

4 環境制御 ICT 基盤技術 —基盤から社会展開まで—

4 Environment Control ICT Basic Research

— from Researches to Applications —

4-1 酸化ガリウム電子デバイス研究開発

4-1 Research and Development on Gallium Oxide Electronic Devices

東脇正高 上村崇史

HIGASHIWAKI Masataka and KAMIMURA Takafumi

酸化ガリウム (Ga_2O_3) は、次世代パワーデバイス、極限環境無線通信デバイス応用に適した優れた物性を有する。また、原理的に大口径かつ高品質な単結晶基板を、融液成長法により安価かつ簡便に製造することができるという産業応用上の魅力も併せ持つ。本稿では、研究背景、 Ga_2O_3 の物性について述べた後、未来 ICT 研究所グリーン ICT デバイス先端開発センターで行ってきた Ga_2O_3 電子デバイス研究開発の現状について紹介する。

Ga_2O_3 has excellent material properties suitable for next-generation power and extreme-environment wireless communication device applications. Furthermore, it has an attractive feature from the viewpoint of industrial application that large-diameter, high-quality single-crystal wafers can be easily produced at low cost by melt growth methods. In this paper, after describing research background and material properties of Ga_2O_3 , we will introduce current status of research and development on Ga_2O_3 electronic devices, which have been conducted at Green ICT Device Advanced Development Center, Advanced ICT Research Institute.

1 まえがき

70年以上にわたる半導体トランジスタの歴史を振り返ると、材料の有する諸特性の根幹とも言えるバンドギャップに注目し、既存材料には無いバンドギャップを有する新材料を開拓し、それを使いこなすことこそが、一貫して半導体材料、デバイス研究開発の基本戦略であった。実際、ゲルマニウム、シリコン (Si) から始まり、主にバンドギャップエネルギーが大きくなる方向 [ガリウム砒素、シリコンカーバイド (SiC)、窒化ガリウム (GaN)] へと、新たな半導体材料及びその応用に関する研究開発が進められてきた。NICT は、その存在自体は長く知られていたが、デバイス開発に関してはほぼ手つかずの状態にあった新酸化物半導体材料酸化ガリウム (Ga_2O_3) に着目し、2011年世界に先駆けてそのトランジスタ開発、動作実証に成功した [1]。

Ga_2O_3 は、様々な物性の中でも半導体の最も基本的な特性に相当するバンドギャップエネルギーが、全半導体の中で唯一無二の 4.5 eV という値を取ることに一番の特長がある [2]。実際、そのバンドギャップエネルギーは、ワイドバンドギャップ半導体の代表的存在

である SiC や GaN の 3.3 ~ 3.4 eV よりも更に 1 eV 程度大きな値となる。この Ga_2O_3 の 4.5 eV よりも更に大きなバンドギャップエネルギーを有する材料の場合、不純物ドーピングによるキャリア濃度の精密制御が不可能、つまり半導体ではなく絶縁体になってしまうと考えられる。そのため Ga_2O_3 が、デバイス応用可能な最後の単結晶バルク半導体である可能性は高いと言える。この大きなバンドギャップに起因する物性から期待されるデバイス応用は、様々な電力変換に用いられるパワーデバイス及び極限環境と呼ばれる通常半導体デバイスの利用が想定されていない過酷な環境での無線通信、信号処理デバイスなどが挙げられる。

省エネルギー化は、将来長きにわたる持続可能な電力供給の確保、温室効果ガス排出量の削減のため、現在世界的な社会課題として挙げられている。電力変換損失の削減は、このエネルギー課題を解決するのに最も有効な手段の一つである。このような社会情勢にある現在、広く一般に用いられている Si パワーデバイスがその性能限界に近づいていることもあり、ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイス開発が活発に行われている。我々が研究開発を行う Ga_2O_3 パワーデバイ

スは、その非常に大きなバンドギャップに基づく物性から、通常の Si デバイスはもとより、SiC, GaN デバイスをも大きく上回るデバイス性能 (高効率、低損失化) を達成し得るポテンシャルを有する。

また現在、極限環境と呼ばれる高温、多湿、腐食性ガス雰囲気、放射線下などの過酷な環境において利用可能な半導体デバイス、回路が強く求められている。それら応用分野は現状まだニッチ市場ではあるが、社会的重要性の観点から注目を集めている。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は、その非常に大きなバンドギャップに伴う材料的適性及び化学的に安定な結晶構造から、極限環境エレクトロニクスという新しい分野を切り拓く半導体材料として期待される。

