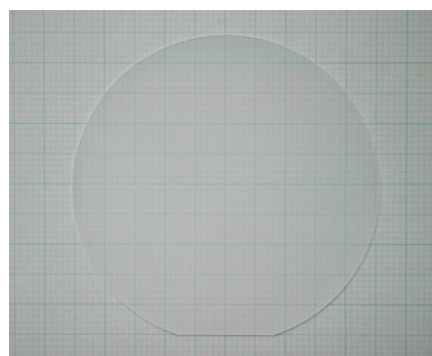


図 6 炉内圧力 40 kPa で $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 成長後のサファイア基板写真

3. 2. 2 MOCVD 法による $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(010)$ ホモエピタキシャル薄膜成長技術開発

- ・ 減圧・ホットウォール MOCVD 炉の改造により、収容可能な基板サイズを 2 インチ径基板にまで引き上げ、2 インチ径 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(010)$ 基板上のホモエピタキシャル成長において、膜厚の面内分布が (最大膜厚－最小膜厚) / 平均膜厚で 5% 未満となる均一ホモエピタキシャル薄膜成長を実現する。
- ・ 2 インチ径 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(010)$ 基板上への Si ドープ n 型ホモエピタキシャル薄膜成長において、Si 濃度 $10^{16} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の制御および面内の Si 濃度分布として (最大値－最小値) / 平均値で 5% 未満を達成する。

第 1 期に開発したトリメチルガリウム (TMGa) と酸素 (O_2) を原料ガス、アルゴン (Ar) をキャリアガスに用いる $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の減圧・ホットウォール MOCVD 炉の原料供給ノズルを 2 インチ径基板に対応可能なものに再設計し設置した。基板はア) 「高品質単結晶 Ga_2O_3 バルク、ウェハ製造技術に関する研究開発」で開発された 2 インチ径 n⁺ Si ドープ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(010)$ 基板 [キャリア密度 $n \sim 9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、移動度 $\mu \sim 80 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$] の供給を受け用いた。TMGa 由来の炭素と水素による MOCVD 成長層の汚染を

回避するため、最適化により見出された炉内圧力 3.4 kPa、成長温度 1000°C、TMGa 供給速度 $f_{\text{TMGa}} = 180 \mu\text{mol/min}$ 、O/Ga 供給比 970、成長中の基板面内回転 1 rpm にて約 10 μm 厚のホモエピタキシャル層を成長し、面内の膜厚の分布を調査した。図 7 はホモエピタキシャル成長後の 2 インチ径 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(010)$ 基板の全景写真である。クラック等の発生は全く見られず、2 インチ径基板上にホモエピタキシャル成長が達成された。表面ヒロック除去の目的で表面に化学機械研磨 (CMP) を施した後、図中 B から E 方向にかけてのホモエピタキシャル成長層の厚さを FT-IR で測定した結果を図 8 に示す。ウェハ全面に約 10 μm のホモエピタキシャル層が均一に存在し、(最大膜厚－最小膜厚) / 平均膜厚 = 3.9%と目標値が達成されており、ホモエピタキシャル層付ウェハ量産体制の成立可能性が実証された。

次に、上記の成長条件で Si ドーピングを試みた。ドーピングガスにはテトラメチルシラン (TMSi) を用い、Si 供給比 $R_{\text{Si}} = f_{\text{TMSi}} / (f_{\text{TMGa}} + f_{\text{TMSi}})$ をパラメータとし $9.7 \times 10^{-8} \sim 8.0 \times 10^{-4}$ の範囲で変化させた (f_{TMSi} は TMSi の供給速度)。成長層中の Si 不純物濃度 [Si] を SIMS で測定したところ、[Si] が R_{Si} に比例しており、膜中の深さ方向で均一に $2.1 \times 10^{15} \sim 1.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の広い範囲で Si 濃度を制御でき目標を達成できていることが確認された。また、 $R_{\text{Si}} = 5 \times 10^{-7}$ (目標 [Si] $\sim 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) の時の面内 5 点 (位置関係は図 7 と同一) における各不純物濃度の測定結果を表 2 に示すが、水素 (H) と炭素 (C) 不純物については全点で SIMS のバックグラウンド濃度未満で、Si についてはほぼ目標値に等しく、面内分布は (最大値－最小値) / 平均値 = 4.2%と目標が達成できており、量産体制の成立可能性が実証された。

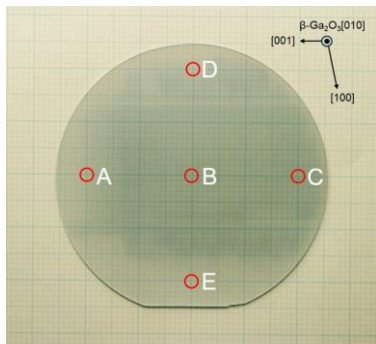


図 7 2 インチ径 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(010)$ ホモエピタキシャルウェハ写真

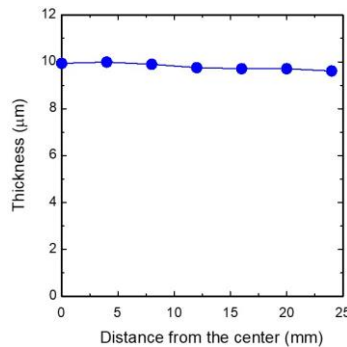


図 8 2 インチ径 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3(010)$ 基板上的ホモエピタキシャル層の膜厚分布

表 2 2 インチ径基板上ホモエピタキシャル層中の不純物濃度 (単位 cm^{-3})

Position	H	C	Si
A	$<3 \times 10^{16}$	$<1 \times 10^{16}$	1.20×10^{16}
B	$<3 \times 10^{16}$	$<1 \times 10^{16}$	1.15×10^{16}
C	$<3 \times 10^{16}$	$<1 \times 10^{16}$	1.20×10^{16}
D	$<3 \times 10^{16}$	$<1 \times 10^{16}$	1.18×10^{16}
E	$<3 \times 10^{16}$	$<1 \times 10^{16}$	1.20×10^{16}

3. 3. ウ) Ga_2O_3 デバイスプロセス要素技術に関する研究開発

エ) 「 Ga_2O_3 デバイス技術に関する研究開発」で必要となる各種デバイスプロセス要素技術を開発する。

3. 3. 1. 表面窒化プロセス技術開発

Ga_2O_3 中で窒素 (N) はディープアクセプタとして振る舞うことから、N ドープ Ga_2O_3 は電流ブロック層やビルトインポテンシャルに相当するエネルギー障壁を用いたショットキーゲート型ジャンクション FET が期待できる。本研究では、 Ga_2O_3 の表面窒化に適した手法を探索し、その条件を最適化することを目的として実施する。

大気圧プラズマと RF プラズマを用いた表面窒化プロセス技術開発 (大阪公立大学 藤村研究室)

縦型フィンランジスタのフィン側壁に、窒素 (N) ドープ Ga_2O_3 を形成するための RF プラズマプロセスと大気圧プラズマプロセスによる窒化技術の開発を行った。大気圧および RF 窒素プラズマを用

いた照射実験を 10–100 W の照射条件で行った。RMS はどちらのプラズマを用いても 0.2 nm 程度に減少した。RF プラズマプロセスであるにもかかわらず、大気圧プラズマ放電中で得られる分子状 N 活性種 (N_2 2nd p.s.) (図 9) の照射効果に着目して、放電圧力、RF 電力、酸素窒素比率を変化させた検討を行った。また、基板の前処理に関しても検討を行った。HAXPES(Spring-8) を用いることによって、N1s 軌道から明確な窒素のドーピングが確認できた (図 10)。また、Ga 2p 軌道を用いて Ga-N 結合の存在が示唆された。ショットキーアノード電極を作製したショットキーバリアダイオード (SBD) の容量–電圧 (C – V) 特性から窒化した試料の N_d – N_a の減少が確認される (図 11)。表面 4 nm 程度の深さではあるが、N が導入されたことで、この領域のフェルミ準位は N 準位付近にピン止めされ、空乏層幅が増加したと考えられる。基板表面に導入された N 準位が $E_v + 1.3$ eV の位置に形成されたとすると、その時の理想的なビルトインポテンシャルはおよそ 3.4 eV となり、ゼロバイアス電圧下での空乏層幅は 250 nm 程度となる。これは、図 11 の C – V 特性から得られたキャリア減少領域の厚みとおおよそ一致する。この C – V 特性は掃引速度を 0.2 Hz で取っており (ファンクションジェネレーターにより発生させた、0.1–1000 Hz の三角波をバイアス電圧として掃引し、その三角波に対して、CV analyzer で測定)、ほぼヒステリシスがないことから、 N_2 2nd p.s. を用いたプラズマプロセスがダメージレスであることが示唆される。図 12 に示したように、電流–電圧 (I – V) 特性から約 0.5 V 程度のビルトインポテンシャルの増加が確認された。

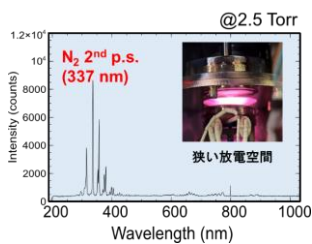


図 9 RF プラズマ放電とその発光分析

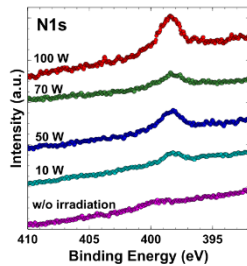


図 10 HAXPES の N1s スペクトル

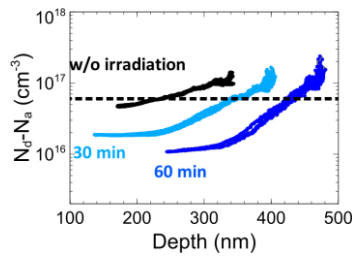


図 11 N_d – N_a 深さ方向プロファイル

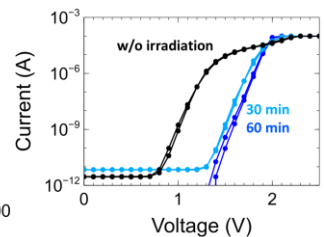


図 12 I – V 特性

N ラジカルおよび反応性 N イオン照射による表面窒化プロセス開発 (大阪公立大学 東協研究室)

MBE 装置の窒素 (N) プラズマセルによる N ラジカル照射は、早期にプロセス条件が確立し、その表面ダメージ回復効果を活用することで、後述するように縦型 Ga_2O_3 フィン FET のデバイス特性改善につなげることが出来た。ただ、この手法では、 Ga_2O_3 基板の濡れ性が悪く、MBE 成長室内に搬入する際に落下する事故が複数回生じた。そのため、より確実かつ簡便な手法として、反応性イオンエッチャー (RIE) を用いた N イオン照射を試みたところ、N 原子を Ga_2O_3 表面からより深くドーピング出来ることが分かった。図 13 に、 Ga_2O_3 (100), (010), (001) 基板に対して、 N_2 RIE (RF 200 W、30 分間) 前後およびアニール後 (1000°C、20 分間) の N 濃度の深さ方向分布を示す。 N_2 RIE 処理により、N が Ga_2O_3 結晶内に注入されていること、(010) 面では特に深くまで分布していることが分かる。また、アニール処理後全ての面指数で N 濃度分布は広がりを見せたが、特に (010) 面で深さ 150 nm 程度まで広がっている。これは、結晶構造的に [010] 方向に大きな空隙があることによるチャネリング効果であると考えられる (図 14 参照)。図 15 に、同プロセスにより形成した N ドープ Ga_2O_3 層の中で、特に顕著な電流ブロック特性を示した N ドープ Ga_2O_3/n - Ga_2O_3 (010) SBD の順方向、逆方向 I – V 特性を示す。順方向 J のターンオン V が正方向にシフトするとともに、大きな J の減少が確認された。また、逆方向オフ耐圧についても増大した。これらは、 N_2 RIE プロセスにより導入した N が、 Ga_2O_3 結晶格子に取り込まれ、電気的に活性化し、ディープアクセプタとして機能していることを示している。

本課題については、目標とした MBE を用いた Ga_2O_3 表面窒化プロセスを開発し、縦型フィン FET への適用を果たした。更に、当初予定していなかった、より簡便な窒化プロセスとして N_2 RIE 処理を新規開発することに成功した。

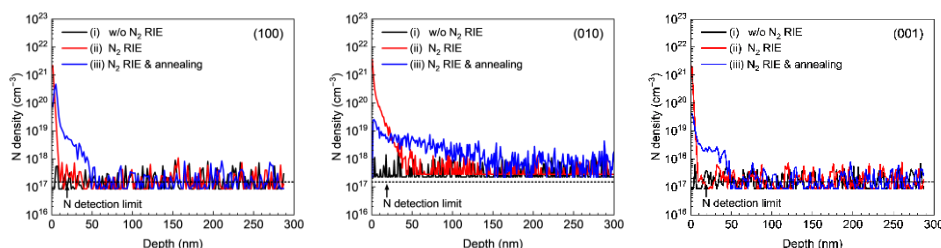


図 13 Ga_2O_3 (100), (010), (001) 基板中 N 濃度の深さ方向プロファイル

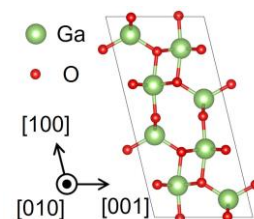


図 14 [010] 方向から見た Ga_2O_3 結晶格子

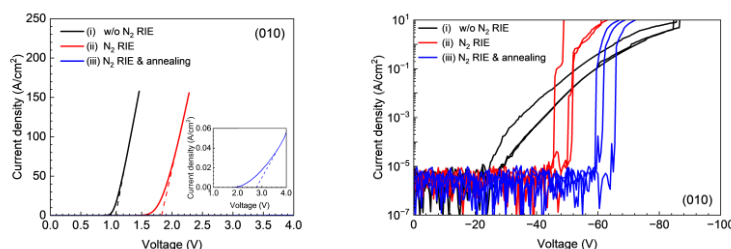


図 15 N ドープ $\text{Ga}_2\text{O}_3/n\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (010) SBD の順方向、逆方向 I - V 特性

3. 3. 2. N ドープ Ga_2O_3 薄膜成長技術開発

主に Ga_2O_3 FET のノーマリーオフ化のための要素技術として、N ドープ Ga_2O_3 薄膜の ALD 成長および MBE 成長に取り組む。

N ドープ Ga_2O_3 薄膜の ALD 成長（大阪公立大学 藤村研究室）

窒化領域の増加を目的として N ドープ Ga_2O_3 薄膜の ALD 成長に取り組んだ。ALD 成長における、ガリウム原料として常温常圧で気体である TMG を用いた。 Ga_2O_3 薄膜の ALD 成長に関しては、酸素プラズマやオゾンを用いた成長に関しては報告があるが、 H_2O を酸化源にした成長に関しては報告例が極めて少ない。今回、成長温度と H_2O の供給時間を制御し、 Ga_2O_3 の ALD 成長に成功した。また、 N_2 2nd p.s. N 活性種を用いた O_2/N_2 プラズマ ALD においても、(-201)基板では、210°C という低温成長であるにもかかわらず TEM でエピタキシャル成長が確認された。(010)基板では、一部非晶質の領域が認められた。 O_2 に混入する N_2 の量を変化させた場合、 O_2/N_2 比に依存せず 11 nm 程度の膜が成長し、 $10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の窒素のドーピング導入が確認できる（図 16）。 N_2 2nd p.s. による窒化反応が極めて高い反応性を有し、表面反応律速で自己制御的に進行していることを示唆している。

