

一般セッション(口頭講演)| 21 合同セッションK「ワイドギャップ酸化物半導体材料・デバイス」：21.1 合同セッションK「ワイドギャップ酸化物半導体材料・デバイス」

■ 2023年9月20日(水) 13:00 ~ 17:00 | 会 A302 (熊本城ホール)

■ [20p-A302-1~15] 21.1 合同セッションK「ワイドギャップ酸化物半導体材料・デバイス」

佐々木 公平(ノベルクリスタルテクノロジー)、池之上 卓己(京大)

13:00 ~ 13:15

[20p-A302-1] ミスト CVD 法による MgO 基板上 Ga₂O₃ 薄膜の成長

○池之上 卓己^{1,2}、Cho Yongjin²、Protasenko Vladimiri²、Savant Chandu²、Cromer Bennett²、三宅 正男¹、平藤 哲司¹、Thompson Mike²、Jena Debdeep²、Xing Huili² (1.京大院エネ科、2.コーネル大)

13:15 ~ 13:30

[20p-A302-2] ミストCVD成長β-Ga₂O₃を用いたMESFET

○(D)高根 倫史¹、安藤 裕二²、高橋 英匡²、牧迫 隆太郎²、池田 光¹、上田 哲三³、須田 淳²、田中 勝久¹、藤田 静雄¹、菅谷 英生³ (1.京大、2.名大、3.パナソニック)

13:30 ~ 13:45

[20p-A302-3] (001) β-Ga₂O₃基板上のNiO薄膜上に形成したGa₂O₃薄膜

○中込 真二¹ (1.石巻専修大理工)

13:45 ~ 14:00

[20p-A302-4] (-102)面β-Ga₂O₃基板上のホモエピタキシャル成長

大島 祐一¹、○大島 孝仁¹ (1.NIMS)

14:00 ~ 14:15

[20p-A302-5] (-102)面β-Ga₂O₃基板に対する選択成長と選択エッチング

○大島 孝仁¹、大島 祐一¹ (1.NIMS)

14:15 ~ 14:30

[20p-A302-6] 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

○(M2)新田 恭平¹、後藤 健¹、村上 尚²、熊谷 義直¹ (1.東京農工大院工、2.東京農工大院BASE)

14:30 ~ 14:45

[20p-A302-7] ルツボレスで作製したβ-Ga₂O₃結晶の成長方位依存性

○高橋 勲^{1,2}、Vladimir Kochurikhin¹、富田 健稔¹、菅原 孝昌²、庄子 育宏¹、鎌田 圭^{1,2}、柿本 浩一²、吉川 彰^{2,1} (1.株C&A、2.東北大)

15:00 ~ 15:15

[20p-A302-8] HVPE法によるβ-Ga₂O₃(010)基板上Siドープβ-Ga₂O₃層の成長

○(M2)田中 舞¹、河野 有佑¹、後藤 健¹、熊谷 義直^{1,2} (1.東京農工大院工、2.東京農工大 FLOuRISH)

15:15 ~ 15:30

[20p-A302-9] Cr₂O₃単結晶上への低欠陥α-Ga₂O₃薄膜成長

○渡邊 守道¹、村上 和仁¹、西村 昇¹ (1.日本ガイシ (株))

15:30 ~ 15:45

[20p-A302-10] 導電性 α -($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$) $_2\text{O}_3$ 薄膜の作製とその評価

○安岡 龍哉¹、ダン タイジャン²、劉 麗²、川原村 敏幸^{1,2} (1.高知工大シス工、2.高知工大総研)

◆注目講演

15:45 ~ 16:00

[20p-A302-11] MBE法により成長したSiドープ α - Al_2O_3 層の電気的特性評価

○奥村 宏典¹ (1.筑波大数理)

16:00 ~ 16:15

[20p-A302-12] Cold-wall MOCVD法を用いたサファイア基板上 Ga_2O_3 層の試作

○奥村 宏典¹ (1.筑波大 数理)

16:15 ~ 16:30

[20p-A302-13] 選択成長 α - Ga_2O_3 の速度論的安定性の温度依存性

○神野 莉衣奈¹、深津 晋¹ (1.東大院総合文化)

16:30 ~ 16:45

[20p-A302-14] 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

○(M1)江口 輝生¹、佐藤 翔太¹、Wang Zhenwei²、東脇 正高^{1,2} (1.大阪公立大院工、2.情通機構)

16:45 ~ 17:00

[20p-A302-15] 窒化ラジカル照射処理した Ga_2O_3 表面の構造評価

○(M1)谷口 奨季¹、中岡 蔵¹、東脇 正高^{1,2} (1.大阪公立大院工、2.情通機構)

ミスト CVD 法による MgO 基板上 Ga₂O₃ 薄膜の成長

Epitaxial Growth of Ga₂O₃ Thin Films on MgO Substrate via Mist CVD Method

京大院エネ科¹, コーネル大学² °池之上 卓己^{1,2}, Yongjin Cho², Vladimir Protasenko², Chandu Savant²,
Bennett Cromer², 三宅 正男¹, 平藤 哲司¹, Mike Thompson², Debdeep Jena², Huili Grace Xing²
Kyoto Univ.¹, Cornell Univ.², °Takumi Ikenoue^{1,2}, Yongjin Cho², Vladimir Protasenko², Chandu Savant²,
Bennett Cromer², Masao Miyake¹, Tetsuji Hirato¹, Mike Thompson², Debdeep Jena², Huili Grace Xing²
E-mail: ikenoue.takumi.4m@kyoto-u.ac.jp

Ga₂O₃ は、パワーデバイス用の有望なワイドバンドギャップ材料として期待されている。Ga₂O₃ は p 型化が難しいことから、p 型ワイドギャップ酸化物半導体として NiO が注目されており、その NiO のエピタキシャル成長用の基板として、同じ結晶構造を有し、格子不整合の小さな MgO は有望な候補である。したがって、MgO 基板上の Ga₂O₃ 成長は、特に NiO と Ga₂O₃ を組み合わせたヘテロ接合デバイスの開発に重要となる。そこで、本研究では、ミスト CVD 法を用いた MgO (001) 基板上への Ga₂O₃ の成長について報告する。

Ga₂O₃ の成長には、ガリウムアセチルアセトナート水溶液を用いた。洗浄した MgO 基板上に 300 °C または 600 °C で Ga₂O₃ を成長させた。Fig. 1(a) は、600 °C で成長させた Ga₂O₃ 薄膜の XRD パターンである。MgO (002) 基板上に (100) 配向の β-Ga₂O₃ が成長したことがわかる。Fig. 1(b) の拡大図からは、PLD などの方法で成膜した時にみられることのある γ-Ga₂O₃ (400) のピーク (2θ=43.93°) は観察されず、β-Ga₂O₃ 単相であることが示唆された。MgO と β-Ga₂O₃ の界面に γ-Ga₂O₃ が存在しないことは、p-NiO でも β-Ga₂O₃ との急峻な界面の作製が期待できる。一方、300 °C で成長させた Ga₂O₃ 薄膜は γ-Ga₂O₃ (400) 単相であった。これらの Ga₂O₃ 薄膜の特性についても報告する。

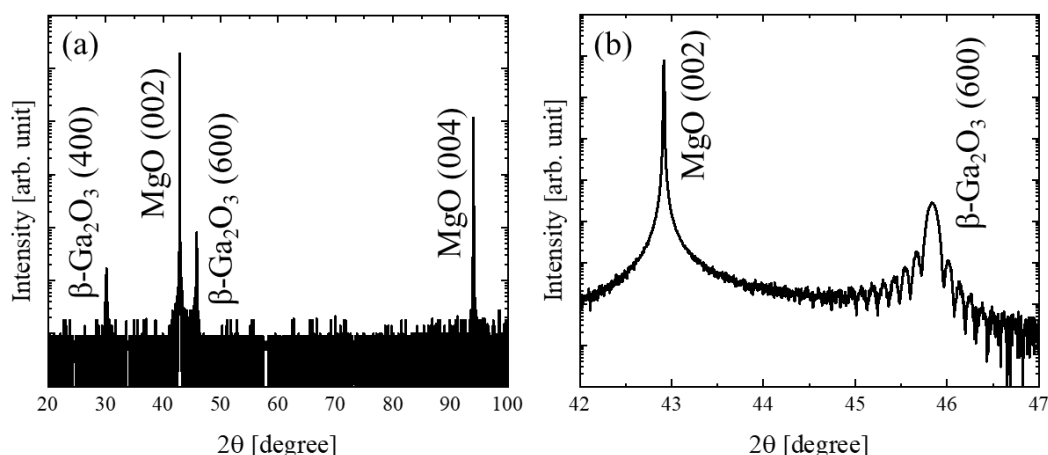


Figure 1. (a) XRD pattern of β-Ga₂O₃ film grown on MgO (001) substrate at 600 °C and (b) expansion of the region corresponding to diffraction from β-Ga₂O₃ (600).