以上のような社会的情勢も踏まえて、未来 ICT 研究所グリーン ICT デバイス先端開発センターでは、パワースイッチング、極限環境無線通信という二つの領域での実用を目指した Ga_2O_3 トランジスタ、ダイオードの研究開発を、外部機関 (大学、企業) との緊密な連携の下に推進している。現在、 Ga_2O_3 パワーデバイス研究開発は、多くの基盤技術は確立され、企業への技術移転、そして移転した技術を基に各企業での製品化、実用化に向けたデバイス本格開発に移ろうとする段階にある。一方、 Ga_2O_3 極限環境デバイスに関しては、その実用の可能性を探るため、基本的なデバイス構造を作製し、そのデバイス特性から実用領域自体も含めて検討するという探索的研究開発フェーズにある。

2 Ga_2O_3 の材料特性、特徴

2.1 Ga_2O_3 の物性

Ga_2O_3 は、III 族酸化物半導体の一種で、結晶多形で知られている。現在までに 6 種類の結晶相が確認されており、それぞれギリシャ文字 $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon, \kappa$ を用いて分類される [3]–[5]。最安定結晶相は $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ であり、これまでグリーン ICT デバイス先端開発センターにおける Ga_2O_3 デバイス研究開発は $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ に特化している。ちなみに、 β 以外の結晶相は準安定構造であり、主に異種材料基板上的低温ヘテロエピタキシャル成長で得られる。上述のように、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ のバンドギャップエネルギーについては、SiC, GaN の 3.3 ~ 3.4 eV を大きく上回る 4.5 eV である [2]。この非常に大きなバンドギャップから、デバイス耐圧を決める物性パラメータである絶縁破壊電界に関して、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は SiC, GaN と比較して 2 倍以上大きな値を有すると見積もられる。その結果、パワーデバイス用途半導体としての材料的資質を比較するために最もよく用いられる指標であるバリガ性能指数 (Baliga's figure of merit) [6][7] が、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の場合 SiC, GaN の数倍大きな値となる

表 1 パワーデバイスに用いられる主要な半導体と $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の物性比較

	Si	4 H-SiC	GaN	$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$
バンドギャップ (eV)	1.1	3.3	3.4	4.5
電子移動度 ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	1,400	1,000	1,200	200
絶縁破壊電界 (MV/cm)	0.3	2.5	3.3	>7
比誘電率	11.8	9.7	9.0	10 ~ 12
バリガ性能指数	1	340	870	>1,500

(表 1)。この優れたバリガ性能指数を主な判断材料として、パワーデバイス応用に向けた Ga_2O_3 の高い材料的ポテンシャルに期待が集まっている。また、バンドギャップが大きい材料を用いた電子デバイスは、原理的に高温動作が可能になるとともに、総じて放射線耐性も高い特徴がある。

2.2 Ga_2O_3 単結晶バルク融液成長技術

最安定相である $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ は、Si などと同様に、融液成長により単結晶バルクを育成可能である。このことが、同様の融液成長が不可能な SiC, GaN に対するアドバンテージとなる。原理的に、チョクラルスキー、フローティングゾーン、ブリッジマン法などの代表的な融液成長法が、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ バルク育成に利用可能である [8]–[10]。かつて我々が共同研究を行っていた (株) タムラ製作所のメンバーが、カーブアウトしてベンチャー企業 (株) ノベルクリスタルテクノロジーを設立した (2015 年 6 月) [11]。なお、NICT との共同研究で得た成果を基にした起業であるため、ノベルクリスタルテクノロジーは「NICT 技術移転ベンチャー」とも定義されている。ノベルクリスタルテクノロジーは、 Ga_2O_3 バルク製造に融液成長法の一つである縁部限定薄膜供給成長法 (Edge defined film-fed growth: EFG) を採用し [12]、現在 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 単結晶バルク、エピタキシャルウェハーを商業ベースで製造、販売している。その世界的シェアは、少なくとも見積もっても 80 % 以上と非常に大きい。単結晶 Ga_2O_3 ウェハーは、転位密度が 10^4 cm^{-2} 以下と非常に低いことに代表されるように、既にデバイス開発を遂行するうえで十分に高品質なものが得られている。また、研究開発レベルでは、最大 6 インチ径ウェハーの製造にも成功している。このように、低コストかつ大口径ウェハーの量産が見込める点が、産業化を考えた場合重要な Ga_2O_3 の強みとなる。