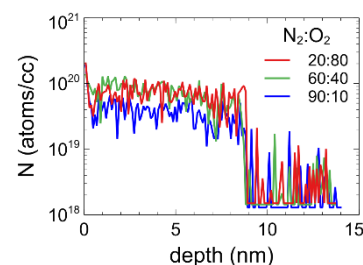


図 16 N_2/O_2 比を変えて作成した試料の N 濃度 $N_d - N_a$ 深さ方向の変化

N ドープ Ga_2O_3 薄膜の MBE 成長（大阪公立大学 東脇研究室）

O ラジカルと N ラジカルを同時に供給することで、 Ga_2O_3 (010) 基板上に高濃度 N ドープ Ga_2O_3 薄膜を MBE 成長することに成功した。開発した MBE 技術では成長シーケンス・条件により、 Ga_2O_3 薄膜の高い結晶品質を保ったまま、N 濃度は $10^{17} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ の広範囲で任意に制御可能である（図 17）。また、ドーピングされた N は 1000°C 程度以上の高温アニールにより熱拡散することが分かった。これ

は、ドーピングされた N 原子の内 10–20%程度が格子間に存在し、上述 N イオン照射による N ドーピングと同様に、アニールにより格子間隙をチャネリング拡散するためである。

次に、MBE 成長した N ドープ Ga_2O_3 薄膜上に SBD 構造を作製し (図 18)、その電気的特性を評価した。N 濃度は 3×10^{18} , 3×10^{19} , $4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の 3 種類である。図 19 に SBD それぞれの容量–電圧 (C – V) 特性を示す。N = $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ では V に依らず C が一定である。これは、N ドープ Ga_2O_3 薄膜/基板界面に存在する Si の濃度が N 濃度を上回り、界面に高密度な二次元電子ガス (2DEG) が形成され、 $V > -20 \text{ V}$ では基板側に空乏層が伸びること無く電荷中性が保たれるためと考えられる。なお、実測された $C \sim 55 \text{ nF/cm}^2$ は、N ドープ Ga_2O_3 薄膜の厚さから導出される計算値にほぼ一致する。一方、N = $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ では、 $V = 0 \sim -5 \text{ V}$ で C がほぼ一定値であるが、 $V < -5 \text{ V}$ では C が単調に減少する。また、N = $4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ では V 減少に伴い単調に C が減少している。これらの結果は、N = $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ では $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の場合と同様に、 $V > -5 \text{ V}$ で 2DEG によりフェルミレベルがピン留めされるため C は変化しないが、 $V = -5 \sim -7 \text{ V}$ で 2DEG が消失し、 $V < -7 \text{ V}$ では基板中に空乏層が伸びるためと考えられる。また、N = $4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ では、N ドープ Ga_2O_3 薄膜/基板界面における N 濃度が Si 濃度より一桁高いため、Si ドナーは完全に補償され 2DEG は形成されず、 $V < +1 \text{ V}$ 全領域で空乏層が基板側に広がっていると考えられる。これらの結果から、MBE 成長した N ドープ Ga_2O_3 薄膜では、ドーピングした N がディープアクセプタとして機能し、電気的に活性であることが確認された。

本課題については、当初目標とした N 濃度を制御した N ドープ Ga_2O_3 薄膜の MBE 成長技術の開発、およびデバイスへの応用を全て達成した。その上で、N 原子の拡散プロセスの解析等も実施できた。

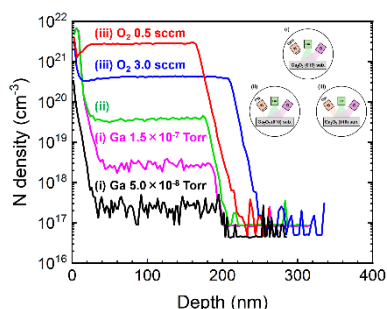


図 17 N = $10^{17} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ の N ドープ Ga_2O_3 薄膜中の N 濃度深さ方向プロファイル

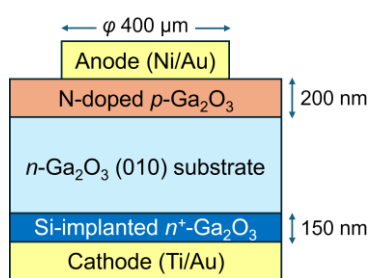


図 18 N ドープ Ga_2O_3 SBD の断面構造模式図

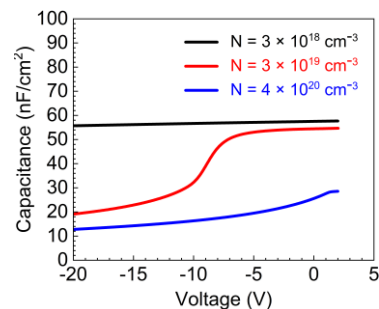


図 19 N ドープ Ga_2O_3 SBD の C – V 特性

3. 3. 3. イオン注入ドーピング技術開発 (日新イオン機器、大阪公立大学 東脳研究室)

Si, N 加熱イオン注入による低ダメージプロセスを開発し、結晶ダメージの低減効果を電気的特性から確認する。そして、開発した加熱注入 Si, N イオン注入ドーピングプロセスを、縦型電流注入アパーチャートランジスタの試作に適用する。

本加熱注入による低ダメージイオン注入を実施し、結晶性ダメージの低減効果を構造および電気的特性評価を実施した。そして、得られたデータから注入・アニール条件を最適化した。

Si イオン注入ドーピングプロセスに関しては、構造評価として RBS チャネリング測定を実施し、注入濃度と加熱注入時の結晶性ダメージの関係が明らかにした。結晶性ダメージは、Si 注入濃度 $4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の場合注入温度 150°C 以上で、Si = $8 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の場合注入温度 300°C 以上で回復することが分かった。また、室温ホール測定の結果、Si = $5 \times 10^{19} - 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の場合注入した Si のドナー活性化率 90%以上となり、Si > $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ で飽和した (図 20)。また、室温電子移動度は、Si = $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

³で最大値 $68 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ が得られた。この移動度は、エピタキシャル成長で得られた高品質膜と同等以上の特性である（図 21）。

N イオン注入においても Si と同様に RBS チャネリング法による構造評価を実施し、結晶性ダメージは、注入濃度 $2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上の場合、注入温度 300°C 以上で回復することが分かった。電気特性については、SBD を作製し I - V , C - V 評価を実施した。また、活性化アニールの温度条件を変更した。結果は、 $N \geq 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ で 300°C 以上の加熱注入を実施することで、従来条件の 1100°C よりも 200°C 低温である 900°C アニールでも N 活性化率が大幅に改善する結果が得られた。また、 300°C 以上の加熱注入によって、 900°C アニールで 1100°C アニールを超える耐圧が得られた。このように、加熱 N イオン注入により、活性化アニール温度を 900°C まで低温化することに成功した。

研究開発マネジメント上の工夫として、構造評価として非破壊検査である RBS チャネリング法を採用することで、随時構造評価が完了した基板を電気特性評価のデバイス作製に転用することで、評価に必要な基板枚数及び注入処理を伴う人件費の削減を実現した。また、令和 7 年度より研究人員を 1 名追加することで各研究人員に掛かる負担及びリスクを軽減し当開発が円滑に進む様にした。

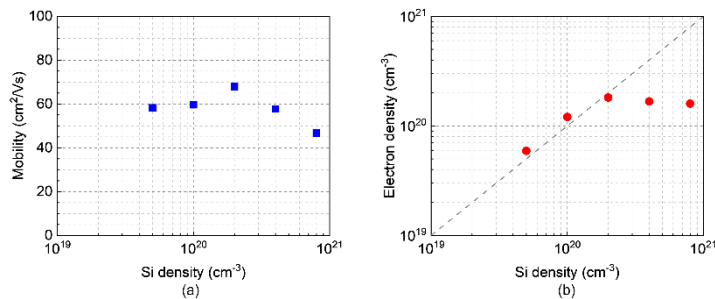


図 20 Si イオン加熱注入ドーピングで作製した $n^+\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の(a) 室温電子移動度、(b) 電子濃度

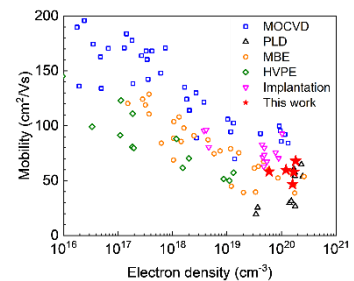


図 21 様々な手法で作製された $n\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の室温電子移動度と電子濃度の関係

3. 3. 4. Ga_2O_3 ウェハのチップ化レーザー加工技術開発（レーザーシステム）

Ga_2O_3 ウェハのデバイスチップ化レーザー加工技術確立する。

本開発では、 Ga_2O_3 ウェハのデバイスチップ化レーザー加工技術の確立を目標に、フェムト秒レーザーによるフルカットプロセスの最適化と加工品質支配因子の整理を行った。その結果、 Ga_2O_3 単結晶ウェハの貫通切断が可能であることを実証し、マイクロクラックおよび粉塵が品質に大きく影響する主要因子であることを明確化した。切断速度 0.002 mm/s 、焦点位置 $+0.3 \sim 0.4 \text{ mm}$ 、パルスエネルギー $4 \mu\text{J}$ の条件により、チップングのない高品質切断を実現した。粉塵対策として同軸エアブローを導入することで加工速度を 0.005 mm/s まで向上させた（図 22）。さらに、改質ライン形成と段階的 Z 加工を組み合わせた二段階加工により、品質を維持したまま 0.011 mm/s までの高速化を達成した。ダイサー切断や選択エッチング法との比較から、本手法が品質面で最も有効であるとの技術知見を得た。

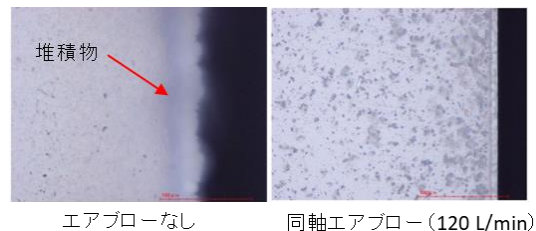


図 22 同軸エアブロー加工の効果

3. 4. エ) Ga_2O_3 デバイス技術に関する研究開発

家電製品や自動車等をはじめ多種多様な用途でパワーデバイスの適用が可能な範囲として広い需要

が見込め、かつ産業化の可能性の見極めが可能となる耐圧 500~2000 V (2 kV) 程度の領域を想定し、各活用先に応じて十分に機能を発揮することが可能な縦型パワートランジスタ・縦型パワーSBD を実現する。また、極限環境（高放射線下・高温下）においても長期間安定的に作動可能な ICT デバイスに適用可能な縦型高周波 SBD・横型トランジスタを製造する。

3. 4. 1. 縦型 Ga₂O₃ パワートランジスタ開発

縦型パワートランジスタについては、オン抵抗 20 mΩcm² 以下、耐圧 1 kV 以上のデバイス特性を維持・さらなる改善に取り組み、また放熱性も確保したうえで、ゲートリーク電流の低減に伴うスイッチングデバイスとして求められるオン/オフ比 6 桁以上の実現と、デバイス構造やその製造プロセスを踏まえた量産性の改善に取り組む。

縦型 Ga₂O₃ (010) フィントランジスタ開発（情報通信研究機構、大阪公立大学 東協研究室）

東京農工大学で成膜された高品質 MOVPE Ga₂O₃ (010) ドリフト層と、大阪公立大学で開発された窒素ラジカル照射プロセスを組み合わせ、縦型 Ga₂O₃ (010) FinFET の開発に成功した。図 23(a)に作製した Ga₂O₃ (010) FinFET の断面構造模式図を示す。フィン側壁(100)およびトレンチ底部(010)表面に窒素ラジカル照射処理を施した。図 23(b), (c)に、シングルおよびマルチ FinFET の光学顕微鏡像をそれぞれ示す。マルチフィン構造は 10 μm 間隔で 6 本のフィンから構成される。図 24(a)-(c)に、フィン幅 (W_{fin}) 300 nm の窒化マルチ FinFET のドレイン電流-ゲート電圧 (I_D - V_G) 特性、 I_D -ドレイン電圧 (I_D - V_D) 特性、オフ状態耐圧特性を示す。しきい値電圧 (V_{th}) +1.0 V、サブスレッショルドスイング (SS) 73 mV/decade、特性オン抵抗 (R_{on}) 9.5 mΩcm²、 I_D オン/オフ比 (I_{on}/I_{off}) 10 桁以上の優れた特性が得られた。破壊耐圧として定義したオフ状態耐圧 (V_{br}) は 1213 V であり、耐圧試験中にはゲート電流 $\sim 10^{-7}$ A と低い値を維持した。図 24(d)に窒化 Ga₂O₃ FinFET の R_{on} - V_{br} 相関を示す。マルチフィン化および W_{fin} 増加により、 V_{br} の劣化を抑えつつ R_{on} の低減を実現した。特に $W_{fin} = 300$ nm のマルチ FinFET で、バリガ性能指数 (V_{br}^2/R_{on}) 1.55×10^8 W/cm² が得られ、縦型 Ga₂O₃ FinFET の目標性能を達成した。