ミスト CVD 成長 β -Ga₂O₃ を用いた MESFETMESFETs of β -Ga₂O₃ grown by mist CVD京大¹, 名大², パナソニック³ °(D)高根 倫史¹, 安藤 裕二², 高橋 英匡², 牧迫 隆太郎²,池田 光¹, 上田 哲三³, 須田 淳², 田中 勝久¹, 藤田 静雄¹, 菅谷 英生³Kyoto Univ.¹, Nagoya Univ.², Panasonic³, °H. Takane¹, Y. Ando², H. Takahashi², R. Makisako²,H. Ikeda¹, T. Ueda³, J. Suda², K. Tanaka¹, S. Fujita¹, H. Sugaya³

E-mail: sugaya.hidetaka@jp.panasonic.com

ミスト CVD 法は、安全・低コスト・省エネルギーの結晶成長技術として、主に α -Ga₂O₃の成長に用いられてきた。今回、ミスト CVD 法により β -Ga₂O₃ 基板上へのホモエピ成長を行い、MESFET の試作により、デバイス作製技術としてのミスト CVD 法の有用性を実証したので報告する。

基板は NCT 社製(010) β -Ga₂O₃であり、Ga 原料として tris(acetylacetonato)gallium (III)、ドナーとなる Si 原料として chloro-(3-cyanopropyl)-dimethylsilane を用いた。Fig. 1 に成長速度の温度依存性を示す。750°C において実用的な 750 nm/h の成長速度が得られた。X 線回折 $2\theta/\omega$ スペクトルでは、(010)配向の β 相以外の混入は認められなかった。

MESFET は、Fe ドープ半絶縁性(010) β -Ga₂O₃ 基板上に成長した 200 nm 厚の n 型 β -Ga₂O₃ 層を用いて作製した。n 型 β -Ga₂O₃ 層の Hall 効果測定から得られた移動度とキャリア密度はそれぞれ 80 cm²/Vs、 6.2×10^{17} cm⁻³であった。n 型 β -Ga₂O₃ 層について、ICP-RIE によりメサ形成後、Si イオン注入によりソース、ドレイン領域を形成した。ゲート電極には Ti/Pt/Au を用いた。デバイスはソース-ドレイン間 6 μ m、ゲート長 2 μ m、ゲート幅 50 μ m のプレーナ型である。Fig. 2 はドレイン特性で、 $V_{GS} = -10$ V でピンチオフが見られた。相互コンダクタンスの最大値は $g_m = 28$ mS/mm、ドレイン電流の最大値は $I_D = 190$ mA/mm、オン抵抗は $R_{ON} = 32$ Ω mm であった。上記の結果から、少なくともノーマリオン・デプレッションモード型 FET に関して、ミスト CVD 法によりデバイス品質の β -Ga₂O₃ が作製可能であり、ミスト CVD 法がデバイス応用上有用な成長手法であると言える。

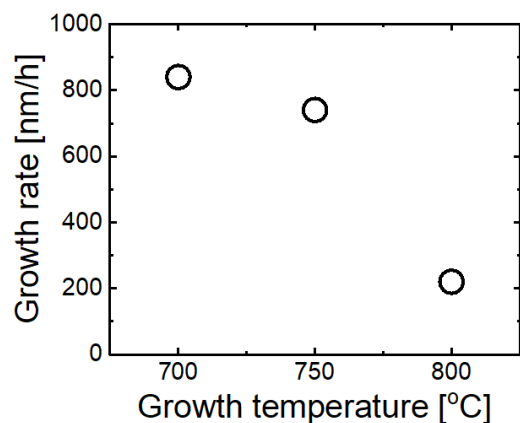
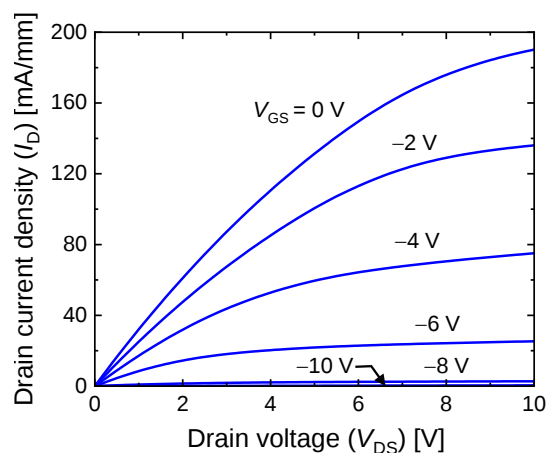
Fig. 1. β -Ga₂O₃ の成長速度の温度依存性

Fig. 2. MESFET のドレイン特性

(001) β - Ga_2O_3 基板上の NiO 薄膜上に形成した Ga_2O_3 薄膜

Ga_2O_3 Thin Film Formed on NiO Thin Film on (001) β - Ga_2O_3 Substrate

石巻専修大理工¹ °中込 真二¹

Ishinomaki Senshu Univ.¹, °Shinji Nakagomi¹

E-mail: nakagomi@isenshu-u.ac.jp

【はじめに】最近, p 形として NiO を用いて β - Ga_2O_3 と組み合わせたヘテロ pn 接合ダイオードで SiC 限界を超える高耐圧が報告され始めた。どれも市販されているエピ(001) β - Ga_2O_3 基板を用いている。これに NiO を成膜すると(100) NiO // (100) β - Ga_2O_3 となるほぼ(133)配向 NiO が形成されることを筆者らは報告しており[1], これは NiO の(110)面が約 13.7° 傾いた配置である。

本研究では上記の NiO 上に Ga_2O_3 を成膜し, どのような配向となるかを調査した。NiO と同じ立方晶の MgO を使った実験[2]では, (110) MgO 基板上に β - Ga_2O_3 を成膜するとき, 180° 回転対称な2種類の $(\bar{1}02)$ 配向 β - Ga_2O_3 が形成されることが分かっている, これが現れるかを調べた。

【実験】(001) β - Ga_2O_3 基板上に基板加熱電子ビーム蒸着によって NiO 層を形成した。その後, SiO_2 膜を付けて一部をエッチングして窓を開けて, 酸素プラズマ中の Ga 蒸着法で β - Ga_2O_3 を形成後にリフトオフした。

【結果】 β - Ga_2O_3 基板 a 面劈開面での断面 SEM 像を Fig. 1 に示す。基板に約 40nm の NiO 層が形成されており, その上に (右側上部) Ga_2O_3 が 150nm ほど成膜されている。両層は基板から連続的に繋がって成膜されている。

Fig. 2 に NiO と β - Ga_2O_3 の X 線回折反射の極点図を示す。(a) (200) NiO の反射から, これまでの報告通り NiO が 1 種類の配向で成膜していることが確認された。この図では β - Ga_2O_3 基板の a 軸方向は下側 (270° 方向) である。

NiO 層上の β - Ga_2O_3 は 2 種類できる可能性がある。ひとつは基板と同じ配置をとり, 基板からの反射と重なる。他方は NiO(110)面上で 180° 回転した配置で, これが存在すれば別の位置に回折反射が現れるはずである。

Fig. 2 (b) $(\bar{4}01)$ β - Ga_2O_3 の反射では 90° 方向が基板と同じ配置であり, 270° 方向も同じ配置の(400)の反射が見えている。他方の配置がある場合には 270° 方向の 46° 付近に現れるはずであるが見えない。(c) (111) β - Ga_2O_3 の反射でも基板と同じ配置の反射しか見えない。

(001) β - Ga_2O_3 基板上に形成した配向 NiO の上に形成した β - Ga_2O_3 層も基板と同じ結晶配向で形成できることが分かった。このことから, β - Ga_2O_3 と NiO からなる複合構造デバイス等への応用が期待される。

[1] S. Nakagomi, T. Yasuda, Y. Kokubun, Physica Status Solidi B, 257, 1900669 (2020).

[2] S. Nakagomi, Y. Kokubun, Journal of Crystal Growth, 479, pp. 67-74 (2017).

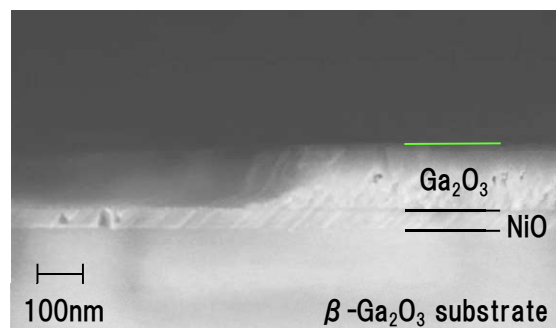


Fig. 1 Cross sectional SEM image of the Ga_2O_3 thin film formed on NiO thin film on (001) β - Ga_2O_3 substrate.