3 Ga_2O_3 パワーデバイス開発

3.1 Ga_2O_3 トランジスタ開発

パワーデバイスとしてのトランジスタは、電力のオン、オフ制御のためのスイッチとして用いられる。トランジスタには縦型、横型があるが、高電圧、大電流、

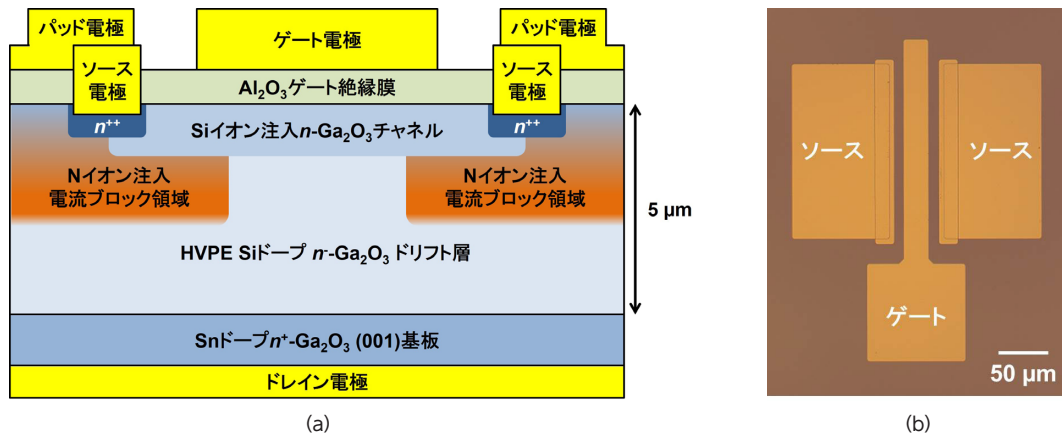


図1 縦型ディプレッションモード Ga₂O₃ トランジスタの (a) 断面構造模式図、(b) 光学顕微鏡写真

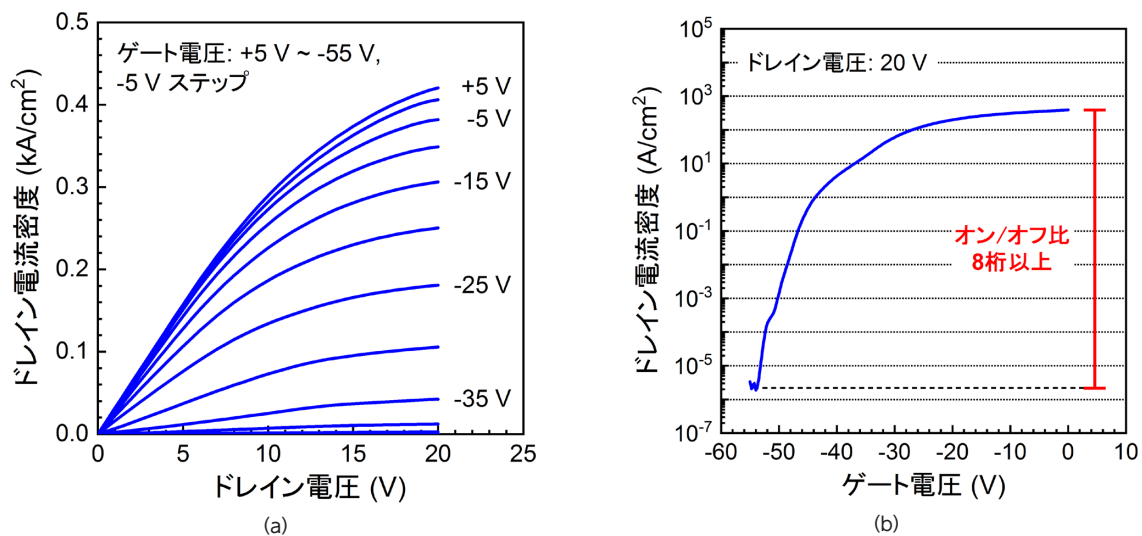


図2 縦型ディプレッションモード Ga₂O₃ トランジスタの (a) 電流 - 電圧出力特性、(b) トランスファー特性

大電力用途には縦型構造が望ましい。

図1(a)、(b)に、2018年グリーンICTデバイス先端開発センターが、東京農工大と共同で開発した縦型ディプレッションモード Ga₂O₃ トランジスタの断面構造模式図、光学顕微鏡写真をそれぞれ示す[13]。東京農工大にて、*n*型 Ga₂O₃ ドリフト層をハライド気相成長(HVPE)したエピ基板を用いて、NICTにてデバイスプロセス、特性評価を行った[14][15]。トランジスタ動作原理は、エピ表面のソース電極から裏面のドレイン電極への電子の流れを、両サイドに配置する電流ブロック層にてアパーチャー部分に限定し、その直上に作製したゲート電極でオン/オフ制御する方式となる。電流ブロック層作製プロセスには、我々が独自開発した窒素(N)イオン注入ドーピング技術を用いている[16]。イオン注入ドーピング技術は、面内でのデバイス構造の作り込みが容易にできることから汎用性が高く、加えて低コストプロセスである。そのため量産に適しており、実際の半導体デバイス製造現場で広く

用いられている。我々が大きなブレイクスルーと位置づける本デバイス開発に当たっては、以前開発したSiを用いたイオン注入*n*型ドーピング技術[17]に加え、新たに開発したNイオン注入*p*型ドーピング技術が肝となった。

図2(a)、(b)に、代表的なデバイス特性である電流-電圧特性、トランスファー特性をそれぞれ示す。デバイス特性的には、スイッチングデバイスとして最も重要なドレイン電流オン/オフ比が、実用上必要な5~6桁を大きく上回る8桁を記録するなど優れたものであった。