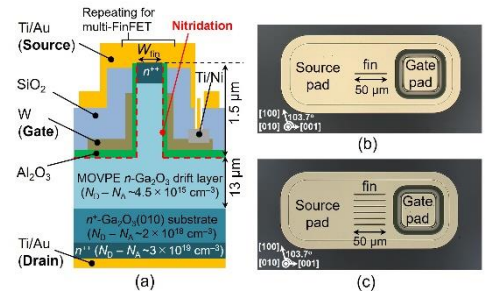


図 23 (a) 縦型 Ga₂O₃ (010) FinFET の断面構造模式図、(b)シングル FinFET と(c)マルチ FinFET の平面光学顕微鏡像

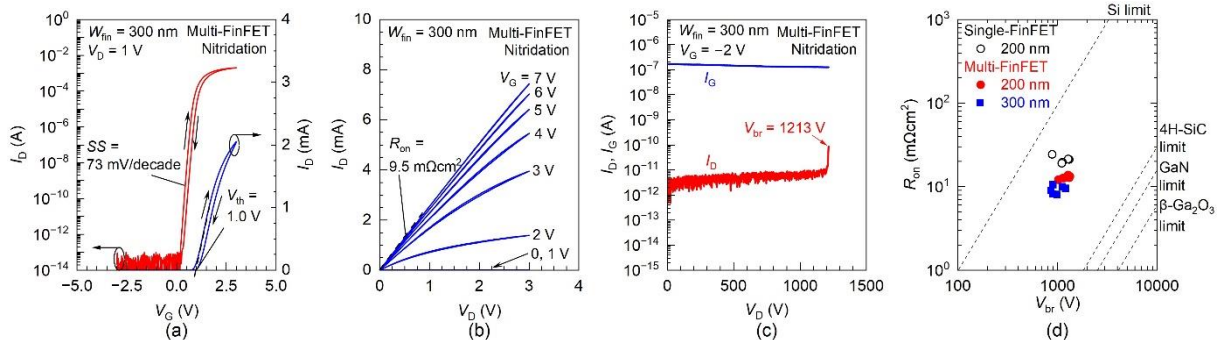


図 24 $W_{fin} = 300$ nm を有するマルチ FinFET の (a) I_D - V_G 特性、(b) I_D - V_D 特性、(c)オフ状態 V_{br} 特性、(d)シングルおよびマルチ FinFET の R_{on} - V_{br} 相関

縦型 Ga₂O₃ 電流アパーチャトランジスタ開発（大阪公立大学 東協研究室、情報通信研究機構）

NICT で過去に開発した縦型 Ga_2O_3 (001) 電流アパーチャトランジスタ (CAVET) は、デバイスオン特性は概ね良好であるが、オフ耐圧が小さい (263 V) という問題があった [M. H. Wong *et al.*, IEEE EDL 41, 296 (2020)]。これは、室温 Si, N イオン注入時に Ga_2O_3 結晶がダメージを受け、その部分の結晶品質が劣化していることが原因と考えられる。本研究では、室温ではなく、基板を加熱した状態でイオン注入を行うことにより、注入時のダメージを抑制し、CAVET のオフ耐圧改善を試みた。

本課題の主題である Ga_2O_3 (010) 基板に加え、リファレンスとして過去の報告と同じ Ga_2O_3 (001) 基板上にも CAVET を同プロセスで作製した。図 25 に、CAVET 断面模式図を示す。 Ga_2O_3 (010) CAVET においては、オフ V_{br} は 345 V と若干の改善が見られたが、最大 I_D は 0.003 A/cm^2 と、既報の Ga_2O_3 (001) CAVET と比較して約 1/10 と低い値であった。一方、リファレンスとして作製した Ga_2O_3 (001) CAVET においては、最大ドレイン電流 0.123 kA/cm^2 、オフ耐圧 756 V と、それぞれ既報 CAVET より約 5 倍、約 3 倍大きな値が得られた [図 26(a), (b)]。また、 I_{on}/I_{off} は 11 桁以上であった。これらの優れたデバイス特性は、加熱イオン注入により結晶品質劣化が抑制された結果であると考えられる、一方、 Ga_2O_3 (010) CAVET のデバイス特性が伸び悩んだ理由としては、電流ブロック層 (CBL) 形成目的で注入した N が、[001] 方向にはほぼ拡散しないのに対し、[010] 方向では拡散するためであると考えられる。N が拡散したことで n^+ アクセス層の Si ドナーが補償され直列抵抗が増大したことが最大 I_D の減少に、N 拡散により CBL の障壁高さが減少したことが V_{br} の減少にそれぞれつながったと考えられる。

当初目標に掲げた Ga_2O_3 (010) CAVET において、 $V_{br} > 1 \text{ kV}$ 以上は達成できなかったが、リファレンス用に作製した Ga_2O_3 (001) CAVET で過去の報告と比較して大幅なデバイス特性改善は果たした。このように、加熱イオン注入ドーピングの効果は十分に確認でき、今後 N 拡散も考慮の上デバイス構造を設計することで、 Ga_2O_3 (010) CAVET についても大幅なデバイス特性の改善が可能である。

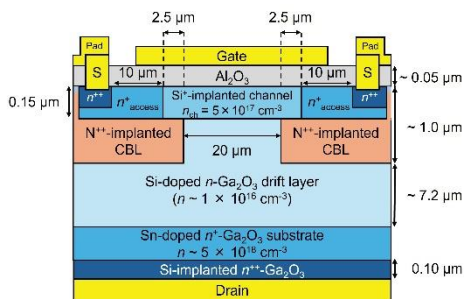


図 25 Ga_2O_3 CAVET の断面模式図

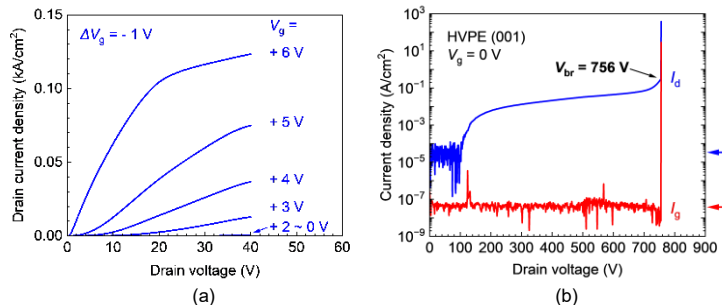


図 26 Ga_2O_3 (001) CAVET の (a) I_D - V_D 特性、(b) V_{br} 特性

3. 4. 2. 縦型 β - Ga_2O_3 SBD の耐量評価 (三菱電機)

第一期で確立した技術と 3. 1 及び 3. 2 の成果を各々の進捗に応じて適用し、実際の製品仕様として重要なサージ電流耐量 (電流二乗時間積) について 10 A 級デバイスを試作し評価し、その特性改善のための課題を明確にする。サージ電流耐量はデバイスの放熱性に依存するため、熱伝導率や移動度が異なる複数の結晶面で実証し評価する。

第一期で確立した技術を元に、縦型パワー SBD を試作し、10 A 以上の通電条件下でも安定して動作することを確認した (図 27)。さらにサージ電流耐量評価のため、直流電源、パルスジェネレータ、オシロスコープを組み合わせ、パルス通電電流のピーク値を最大 72 A まで徐々に増加させながら簡易モジュールに通電することで、デバイスが破壊する電流値を計測可能なシステムを構築した。

サージ電流耐量はデバイスの放熱性に依存するため、基板厚、および結晶方位の異なる酸化ガリウムエピ基板に、縦型 SBD をそれぞれ作製し、サージ電流耐量評価を実施した。その結果、基板厚みの増加

および特性オン抵抗 (R_{onA}) の増加に伴いサージ電流耐量 (J_t) が低下することを確認した。面方位では(010)面基板の方が (001) 面基板よりサージ電流耐量が高いことを示した (図 28)。さらに、簡易モジュールを模擬した過渡伝熱解析により、評価結果と解析結果とが良く一致することを確認した。基板厚では、150 μm 以下の薄板化が最大温度の低減に有効であることを示した (図 29)。これにより、サージ電流耐量評価技術を確立するとともに、評価結果の妥当性も検証した。特に、熱伝導率の高い(010)面基板では、薄板化と組み合わせることでサージ電流耐量を効果的に向上させ得ることを示し、デバイス応用に向けた(010)面方位基板の有用性を実証することに成功した。

サージ電流耐量の統計的な実力評価には、十分な数量の基板が必要だが、(010)面基板の調達が課題であった。これに対し購入品基板で代替し、エピ成長は東京農工大と連携、早期に成果が出るよう工夫した。さらに、伝熱シミュレーションを活用し、評価結果の妥当性検証や、不足した結晶方位と厚みの複合要因に対する検証を行った。ソフトウェア費用は、旅費およびウェハ薄板化加工費の一部を振り替えた。これらにより、効率のよい経費運営を実施できた。

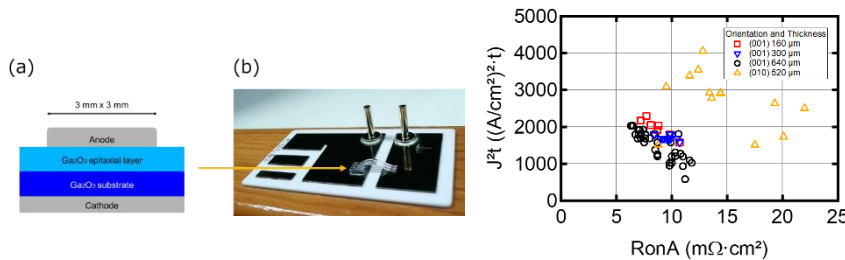


図 27 (a) 試作した 10A 級 縦型 SBD の断面模式図、(b) 簡易モジュール化した SBD

図 28 サージ電流耐量の評価結果

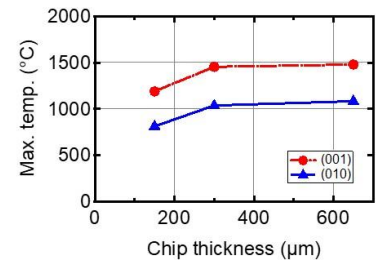


図 29 過渡伝熱解析による基板厚と基板面方位依存性

3. 4. 3. 極限環境用途に向けた横型高周波 Ga_2O_3 トランジスタ開発

横型高周波トランジスタについては、第一期で試作したものと違ったアプローチで本用途に適したデバイス作製手法を検討・デバイス構造を設計し、試作・デバイス特性評価を行い、最大発振周波数 20 GHz 以上においてガンマ線耐量 1 MGy 以上を実現することと、室温下 2 GHz の周波数で 0.1 W 以上の出力電力を有するデバイスを実現することを目指す。また上記で製作したデバイスに関して高温環境での動作信頼性を評価するため 300 °C 以上における動作試験も実施する。

横型高周波 Ga_2O_3 MOSFET 開発 (情報通信研究機構)

MOVPE 成長中ドーピングを用いた横型高周波 Ga_2O_3 MOSFET を試作・評価した結果、ゲート長 80 nm で動作は確認したものの、最大発振周波数は 11 GHz に留まった。ドナー活性化不足およびエピ膜/基板界面リークに起因する相互コンダクタンス低下を要因として特定した。これを踏まえ、成長中ドーピング条件の深掘りを行わず、制御性に優れた Si イオン注入法を基盤とするプロセス開発へと方針を転換するという研究開発マネジメント上の判断を行った。その結果、電子線描画と Ni メタルマスクを用いた選択的 Si イオン注入プロセスを構築し、ソース・ドレインアクセス抵抗の低減を実現した。その結果、ソース・ドレイン間距離 0.7 μm までの微細化が可能となった。さらに、925°C アニール後においても 50 nm 以下のアライメント精度を維持可能な高温耐性マスクおよびプロセス基盤を確立した。

高出力電力化については、電波法上利用性の高い 2 GHz 帯での動作を念頭に MOSFET の設計・試作を行った。総ゲート幅拡大による電流増加を狙い、ダブルフィンガー構造からマルチフィンガー構造へ変更した。当該構造に対応するため、図 30(a)に示すゲート - ソース間絶縁用の層間絶縁膜(ポリイミド)

形成技術を確立した。並行して、従来型のダブルフィンガーMOSFET（総ゲート幅 100 μm ）を用いて出力電力の評価を行ったところ、室温・動作周波数 2 GHz において、2 mW という出力電力が得られた [図 30(b)]。到達目標には至っていないが、マルチフィンガーMOSFET では総ゲート幅が 10 倍となり、ドレイン電圧は図 30(b)の 5~10 倍程度印加できることから、今後目標値程度の出力電力が見込める。

横型 FET で問題となるドレイン電流リークを抑制するため、 Ga_2O_3 結晶中で深い準位を形成する Fe を基板表面近傍に高濃度イオン注入し、エピタキシャル層成長と組み合わせた新規技術を開発し、リーク電流を十分低いレベルに抑制できることを確認した。本技術は Ga_2O_3 に限らず、同様の界面リークが課題となる他の半導体材料にも適用可能である。本成果は当初の到達目標を超える独創的な技術であり、その新規性から特許出願および PCT 国際出願を完了している。これにより、デバイス信頼性向上と知的財産権確保を通じた国際競争力強化に資する先進的成果を創出した。

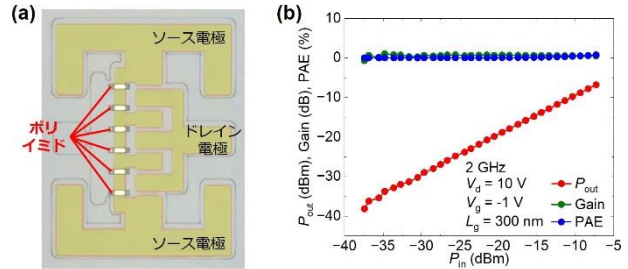


図 30 (a) マルチフィンガー構造のソース・ドレイン電極パターンと層間絶縁膜（ポリイミド）の顕微鏡像。(b) 室温・動作周波数 2 GHz で測定したダブルフィンガーMOSFET の出力電力、利得、電力付加効率

横型高周波セルフアラインゲート Ga_2O_3 MOSFET 開発（大阪公立大学 東協研究室）

セルフアラインプロセス（SAG）を適用して試作した Ga_2O_3 SAG-FET の SEM 像を図 31(a) に示す。

（設計 $L_g = 2 \mu\text{m}$ ）のチップ面内における I_d - V_g 特性では、特にドレイン電流値に大きなばらつきが確認された。しかし、特にチップ周辺部においては、図 31(b) に示すように $I_{on}/I_{off} > 10^8$ 、 $SS = 167 \text{ mV/dec.}$ を有する SAG-FET が作製されていることを確認しており、これは類似報告 [K. J. Liddy *et al.*, APEX 12, 126501 (2019)] と同等の特性である。歩留まりが低い点、標準 FET と比べてしきい値のシフトが大きい点は引き続きの課題であるが、 Ga_2O_3 SAG-FET の動作を確認できた。また別途測定した I_d - V_d 特性の比較により、SAG-FET は標準 FET と比較して R_{on} が低減されていることが確認された。一方、比較用の標準 FET では R_{on} が $\text{k}\Omega$ オーダーと設計よりも 10 倍以上高く、チャネル内キャリアの空乏化が示唆された。各種解析により、チャネルに何かしらの不具合があった可能性が高い。原因同定とプロセス改善は引き続きの課題である。

以上より、耐熱ゲート電極を用いた SAG プロセスが Ga_2O_3 MOSFET に適用可能であることを確認できた。SAG プロセスによるアクセス抵抗低減、電子線描画によるゲート電極の微細化を組み合わせることで、 $f_{max} > 50 \text{ GHz}$ の達成は可能な範囲にあると考えられる。今後は、ゲートスケールングおよび R_{on} 低減による高出力化・高周波特性の向上を図り、極限環境応用への展開を推進する。