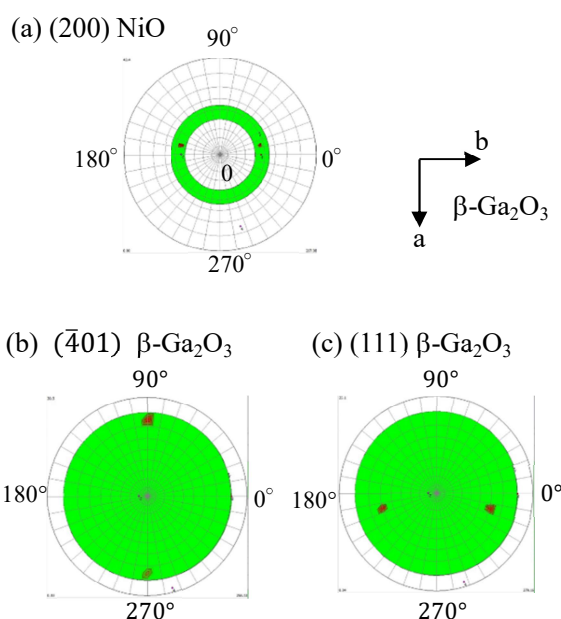


Fig. 2 Pole figures of (a) (200) NiO, (b) $(\bar{4}01)$ β - Ga_2O_3 and (c) (111) β - Ga_2O_3 of the Ga_2O_3 formed on NiO on (001) β - Ga_2O_3 substrate.

($\bar{1}02$)面 β -Ga₂O₃ 基板上的ホモエピタキシャル成長

Homoepitaxial growth of β -Ga₂O₃ on ($\bar{1}02$) substrates

NIMS 大島 祐一, [○]大島 孝仁 NIMS Yuichi Oshima, [○]Takayoshi Oshima

E-mail: OSHIMA.Yuichi@nims.go.jp

【背景】 β -Ga₂O₃ 半導体の研究は、その初期から高品質バルク単結晶が利用されており、その単結晶基板の面方位は、研究初期からこれまでに主に(100), ($\bar{2}01$), (010), (001)面が検討されてきた。現在では、双晶などの混入がない単一ドメインのホモエピタキシャル膜が作製可能な(010), (001)面が報告の大半を占めている。一方で、最近になって、基板からエピタキシャル膜へ伝播する転位の低減が可能な(011)面の提案もされており[APL **120**, 102102 (2022).], 基板面方位については未だ探索の余地が残されている。我々は、その基板面の新たな選択肢として、($\bar{1}02$)面に注目している。続く報告で示すように、この面上では選択成長やガスエッチングなどのファセット形成が促される方法で、垂直な(100)ファセット側壁を持つフィンやトレンチの形成が可能である。さらに、($\bar{1}02$)面は、[010]方向に板状のインゴットを引き上げる edge-defined film-fed growth 法にも適合しており、大口径基板の製造も可能と考えられる。本研究では、この($\bar{1}02$)面に関して、ホモエピタキシャル膜のドメイン構造を評価したので報告する。

【実験結果と考察】ハライド気相成長法を用いて、($\bar{1}02$)および(001) β -Ga₂O₃ 基板に対して同時にホモエピタキシーを 1038°C 大気圧下で 5 分間行った。2 次イオン質量分析の深さプロファイルから決定した膜の厚みは、それぞれ 1.9 μ m および 2.2 μ m であり、($\bar{1}02$)面の方がやや成長速度が小さかった。一方、膜表面に現れた[010]に伸びたマクロステップの密度は、($\bar{1}02$)面の方がやや大きかった。($\bar{1}02$)面エピ試料の X 線 pole figure を Figs. 1(a), (b)に示す。いずれの場合も、($\bar{1}02$)面単結晶に期待される位置にのみピークが観測されたことから、方位の異なるドメインの混入が無いことが示された。また、 $\bar{2}04$ および 401 回折 (それぞれ symmetric および skew-symmetric 配置) のロッキングカーブ半値全幅は基板と同等であった。発表では、透過電子顕微鏡観察の結果についても報告予定である。

【謝辞】本研究は、東電記念財団から基礎研究助成を受けた。また、NIMS の共用設備 (23NM5073) を利用して実施した。

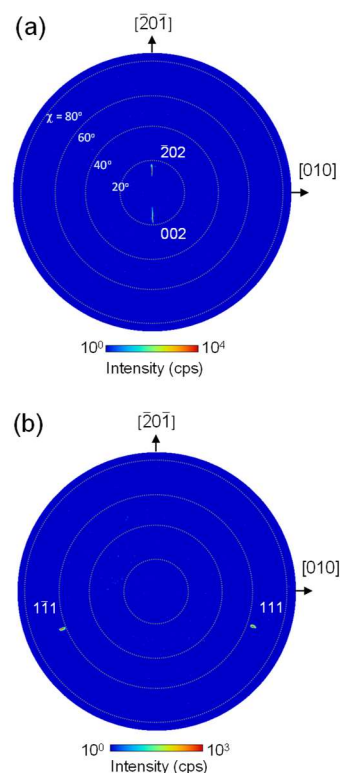


Fig. 1. XRD pole figures of the homoepitaxial wafer on a ($\bar{1}02$) substrate for diffractions of (a) 002 and $20\bar{2}$, (b) 111 and $1\bar{1}1$.

(-102)面 β -Ga₂O₃ 基板に対する選択成長と選択エッチング

Selective area growth and selective area etching of (-102) β -Ga₂O₃ substrates

NIMS, °大島 孝仁, 大島 祐一 NIMS, °Takayoshi Oshima, Yuichi Oshima

E-mail: OSHIMA.Takayoshi@nims.go.jp

【背景】 β -Ga₂O₃ パワーデバイスの研究開発は、高品質バルク単結晶基板の利用により加速度的に進んできた。現在では、(001), (010)面基板が、主にノベルクリスタルテクノロジー社により市販され、研究開発に用いられている。我々は、これら両方の面方位基板上で、選択成長 (Selective area growth: SAG) と選択エッチング (Selective area etching: SAE) により、表面エネルギー密度最小の(100)ファセット面が側壁となるフィンやトレンチの形成に成功し、それら手法が微細加工プロセスに応用できる可能性を示した[1-3]。しかしながら、(001)面基板上に形成したフィン/トレンチは、結晶構造を反映して(100)側壁面が約 14°傾斜したため、デバイス応用に最適ではないと考えられる。一方、(010)面基板上に形成したフィン/トレンチは、(100)側壁面は垂直であったが、 β -Ga₂O₃ 結晶中の転位の多くが[010]方向に伸びて貫通転位となることを考慮すれば、縦型デバイス応用には不向きである (横型デバイスには適している)。我々は、それらの傾斜と転位の方位に関する課題を同時に解決するために、(100)面と垂直かつ[010]方向と平行な(-102)面基板の利用を考え、実際に SAG と SAE により微細加工を試みたので報告する。

【実験結果と考察】(-102) β -Ga₂O₃ 基板上に種々の形状の開口 (窓) のある SiO₂ マスクを形成し、HCl 支援ハライド気相成長装置を用いて、これまでの報告[1-3]と同様の条件で SAG と SAE を行った。Fig. 1 は、SAG と SAE を用いて、[010]方位のストライプ窓に形成されたフィンとトレンチの断面傾斜 SEM 像である。期待通りフィン/トレンチが垂直に形成されていることが確認できる。一方、これらのフィン/トレンチは、[010]方向と平行であり構造表面に転位が現れる確率が小さく、縦型、横型デバイス両方に应用可能であると考えられる。このように、(-102)面基板の利用と SAG と SAE による自己形成的な微細加工手法の組み合わせは、非常に有用である。

【謝辞】本研究は、東電記念財団から基礎研究助成を受けて、NIMS の共用設備 (23NM5073) を利用して実施した。

【文献】 [1] APEX **15**, 075503 (2022). [2] APL **122**, 162102 (2023). [3] APEX (2023) **16**, 066501 (2023).

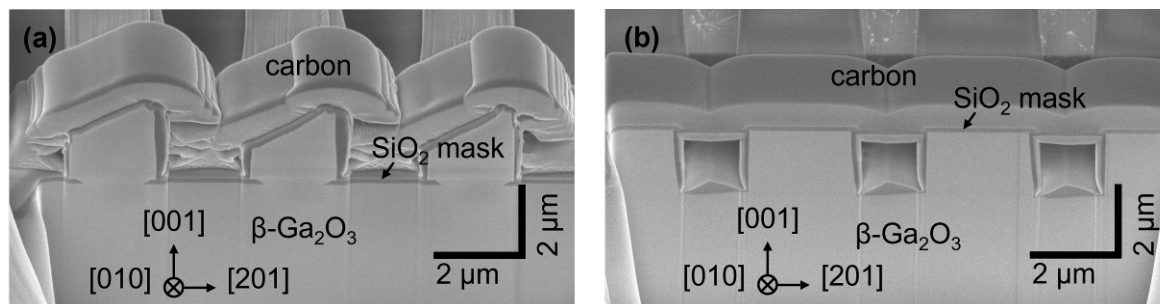


Fig. 1. 54°-tilted-view SEM images of cross-sections of (a) fins and (b) trenches formed on the (-102) substrates by SAG and SAE, respectively. Note that [001] and [201] are perpendicular to (-102) and (100), respectively.