スイッチング用途に用いるパワートランジスタの場合、フェールセーフの観点からデバイスが故障した際、自動的にオフとなり電力を遮断するノーマリーオフ動作が望ましく、多くの用途で強く求められる。2019年、ノーマリーオンデバイスである上述縦型ディプレッションモードトランジスタ構造をベースに、チャンネル層ドーピング濃度等のデバイス構造を変更することで、

ノーマリーオフ動作を可能とする縦型エンハンスメントモード Ga₂O₃ トランジスタの作製、動作実証に成功した [18]。デバイス特性は比較的良好で、ドレイン電流オン/オフ比も 7 桁と大きな値を保つことができている。しかしながら、Ga₂O₃ 薄膜中に存在する電荷トラップによると思われる問題点も確認された。今後、デバイス構造の最適化及び半導体薄膜の高品質化などにより、これらの問題解決に取り組んでいく。

3.2 Ga₂O₃ ショットキーバリアダイオード開発

ダイオードは、一般的に整流器として用いられる。トランジスタと同様に、高電圧、大電流、大電力用途には縦型ダイオード構造が望ましい。

我々が、東京農工大、三菱電機(株)と共同開発した縦型 Ga₂O₃ ショットキーバリアダイオードの断面構造模式図を図 3 に示す [19]。トランジスタと同様、東京農工大にて n 型 Ga₂O₃ ドリフト層を HVPE 成長したエピ基板を用いて、NICT でデバイスプロセス、特性評価を行った。上述縦型トランジスタでも用いた、N イ

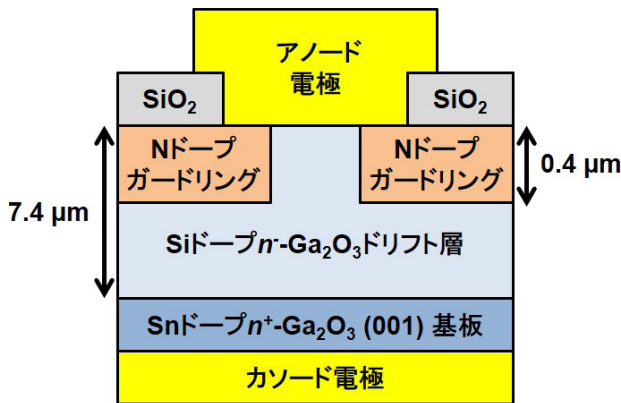


図 3 ガードリングを有する縦型 Ga₂O₃ ショットキーバリアダイオードの断面構造模式図

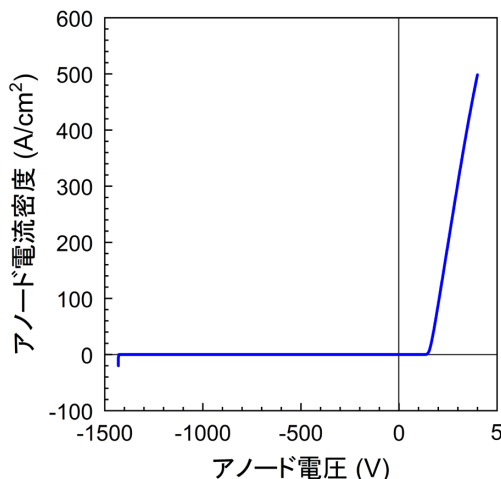


図 4 ガードリング付き縦型 Ga₂O₃ ショットキーバリアダイオードの電流密度 - 電圧特性

オン注入ドーピングによりガードリングを形成している点に特徴がある。ガードリングには、アノード電極端への電界集中を防止し、デバイス耐圧を向上させる効果が期待される。