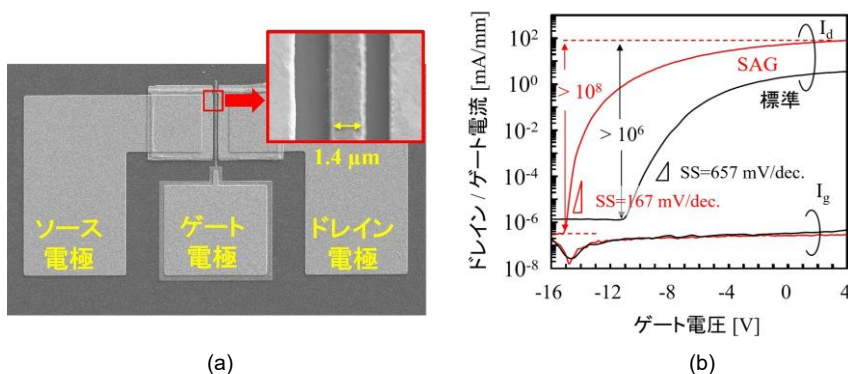


図 31 試作した Ga_2O_3 SAG-FET の (a) SEM 像、(b) I_d - V_g 特性の比較

3. 4. 4. マイクロ波電力伝送応用に向けた高周波 Ga₂O₃ ショットキーバリアダイオード開発

縦型高周波 SBD については、 α -Ga₂O₃、 β -Ga₂O₃ の両者についてデバイスを作製し動作確認する。 α -Ga₂O₃ デバイスに関しては、サファイア基板を用いた α -Ga₂O₃ のエピウェハの特徴を生かしたデバイス作製技術を確認する。 β -Ga₂O₃ デバイスに関しては、高周波 SBD 作製に新たに必要となるデバイス作製プロセスの要素技術を確認する。これらの取組を通じ、両者について、電極直径 10 μ m 以下において、デバイス特性としてオン抵抗 3 m Ω cm² 以下、オフ耐圧 30 V 以上を実現する高周波デバイスの開発を目指す。

高周波 α -Ga₂O₃ SBD 開発（京都大学、レーザーシステム）

レーザーアニールが α -Ga₂O₃ 薄膜の構造と電気伝導特性に及ぼす影響の調査

本開発では、ミスト CVD による Ga₂O₃ 膜のレーザー結晶化技術確立を目的に、金属膜を用いた間接加熱型レーザーアニールおよび成膜プロセスを検討した。成膜温度の検討では、350°C でアモルファス、600°C で β -Ga₂O₃ 多結晶が得られ、ミスト CVD 膜質条件を確認した。光吸収層として TiN、Mo、W、MoSi₂、WSi₂ を評価した結果、TiN は膜剥離、Mo および W は酸化の問題から不適と判断した。SiO₂ キャップ層を導入した間接アニールでは蒸散およびアブレーションを抑制し、改質部で β -Ga₂O₃ XRD ピークを確認した（図 32）。さらに、高周波計測による電気特性評価手法を構築し、レーザー出力変化により改質部の抵抗低下傾向を確認した。加えて、高出力レーザーを用いて Ga₂O₃ が残留状態から蒸散に至る出力レンジを明確化し、熔融結晶化に向けたプロセス検討に向けた技術的知見を得た。

本研究開発での研究開発のマネジメントとして、レーザー加工とデバイス評価・シミュレーションの役割分担し検討の効率化を図った。ミスト CVD 成膜や金属膜形成など対応困難な工程や分析については京都大学及び九州工業大学と共同研究契約を締結し、各機関の専門性を活用した分業体制を構築した（表 3）。費用対効果として、社内インフラで不足する分析評価や光学系については必要最小限の調達を行い、限られた期間および予算の中で効率的に研究成果を得ることができた。

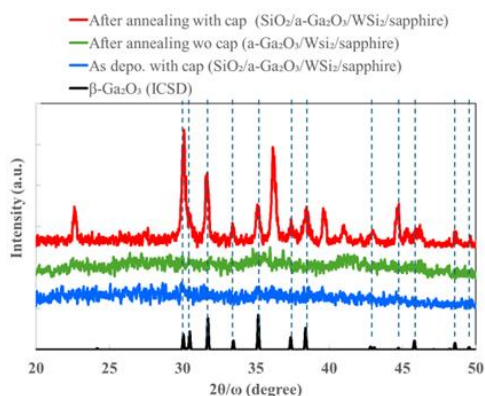


図 32 WSi 金属膜での XRD パターン：アニール無（青）、アニール後キャップ層なし（緑）、アニール後キャップ層あり（赤）、 β -Ga₂O₃ ピーク（黒）

表 3 研究開発体制

機関・企業		役割
レーザーシステム	平岡	レーザーアニール レーザー加工
	大野	デバイス評価・シミュレーション
	原田	レーザー加工
	坪井	技術アドバイザー
	伊藤	デバイス評価
京都大学 田中勝久研究室		ミストCVD成膜 キャップ膜成膜 XRD分析
九州工業大学 新海聡子研究室		金属膜形成 選択エッチング処理 ダイサー切断

α -Ga₂O₃ 薄膜を用いた SBD の高周波特性の評価

本研究ではミスト CVD 法によって成膜した Ge ドープ α -Ga₂O₃ 薄膜を用いて SBD を作製し、基礎的な電気伝導特性を明らかにするとともに、高周波を直流に変換するデバイスであるレクテナを 16 個の SBD から構成して高周波特性を評価した。理論的な考察によると、レクテナの変換効率は R_{on} とオフ状態での容量 (C_{off}) の積が小さいほど高くなることから、 $R_{on}C_{off}$ は高周波バリガ指数に反比例する。 R_{on} と C_{off} は SBD のアノード電極サイズに依存することから、アノード径が異なる (4, 8, 12 μm) SBD を作製し、 R_{on} と C_{off} を測定した (図 33)。 C_{off} は一般的な容量として扱えるので、アノードの面積に比例して大きくなる。一方、電気抵抗に関しては、電流は主としてアノードの外周付近をカソードに向かって流れると考えられるので、 R_{on} はアノードの外周に反比例すると考えてよい。その結果、 $R_{on}C_{off}$ はおよそアノード径に比例することになるが、図 33 の結果は定性的にこの考え方と整合する。

次に、アノード径が 4 μm の SBD から成るレクテナを試作した。4 個の SBD を並列に並べて一つのダイオードとし、このダイオードを組み合わせ総計が 16 個の SBD から構成されるレクテナを作製した (図 34)。図 30 右の回路に示された①から④までの端子は左の SEM 像の①から④にそれぞれ対応しており、各端子間で電流-電圧特性を調べたところ、③-④間においてややリーク電流が見られたものの、いずれの 4 組のダイオードも良好な整流作用を示した。このレクテナを用いて高周波を直流に変換する実験を行った。図 35 に示すように、周波数 2.45 GHz、1.7 W で変換効率は 13.9% であった。ただし、反射率が 60% 以上と高く、これを考慮すると実質的な変換効率は 0.65 W において 37.1% と見積もられた。

以上の研究を進めるにあたり、研究開発マネジメント上の工夫として、共同研究先の株式会社レーザーシステムならびに京都大学の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、共同研究により単独では実施できない研究を進めることができた。

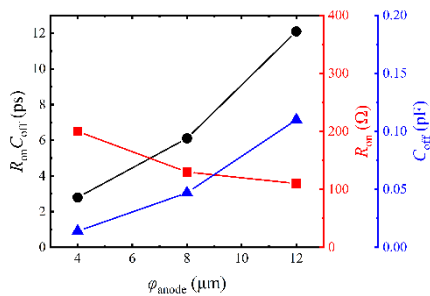


図 33 R_{on} , C_{off} , $R_{on}C_{off}$ のアノード径依存性

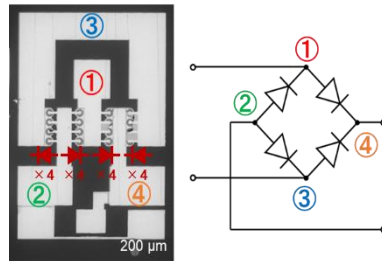


図 34 16 個の SBD から構成したレクテナの (左) SEM 像、(右) 等価回路

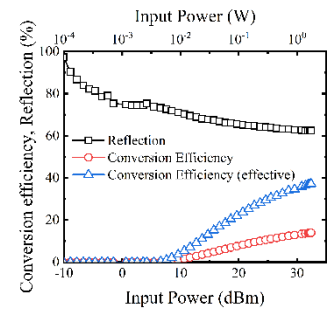


図 35 RF から DC 電力への変換効率、反射率の入力電力依存性

高周波 β -Ga₂O₃ SBD 開発 (大阪公立大学 東脳研究室、レーザーシステム)

まず、デバイスシミュレーションで構造最適化した Ga₂O₃ ショットキーバリアダイオード (SBD) を用いたボルテージダブル回路の、24 GHz における RF/DC 電力変換効率の入力電力依存性を回路シミュレータで導出した。結果、図 36 に示すように、アクセス層のドナードーピング濃度を $4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の場合、アノード電極直径 (ϕ) に依らず変換効率最大値は 80% 程度の大きな値が得られることが分かった。

続いて、シミュレーションにより最適化したダイオード構造を基に、図 37 に示すような微小アノード電極を有する横型 Ga₂O₃ SBD を作製し、そのデバイス特性を評価した。図 38 に $\phi = 8 \mu\text{m}$ SBD の順方向、逆方向 J - V 特性を示す。理想因子は 1.11 と良好な値を示す一方、逆方向リーク J が想定より大き

かった。これは、構造設計ではドリフト層ドーピング濃度を $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ としたのに対し、実際に作製した SBD では $8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ であったためである。その他デバイスプロセス上の課題が数点確認されたが、目標の $\phi < 10 \mu\text{m}$ での良好な SBD 動作は達成された。

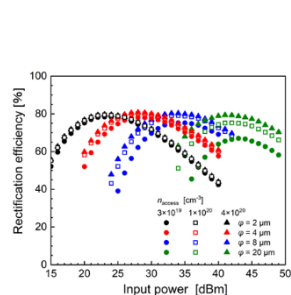


図 36 ボルテージダブル回路の、24 GHz における RF/DC 電力変換効率の入力電力依存性

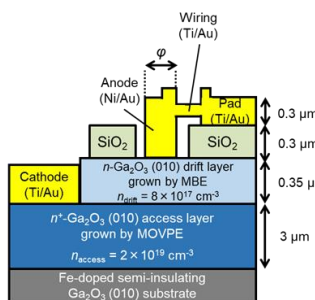


図 37 微小アノード電極を有する横型 Ga₂O₃ SBD の断面構造模式図

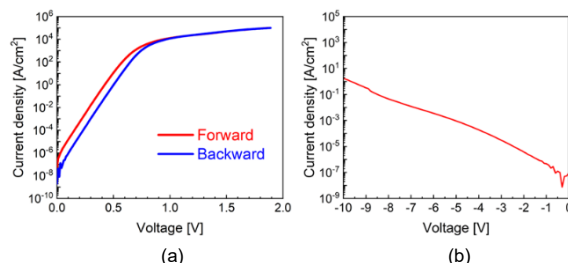


図 38 $\phi = 8 \mu\text{m}$ SBD の (a) 順方向、(b) 逆方向 J - V 特性

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、実際に近い将来製品化・産業化を考えている、企業メンバー機関 [Orbray(株)、日新イオン機器(株)、三菱電機(株)、(株)レーザーシステム] 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。

4. 1. Orbray

Ga₂O₃ 関連マーケット調査

現状、海外メーカーが参入し始めているものの、依然 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コメントが引き続き多々あり、ウェハマーケット参入についてより深耕していく予定である。ユーザーの多くは、引き続き、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 インチ径サイズや、最近の酸化ガリウム原料等の価格高騰による影響もあり、より小形サイズのウェハ ($10 \times 15 \text{ mm}^2$) も求められている。

今後は、基板販売を念頭の上、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

2 件出願した。

4. 2. 日新イオン機器

担当機関（日新イオン機器）の取引先などから Ga₂O₃ デバイス開発に関して、国内 2 社にヒアリングした。2 社共に、注目している技術であり当社の発表に関しても把握していたが、他材料 (SiC, GaN) を用いたデバイス開発に注力しており、投資計画はまだないとの回答となった。また、開発したイオン注入プロセス技術について、学会にて研究発表を 2 件、親会社（日新電機）社報にて 1 件発信した。

4. 3. 三菱電機

社内連絡会や学会等を通じてユーザーニーズ、システムメリットについて調査検討し、年2回の研究開発運営委員会において情報展開、議論した。近年のSiC ウェハの価格下落を受け、 β -Ga₂O₃ デバイスがコスト面で優位性を確保するには、エピ薄厚化でメリットが出せる、より高耐圧領域のアプリが候補となり得ること、一方で、電力分野を代表とする超高耐圧領域ではユーザー側の高いシステム信頼性要求により新規デバイスの導入のハードルが高いことを報告した。電力分野での本格的な社会実装に向け、少量でも市場実績を積むことが重要であり、適用可能なアプリケーションおよびパートナーを見出すため、引き続き調査を行っていく予定である。また Ga₂O₃ 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い。放熱性向上として薄板化が一つの候補となるが、薄板加工性と実装性、加工まで反映したデバイスコストのバランスが重要となる。本プロジェクトでの成果を研究会にて1件発表済み。基本特許となりうる重要知財を1件出願済み。

4. 4. レーザーシステム

Ga₂O₃ ウェハのチップ化レーザー加工技術開発

(a) 基本特許となりうる重要知財の獲得

Ga₂O₃ ウェハを用いてフェムト秒レーザー切断条件の最適化を行い、ダイサーより品質優位な切断技術であることを確認した。得られた知見を基に切断に関する基本特許の出願方針を検討していく。

(b) アウトリーチ活動

レーザー加工装置の販売および受託加工については、既存事業として継続的に実施している。その延長として Ga₂O₃ ウェハへの対応が可能である。今後本研究で得られた Ga₂O₃ ウェハ切断に関する知見については、ホームページ等を通じて対外的に情報発信を行い、問い合わせや共同検討の機会につなげていく。

マイクロ波電力伝送応用に向けた高周波 Ga₂O₃ SBD 開発・高周波 α -Ga₂O₃ SBD 開発

(a) Ga₂O₃ 関連マーケット調査

本研究では、ミスト CVD 成膜とレーザー再結晶化を組み合わせた低コスト SBD 製作の技術的可能性について検討を行った。局所的なレーザーアニールによる結晶化に向けて、適切な積層構造やアニール条件に関する多くの技術的知見を得た。一方で、高品質な結晶形成およびデバイス性能の実現には追加の研究開発が必要であることも明確となった。単独での対応には限界があることから、引き続き市場ニーズの把握を行うとともに、共同研究や協業を視野に入れた連携先探索を進めていく。

(b) 基本特許となりうる重要知財の獲得

本研究結果からレーザーアニールにより作られる構造体として、透明基板および透明薄膜を有する積層体に光を照射し、透明薄膜をアニール処理して積層構造体を製造する方法を特許出願した。