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

Off-angle dependence of homoepitaxial growth on β -Ga₂O₃(010) substrate

¹ 東京農工大院工, ² 東京農工大院 BASE

○(M2) 新田恭平¹, 後藤健¹, 村上尚², 熊谷義直¹

Tokyo University of Agriculture and Technology¹, Tokyo Univ. Agri. Tech. BASE²

°Kyohei Nitta¹, Ken Goto¹, Hisashi Murakami², Yoshinao Kumagai¹

E-mail: murak@cc.tuat.ac.jp

β 酸化ガリウム(β -Ga₂O₃)は約 4.5 eV の大きなバンドギャップや高い絶縁破壊電界強度などの優れた物性から、高耐圧・低損失なパワーデバイス用途への応用が期待されている半導体材料である。 β -Ga₂O₃ のホモエピタキシャル成長においては様々な面方位の基板の利用が検討されており¹⁾、中でも β -Ga₂O₃(010)基板上成長は表面に生じるピットの少なさや易加工性からデバイス作製への応用に期待が持たれている。しかしながら、ハライド気相成長 (HVPE) 法による β -Ga₂O₃(010)基板上成長においては成長速度の増加に伴う表面ヒロックの増加や表面形態の悪化が問題となっている。本研究では、 β -Ga₂O₃(010)基板上 HVPE 成長における表面形態の改善を目的として、基板オフ角の影響を調査した。

β -Ga₂O₃ 成長には縦型の石英反応炉を用い、6N 固体 GaCl₃ 及び O₂ を原料として使用した。GaCl₃ は原料容器を 85 °C に恒温することで蒸気圧を制御し、N₂ キャリアガスにて反応炉へ輸送した。化学機械研磨(CMP)によって表面に任意のオフ角をつけた β -Ga₂O₃(010)基板を用い、1130 °C に加熱した成長部で GaCl₃ と O₂ を反応させることで Ga₂O₃ を成長した。 β -Ga₂O₃(010)基板のオフ角を変化させることによる表面形態及び成長速度の変化を調査し、成長メカニズムを考察した。

Fig.1 に β -Ga₂O₃(010)ジャスト基板 (オフ角 0°) 及び 0.2° オフ基板を用いホモエピタキシャル成長した際の成長層表面の微分干渉コントラスト顕微鏡像を示す。オフ角 0° では多数見られる表面ヒロックが 0.2° オフ基板上では全く見られないことから、基板にオフ角をつけることにより表面形態の大幅な改善が可能であることが示唆された。発表当日は成長速度や表面形態のオフ角依存性等のデータを示し、成長メカニズムについても考察する。

本研究開発は、総務省の「ICT 重点技術の研究開発プロジェクト(JPMI00316)」によって実施した成果を含みます。

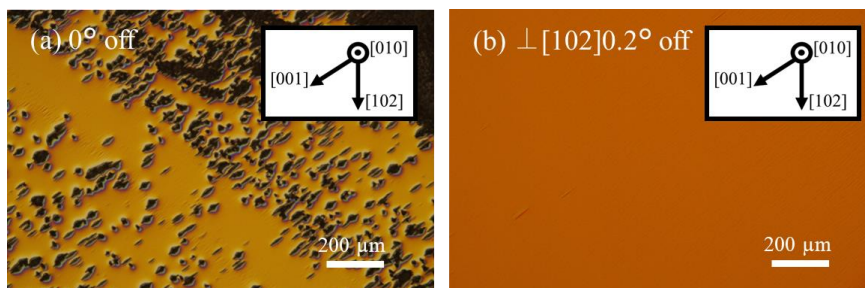


Fig.1 Nomarski differential interference contrast (NDIC) microscopy surface images after homoepitaxial growth on the β -Ga₂O₃(010) substrate: (a) 0° off, (b) 0.2° off.

参考文献

1) K. Goto *et al.*, Appl. Phys. Lett. **120**, 102102 (2022).

ルツボレスで作製した β -Ga₂O₃ 結晶の成長方位依存性

Dependence of growth orientation in β -Ga₂O₃ crystals

grown by crucible free growth methods

株式会社C&A¹, 東北大学², [○]高橋勲^{1,2}, Vladimir Kochurikhin¹, 富田健稔¹,

菅原孝昌², 庄子育宏¹, 鎌田圭^{1,2}, 柿本浩一², 吉川彰^{1,2}

C&A corp.¹, Tohoku univ.², [○]Isao Takahashi^{1,2}, Vladimir Kochurikhin¹, Taketoshi Tomida¹,
Takamasa Sugawara², Yasuhiro Shoji¹, Kei Kamada^{1,2}, Koichi Kakimoto², Akira Yoshikawa^{1,2},

E-mail:takahashi_isao@c-and-a.jp

β -Ga₂O₃ はワイドギャップ半導体の中で融液成長可能な材料であるため、量産性があり低コストな基板の実現が期待されている。しかし現状の結晶成長法では Ir や Pt-Rh などの貴金属を使用するため、コスト低減が困難である。そこで、我々のグループでは、スカルメルト法をベースとし、比抵抗の高い酸化物に対応した高周波加熱装置を独自開発することにより、ルツボレスで Cz 法のような結晶引き上げ可能な新規手法 Oxide Crystal growth from Cold Crucible (OCCC) method を考案した。この方法では、ルツボからの不純物汚染を防ぐことが出来るため、高純度の結晶作製が可能である。Fig.1 には、OCCC 法で作製した結晶の写真を示すが、透明度の高い結晶が出来ており、不純物汚染が少ないことが分かる。

β -Ga₂O₃ はパワー半導体としての利用が考えられるため、結晶中の転位密度を減らすことがデバイスの実用化には重要である。転位の発生には、バーガースベクトルの方向と結晶内に働く応力の向きの関係が重要であるため、結晶の成長方位により大きくその密度が異なることが考えられる。そこで本研究では、成長方位を(010)面、(001)面、(-102)面とし作製した結晶のエッチピット密度を測定した。その結果を Fig.2 に示す。この図では、同じルツボレスの成長法である Floating Zone(FZ)法の結晶についても併せて示す。OCCC 法でも FZ 法でも(010)面成長の結晶で比較的高い密度のエッチピットが観測された。また、最も転位密度の低い結晶は(001)面であり、他の方位よりも 1 桁程度低位であることが分かった。講演ではその他の評価結果についても考察する。

謝辞:本研究で用いた結果の一部は信州大学干川先生、太子先生から提供いただいた単結晶を用いたものである。また、本研究の一部は文部科学省 革新的パワーエレクトロニクス創出基盤技術研究開発事業 JPJ009777、JSPS 科研費 22H00204 の助成を受けたものです。関係各位に感謝申し上げます。

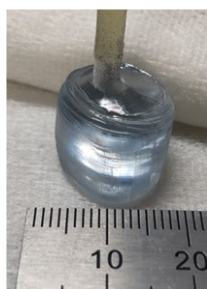


Fig.1; Picture of a crystal grown by OCCC method

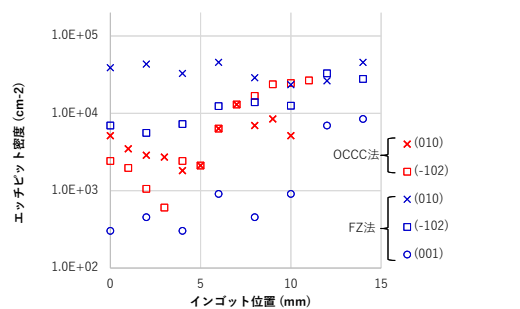


Fig.2; Etch pit density of grown crystals with different growth orientations

HVPE 法による β -Ga₂O₃ (010) 基板上 Si ドープ β -Ga₂O₃ 層の成長

Growth of Si-doped (010) β -Ga₂O₃ layers by HVPE

東京農工大院工¹, 東京農工大 FLOuRISH²

○(M2) 田中 舞¹, (M1) 河野 有佑¹, 後藤 健¹, 熊谷 義直^{1,2}

Tokyo Univ. of Agri. and Tech.¹, TUAT FLOuRISH²

°Mai Tanaka¹, Yu Kono¹, Ken Goto¹, and Yoshinao Kumagai^{1,2}

E-mail: s225807s@st.go.tuat.ac.jp

β -Ga₂O₃ は、約 4.5 eV の大きなバンドギャップエネルギーに起因する高い絶縁破壊電界強度を持ち、高耐圧・低損失な次世代パワーデバイス材料として注目を集めている。また、融液成長法で大口径基板を作製可能なことから、産業化の面でも有利な材料である。