図 4 に、作製したガードリング付き縦型 Ga₂O₃ ショットキーバリアダイオードの電流密度 - 電圧特性を示す。ガードリングの効果により、デバイス逆方向耐圧は 1,076 V [20] から 1,430 V へと大幅な向上を果たした。なお、この Ga₂O₃ ショットキーバリアダイオードで記録したオン抵抗 (4.7 mΩ·cm²)、逆方向耐圧 (1,430 V) の両方で決まる総合的なデバイス特性は世界最高レベルであった。

4 Ga₂O₃ 極限環境無線通信トランジスタ開発

4.1 Ga₂O₃ トランジスタの耐放射線性

現在、極限環境エレクトロニクスと呼ばれる、高温、多湿、腐食性ガス雰囲気、放射線下などの過酷な環境において利用可能な半導体デバイス、回路の必要性が増している。それらの多くは、人間が立ち入ることができない環境での作業において、現場の状況を離れた場所でリアルタイムに把握するための各種センサー (カメラ、温度計、放射線量計など) と組み合わせて利用される。比較的身近な応用例として、自動車・航空機のエンジンルームから、未開拓領域に該当する地下資源探査、宇宙空間まで、その用途は多岐にわたる。また、高温、放射線両方への高い耐性が必要な原子力施設や、災害時に活躍するロボットなどからも要求がある。これら尽きることなく社会的に求められる、より高度な情報インフラを幅広い分野で実現するためには、既存の半導体デバイス技術を更に改良、発展させるだけにとどまらず、新しい半導体材料を用いた革新

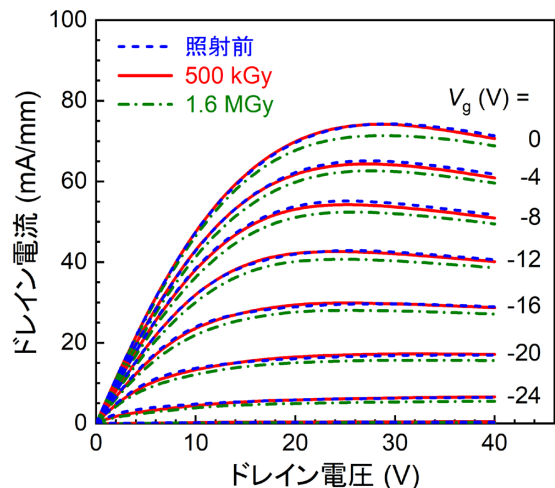


図 5 横型 Ga₂O₃ 電界効果トランジスタの電流 - 電圧出力特性のガンマ線積算照射線量依存性

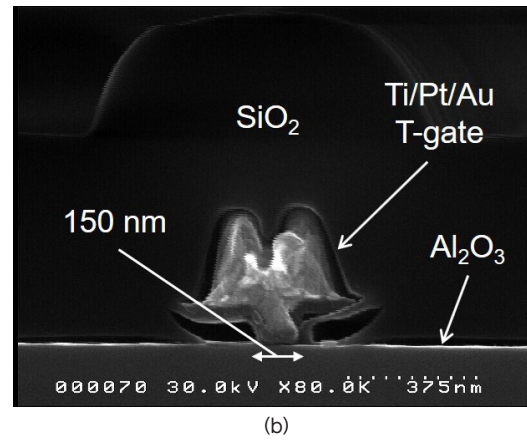
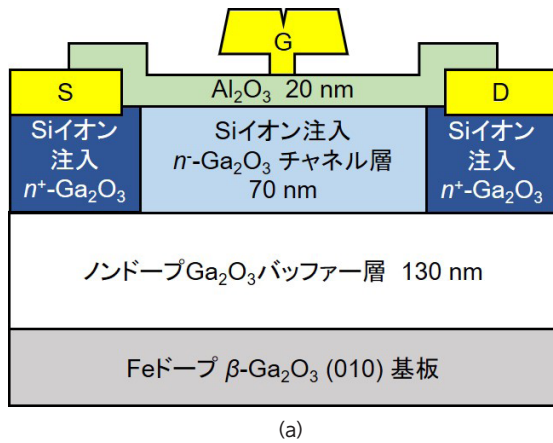