5 政策目標（アウトカム目標）の達成に向けた計画

5. 1. Orbray

ア) 高品質単結晶 Ga₂O₃ バルク、ウェハ製造技術に関する研究開発

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 インチ径の開発を目指す。以下の表のように計画している。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。

事業家内容	2026年	2027年	2028年	2029年	2030年
2インチ径ウェハの高品質化	→	→	→		
2インチ径ウェハのサンプル出荷		→	→	→	
2インチ径ウェハの量産化				→	→
4インチ径ウェハの開発					→

波及効果： 他の結晶（例えば、光学用途の YAG(Yttrium Aluminium Garnet)やサファイア）への応用展開が考えられる

5. 2. 日新イオン機器

ウ) -3 イオン注入ドーピング技術開発

第二期事業期間中（2024～2025 年度）中に開発したイオン注入プロセス技術を基に、デバイスメーカーにニーズの聞き取り及びサンプル注入を行い、Ga₂O₃ デバイス量産に向けたイオン注入プロセス、および装置開発を進める。

事業化内容	2026	2027	2028	2029	2030
デバイスメーカーへの サンプル注入実施	→	→	→		
デバイス量産向け イオン注入プロセス、装置開発			→	→	→

波及効果： 課題がある他次世代パワーデバイス半導体（縦型 GaN、ダイヤモンド、AlN 等）への応用。

5. 3. 三菱電機

エ) -2 縦型 β-Ga₂O₃ SBD の耐量評価

三菱電機は、縦型 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 年代の製品化を目指す（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した。本成果は、将来の β-Ga₂O₃ 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。さらに、第二期において、熱伝導率が最も高い面方位である(010)面基板を用いれば、Si や SiC で実績のある 150 μm 厚という現実的な基板厚でも、放熱性を効果的に向上させサージ電流耐量を向上させ得ることを示した。

事業化内容	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
SBD低損失化開発	→						
SBD大電流化開発	→	→					
SBDチップ信頼性検証	→	→	→				
SBDサンプル出荷			→	→	→		
SBD量産化技術			→	→	→	→	→

波及効果： 開発成果は今後、学会や論文発表を予定。システム実装検討への波及が期待される。

5. 4. レーザーシステム

ウ) -4 Ga_2O_3 ウェハのチップ化レーザー加工技術開発

本事業（第二期）期間中（2024～2025 年度）に開発した光学系を社内デモ装置に搭載し市場調査を行う。また、ホームページや展示会などを通じた商談から受託加工や装置販売を目指す。

事業化内容	2026年	2027年	2028年	2029年	2030年
Ga_2O_3 ウェハ切断用光学エンジンの開発	→				
Ga_2O_3 ウェハ切断用光学エンジンの製造・販売			→		

波及効果： ウェハ切断の受託加工ビジネス、ウェハ切断用装置販売

エ) -4 マイクロ波電力伝送応用に向けた高周波 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD 開発

本事業（第二期）期間中に開発した高周波 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD のデバイス、回路特性をアピールしていく。実際の製品化に向けた協業企業や機関の探索、開発をスタートし製品化を目指す。また研究開発用途のレーザーアニール結晶化装置の製造・販売を目指す。

事業化内容	2026年	2027年	2028年	2029年	2030年
高周波用 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD 開発	→				
$\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ SBD を用いた高周波レクテナ回路開発		→			
研究開発用途レーザーアニール結晶化装置の製造・販売				→	

波及効果： レーザーアニール手法の開発引き合い、石英やサファイアなど透明基板上の熱加工技術への応用

6 査読付き誌上発表論文リスト

東京農工大学

- [1] Junya Yoshinaga, Yoshiki Iba, Kakeru Kubota, Yuma Terauchi, Takahito Okuyama, Shogo Sasaki, Kazutada Ikenaga, Takeyoshi Onuma, Masataka Higashiwaki, Kazushige Shiina, Shuichi Koseki, Yuzaburo Ban, and Yoshinao Kumagai, “Homoeptaxial growth of thick Si-doped β -Ga₂O₃ layers using tetramethylsilane as a dopant source by low-pressure hot-wall metalorganic vapor phase epitaxy”, Applied Physics Express Vol. 18, No. 5, pp. 055503 1-4 (2025 年 5 月 20 日) :
- [2] Kentaro Chukwudalu Kakuta, Takatoshi Kikawa, and Yoshinao Kumagai, “Growth of N-doped β -Ga₂O₃ homoeptaxial layers by halide vapor phase epitaxy using NH₃ as the doping source”, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 64, No. 10, pp. 100906 1-4 (2025 年 10 月 23 日) :
- [3] Yuma Terauchi, Shogo Sasaki, Junya Yoshinaga, Yoshihiko Takinami, Masato Ishikawa, and Yoshinao Kumagai, “In situ mass spectrometric study of trimethylgallium decomposition and subsequent hydrocarbon combustion during the metalorganic vapor phase epitaxy of β -Ga₂O₃”, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 64, No. 12, pp. 125503 1-7 (2025 年 12 月 15 日) :

京都大学

- [4] Takeru Wakamatsu, Yuki Isobe, Hitoshi Takane, Kentaro Kaneko, 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, pp.155705 1-8 (2024 年 4 月 18 日) :
- [5] Hitoshi Takane, Shinya Konishi, Yuichiro Hayasaka, Ryo Ota, Takeru Wakamatsu, Yuki Isobe, Kentaro Kaneko, and Katsuhisa Tanaka, “Structural characterization of threading dislocation in α -Ga₂O₃ thin films on c- and m-plane sapphire substrates”, Journal of Applied Physics, Vol. 136, No. 2, pp. 025105 1-9 (2024 年 7 月 10 日) :
- [6] Takeru Wakamatsu, Hirokazu Izumi, Hitoshi Takane, Yuki Isobe, Kentaro Kaneko, and Katsuhisa Tanaka, “Mist-CVD grown Ge-doped α -Ga₂O₃ thin films with high mobilities”, Applied Physics Letters Vol. 128 No.1 pp. 012105 1-7 (2026 年 1 月 5 日) :

大阪公立大学（藤村研究室）

- [7] Md. Earul Islam, Kento Shimamoto, Takeshi Yoshimura, and Norifumi Fujimura, “Dielectric properties of low-temperature-grown homoeptaxial (-201) β -Ga₂O₃ thin film by atmospheric pressure plasma-assisted CVD”, AIP Advances Vol.14 No.4 pp. 045003 1-5 (2024 年 4 月 1 日) :

大阪公立大学（東脇研究室）

- [8] Masataka Higashiwaki and Man Hoi Wong, “Beta-gallium oxide material and device technologies”, Annual Review of Materials Research Vol. 54, pp. 175-198 [Invited review] (2024 年 4 月 11 日) :
- [9] Jun J. Morihara, Jin Inajima, Zhenwei Wang, Junya Yoshinaga, Shota Sato, Kohki Eguchi, Takuya Tsutsumi, Yoshinao Kumagai, and Masataka Higashiwaki, “Electrical properties of

unintentionally doped β -Ga₂O₃ (010) thin films grown by low-pressure hot-wall metalorganic chemical vapor deposition”, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 63, No. 8, pp. 080901 1-4 (2024 年 8 月 6 日) :

- [10] Masataka Higashiwaki, “Gallium oxide power electronics – The key semiconductor for realizing energy sustainable future –”, IEEE Electron Device Magazine Vol. 2, No. 4, pp. 42-49 [Invited review] (2025 年 1 月 10 日) :
- [11] Kohki Eguchi, Yudai Suehiro, Yuto Tabata, Romulado A. Ferreyra, Takuya Tsutsumi, Yasuo Ohno, and Masataka Higashiwaki, “Design of high-frequency Ga₂O₃ Schottky barrier diodes for microwave wireless power transmission”, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 64, No. 4, pp. 046501 1-5 (2025 年 3 月 31 日) :
- [12] Kura Nakaoka, Shoki Taniguchi, Tomoki Uehara, Jin Inajima, Kohki Tsujimoto, Yusuke Teramura, Satoko Honda, Yong-Gu Shim, and Masataka Higashiwaki, “Plasma-assisted molecular beam epitaxy growth of high-density nitrogen-doped Ga₂O₃ thin films on Ga₂O₃ (010) substrates by simultaneously supplying oxygen and nitrogen radicals”, APL Materials Vol. 13, No. 5, pp. 051117 1-7 (2025 年 5 月 12 日) :
- [13] Jun J. Morihara, Mao Bando, Junya Yoshinaga, Yoshinao Kumagai, and Masataka Higashiwaki, “Effects of high-temperature annealing on electrical properties of Si-doped β -Ga₂O₃ thin films grown by low-pressure hot-wall MOCVD”, Applied Physics Letters Vol. 127, No. 14, pp. 142105 1-6 (2025 年 10 月 7 日) :

情報通信研究機構

- [14] Zhenwei Wang, Sandeep Kumar, Takafumi Kamimura, Hisashi Murakami, Yoshinao Kumagai, and Masataka Higashiwaki, “Ga₂O₃ fin field-effect transistors with on-axis (100)-plane gate sidewalls fabricated on Ga₂O₃ (010) substrates”, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 63, No. 10, pp. 100902 1-4 (2024 年 10 月 16 日) :

7 査読付き口頭発表論文（印刷物を含む）リスト

情報通信研究機構

- [1] Takafumi Kamimura, Takumi Ohtsuki, Masataka Higashiwaki, “A review: β -Ga₂O₃ transistors with back-barrier for RF applications”, 2025 22nd International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), pp. 1-6 (2025 年 5 月 22 日) :

8 その他の誌上発表リスト

特になし

9 口頭発表リスト

東京農工大学

- [1] Yoshinao Kumagai, Hisashi Murakami, Kohei Sasaki, Akito Kuramata, and Masataka Higashiwaki, “Vapor-phase epitaxial growth of gallium-oxide using Ga halides as source gases”, The 5th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (ドイツ ベルリン) (2024 年 5 月 27 日) 【招待講演】
- [2] Junya Yoshinaga, Haruka Tozato, Takahito Okuyama, Shogo Sasaki Guanxi Piao, Kazutada Ikenaga, Kazushige Shiina, Shuuichi Koseki, Yuzaburo Ban, and Yoshinao Kumagai, “Growth of Si-doped β -Ga₂O₃ thick layers by low-pressure hot-wall MOVPE using tetramethylsilane as a doping gas”, The 5th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (ドイツ ベルリン) (2024 年 5 月 28 日)
- [3] Yoshinao Kumagai, “High-Speed Growth of High-Purity β -Ga₂O₃ Layers by MOVPE”, The 7th U.S. Gallium Oxide Workshop (アメリカ コロンバス) (2024 年 8 月 6 日) 【招待講演】
- [4] Junya Yoshinaga, Takahito Okuyama, Yuma Terauchi, Kakeru Kubota, Shogo Sasaki, Guanxi Piao, Kazutada Ikenaga, Kazushige Shiina, Shuuichi Koseki, Yuzaburo Ban, and Yoshinao Kumagai, “Growth and Carrier Density Control of Si-Doped β -Ga₂O₃ Homoepitaxial Layers by MOVPE Using Tetramethylsilane as Doping Gas”, The 7th U.S. Gallium Oxide Workshop (アメリカ コロンバス) (2024 年 8 月 6 日)
- [5] Hisashi Murakami, Kyohei Nitta, and Yoshinao Kumagai, “Off-Angle Dependence of Homoepitaxial Growth on (010) β -Ga₂O₃ Substrate”, The 7th U.S. Gallium Oxide Workshop (アメリカ コロンバス) (2024 年 8 月 7 日)
- [6] Junya Yoshinaga, Takahito Okuyama, Kazutada Ikenaga, Kazushige Shiina, Yuzaburo Ban, and Yoshinao Kumagai, “High-speed growth of thick high-purity β -Ga₂O₃ layers by low-pressure hot-wall metalorganic vapor phase epitaxy”, E-MRS 2024 Fall Meeting (ポーランド ワルシャワ) (2024 年 9 月 16 日) 【招待講演】
- [7] 窪田 翔海、吉永 純也、奥山 貴仁、寺内 悠真、佐々木 捷悟、池永 和正、椎名 一成、小関 修一、伴雄三郎、熊谷義直、“MOVPE 法による Si ドープ β -Ga₂O₃(010)ホモエピタキシャル成長”、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟県新潟市) (2024 年 9 月 18 日)
- [8] 寺内 悠真、奥山 貴仁、窪田 翔海、吉永 純也、佐々木 捷悟、石川 真人、熊谷 義直、“トリメチルガリウム系 MOVPE による β -Ga₂O₃ 成長メカニズムの調査”、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟県新潟市) (2024 年 9 月 18 日)
- [9] Yoshinao Kumagai, “Growth of β -Ga₂O₃ Layers Using Metalorganic Vapor Phase Epitaxy”, 43rd Electronic Materials Symposium (奈良県橿原市) (2024 年 10 月 3 日) 【招待講演】
- [10] 吉永 純也、奥山 貴仁、窪田 翔海、寺内 悠真、佐々木 捷悟、池永 和正、椎名 一成、小関 修一、伴 雄三郎、熊谷 義直、“MOVPE 法によるパワーデバイス向け β -Ga₂O₃ ホモエピウェハの開発”、第 53 回結晶成長国内会議 (東京都新宿区) (2024 年 11 月 18 日) 【招待講演】
- [11] 寺内 悠真、奥山 貴仁、窪田 翔海、吉永 純也、佐々木 捷悟、石川 真人、瀧浪 欣彦、熊谷 義直、“ β -(Al_xGa_{1-x})₂O₃ の MOVPE 成長のための TMGa および TMAI の熱分解・燃焼挙動の調査”、第 53 回結晶成長国内会議 (東京都新宿区) (2024 年 11 月 19 日)