当グループでは、ハライド気相成長(HVPE)法により、 β -Ga₂O₃(001)基板上ホモエピタキシャル成長において残留キャリア密度 10^{13} cm⁻³ 未満の高純度層の高速成長及び、 $10^{15} \sim 10^{18}$ cm⁻³ の範囲での導電性制御を達成している[1,2]。一方、熱伝導率の異方性及び、デバイスの作製におけるエッチングプロセスとの相性から、 β -Ga₂O₃(010)基板が最近注目を集めており、同基板上においても高純度層の高速成長を達成している。そこで本研究では、HVPE 法による β -Ga₂O₃(010)基板上 Si ドープホモエピタキシャル層成長によるキャリア密度制御を試みたので報告する。

大気圧横型ホットウォール式反応炉を用い、GaCl と O₂ を原料ガス、SiCl₄ をドーピングガスとし、N₂ キャリアガスを用い β -Ga₂O₃(010)基板上に成長を行った。成長温度は 1000°C、GaCl 供給分圧(P_{GaCl}^0) 3.0×10^{-3} atm、VI/III 供給比($2P_{\text{O}_2}^0/P_{\text{GaCl}}^0$) 10 とした。成長中、SiCl₄ 供給分圧($P_{\text{SiCl}_4}^0$)を制御パラメータ R_{Si} ($P_{\text{SiCl}_4}^0/(P_{\text{GaCl}}^0 + P_{\text{SiCl}_4}^0)$)を用い変化させることでドーピング制御を行った。成長後、N₂ 雰囲気中で 1000°C、60 分の活性化アニールを行い、その後ホール測定によりキャリア密度 n を評価した。SIMS により膜中の Si 濃度([Si])も評価し、Ga サイト数密度 N_{Ga} 、 R_{Si} を用い、 $[\text{Si}] = \eta_{\text{Si}} \cdot N_{\text{Ga}} \cdot R_{\text{Si}}$ の関係から Si の取り込み率 η_{Si} を評価した。

Fig. 1 に各 R_{Si} で成長した膜中の n と [Si]を示す。 R_{Si} を変化させることで、 n を $2 \times 10^{16} \sim 1 \times 10^{18}$ cm⁻³ の範囲で線形的に制御することができた。 η_{Si} は 8.5 ~ 16.1 であることがわかった。講演では他の面方位との比較も含め詳細に議論する。

本研究開発は、総務省の「ICT 重点技術の研究開発プロジェクト (JPMI00316)」によって実施した成果を含みます。

[1] H. Murakami *et al.*, Appl. Phys. Express **8**, 015503 (2015).

[2] K. Goto *et al.*, Thin Solid Films **666**, 182 (2018).

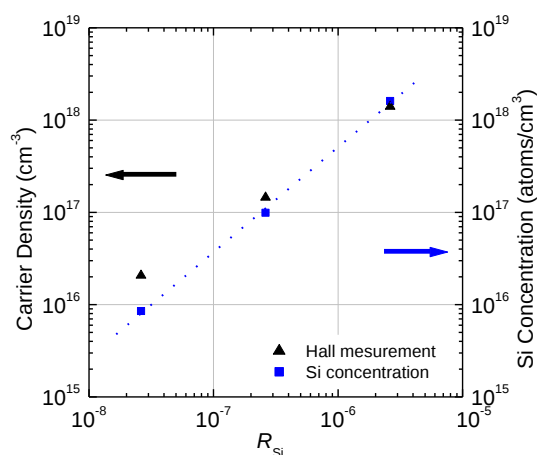


Fig. 1 Si concentration by SIMS measurements and carrier density by Van der Pauw Hall measurements for layers grown at each R_{Si} .

Cr₂O₃ 単結晶上への低欠陥 α -Ga₂O₃ 薄膜成長

Growth of α -Ga₂O₃ thin films with low defect density on Cr₂O₃ single crystals

日本ガイシ(株) °渡邊 守道, 村上 和仁, 西村 昇

NGK INSULATORS, LTD., °Morimichi Watanabe, Kazuto Murakami, Noboru Nishimura

E-mail: watamori@ngk.co.jp

近年、パワーデバイス用半導体材料として α -Ga₂O₃ が注目されている。 α -Ga₂O₃ はサファイアを下地基板として成膜する手法が知られているが、膜中の欠陥密度が 10^{10}cm^{-2} と非常に高い。 α -Ga₂O₃ とサファイアの格子ミスマッチが欠陥発生の原因と考えられ、欠陥抑制の手法としてバッファ層 [1] や選択横方向成長 (Epitaxial Lateral Overgrowth : ELO) [2]、HVPE 法での成膜温度と成膜速度の制御によるマスクレス手法 [3] などが報告されている。本研究では下地基板の格子定数に着目し、コランダム構造であり、a 軸長が α -Ga₂O₃ に近い α -Cr₂O₃ 単結晶を下地基板にすることで欠陥低減を試みた。

実験では、c 面 Cr₂O₃ 単結晶 (0.2° オフ) を下地基板として使用し、ミスト CVD 法による α -Ga₂O₃ 成膜を実施した。リファレンスとして c 面サファイア (0.2° オフ) 上への α -Ga₂O₃ 成膜も試みた。Cr₂O₃ 単結晶上に成膜した α -Ga₂O₃ 膜の断面 TEM 像を図 1 に示す。図中には欠陥が 4 箇所見られるものの、サファイア上に成膜した膜と比較して大幅に欠陥密度が少ないことが分かった。平面 TEM 像 (図 2) から見積もった欠陥密度はおおよそ $3 \times 10^7/\text{cm}^2$ であり、リファレンスのサファイア上 α -Ga₂O₃ 膜と比較して約 1/1000 まで低減できた。二つの欠陥が対になっている状態も認められ、サファイア上 α -Ga₂O₃ 膜中の欠陥とは異なることが示唆された。当日はサファイア上の欠陥との違いを詳細に解析した結果も示す。

[1] R. Jinno, et al., Appl. Phys. Express 9, 071101 (2016).

[2] Y. Oshima, et al., APL Mater. 7, 022503 (2019).

[3] 大島祐一, et al., 第 70 回応用物理学会春季学術講演会, (2023)16p-E102-5.

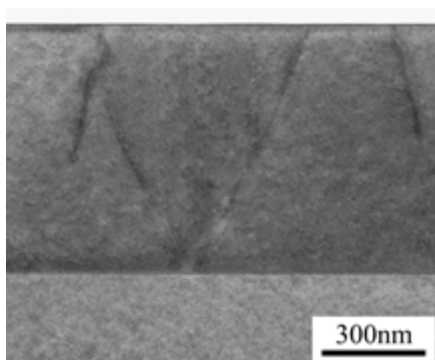


Fig.1 Cross-sectional TEM image of an α -Ga₂O₃ thin film grown on Cr₂O₃ substrate.

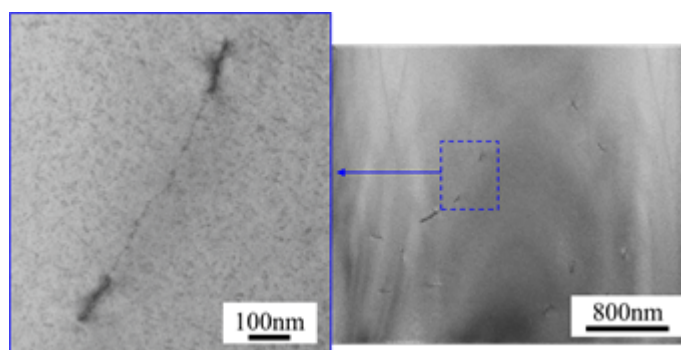


Fig.2 Plan-view TEM images of α -Ga₂O₃ thin film grown on Cr₂O₃ substrate.

導電性 α -($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$) $_2\text{O}_3$ 薄膜の作製とその評価

Fabrication and characterization of conductive α -($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$) $_2\text{O}_3$ thin films

高知工大 シス工¹, 総研² (D)安岡 龍哉¹, ダン タイジャン², 刘 丽², 川原村 敏幸^{1,2}

School of Sys. Eng. ¹, Res. Inst. ², Kochi Univ. of Tech.