図6 高周波 Ga₂O₃ 電界効果トランジスタの (a) 断面構造模式図、(b) ゲート部分の走査型電子顕微鏡像 (ゲート長 150 nm)

的とも言えるデバイス技術を開拓していく研究開発が必要となる。

Ga₂O₃ は、その材料特性から、上述のような過酷な環境においても安定かつ特性劣化無く動作し続けることが期待される。我々は、Ga₂O₃ デバイスの基礎的な放射線耐性を確認するための実験を、国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構と共同で行った。具体的には、Ga₂O₃ トランジスタへのガンマ線照射を複数回行い、照射後の様々なデバイス特性の劣化の有無を確認した [21]。結果、1.6 MGy という非常に高い積算量のガンマ線照射後も、デバイス動作に問題はなく、その特性劣化もほとんど認められなかった (図 5)。一般的に、宇宙応用には 0.1 MGy 以上、原子炉応用には 1 MGy 以上のガンマ線耐性が求められる。これらの結果から、Ga₂O₃ が耐放射線デバイス用途の半導体材料として高いポテンシャルを有することを確認した。

4.2 極限環境無線通信応用に向けた高周波 Ga₂O₃ トランジスタ

上述のように、我々は、極限環境デバイスとしての Ga₂O₃ トランジスタの有する高い可能性に着目し、具体的な実用用途、周波数帯を検討することを目的とした高周波 Ga₂O₃ トランジスタの探索的研究開発を実施している。

2019 年、ゲート長が 50 ~ 1,000 nm の横型 Ga₂O₃ トランジスタを作製し、その高周波デバイス特性を系統的に評価した [22]。このトランジスタは、主に無線通信応用を見据えたものである。図 6 (a)、(b) に、作製したトランジスタの断面構造模式図及びゲート部分 (ゲート長 150 nm) の走査型電子顕微鏡像をそれぞれ示す。すべてのゲート長において、おおむね良好なデバイス特性が得られた。ここでは、ゲート長 200 nm のトランジスタの高周波デバイス特性について紹介する。高周波動作の限界周波数に相当する電流利得遮断

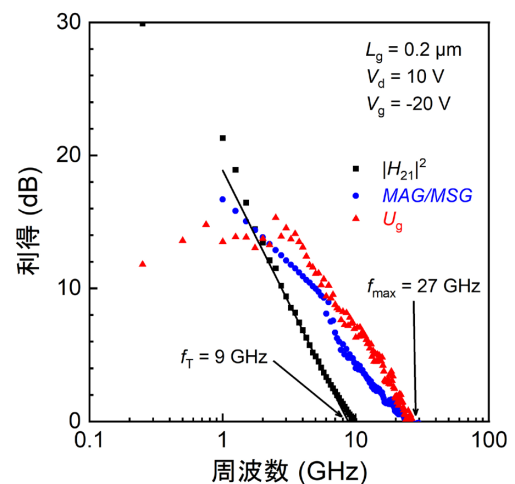


図7 ゲート長 200 nm の Ga₂O₃ 電界効果トランジスタの RF 小信号特性 ($|H_{21}|^2$: 電流利得、MSG/MAG: 最大安定電力利得/最大有能電力利得、 U_g : 単方向電力利得)

周波数 (current-gain cutoff frequency: f_T) は 9 GHz、高周波電力増幅の重要な性能指数である最大発信周波数 (f_{max}) は 27 GHz と共に優れた値を記録した。特に f_{max} は、これまでの Ga₂O₃ トランジスタ報告最高値であった 17 GHz を、約 60 % 増と大きく上回るものであった [23]。これらデバイス特性から、少なくとも一般に無線通信に用いられる 1 ~ 10 GHz 程度の周波数において、Ga₂O₃ トランジスタが十分に利用可能であることが明らかになった。今後、極限環境下での無線通信デバイス用途を念頭に、高周波 Ga₂O₃ トランジスタの更なる特性改善に向けた研究開発を進めていく。

5 むすび

Ga₂O₃ は、NICT が見だし、世界初の Ga₂O₃ トランジスタ動作実証を果たした新半導体材料である。我々が果たしたいくつかのブレークスルーと呼べる技術、成果の報告が呼び水となって、現在では Ga₂O₃ デ