- [12] 窪田 翔海、吉永 純也、奥山 貴仁、寺内 悠真、佐々木 捷悟、池永 和正、椎名 一成、小関 修一、伴 雄三郎、熊谷 義直、“テトラメチルシランを用いた Si ドープ β -Ga₂O₃(010)ホモエピタキシャル層の MOVPE 成長”、第 53 回結晶成長国内会議（東京都新宿区）（2024 年 11 月 19 日）
- [13] 角田 健太郎、河野 有佑、熊谷 義直、“HVPE 法による β -Ga₂O₃ 成長における GaCl 先行供給の効果”、第 53 回結晶成長国内会議（東京都新宿区）（2024 年 11 月 20 日）
- [14] 吉永 純也、熊谷 義直、“MOVPE 法による β -Ga₂O₃ 成長とパワーデバイス用ホモエピウェハの開発”、独立行政法人日本学術振興会 R032 産業イノベーションのための結晶成長委員会第 20 回研究会「化合物半導体結晶成長の新展開」（東京都目黒区）（2025 年 3 月 6 日）【招待講演】
- [15] 河野 有佑、木川 孝俊、角田 健太郎、熊谷 義直、“窒素ドープ β -Ga₂O₃ ホモエピタキシャル層の HVPE 成長”、第 72 回応用物理学会春季学術講演会（千葉県野田市）（2024 年 3 月 16 日）
- [16] Yoshinao Kumagai, Junya Yoshinaga, Kazutada Ikenaga, Takeyoshi Onuma, Masataka Higashiwaki, and Yuzaburo Ban, “Control of n-Type Conductivity of MOVPE-Grown β -Ga₂O₃ by Intentional Si Doping”, 2025 MRS Spring Meeting & Exhibit（アメリカ シアトル）（2025 年 4 月 10 日）【招待講演】
- [17] 熊谷 義直、“酸化ガリウムホモエピタキシャルウェハの開発”、応用物理学会応用電子物性分科会／結晶工学分科会合同研究会「ワイドギャップ半導体電子デバイスの最前線」（大阪府大阪市）（2025 年 6 月 18 日）【招待講演】
- [18] 伊庭 義騎、吉永 純也、窪田 翔海、寺内 悠真、尾沼 猛儀、東脇 正高、伴 雄三郎、熊谷 義直、“減圧ホットウォール MOVPE 成長した Si ドープ β -Ga₂O₃ ホモエピタキシャル層の結晶性・電気的特性の Si 濃度依存性”、第 86 回応用物理学会秋季学術講演会（愛知県名古屋市）（2025 年 9 月 9 日）
- [19] 角田 健太郎、木川 孝俊、大槻 匠、上村 崇史、東脇 正高、熊谷 義直、“ β -Ga₂O₃ 基板表面の GaCl エッチングと HVPE ホモエピタキシャル成長への影響”、第 86 回応用物理学会秋季学術講演会（愛知県名古屋市）（2025 年 9 月 9 日）
- [20] 角田 健太郎、木川 孝俊、熊谷 義直、“NH₃ をドーパント源とした N ドープ β -Ga₂O₃(010)ホモエピタキシャル層の HVPE 成長”、第 54 回結晶成長国内会議（石川県金沢市）（2025 年 11 月 11 日）
- [21] 伊庭 義騎、吉永 純也、窪田 翔海、寺内 悠真、尾沼 猛儀、東脇 正高、伴 雄三郎、熊谷 義直、“ β -Ga₂O₃(010)基板上に減圧ホットウォール MOVPE 成長させたホモエピタキシャル層の結晶性およびキャリア輸送特性に対する Si ドーピング濃度の影響”、第 54 回結晶成長国内会議（石川県金沢市）（2025 年 11 月 11 日）
- [22] 熊谷 義直、“HVPE 法および MOVPE 法によるパワーデバイス向け酸化ガリウムホモエピタキシャルウェハの開発”、独立行政法人日本学術振興会 R063 高効率エネルギー変換材料とデバイス技術の融合委員会第 4 回研究会「次々世代パワー半導体材料 Ga₂O₃」（東京都千代田区）（2026 年 1 月 29 日）【招待講演】
- [23] 熊谷 義直、“成長炉内ガス種の解析による次世代パワーデバイス材料 β -Ga₂O₃ の MOVPE 成長技術の確立”、(株)三ツワフロンテック主催 Web セミナー「機能性材料・分析技術セミナー ～半導体プロセス～」（オンライン）（2026 年 2 月 24 日）【招待講演】
- [24] 吉永 純也、熊谷 義直、“MOVPE 法による縦型パワーデバイス向け β -Ga₂O₃ ホモエピタキシャル成長と特性解析”、独立行政法人日本学術振興会 R032 産業イノベーションのための結晶成長委員会

第 25 回研究会「ワイドギャップ半導体の現在と未来」（東京都目黒区）（2026 年 3 月 13 日）【招待講演】

- [25] 伊庭 義騎、寺内 悠真、吉永 純也、橋本 健宏、熊谷 義直、“減圧ホットウォール MOVPE 法による 2 インチ径 β -Ga₂O₃(010) 基板上ホモエピタキシャル厚膜の成長”、第 73 回応用物理学会春季学術講演会（東京都目黒区）（2026 年 3 月 16 日）
- [26] 北川 晴輝、吉田 直輝、村上 尚、熊谷 義直、“THVPE 法による Si ドープ β -Ga₂O₃(010)ホモエピタキシャル成長”、第 73 回応用物理学会春季学術講演会（東京都目黒区）（2026 年 3 月 16 日）
- [27] 寺内 悠真、佐々木 捷悟、吉永 純也、瀧浪 欣彦、石川 真人、熊谷 義直、“トリメチルガリウム分解・炭化水素燃焼機構の解明に基づく量産型 MOVPE 炉での高純度 β -Ga₂O₃ 成長”、第 73 回応用物理学会春季学術講演会（東京都目黒区）（2026 年 3 月 17 日）

京都大学

- [28] Hitoshi Takane, Shinya Konishi, Yuichiro Hayasaka, Ryo Ota, Takeru Wakamatsu, Yuki Isobe, Kentaro Kaneko, and Katsuhisa Tanaka, “Structural characterization of threading dislocation in α -Ga₂O₃ on sapphire”, The 5th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (IWGO-5) (ドイツ ベルリン) (2024 年 5 月 29 日)
- [29] Takeru Wakamatsu, Hitoshi Takane, Yuki Isobe, Kentaro Kaneko, and Katsuhisa Tanaka, “Ge-doped α -Ga₂O₃ film with electron mobility of 99 cm²V⁻¹s⁻¹”, The 5th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (IWGO-5) (ドイツ ベルリン) (2024 年 5 月 29 日)
- [30] 若松 岳、泉 宏和、磯部 優貴、高根 倫史、金子 健太郎、田中 勝久、“ミスト CVD 法で作製した高移動度 Ge ドープ α -Ga₂O₃ 薄膜の電気特性”、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会（新潟県新潟市）（2024 年 9 月 18 日）
- [31] 若松 岳、泉 宏和、高根 倫史、磯部 優貴、金子 健太郎、田中 勝久、“ミスト CVD 法で作製した高移動度 Ge ドープ α -Ga₂O₃ 薄膜の電気特性”、第 43 回電子材料シンポジウム (EMS43) (奈良県橿原市) (2024 年 11 月 2 日)
- [32] 若松 岳、泉 宏和、磯部 優貴、高根 倫史、金子 健太郎、田中 勝久、“ミスト CVD 法で作製した高移動度 Ge ドープ α -Ga₂O₃ 薄膜の電気特性評価と MESFET 応用”、日本材料学会 2024 年度第 3 回半導体エレクトロニクス部門委員会第 2 回研究会・2024 年度第 1 回ナノ材料部門委員会第 1 回研究会（京都府京都市）（2024 年 11 月 16 日）
- [33] 若松 岳、磯部 優貴、高根 倫史、金子 健太郎、田中 勝久、“ミスト CVD 法で作製した Ge ドープ α -Ga₂O₃ 薄膜の電気伝導特性と MESFET への応用”、日本セラミックス協会 2025 年年会（静岡県浜松市）（2025 年 3 月 6 日）
- [34] 若松 岳、藤田 静雄、金子 健太郎、大野 泰夫、平岡 知己、田中 勝久、“ α -Ga₂O₃ を用いたショットキーバリアダイオードのレクテナへの応用”、第 72 回応用物理学会春季学術講演会（千葉県野田市）（2025 年 3 月 16 日）
- [35] Takeru Wakamatsu, Shizuo Fujita, Hikaru Ikeda, Kentaro Kaneko, Yasuo Ohno, Tomomi Hiraoka, Katsuhisa Tanaka, “Application of α -Ga₂O₃-Based Schottky Barrier Diode to Microwave Rectenna”, The 8th United States Gallium Oxide Workshop (GOX 2025) (アメリカ ソルトレークシティ) (2025 年 8 月 6 日)

- [36] Takeru Wakamatsu, Shizuo Fujita, Hikaru Ikeda, Kentaro Kaneko, Yasuo Ohno, Tomomi Hiraoka, Katsuhisa Tanaka, “ α -Ga₂O₃-Based Schottky Barrier Diode for Microwave Rectenna Applications”, 2025 International Conference on Solid State Devices and Materials (神奈川県横浜市) (2025 年 9 月 18 日)
- [37] 永所 康太朗、若松 岳、金子 健太郎、田中 勝久、“微細パターンを設けたサファイア基板上へのミスト CVD 法による α -Ga₂O₃ 薄膜成長”, 2025 年度半導体エレクトロニクス部門委員会 第 2 回研究会 (京都府京都市) (2025 年 11 月 29 日)
- [38] Takeru Wakamatsu, Hirokazu Izumi, Hitoshi Tanake, Yuki Isobe, Kentaro Kaneko, Katsuhisa Tanaka, “Electrical properties of Ge-doped α -Ga₂O₃ films with high electron mobilities grown by mist-CVD”, Materials Research Meeting 2025 (MRM 2025) (神奈川県横浜市) (2025 年 12 月 10 日)
- [39] 永所 康太朗、若松 岳、金子 健太郎、田中 勝久、“微細加工を施した a 面サファイア基板における α -Ga₂O₃ 薄膜の成長”, 第 73 回応用物理学会春季学術講演会 (東京都目黒区) (2026 年 3 月 18 日)

大阪公立大学 (藤村研究室)

- [40] 藤村 紀文、“強誘電体材料とデバイス応用”, 大阪大学・社会人教育プログラム「ナノエレクトロニクス材料・デバイス学」 (大阪府豊中市) (2024 年 7 月 9 日)
- [41] Ryuto Ichikawa, Takeshi Yoshimura, and Norifumi Fujimura, “Non-equilibrium phase HfO₂ thin films by ALD method”, The 14th Japan-Korea Conference on Ferroelectricity (JKC-FE14) (滋賀県草津市) (2024 年 8 月 30 日)
- [42] 市川 龍斗、吉村 武、藤村 紀文、“ALD 法で作製した Ga₂O₃ 薄膜の成長機構”, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟県新潟市) (2024 年 9 月 18 日)
- [43] 古川 勝裕、市川 龍斗、阿多 翔大、吉村 武、藤村 紀文、“ β -Ga₂O₃ 上の HfO₂ 系極薄膜成長の結晶方位依存性”, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟県新潟市) (2024 年 9 月 18 日)
- [44] 阿多 翔大、市川 龍斗、内藤 圭吾、吉村 武、藤村 紀文、“成長空間における RF プラズマの評価と β -Ga₂O₃ 薄膜の ALD 成長”, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟県新潟市) (2024 年 9 月 18 日)
- [45] Ryuto Ichikawa, Takeshi Yoshimura, and Norifumi Fujimura, “Growth mechanism of ALD-Ga₂O₃ thin film”, 第 43 回電子材料シンポジウム (EMS43) (奈良県橿原市) (2024 年 10 月 3 日)
- [46] Katsuhiko Furukawa, Ryuto Ichikawa, Takeshi Yoshimura, and Norifumi Fujimura, “ALD growth of HfO₂-based ferroelectric thin films on Ga₂O₃”, 第 43 回電子材料シンポジウム (EMS43) (奈良県橿原市) (2024 年 10 月 3 日)
- [47] 古川 勝裕、市川 龍斗、阿多 翔大、吉村 武、藤村 紀文、“Hf 系強誘電体/ β -Ga₂O₃ 界面電子状態の評価”, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会 (千葉県野田市) (2025 年 3 月 16 日)
- [48] 阿多 翔大、市川 龍斗、古川 勝裕、相馬 永、吉村 武、長田 貴弘、山下 良之、小島 雅明、福田 竜生、藤村 紀文、“RF 窒素プラズマ照射による β -Ga₂O₃ の窒素ドーピング”, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会 (千葉県野田市) (2025 年 3 月 16 日)
- [49] 古川 勝裕、阿多 翔大、吉村 武、藤村 紀文、“Hf 系強誘電体/ β -Ga₂O₃ 界面電子状態の評価”, 第 42 回強誘電体会議 (FMA42) (京都府京都市) (2025 年 6 月 14 日)

- [50] 阿多 翔大、古川 勝裕、相馬 永、吉村 武、藤村 紀文、“Ga₂O₃ 薄膜の rf 窒素プラズマ支援 ALD 成長とその電気特性評価”、第 86 回応用物理学会秋季学術講演会（愛知県名古屋市）（2025 年 9 月 9 日）
- [51] 古川 勝裕、阿多 翔大、吉村 武、藤村 紀文、“Hf 系強誘電体/WBG 半導体 β -Ga₂O₃ 界面電子構造の解析”、第 86 回応用物理学会秋季学術講演会（愛知県名古屋市）（2025 年 9 月 9 日）
- [52] Norifumi Fujimura, “Novel chemical vapor deposition process of ZnO and Ga₂O₃ films by nonequilibrium atmospheric pressure N₂/O₂ Plasma”, 10th International Symposium on Transparent Conductive Materials & 14th International Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics (TCM-TOEO 2025) (ギリシャ クレタ) (2025 年 10 月 21 日) 【基調講演】
- [53] Shodai Ata, Katsuhiko Furukawa, Hisashi Soma, Takeshi Yoshimura, and Norifumi Fujimura, “The Physical Properties of Nitrogen Doped β -Ga₂O₃ Substrate and the ALD Films”, Materials Research Meeting (MRM 2025) (神奈川県横浜市) (2025 年 12 月 10 日)
- [54] 阿多 翔大、古川 勝裕、相馬 永、吉村 武、藤村 紀文、“rf 窒素プラズマを用いた β -Ga₂O₃ へのアクセプタ導入と ALD 成長”、第 73 回応用物理学会春季学術講演会（東京都目黒区）（2026 年 3 月 17 日）

大阪公立大学（東脳研究室）

- [55] Shota Sato, Akimasa Mineyama, Zhenwei Wang, and Masataka Higashiwaki, “Effects of oxygen reactive ion etching and nitrogen radical irradiation on temperature-dependent electrical properties of Ga₂O₃ (010) Schottky barrier diodes”, The 5th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (IWGO-5) (ドイツ ベルリン) (2024 年 5 月 29 日)
- [56] Jun Morihara, Zhenwei Wang, Junya Yoshinaga, Shota Sato, Kohki Eguchi, Yoshinao Kumagai, and Masataka Higashiwaki, “Investigation of electrical properties of unintentionally doped Ga₂O₃ thin films grown by low-pressure hot-wall MOCVD”, The 5th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (IWGO-5) (ドイツ ベルリン) (2024 年 5 月 29 日)
- [57] Masataka Higashiwaki, “Progress in Ga₂O₃ material and device technologies towards next-generation power and harsh-environment electronics”, The 5th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (IWGO-5) (ドイツ ベルリン) (2024 年 5 月 30 日) 【基調講演】
- [58] Kohki Eguchi, Yudai Suehiro, Romualdo A. Ferreyra, Yasuo Ohno, and Masataka Higashiwaki, “Structural design of high-frequency Ga₂O₃ Schottky barrier diodes for microwave wireless power transmission”, The 7th U.S. Gallium Oxide Workshop (アメリカ コロンバス) (2024 年 8 月 7 日)
- [59] Masataka Higashiwaki, Zhenwei Wang, Shota Sato, Kohki Eguchi, Kura Nakaoka, Shoki Taniguchi, Takafumi Kamimura, Hisashi Murakami, and Yoshinao Kumagai, “Vertical Ga₂O₃ (010) FinFETs with (100) sidewalls treated by nitrogen radical irradiation”, 15th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM 2024) (宮城県仙台市) (2024 年 8 月 27 日) 【招待講演】