○Tatsuya Yasuoka¹, Li Liu², Giang T. Dang², Toshiyuki Kawaharamura^{1,2}

E-mail: 256015k@gs.kochi-tech.ac.jp, kawaharamura.toshiyuki@kochi-tech.ac.jp

近年、HEMT など高性能パワーデバイス等への応用を目指し、($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$) $_2\text{O}_3$ へのドーピングに関する研究が盛んに行われており、例えば変調ドーピングにより β -($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$) $_2\text{O}_3$ /Ga $_2\text{O}_3$ 界面において二次元電子ガスの形成に成功している^[1]。一方、熱的準安定相である α -Ga $_2\text{O}_3$ は Sn や Si をドーパントとして導電性を持つ薄膜の形成に成功している^[2,3]。また、ノンドープの α -($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$) $_2\text{O}_3$ は Al 組成比 $x=0.7$ 程までの作製に成功している^[4]。しかし、導電性 α -($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$) $_2\text{O}_3$ は十分に検討されておらず、また、バンドギャップがどれくらいの大きさまで導電性を維持出来るのかも十分に分かっていない。本研究では、Si ドープ α -($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$) $_2\text{O}_3$ の作製を試みた。なお、本研究の内容は 2020 年に論文にて報告しているが^[5]、これまで日本語での発表の機会がなかったため今回報告する。

Si ドープ α -($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$) $_2\text{O}_3$ は第三世代ミスト CVD 法を用いて作製した。第三世代ミスト CVD 法は、複数の溶液を別々に霧化した後まぜまぜ器(ミスト混合器)に一度集め、混合されたミストを反応炉へと供給し基板上に薄膜を得る手法である。噴霧器を分けることで副反応を抑制することが可能であり、ガス流量のみを変更することで組成制御が可能である^[6]。今回は、Ga(acac) $_3$ 、Al(acac) $_3$ をそれぞれ HCl を微量に添加した超純水に溶解させたものを作製し、Si ドープとしてクロロ(3-シアノプロピル)ジメチルシランをそれぞれに対して 0.075%となるように添加した。キャリアガスには N_2 を用い、反応支援ガスとして O_3 を導入した。

図 1 に透過率の測定結果を示す。Al の流量が増加するにつれて吸収端がブルーシフトし、Al 組成が増加していることが分かる。図 2 に Al 組成比 x に対する光学的バンドギャップ及び抵抗値をプロットしたものを示す。なお、Al 組成比は EDX 測定、光学的バンドギャップは透過率測定、抵抗値は TLM 法により測定及び算出した。バンドギャップに関して、Al の組成が増加するにつれてバンドギャップは増加しており、またボーイングパラメータを考慮したヴェガード則と一致していることが分かる。一方、抵抗値に関しては Al 組成比 x が 0.05 程度までは x の増加に伴わずに減少する傾向が見られたが、Al 組成比がそれより大きくなると抵抗値は数桁ほど大きくなった。しかし、Al 組成比が 0.3 でバンドギャップの値が 6.22 eV の試料でさえノンドープのものと比べて数桁程低抵抗であった。当日はこれらの試料を用いた SD や MESFET の特性についても報告する。

[1] Y. Zhang et al, Appl. Phys. Lett. 112, 173502 (2018),

[2] T. Uchida et al, MRS Adv. 3, 171 (2018),

[3] K. Akaiwa et al, Jpn. J. Appl. Phys. 51 070203 (2012),

[4] G. T. Dang et al, Appl. Phys. Lett. 113, 062102 (2018)

[5] G. T. Dang et al., AIP Advances 10, 115019 (2020),

[6] T. Yasuoka et al, AIP Advances 11, 045123 (2021)

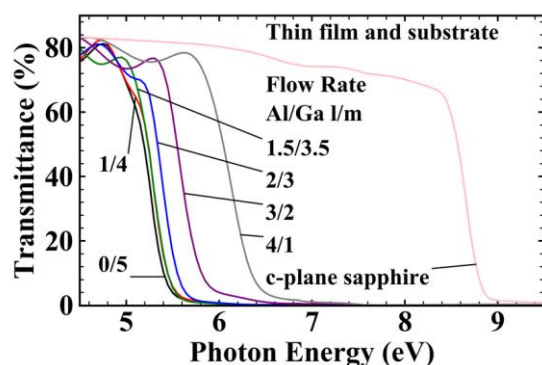


Fig.1 Transmittance spectra of the thin films and substrate

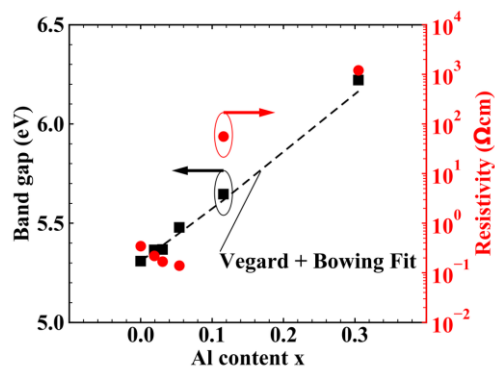


Fig.2 Dependence of the bandgap and resistivity on Al content

MBE 法により成長した Si ドープ α - Al_2O_3 層の電気的特性評価

Si doping of α - Al_2O_3 grown by molecular beam epitaxy

筑波大数理¹

○奥村 宏典¹

Univ. of Tsukuba¹ ○Hironori Okumura¹

E-mail: okumura.hironori.gm@u.tsukuba.ac.jp

一般的に、バンドギャップエネルギー(E_g)の大きい固体材料は、高温高耐圧に優れる。低価格かつ大面積試料が入手可能な α - Al_2O_3 (サファイア、 $E_g \sim 9$ eV)は有力材料の一つであるが、絶縁体として知られている。我々は、M 面 α - Al_2O_3 基板を用いて、MBE 法による高品質高 Al 組成 α -(AlGa) $_2\text{O}_3$ 成長を行ってきた[1-3]。本研究では、Si ドープ α - Al_2O_3 層を成長し、電気的特性を評価した[4]。

プラズマ援用 MBE 装置を用いて α - Al_2O_3 (10 $\bar{1}$ 0)基板の上に Si ドープ α - Al_2O_3 を成長した。Si 濃度は $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ とした。結晶成長後、窒素雰囲気下で様々な温度で 30 分間熱処理を行った。高温熱処理後における α - Al_2O_3 層の XRD 測定(Co $K\alpha_1$)結果を図 1 に示す。1400°C 以下では、 Al_2O_3 (3030)および(20 $\bar{2}$ 0)のピークのみが観察された。しかし、1500°C 以上で熱処理した場合、 α - Al_2O_3 が分解し始め、表面荒れが大きくなると同時に 78.4°に新たな XRD ピークが現れた。 γ - Al_2O_3 (440)に近いが、今後、TEM を用いた詳細な検証が必要である。

1400°Cで熱処理後の Si ドープ α - Al_2O_3 層の電気的特性評価を行った。試料構造を図 2(a)に示す。Ti (20 nm)/Au (50 nm)電極を蒸着し、窒素雰囲気 850 度 1 分で合金化した。電極は 6 μm 離れた二つの 50 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ の長方形状を利用した。本試料を用いて、真空中で室温 $\sim$ 800°Cにおいて I - V 測定を行った(図 2 (b))。800°Cでも繰り返し測定ができたことから、高温耐性に優れていると言える。

また、室温で 166 Ωcm を示し、 α - Al_2O_3 の室温電気伝導に成功した。本研究は、NEDO 先導プログラム/未踏チャレンジ 2050 の援助を得て行われた。

[1] 神野ら第 68 回応物春 18p-Z33-12

[2] 神野ら第 81 回応物秋 9p-Z20-14

[3] 神野ら第 82 回応物秋 13p-S201-9

[4] H. Okumura, JJP 61, 125505 (2022).

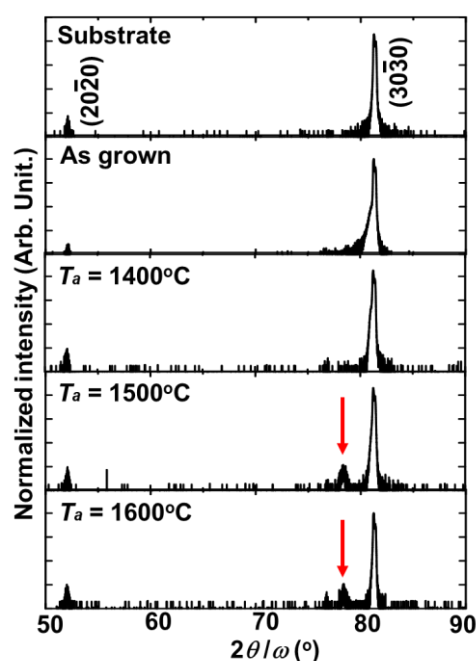


Fig. 1: 2 θ - ω scan of Al_2O_3 :Si layer after annealing at various temperatures

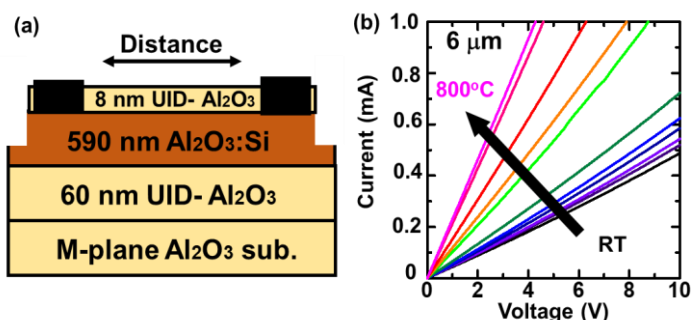


Fig. 2: (a) Schematic structure and (b) I - V characteristics of Al_2O_3 :Si layer after annealing at 1400°C.