バイス研究開発が世界中で活発に行われている。様々な用途への応用が期待される中で、Ga₂O₃は、特にパワーデバイス材料として高いポテンシャルを有しており、Si, SiC, GaNなどの既存の半導体パワーデバイスを、特性的に大きく上回るものを実現することが期待される。今後、高性能Ga₂O₃パワーデバイスは、グローバルな社会課題である省エネ問題に対して直接貢献するとともに、日本発の新たな半導体産業の創出という経済面での大きな貢献も見込まれる。加えて、Ga₂O₃デバイスは、極限環境エレクトロニクスという半導体デバイス未踏分野の開拓におけるキーテクノロジーとなることも期待される。

現在、グリーン ICT デバイス先端開発センターでは、パワーエレクトロニクス、極限環境エレクトロニクス両分野への応用を念頭にGa₂O₃トランジスタ、ダイオードに関する研究開発を行っている。我々は、今後も早期実用化に向けた活動に全身全霊で取り組んでいく所存である。

謝辞

本稿で紹介した成果は、これまでにグリーン ICT デバイス先端開発センターに在籍した研究員、及び外部機関研究者と共同で行った研究開発により得られたものである。ここに、この研究に関わった全ての研究者に感謝の意を表します。また、本稿で紹介した研究開発の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「次世代パワーエレクトロニクス」(管理法人:NEDO)、及び総務省戦略的情報通信研究開発推進事業 (SCOPE) からの委託事業として実施されました。