- [60] Masataka Higashiwaki, “Gallium oxide electronics – Power, harsh environment, and something new –”, 2024 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2024) (兵庫県姫路市) (2024 年 9 月 2 日) 【基調講演】
- [61] Shoki Taniguchi, Kura Nakaoka, Tomoki Uehara, Jin Inajima, Yusuke Teramura, Kohki Tsujimoto, Satoko Honda, and Masataka Higashiwaki, “MBE growth of nitrogen-doped Ga₂O₃ (010) thin films”, 23rd International Conference on Molecular Beam Epitaxy (ICMBE 2024) (島根県松江市) (2024 年 9 月 10 日)
- [62] 中岡 蔵、谷口 奨季、上原 知起、稲嶌 仁、本田 智子、東脇 正高、“窒素ラジカル照射処理した Ga₂O₃ (010) 基板上に MBE 成長した Ga₂O₃ 薄膜”、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟県新潟市) (2024 年 9 月 18 日)
- [63] 谷口 奨季、中岡 蔵、上原 知起、稲嶌 仁、寺村 祐輔、辻本 晃基、本田 智子、東脇 正高、“Development of nitrogen doping process for Ga₂O₃ by MBE”、第 43 回電子材料シンポジウム (EMS-43) (奈良県橿原市) (2024 年 10 月 4 日)
- [64] 中岡 蔵、谷口 奨季、稲嶌 仁、上原 知起、寺村 祐輔、辻本 晃基、本田 智子、東脇 正高、“Ga₂O₃ (010) 基板上に MBE 成長した窒素ドーパ Ga₂O₃ 薄膜 (1)”、応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第 11 回講演会 (群馬県高崎市) (2024 年 11 月 25 日)
- [65] 上原 知起、谷口 奨季、中岡 蔵、稲嶌 仁、辻本 晃基、寺村 祐輔、本田 智子、東脇 正高、“Ga₂O₃ (010) 基板上に MBE 成長した窒素ドーパ Ga₂O₃ 薄膜 (2)”、応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第 11 回講演会 (群馬県高崎市) (2024 年 11 月 25 日)
- [66] 江口 輝生、末廣 雄大、Romualdo A. Ferreyra、堤 卓也、大野 泰夫、東脇 正高、“マイクロ波無線電力伝送に向けた高周波 Ga₂O₃ ショットキーバリアダイオード構造の設計”、応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第 11 回講演会 (群馬県高崎市) (2024 年 11 月 25 日)
- [67] 末廣 雄大、江口 輝生、堤 卓也、大野 泰夫、東脇 正高、“高周波 Ga₂O₃ ショットキーバリアダイオードを用いたマイクロ波無線電力伝送応用に向けたレクテナ回路設計”、応用物理学会 先進パワー半導体分科会 第 11 回講演会 (群馬県高崎市) (2024 年 11 月 25 日)
- [68] Masataka Higashiwaki, “Advances in gallium oxide material and device technologies”, 11th International Workshop on Semiconductor Oxides (IWSO-2025) (アメリカ テンピ) (2025 年 3 月 3 日) 【基調講演】
- [69] 東脇 正高、上村 崇史、大槻 匠、武山 昭憲、牧野 高紘、大島 武、“極限環境エレクトロニクス応用に向けた酸化ガリウムデバイス開発”、第 72 回応用物理学会春季学術講演会 シンポジウム「極限環境デバイス」 (千葉県野田市) (2025 年 3 月 15 日) 【招待講演】
- [70] 寺村 祐輔、中岡 蔵、谷口 奨季、稲嶌 仁、上原 知起、辻本 晃基、本田 智子、大槻 匠、上村 崇史、東脇 正高、“プラズマ援用 MBE 成長した窒素ドーパ β-Ga₂O₃ (010) 薄膜の電気的特性”、第 72 回応用物理学会春季学術講演会 (千葉県野田市) (2025 年 3 月 15 日)
- [71] 八木 虎太郎、松尾 大輔、金野 舜、竹村 真哉、臼井 洸佑、安東 靖典、田中 浩平、東脇 正高、“加熱注入による Ga₂O₃ への高濃度 Si ドーピング (2) – 電気的特性 –”、第 72 回応用物理学会春季学術講演会 (千葉県野田市) (2025 年 3 月 15 日)

- [72] 末廣 雄大、江口 輝生、田端 悠大、堤 卓也、大野 泰夫、東脇 正高、“高周波 Ga_2O_3 ショットキーバリアダイオードを活用した 24 GHz マイクロ波無線電力伝送用レクテナ回路設計”、第 72 回応用物理学会春季学術講演会（千葉県野田市）（2025 年 3 月 15 日）
- [73] 稲嶋 仁、中岡 蔵、谷口 奨季、上原 知起、辻本 晃基、寺村 祐輔、本田 智子、東脇 正高、“酸素、窒素ラジカル同時供給による高濃度窒素ドーパ Ga_2O_3 薄膜の プラズマ援用 MBE 成長 (1)”、第 72 回応用物理学会春季学術講演会（千葉県野田市）（2025 年 3 月 16 日）
- [74] 辻本 晃基、中岡 蔵、谷口 奨季、稲嶋 仁、上原 知起、寺村 祐輔、本田 智子、沈 用球、東脇 正高、“酸素、窒素ラジカル同時供給による高濃度窒素ドーパ Ga_2O_3 薄膜の プラズマ援用 MBE 成長 (2)”、第 72 回応用物理学会春季学術講演会（千葉県野田市）（2025 年 3 月 16 日）
- [75] 上原 知起、谷口 奨季、辻本 晃基、中岡 蔵、稲嶋 仁、寺村 祐輔、本田 智子、東脇 正高、“プラズマ援用 MBE 成長した窒素ドーパ Ga_2O_3 ショットキーバリアダイオードの電気的特性”、第 72 回応用物理学会春季学術講演会（千葉県野田市）（2025 年 3 月 16 日）
- [76] 森原 淳、坂東 舞生、吉永 純也、熊谷 義直、東脇 正高、“減圧ホットウォール MOCVD 成長した Si ドープ Ga_2O_3 薄膜の電気的特性に対する高温アニール処理の影響”、第 72 回応用物理学会春季学術講演会（千葉県野田市）（2025 年 3 月 16 日）
- [77] 東脇 正高、吉永 純也、村上 尚、熊谷 義直、“酸化ガリウム薄膜エピタキシャル成長技術の進展”、日本物理学会 2025 年春季大会（オンライン）（2025 年 3 月 18 日）【招待講演】
- [78] Masataka Higashiwaki, Kura Nakaoka, Syouki Taniguchi, Shota Sato, Kohki Eguchi, Jin Inajima, Tomoki Uehara, Yusuke Teramura, Kohki Tsujimoto, Zhenwei Wang, and Satoko Honda, “Nitrogen doping into Ga_2O_3 by molecular beam epitaxy”, 2025 MRS Spring Meeting and Exhibit (アメリカ シアトル)（2025 年 4 月 10 日）【招待講演】
- [79] 東脇 正高、稲嶋 仁、上原 知起、寺村 祐輔、辻本 晃基、本田 智子、ワン ジェンウェイ、“酸化ガリウムデバイスのための窒素ドーピング技術”、電気学会 電子デバイス研究会「化合物半導体を用いた次世代高機能デバイス技術とアプリケーション」（栃木県日光市、オンライン）（2025 年 4 月 16 日）【招待講演】
- [80] Masataka Higashiwaki, “ Ga_2O_3 FETs for future power and harsh environment electronics”, 2025 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS) (アメリカ サンフランシスコ)（2025 年 6 月 16 日）【招待講演】
- [81] Jin Inajima, Kura Nakaoka, Shoki Taniguchi, Tomoki Uehara, Kohki Tsujimoto, Yusuke Teramura, Satoko Honda, and Masataka Higashiwaki, “Nitrogen doping into Ga_2O_3 by plasma-assisted molecular beam epitaxy”, The 67th Electronic Materials Conference (EMC) (アメリカ ダーラム)（2025 年 6 月 26 日）
- [82] Jun J. Morihara, Mao Bando, Junya Yoshinaga, Yoshinao Kumagai, and Masataka Higashiwaki, “Electrical properties of Si-doped Ga_2O_3 thin films grown by low-pressure hot-wall MOCVD and effects of high-temperature annealing”, The 67th Electronic Materials Conference (EMC) (アメリカ ダーラム)（2025 年 6 月 26 日）
- [83] Masataka Higashiwaki, Jin Inajima, Tomoki Uehara, Kohki Tsujimoto, Yusuke Teramura, Satoko Honda, and Zhenwei Wang, “Nitrogen-doped Ga_2O_3 thin films grown by molecular beam

- epitaxy”, 8th United States Gallium Oxide Workshop (GOX 2025) (アメリカ ソルトレイクシティ) (2025 年 8 月 4 日) 【招待講演】
- [84] K. Yagi, D. Matsuo, S. Konno, S. Takemura, K. Usui, Y. Andoh, K. Tanaka, and M. Higashiwaki, “High-density Si doping into Ga_2O_3 by hot implantation”, The 8th United States Gallium Oxide Workshop (GOX 2025) (アメリカ ソルトレイクシティ) (2025 年 8 月 5 日)
- [85] Masataka Higashiwaki, “Advances in gallium oxide epitaxial growth and devices”, Center for Device Thermography and Reliability (CDTR) seminar (イギリス ブリストル) (2025 年 8 月 29 日) 【依頼講演】
- [86] Masataka Higashiwaki, “Present status of gallium oxide device technologies”, The 35th International Conference on Diamond and Carbon Materials (ICDCM 2025) (イギリス グラスゴー) (2025 年 9 月 1 日) 【基調講演】
- [87] 東脇 正高, “酸化ガリウムデバイスの現状と可能性”, 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会 (愛知県名古屋市) (2025 年 9 月 7 日) 【招待講演】
- [88] 八木 虎太郎, 松尾 大輔, 金野 舜, 臼井 洸佑, 安東 靖典, 田中 浩平, 東脇 正高, “加熱イオン注入による高濃度 Si ドープ $n\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のホール測定”, 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会 (愛知県名古屋市) (2025 年 9 月 7 日)
- [89] 森原 淳, 垣尾 宗, 吉永 純也, 上村 崇史, 熊谷 義直, 東脇 正高, “減圧ホットウォール MOVPE 成長した Ga_2O_3 薄膜のフォトキャパシタンス測定”, 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会 (愛知県名古屋市) (2025 年 9 月 9 日)
- [90] 稲脇 仁, 上原 知起, 辻本 晃基, 寺村 祐輔, 本田 智子, 東脇 正高, “MBE 成長した窒素ドープ Ga_2O_3 薄膜中の窒素原子の熱拡散”, 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会 (愛知県名古屋市) (2025 年 9 月 9 日)
- [91] 峰山 滉正, 東脇 正高, “反応性イオンエッチングにより窒素ドープした $n\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (010) 基板の構造および電気的特性評価”, 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会 (愛知県名古屋市) (2025 年 9 月 9 日)
- [92] Jun J. Morihara, Tsukasa Kakio, Junya Yoshinaga, Takafumi Kamimura, Yoshinao Kumagai, and Masataka Higashiwaki, “Investigation of electrical properties of unintentionally doped Ga_2O_3 thin films grown by low-pressure hot-wall MOCVD”, 2025 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2025) (神奈川県横浜市) (2025 年 9 月 17 日)
- [93] Masataka Higashiwaki, Jin Inajima, Tomoki Uehara, Kohki Tsujimoto, Yusuke Teramura, and Satoko Honda, “MBE growth of nitrogen-doped Ga_2O_3 thin films”, 8th International Workshop on Ultra-Wide Bandgap Materials and Devices (IWUMD 2025) (ポーランド ヴロツワフ) (2025 年 9 月 24 日) 【招待講演】
- [94] 辻本 晃基, 上原 知起, 稲脇 仁, 寺村 祐輔, 本田 智子, 東脇 正高, “Analysis of C - V characteristics of nitrogen-doped $\text{Ga}_2\text{O}_3/n\text{-Ga}_2\text{O}_3$ junctions grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy”, 第 44 回電子材料シンポジウム (EMS-44) (奈良県橿原市) (2025 年 10 月 15 日)
- [95] 八木 虎太郎, 松尾 大輔, 金野 舜, 臼井 洸佑, 安東 靖典, 田中 浩平, 東脇 正高, “Electrical properties of Si-doped Ga_2O_3 formed by hot implantation”, 第 44 回電子材料シンポジウム (EMS-44) (奈良県橿原市) (2025 年 10 月 17 日)