Cold-wall MOCVD 法を用いたサファイア基板上 Ga_2O_3 層の試作

Ga_2O_3 growth on sapphire substrates by cold-wall MOCVD

筑波大数理¹

○奥村 宏典¹

Univ. of Tsukuba¹ ○Hironori Okumura¹

E-mail: okumura.hironori.gm@u.tsukuba.ac.jp

一般的に、バンドギャップエネルギー(E_g)の大きい固体材料は、高温高耐圧に優れる。低価格かつ大面積試料が入手可能な $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (サファイア、 $E_g \sim 9$ eV)は有力材料の一つであるが、絶縁体として知られている。最近、我々は、MBE 法を用いた高濃度 Si ドープ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 試料において、室温で導電性を得ることに成功した[1]。しかし、実用化には、MOCVD 法を用いた大面積化が不可欠である。今回、新たに MOCVD 装置を導入し、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 基板上に Ga_2O_3 成長を試みた。

横型 Cold-wall MOCVD 装置(GII テクノ社製、図 1 参照)を用いて $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001)基板上 Si ドープ Ga_2O_3 成長を行った。インコネルサセプタを用いて、900 度まで加熱した。成長温度は熱電対により測定した。成長圧力を 2.6 kPa とし、キャリアガスに Ar を用いた。原料として TEG と O_2 ガスを用い、それぞれ 9.9 $\mu\text{mol/min}$ と 500 sccm とした。ドーピングガスは、モノメチルシランを Ar と dilution により 0.03%に希釈した。成長後の Ga_2O_3 膜の結晶性を X 線回折($\text{Co K}\alpha_1$)により調べた。

結晶成長後における Ga_2O_3 膜の XRD 測定結果を図 2 に示す。 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 基板に関連するピークと共に、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 結晶の(-201)、(-402)、(-603) 、(-804)に相当するピークが観察された。このことから、 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (-201)結晶の成長に成功したと言える。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (-201)面が成長したのは、 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (0001)面と面内の酸素原子配置が類似しているためであり、これまでの他機関の報告と一致する。他にも $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ の(310)や(204)面と思われるピークが見られる。 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (310)は、高温熱処理時に見られることがある。今後、成長条件の最適化を行うことで、単結晶成長を目指す。

本研究は、NEDO 先導プログラム/未踏チャレンジ 2050 の援助を得て行われた。

[1] H. Okumura, JJAP **61**, 125505 (2022).

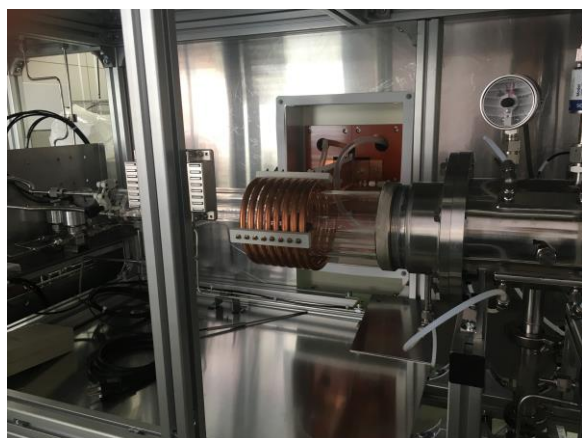


Fig. 1: Cold wall MOCVD for Al_2O_3 and Ga_2O_3 growth. Max 1050°C, Sample size 2 inch.

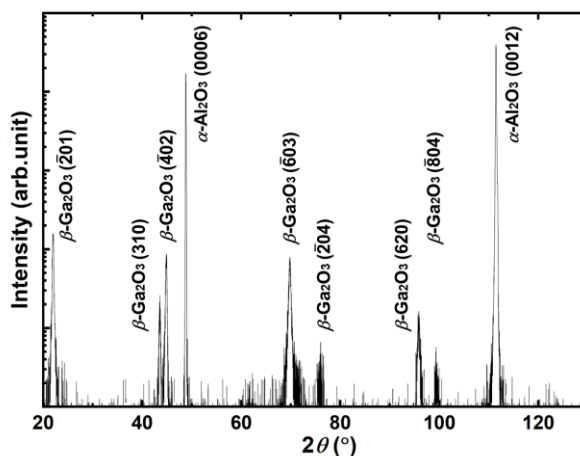


Fig. 2: XRD 2θ-ω scan of Ga_2O_3 :Si layer on c-plane Al_2O_3 .

選択成長 α -Ga₂O₃ の速度論的安定性の温度依存性

Temperature Dependence of Kinetic Phase Stability of Selective-Area-Grown α -Ga₂O₃

東大院総合文化, °神野 莉衣奈, 深津 晋

UTokyo, °Riena Jinno, Susumu Fukatsu

E-mail: rjinno@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

Ga₂O₃は4.7-5.6 eVのバンドギャップ (E_g)を持つ超ワイドバンドギャップ半導体の一つであり、パワーデバイスの材料として近年、注目されている。Ga₂O₃は5つの異なる結晶構造 ($\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$ (κ))を持ち、大気圧下では β 相が最安定相である。他方、準安定な α 相は、バンドギャップが $E_g=5.4-5.6$ eVと他の相よりも約1 eV大きく、さらに α -Al₂O₃との混晶化により8.8 eVまで E_g を拡大できる点に特徴がある [1]。 α -Ga₂O₃は、600℃付近で準安定相から最安定 β 相への相転移を示すことが報告されており、高温プロセスへの耐性確保に向けて熱的安定性の制御が課題である[2]。本研究では、 α -Ga₂O₃の速度論的安定性の解明を目的として、その場顕微観察による α -Ga₂O₃中の安定核 (β -Ga₂O₃) の発生速度と成長 (伝搬) 速度の温度 (T) 依存性について調べたので報告する。

サファイア基板上にa軸方向のSiO₂マスクのストライプ開口 (幅3 μ m)を形成し、ミストCVD法により600℃で α -Ga₂O₃を選択成長した。作製した試料を大気雰囲気下で加熱し、安定核の成長をその場顕微観察した。 α -Ga₂O₃が β 相へ相転移すると表面モフォロジーが変化し、[1010] m面の方向に沿って特徴的なクラックが導入された (Fig.1)。 α -Al₂O₃では[1012] r面が劈開面であり、同じ結晶構造を持つ α -Ga₂O₃においてもr面に沿って劈開した可能性がある。一方、安定核の発生したストライプ数と安定核の成長速度はアニール温度 T_A の増加関数となり、後者は指数増加傾向を示した(Fig.2)。また安定核発生はストライプ端の近傍限定で同一ストライプ内での複数発生は観測されなかった。今後、応力やメサ構造の制御を通じた α -Ga₂O₃の高温での速度論的安定性の向上が期待される。

【謝辞】本研究の一部は JSPS 科研費 22K14286 の助成を受けて行われました。
[1] K. Kaneko, *et. al.*, J. App. Phys. **131**, 090902 (2022).
[2] R. Roy, *et. al.*, J. Am. Chem. Soc. **74**, 3, 719–722 (1952).

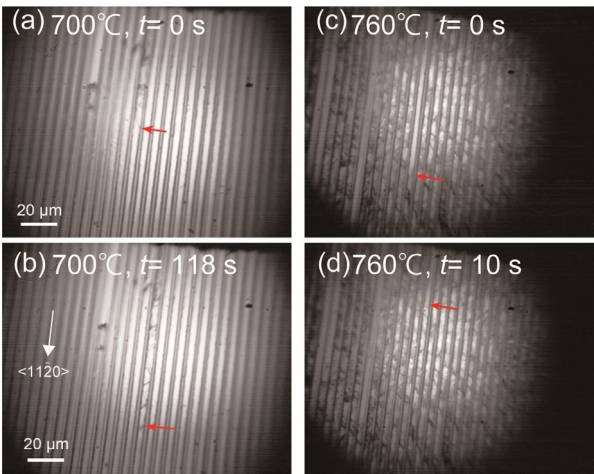


Fig.1. Microscope images of the selective-area-grown α -Ga₂O₃ taken at $T_A=700^\circ\text{C}$ and 760°C .