【参考文献】

- M. Higashiwaki, K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, "Gallium oxide (Ga₂O₃) metal-semiconductor field-effect transistors on single-crystal β -Ga₂O₃ (010) substrates," *Appl. Phys. Lett.*, vol.100, no.1, 013504, Jan. 2012.
- T. Onuma, S. Saito, K. Sasaki, T. Masui, T. Yamaguchi, T. Honda, and M. Higashiwaki, "Valence band ordering in β -Ga₂O₃ studied by polarized transmittance and reflectance spectroscopy," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.54, no.11, 112601, Nov. 2015.
- R. Roy, V. G. Hill, and E. F. Osborn, "Polymorphism of Ga₂O₃ and the system Ga₂O₃-H₂O," *J. Am. Chem. Soc.*, vol.74, no.3, pp.719-722, Feb. 1952.
- I. Cora, F. Mezzadri, F. Boschi, M. Bosi, M. Čaplovičová, G. Calestani, I. Dódony, B. Pécz, and R. Fornari, "The real structure of ϵ -Ga₂O₃ and its relation to κ -phase," *CrystEngComm*, vol.19, no.11 pp.1509-1516, March 2017.
- M. Kneiß, A. Hassa, D. Splith, C. Sturm, H. von Wenckstern, T. Schultz, N. Koch, M. Lorenz, and M. Grundmann, "Tin-assisted heteroepitaxial PLD-growth of κ -Ga₂O₃ thin films with high crystalline quality," *APL Mater.*, vol.7, no.2, 022516, Feb. 2019.
- B. J. Baliga, "Semiconductors for high voltage, vertical channel field effect transistors," *J. Appl. Phys.*, vol.53, no.3, pp.1759-1764, March 1982.
- B. J. Baliga, "Power semiconductor device figure of merit for high-frequency applications," *IEEE Electron Device Lett.*, vol.10, no.10, pp.455-457, Oct. 1989.
- Z. Galazka, R. Uecker, D. Klimm, K. Irmscher, M. Naumann, M. Pietsch, A. Kwasniewski, R. Bertram, S. Ganschow, and M. Bickermann, "Scaling-up of bulk β -Ga₂O₃ single crystals by the Czochralski method," *ECS J. Solid State Sci. Technol.*, vol.6, no.2 pp.Q3007-Q3011, Jan. 2017.
- E. G. Villora, K. Shimamura, Y. Yoshikawa, K. Aoki, and N. Ichinose, "Large-size β -Ga₂O₃ single crystals and wafers," *J. Cryst. Growth*, vol.270, Issues 3-4, pp.420-426, Oct. 2004.
- K. Hoshikawa, E. Ohba, T. Kobayashi, J. Yanagisawa, C. Miyagawa, and Y. Nakamura, "Growth of β -Ga₂O₃ single crystals using vertical Bridgman method in ambient air," *J. Cryst. Growth*, vol.447, pp.36-41, Aug. 2016.
- (株)ノベルクリスタルテクノロジーウェブサイト
<https://www.novelcrystal.co.jp/>
- A. Kuramata, K. Koshi, S. Watanabe, Y. Yamaoka, T. Masui, and S. Yamakoshi, "High-quality β -Ga₂O₃ single crystals grown by edge-defined film-fed growth," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol.5, no.12, 1202A2, Dec. 2016.
- M. H. Wong, K. Goto, H. Murakami, Y. Kumagai, and M. Higashiwaki, "Current aperture vertical β -Ga₂O₃ MOSFETs fabricated by N- and Si-ion implantation doping," *IEEE Electron Device Lett.*, vol.40, no.3, pp.431-434, March 2019.
- H. Murakami, K. Nomura, K. Goto, K. Sasaki, K. Kawara, Q. T. Thieu, R. Togashi, Y. Kumagai, M. Higashiwaki, A. Kuramata, S. Yamakoshi, B. Monemar, and A. Koukita, "Homoepitaxial growth of β -Ga₂O₃ layers by halide vapor phase epitaxy," *Appl. Phys. Express*, vol.8, no.1, 015503, Jan. 2015.
- K. Goto, K. Konishi, H. Murakami, Y. Kumagai, B. Monemar, M. Higashiwaki, A. Kuramata, and S. Yamakoshi, "Halide vapor phase epitaxy of Si doped β -Ga₂O₃ and its electrical properties," *Thin Solid Films*, vol.666, pp.182-184, Nov. 2018.
- M. H. Wong, C.-H. Lin, A. Kuramata, S. Yamakoshi, H. Murakami, Y. Kumagai, and M. Higashiwaki, "Acceptor doping of β -Ga₂O₃ by Mg and N ion implantations," *Appl. Phys. Lett.*, vol.113, no.10, 102103, Sept. 2018.
- K. Sasaki, M. Higashiwaki, A. Kuramata, T. Masui, and S. Yamakoshi, "Si-ion implantation doping in β -Ga₂O₃ and its application to fabrication of low-resistance ohmic contacts," *Appl. Phys. Express*, vol.6, no.8, 086502, Aug. 2013.
- M. H. Wong, H. Murakami, Y. Kumagai, and M. Higashiwaki, "Enhancement-mode β -Ga₂O₃ current aperture vertical MOSFETs with N-ion-implanted blocker," *IEEE Electron Device Lett.*, vol.41, no.2, pp.296-299, Feb. 2020.
- C.-H. Lin, Y. Yuda, M. H. Wong, M. Sato, N. Takekawa, K. Konishi, T. Watahiki, M. Yamamuka, H. Murakami, Y. Kumagai, and M. Higashiwaki, "Vertical Ga₂O₃ Schottky barrier diodes with guard ring formed by nitrogen-ion implantation," *IEEE Electron Device Lett.*, vol.40, no.9, pp.1487-1490, Sept. 2019.
- K. Konishi, K. Goto, H. Murakami, Y. Kumagai, A. Kuramata, S. Yamakoshi, and M. Higashiwaki, "1-kV vertical Ga₂O₃ field-plated Schottky barrier diodes," *Appl. Phys. Lett.*, vol.110, no.10, 103506, March 2017.
- M. H. Wong, A. Takeyama, T. Makino, T. Ohshima, K. Sasaki, A. Kuramata, S. Yamakoshi, and M. Higashiwaki, "Radiation hardness of β -Ga₂O₃ metal-oxide-semiconductor field-effect transistors against gamma-ray irradiation," *Appl. Phys. Lett.*, vol.112, no.2, 023503, Jan. 2018.
- T. Kamimura, Y. Nakata, and M. Higashiwaki, " β -Ga₂O₃ MOSFETs with a maximum oscillation frequency of 27 GHz," submitted to *IEEE Electron Device Lett.*
- K. D. Chabak, D. E. Walker, A. J. Green, A. Crespo, M. Lindquist, K. Leedy, S. Tettak, R. Gilbert, N. A. Moser, and G. Jessen, "Sub-micron gallium oxide radio frequency field-effect transistors," in *Proc. 2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, July 2018.



東脇正高 (ひがしわき まさたか)
未来 ICT 研究所
グリーン ICT デバイス先端開発センター
センター長
博士 (工学)
化合物半導体電子デバイス、薄膜結晶成長



上村崇史 (かみむら たかふみ)
未来 ICT 研究所
グリーン ICT デバイス先端開発センター
主任研究員
博士 (工学)
化合物半導体電子デバイス