- [96] 上原 知起、本田 智子、稲嶌 仁、辻本 晃基、寺村 祐輔、東脇 正高、“Structural characterization of nitrogen-doped Ga₂O₃ thin films grown by plasma-assisted molecular beam epitaxy”、第 44 回電子材料シンポジウム (EMS-44) (奈良県橿原市) (2025 年 10 月 17 日)
- [97] 峰山 滉正、東脇 正高、“Electrical properties of nitrogen-doped Ga₂O₃ Schottky barrier diodes fabricated using reactive ion etching”、第 44 回電子材料シンポジウム (EMS-44) (奈良県橿原市) (2025 年 10 月 17 日)
- [98] Masataka Higashiwaki, Jin Inajima, Tomoki Uehara, Khoki Tsujimoto, Yusuke Teramura, Satoko Honda, and Zhenwei Wang, “Effects of nitrogen doping on electrical properties of Ga₂O₃”, The 2025 International Workshop on Dielectric Thin Films for Future Electron Devices - Science and Technology - (IWDTF2025) (宮城県仙台市) (2025 年 11 月 7 日) 【招待講演】
- [99] Masataka Higashiwaki, Jin Inajima, Tomoki Uehara, Kohki Tsujimoto, Yusuke Teramura, Satoko Honda, and Zhenwei Wang, “Nitrogen doping technology for Ga₂O₃ devices”, The 8th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-8) (台湾 台南市) (2025 年 11 月 12 日) 【招待講演】
- [100] Masataka Higashiwaki, “Electrical properties of nitrogen-doped n-Ga₂O₃ (010) layers formed using reactive ion etcher”, Materials Research Meeting 2025 (MRM 2025) (神奈川県横浜市) (2025 年 12 月 11 日) 【基調講演】
- [101] Akimasa Mineyama and Masataka Higashiwaki, “Current status of gallium oxide material and device technologies”, Materials Research Meeting 2025 (MRM 2025) (神奈川県横浜市) (2025 年 12 月 11 日)
- [102] 東脇 正高、“パワー半導体 酸化ガリウム技術の現状”、北陸半導体コンソーシアム(北陸 iSRC) 第 2 回フォーラム (石川県金沢市) (2025 年 12 月 16 日) 【基調講演】
- [103] Masataka Higashiwaki, “Gallium oxide MBE growth and device technologies”, REWIRE UK-Japan Wide Band Gap Electronics Workshop (愛知県名古屋市) (2026 年 3 月 10 日) 【招待講演】
- [104] 東脇 正高、“酸化ガリウム材料・デバイス開発の現状と今後の展望”、第 51 回ニューセラミックスセミナー (大阪府大阪市) (2026 年 3 月 13 日) 【招待講演】
- [105] 峰山 滉正、東脇 正高、“反応性イオンエッチングにより窒素ドーパした *n*-Ga₂O₃ (100), (010), (001) 基板の構造および電気的特性評価”、第 73 回応用物理学会春季学術講演会 (東京都目黒区) (2026 年 3 月 16 日)
- [106] 稲嶌 仁、峰山 滉正、本田 智子、東脇 正高、“MBE 成長した窒素ドーパ Ga₂O₃ 薄膜中の窒素原子の熱拡散 (2)”、第 73 回応用物理学会春季学術講演会 (東京都目黒区) (2026 年 3 月 16 日)
- [107] 辻本 晃基、上原 知起、稲嶌 仁、寺村 祐輔、中岡 俊貴、武田 翔真、本田 智子、東脇 正高、“プラズマ援用 MBE 成長した窒素ドーパ (Al_xGa_{1-x})₂O₃ 薄膜の構造特性評価”、第 73 回応用物理学会春季学術講演会 (東京都目黒区) (2026 年 3 月 17 日)
- [108] 森原 淳、垣尾 宗、Romualdo A. Ferreyra、吉永 純也、上村 崇史、熊谷 義直、東脇 正高、“高温アニール処理が Ga₂O₃ 薄膜のトラップ準位に及ぼす影響の DLOS 評価”、第 73 回応用物理学会春季学術講演会 (東京都目黒区) (2026 年 3 月 17 日)

- [109] 田端 悠大、末廣 雄大、Romualdo A. Ferreyra、堤 卓也、金野 舜、臼井 洸佑、松尾 大輔、伊庭 義騎、寺内 悠真、吉永 純也、熊谷 義直、大野 泰夫、東脇 正高、“マイクロ波無線電力伝送用レクテナ回路応用に向けた高周波 Ga_2O_3 ショットキーバリアダイオード開発”、第 73 回応用物理学会春季学術講演会（東京都目黒区）（2026 年 3 月 18 日）
- [110] Masataka Higashiwaki, “Gallium oxide power device technologies”, INPACE Japan-EU Semiconductor Workshop（東京都文京区）（2026 年 3 月 25 日）【招待講演】

日新イオン機器

- [111] Shinya Takemura, Shun Konno, Daisuke Matsuo, Yasunori Andoh, Kohei Tanaka, Kotaro Yagi, and Masataka Higashiwaki, “Hot-Implantation of High-Density Si donors into $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ” The 7th U.S. Gallium Oxide Workshop (GOX 2024)（アメリカ コロンバス）（2024 年 8 月 7 日）
- [112] 金野 舜、松尾 大輔、八木 虎太郎、竹村 真哉、臼井 洸佑、安東 靖典、田中 浩平、東脇 正高、“加熱注入による Ga_2O_3 への高濃度 Si ドーピング (1) – 構造評価 –”、第 72 回応用物理学会春季学術講演会（千葉県野田市）（2025 年 3 月 15 日）

レーザーシステム

- [113] 平岡 知己、西水流 悠太、新海 聡子、若松 岳、池田 光、藤田 静雄、田中 勝久、大野 泰夫、“ミスト CVD 法による Ga_2O_3 膜のレーザーアニールによる結晶化”、第 86 回応用物理学会秋季学術講演会（愛知県名古屋市）（2025 年 9 月 7 日）

三菱電機

- [114] 湯田 洋平、海老原 洪平、田屋 昌樹、渡邊 寛、綿引 達郎、“酸化ガリウムショットキーバリアダイオード ($\text{Ga}_2\text{O}_3\text{-SBD}$) 開発の取り組み”、第 22 回ワイドギャップ半導体学会研究会（大阪府大阪市）（2025 年 7 月 25 日）【招待講演】

情報通信研究機構

- [115] Zhenwei Wang, Sandeep Kumar, Takafumi Kamimura, Hisashi Murakami, Yoshinao Kumagai, and Masataka Higashiwaki, “ Ga_2O_3 FinFETs with on-axis (100)-plane gate sidewalls fabricated on $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (010) substrates”, 5th International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials (IWGO-5)（ドイツ ベルリン）（2024 年 5 月 30 日）
- [116] Takumi Ohtsuki, Takafumi Kamimura, and Masataka Higashiwaki, “Epitaxial growth and radio-frequency characteristics of Ga_2O_3 field-effect transistors with $(\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ back-barrier layer”, The 23rd International Conference on Molecular Beam Epitaxy (ICMBE2024)（島根県松江市）（2024 年 9 月 10 日）
- [117] Zhenwei Wang, Sandeep Kumar, Takafumi Kamimura, Shota Sato, Kohki Eguchi, Kura Nakaoka, Shoki Taniguchi, Hisashi Murakami, Yoshinao Kumagai, and Masataka Higashiwaki, “Effects of nitrogen radical irradiation to Ga_2O_3 (100) surface and its application to vertical Ga_2O_3 FinFETs”, 23rd International Conference on Molecular Beam Epitaxy (ICMBE 2024)（島根県松江市）（2024 年 9 月 10 日）
- [118] 上村 崇史、東脇 正高、“ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ における塩素系ドライエッチングによるキャリアプロファイル異常とその可動性”、第 85 回応用物理学会秋季学術講演会（新潟県新潟市）（2024 年 9 月 20 日）

- [119] 上村 崇史、“酸化ガリウムの基礎と高効率パワーデバイス開発への応用およびそのポイント”、日本テクノセンターセミナー「酸化ガリウムの基礎と高効率パワーデバイス開発への応用およびそのポイント」（オンライン）（2024 年 10 月 2 日）【依頼講演】
- [120] 大槻 匠、上村 崇史、東脇 正高、“MBE 法による $\beta\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$ 薄膜の成長と高周波 Ga_2O_3 トランジスタへの応用”、第 53 回結晶成長国内会議（JCCG-53）（東京都新宿区）（2024 年 11 月 18 日）【依頼講演】
- [121] 上村 崇史、“酸化ガリウムパワーデバイスの開発動向”、ジャパンマーケティングサーベイセミナー「次世代パワーデバイスの最新開発動向～酸化ガリウムとダイヤモンド半導体～」（オンライン）（2025 年 1 月 17 日）【依頼講演】
- [122] Sandeep Kumar, Hisashi Murakami, Yoshinao Kumagai, and Masataka Higashiwaki, “Vertical $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ Schottky barrier diodes with trench staircase field plate”, 第 72 回応用物理学会春季学術講演会（千葉県野田市）（2025 年 3 月 15 日）【第 46 回応用物理学会優秀論文賞受賞記念講演】
- [123] 大槻 匠、東脇 正高、“表面近傍に高濃度で Fe イオン注入した基板上への Ga_2O_3 薄膜の成長”、第 72 回応用物理学会春季学術講演会（千葉県野田市）（2025 年 3 月 15 日）
- [124] 上村 崇史、東脇 正高、“ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ における塩素系ドライエッチングによるキャリアプロファイル異常とエッチング量の相関”、第 72 回応用物理学会春季学術講演会（千葉県野田市）（2025 年 3 月 17 日）
- [125] 大槻 匠、上村 崇史、東脇 正高、“ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜の MBE 成長と横型高周波トランジスタの開発”、半導体の結晶成長と加工および評価に関する産学連携委員会 第 10 回研究会「ワイドギャップ酸化物半導体 Ga_2O_3 の成長、評価、およびデバイス応用の新展開」（東京都千代田区）（2025 年 6 月 27 日）【依頼講演】
- [126] Zhenwei Wang, Jin Inajima, Yoshiki Iba, Kohki Tsujimoto, Yuma Terauchi, Yusuke Teramura, Junya Yoshinaga, Takafumi Kamimura, Yoshinao Kumagai, and Masataka Higashiwaki, “Effects of nitrogen radical irradiation on electrical properties of Ga_2O_3 (010) FinFETs”, 第 73 回応用物理学会春季学術講演会（東京都目黒区）（2026 年 3 月 18 日）

10 出願特許リスト

Orbray

- [1] 西口 健吾、大橋智典、矢代安澄、古滝敏郎、柴田大輔、“ β 型円柱状 Ga_2O_3 系単結晶の製造方法及び β 型 Ga_2O_3 系単結晶基板の製造方法”、日本（2026 年 3 月 11 日）
- [2] 西口 健吾、大橋智典、矢代安澄、古滝敏郎、柴田大輔、“ β 型 Ga_2O_3 系単結晶の製造方法、日本（2026 年 3 月 11 日）

東京農工大学

- [3] 吉永 純也、池永 和正、朴 錫冠、熊谷 義直、後藤 健、佐々木 捷悟、“エピタキシャル膜の製造方法、気相成長装置およびエピタキシャル膜”、日本（2024 年 4 月 18 日）
- [4] 吉永 純也、朴 錫冠、池永 和正、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”、台湾（2024 年 5 月 16 日）

- [5] 吉永 純也、朴 錫冠、池永 和正、熊谷 義直、後藤 健、佐々木 捷悟、“METHOD FOR PRODUCING CRYSTALLINE FILM, VAPOR PHASE GROWTH DEVICE, AND β -GALLIUM OXIDE CRYSTALLINE FILM”、アメリカ（2024 年 5 月 21 日）
- [6] 吉永 純也、朴 錫冠、池永 和正、熊谷 義直、後藤 健、佐々木 捷悟、“METHOD FOR PRODUCING CRYSTALLINE FILM, VAPOR PHASE GROWTH DEVICE, AND β -GALLIUM OXIDE CRYSTALLINE FILM”、欧州（2024 年 5 月 21 日）
- [7] 吉永 純也、朴 錫冠、池永 和正、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”、中国（2024 年 5 月 21 日）
- [8] 吉永 純也、朴 錫冠、池永 和正、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”、韓国（2024 年 5 月 21 日）

レーザーシステム・京都大学

- [9] 大野 泰夫、平岡 知己、原田 芳昌、坪井 泰之、伊藤 弘子、田中 勝久、藤田 静雄、金子 健太郎、若松 岳、“積層構造体の製造方法および積層構造体”、日本（2025 年 8 月 12 日）

三菱電機

- [10] 湯田 洋平、古橋 壮之、“酸化物半導体装置とその製造方法”、日本（2025 年 12 月 24 日）

情報通信研究機構

- [11] 大槻 匠、東脇 正高、“半導体基板の製造方法、及びエピタキシャル構造体の製造方法”、日本（2025 年 2 月 28 日）
- [12] 大槻 匠、東脇 正高、“半導体基板の製造方法、及びエピタキシャル構造体の製造方法”、PCT（2026 年 2 月 13 日）

1 1 取得特許リスト

特になし

1 2 国際標準提案・獲得リスト

特になし

1 3 参加国際標準会議リスト

特になし

1 4 受賞リスト

東京農工大学

- [1] 寺内 悠真、日本結晶成長学会第 21 回講演奨励賞、“ β -($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$) $_2\text{O}_3$ の MOVPE 成長のための TMGa および TMAI の熱分解・燃焼挙動の調査”（2024 年 12 月 11 日）
- [2] 窪田 翔海、日本結晶成長学会第 21 回講演奨励賞、“テトラメチルシランを用いた Si ドープ β - Ga_2O_3 (010)ホモエピタキシャル層の MOVPE 成長”（2024 年 12 月 11 日）

- [3] 伊庭 義騎、応用物理学会結晶工学分科会発表奨励賞、“異なる Si ドーピング濃度で減圧ホットウォール MOVPE 成長した β -Ga₂O₃(010)ホモエピタキシャル層の結晶性およびキャリア輸送特性評価” (2025 年 12 月 3 日)
- [4] 角田 健太郎、日本結晶成長学会第 22 回講演奨励賞、“NH₃ をドーパント源とした N ドープ β -Ga₂O₃(010)ホモエピタキシャル層の HVPE 成長” (2025 年 12 月 8 日)
- [5] 伊庭 義騎、日本結晶成長学会第 22 回講演奨励賞、“ β -Ga₂O₃(010)基板上に減圧ホットウォール MOVPE 成長させたホモエピタキシャル層の結晶性およびキャリア輸送特性に対する Si ドーピング濃度の影響” (2025 年 12 月 8 日)

大阪公立大学（東協研究室）

- [6] 東協 正高、クラリベイト 2024 年高被引用論文著者 (Highly Cited Researcher 2024) (2024 年 11 月 19 日)
- [7] 東協 正高、電子情報通信学会 エレクトロニクスソサエティ 活動功労表彰 (2025 年 3 月 26 日)
- [8] 東協 正高、2025 年度 大阪公立大学 学長表彰 (研究) (2025 年 10 月 7 日)

情報通信研究機構

- [9] Sandeep Kumar、村上 尚、熊谷 義直、東協 正高、第 46 回 (2024 年度) 応用物理学会優秀論文賞 (2024 年 9 月 16 日)
受賞論文: “Vertical β -Ga₂O₃ Schottky barrier diodes with trench staircase field plate”, Applied Physics Express Vol. 15, No. 5, pp. 054001 1-3 (2022)

15 報道発表リスト

東京農工大学

- [1] “東京農工大など、 β 型酸化ガリウム結晶の高精度 n 型ドーピング技術を独自の有機金属気相成長法で実現”、日本経済新聞 Web 版 (2025 年 5 月 20 日)
- [2] “ β 型酸化ガリウム結晶 高速成長技術を開発”、化学工業日報 (2025 年 5 月 21 日)
- [3] “東京農工大など、 β -Ga₂O₃ 結晶の高速成長技術 独自の有機金属気相成長法で実現”、電波新聞 Web 版 (2025 年 5 月 29 日)

研究開発による成果数

	令和6年度	令和7年度	合計
査読付き誌上発表論文数	8件(8件)	6件(6件)	14件(14件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	0件(0件)	1件(1件)	1件(1件)
その他の誌上発表数	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)
口頭発表数	66件(16件)	60件(13件)	126件(29件)
特許出願数	7件(5件)	5件(1件)	12件(6件)
特許取得数	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)
国際標準獲得数	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)
受賞数	5件(1件)	4件(0件)	9件(1件)
報道発表数	0件(0件)	3件(0件)	3件(0件)
報道掲載数	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)

注: 各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。(括弧)内は、その内海外分のみを再掲。