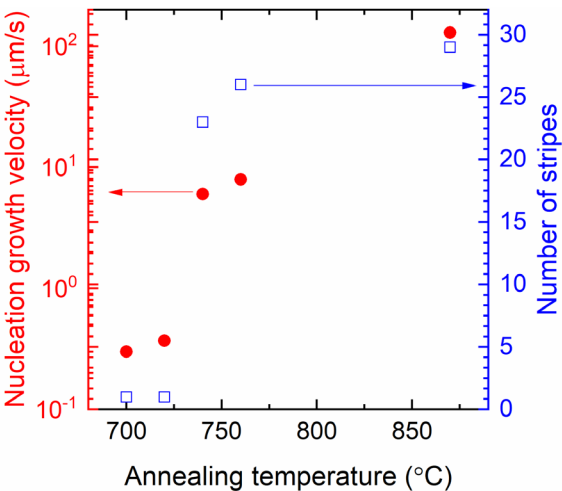


Fig.2. Growth rate of nucleated β -Ga₂O₃ and the number of α -Ga₂O₃ stripes with β -Ga₂O₃ nucleation as functions of T_A .

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

Effects of Nitrogen Radical Irradiation on Electrical Properties of Ga_2O_3 Schottky Barrier Diodes

大阪公立大院工¹, 情通機構², ○(M1)江口 輝生¹, 佐藤 翔太¹, Zhenwei Wang², 東脇 正高^{1,2}

Osaka Metropolitan Univ.¹, NICT²,

○Kohki Eguchi¹, Shota Sato¹, Zhenwei Wang², and Masataka Higashiwaki^{1,2}

E-mail: sh23914b@st.omu.ac.jp

はじめに 近年、シリコンよりもパワーデバイス用途に重要となる物性値が優れたワイドバンドギャップ半導体の一つである酸化ガリウム (Ga_2O_3) に注目が集まっている。本研究では、 Ga_2O_3 FET のゲート作製プロセス等への適用が期待される窒素 (N) ラジカル照射プロセスが、 Ga_2O_3 ショットキー特性へ与える影響について調査した。

実験 $n\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (100) 基板 ($\text{Si} \sim 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 表面に、N ラジカル照射を行った／行わなかった 2 種類の試料を準備した。N ラジカル照射は、分子線エピタキシー装置内で RF プラズマセルを用いて行った。なお、その条件は RF パワー 500 W、 N_2 流量 0.6 sccm、基板温度 700°C 、窒化処理時間 120 分とした。続いて、窒化処理有り／無し両方の $n\text{-Ga}_2\text{O}_3$ (100) 基板を用いて、ショットキーバリアダイオード (SBD) 構造を作製し、その電流密度-電圧 (J - V) 特性を評価した。

結果 Fig. (a) に示すように、一部の窒化処理無しの Ga_2O_3 SBD の順方向 J - V 特性にはキンクが見られる。これは、アノード電極下のショットキー障壁高さが異なる部位の J - V 特性が重なりあったためと考えられる。一方、窒化処理を行った SBD の順方向 J - V 特性は、Fig. (b) に示すように直線的な立ち上がりに変化すると共に、ターンオン電圧も均一化するなど良好なショットキー特性を示している。 Ga_2O_3 表面に対して大きなダメージを生じる、 O_2 反応性イオンエッチング処理後の Ga_2O_3 表面に窒化処理を行った場合にも、同様に J - V 特性の大幅な改善が見られた。その他、窒化処理により Ga_2O_3 ショットキー障壁高さが減少することも確認された。これらの結果は、N ラジカル照射プロセスに、 Ga_2O_3 表面ダメージを回復、および表面状態を均一化する効果があることを示唆している。

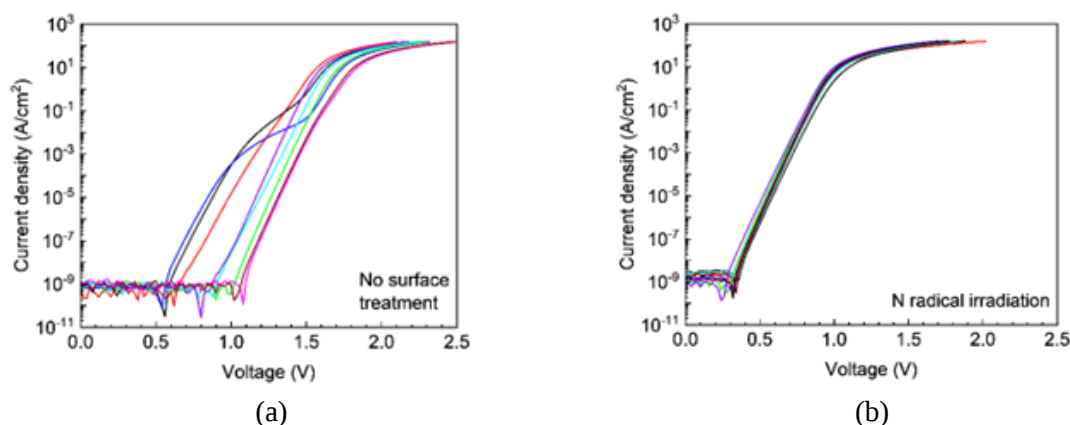


Fig. Forward J - V characteristics of SBDs fabricated on Ga_2O_3 (100) substrates (a) without and (b) with N radical irradiation treatment.

窒化ラジカル照射処理した Ga_2O_3 表面の構造評価Structural Characterization of Ga_2O_3 Surfaces Treated by Nitrogen Radical Irradiation大阪公大院工¹ 情通機構² ○(M1) 谷口 奨季¹, 中岡 蔵¹, 東脇 正高^{1, 2}Osaka Metropolitan Univ.¹, NICT²○Shoki Taniguchi¹, Kura Nakaoka¹, Masataka Higashiwaki^{1, 2}

E-mail: sh23929h@st.omu.ac.jp

我々は最近、窒素 (N) ラジカル照射により Ga_2O_3 表面ダメージの回復が可能であり、ショットキー特性およびその面内均一性を改善できることを発見した。本講演では、窒化処理した Ga_2O_3 (100), (010) 表面構造および組成分析結果について報告する。

分子線エピタキシー成長装置内で、RF プラズマセルにより生成した N ラジカルを、 Ga_2O_3 (100), (010) 基板に照射し表面窒化処理を行った。本プロセスは、基板温度 660°C、窒化時間 120 分の条件で行った。RF プラズマパワーは 500 W、 N_2 ガス流量は 0.6 sccm とした。窒化した Ga_2O_3 表面を原子間力顕微鏡 (AFM) で観察した後、X 線光電子分光法 (XPS) で表面近傍の元素組成を分析した。

Ga_2O_3 (100), (010) 両基板共に、表面粗さが N ラジカル照射時間と共に単調増加した。(100) 面と (010) 面の二乗平均平方根 (RMS) 粗さは、N ラジカル照射前は共に 0.2 nm 以下であったが、120 分照射後はそれぞれ 0.49, 0.99 nm となった。このことは、N ラジカル照射により Ga_2O_3 表面窒化が進んだことを示している。

次に、120 分間の N ラジカル照射を行った試料と行わなかった試料について、表面近傍の元素組成の XPS 分析を実施した。以下の Figs. (a), (b) に、 Ga_2O_3 (010) 基板表面からの Ga 3d ピークの窒化処理の有無による違いを示す。窒化処理を行った表面にのみ明瞭な N 2s ピークが現れていることから、相当量の N 原子が Ga_2O_3 に取り込まれたことが分かる。窒化した表面の Ga 3d ピークは、Ga-O 結合、Ga-N 結合、O 2s 内殻準位、N 2s 内殻準位に対応する成分に分離された。Ga-O ピークと Ga-N ピークの積分強度の比に相当する Ga-N/Ga-O 値は、 Ga_2O_3 (010) 表面で 0.66 であった。なお、 Ga_2O_3 (100) 表面では 0.45 であった。この結果から、(010) 面の方が (100) 面よりも窒化が進んでいることが分かる。これは、ダングリングボンド密度の差に起因していると考えられる。

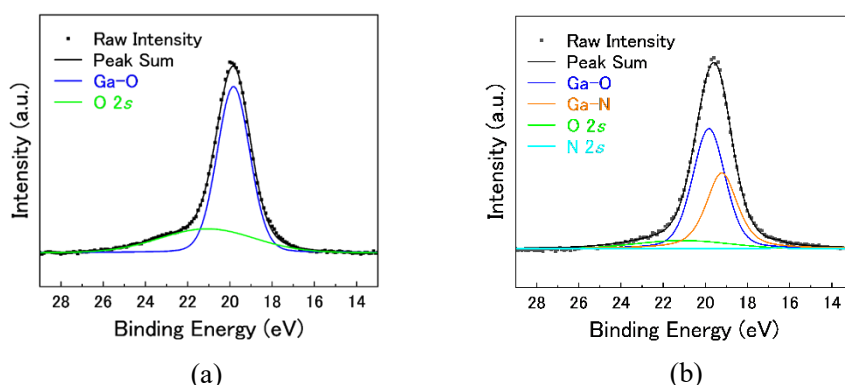


Fig. XPS spectra from Ga 3d core levels of Ga_2O_3 (010) surfaces (a) without and (b) with 120-min N radical irradiation.