

Oral presentation | 21 Joint Session K "Wide bandgap oxide semiconductor materials and devices" : 21.1
Joint Session K "Wide bandgap oxide semiconductor materials and devices"

📅 Fri. Sep 20, 2024 1:00 PM - 4:30 PM JST | Fri. Sep 20, 2024 4:00 AM - 7:30 AM UTC 🏛️ A22 (TOKI
MESSE 2F)

[20p-A22-1~13] 21.1 Joint Session K "Wide bandgap oxide semiconductor materials and devices"

Toshiyuki Kawaharamura(Kochi Univ. of Tech.)

1:00 PM - 1:15 PM JST | 4:00 AM - 4:15 AM UTC

[20p-A22-1]

[The 56th Young Scientist Presentation Award Speech] Characterization of temperature dependence of Schottky barrier height in Ni/ β -Ga₂O₃ combined with XPS study on valence band structure of β -Ga₂O₃

○Akihira Munakata¹, Kohei Sasaki², Kentaro Ema², Yoshiaki Nakano¹, Masaki Kobayashi¹, Takuya Maeda¹ (1.Univ. of Tokyo, 2.Novel Crystal Technology, Inc.)

1:15 PM - 1:30 PM JST | 4:15 AM - 4:30 AM UTC

[20p-A22-2]

Exploring of Thin Film Growth and Lattice Matching of α -(In, Fe)₂O₃ and α -(In, Ga)₂O₃ on LiNbO₃ Substrates

○Kazuki Shimazoe¹, Hiroyuki Nishinaka¹ (1.Kyoto Inst. Tech.)

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[20p-A22-3]

Sn-Doped β -Ga₂O₃ Epitaxial Layer Grown by Liquid Phase Epitaxy

○Zhijin Chen¹, Hiroaki Tadokoro¹, Taro Takakura¹, Miyuki Miyamoto¹, Susumu Innan¹, Teruo Kamura¹ (1.Mitsubishi Gas Chemical)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[20p-A22-4]

Homo-epitaxial growth on the β -Ga₂O₃ (011) substrate by HVPE

○Kentaro Ema¹, Chia-Hung Lin¹, Yuki Ueda¹, Kohei Sasaki¹, Akito Kuramata¹ (1.NCT)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[20p-A22-5]

Investigation of activation annealing condition of β -Ga₂O₃ HVPE epitaxial wafer

○Lin ChiaHung¹, Kengo Obayashi¹, Tomoka Nishikawa¹, Kentaro Ema¹, Yoshihiro Yamashita¹, Kohei Sasaki¹, Akito Kuramata¹ (1.NCT)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[20p-A22-6]

Growth rate control of β -Ga₂O₃ crystal growth in OVPE method using thermodynamic calculations

○TOMOHIRO SHIRAISHI¹, IMANISHI MASAYUKI¹, HOSOKAWA KEISUKE¹, USAMI SHIGEYOSHI¹, MORI YUSUKE¹ (1.Osaka Univ.)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[20p-A22-7]

X-ray topographic characterization of β -Ga₂O₃ crystals grown by vertical Bridgman method

○Hiroataka Yamaguchi¹, Yukako Kato¹, Takuya Igarashi², Yuki Ueda², Kimiyoshi Koshi², Shinya Watanabe², Shigenobu Yamakoshi², Akito Kuramata² (1.AIST, 2.Novel Crystal Technology, Inc.)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[20p-A22-8]

Demonstration of vertical power devices of (001) β -Ga₂O₃ grown by MOCVD

○Kentaro Ema¹, Kohei Sasaki¹, Akito Kuramata¹ (1.NCT)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[20p-A22-9]

Study on NiO/ β -Ga₂O₃ heterojunctions grown by MBE technique

○Hiroataka Yamaguchi¹, Hitoshi Tampo¹, Takehiko Nagai¹, Yoshiaki Nakata², Kohei Sasaki² (1.AIST, 2.Novel Crystal Technology, Inc.)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[20p-A22-10]

Anomalous Carrier Profile and Its Mobility in β -Ga₂O₃ Induced by Chlorine-Based Dry Etching

○Takafumi Kamimura¹, Masataka Higashiwaki^{1,2} (1.NICT, 2.Osaka Metropolitan Univ.)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[20p-A22-11]

Optical properties of selective-area-grown α -Ga₂O₃ on c-plane sapphire

○Riena Jinno¹, Sangmin Ji², Natthajuks Pholsen¹, Hideo Otsuki¹, Satoshi Iwamoto^{1,2} (1.RCAST Univ. Tokyo, 2.IIS Univ. Tokyo)

◆ Highlighted Presentation

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[20p-A22-12]

Fabrication of single-mode α -Ga₂O₃ waveguides and observation of the light propagation in the visible region

○(M2)Koudai Iijima¹, Hideo Otsuki¹, Sangmin Ji², Riena Jinno^{1,3}, Susumu Fukatsu³, Satoshi Iwamoto^{1,2} (1.RCAST U-Tokyo, 2.IIS U-Tokyo, 3.Graduate School of Arts and Sciences U-tokyo)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[20p-A22-13]

Design of photonic crystal nanobeam cavity in gallium oxide

○Jewook Jeon¹, Koudai Iijima¹, Nao Harada¹, Sangmin Ji², Riena Jinno¹, Satoshi Iwamoto^{1,2} (1.RCAST U-Tokyo, 2.IIS U-Tokyo)

Ni/ β -Ga₂O₃ ショットキー障壁高さの温度依存性の起源: 温度上昇に伴う β -Ga₂O₃ 価電子帯上端の上昇と伝導帯底の低下 Characterization of temperature dependence of Schottky barrier height in Ni/ β -Ga₂O₃ combined with XPS study on valence band structure of β -Ga₂O₃

東大工¹, ノベルクリスタルテクノロジー²

棟方晟啓¹, 佐々木公平², 江間健太郎², 中野義昭¹, 小林正起¹, 前田拓也¹

Univ. of Tokyo¹, Novel Crystal Technology, Inc.²

A. Munakata¹, K. Sasaki², K. Ema², Y. Nakano¹, M. Kobayashi¹ and T. Maeda¹

E-mail: munakata@wbgt.t.u-tokyo.ac.jp

酸化ガリウム(β -Ga₂O₃)は高耐圧かつ低損失なパワーデバイス材料として期待されている。これまで我々は、(001)面 β -Ga₂O₃ ショットキーバリアダイオード(SBD)の障壁高さの温度依存性解析に熱電子放出-拡散(TED)モデルを用いることで、電流-電圧(I - V)特性、容量-電圧(C - V)特性、IPE による光電流測定から広い温度範囲で一貫した温度依存性を得られたことを報告した。また、障壁高さの温度依存性とバンドギャップの温度依存性が一致しない原因を調べるため、XPS で価電子帯上端(VBM)のエネルギーの温度変化を調べ報告した[1]。本発表では、障壁高さの温度係数と VBM の温度依存性の関係について定量的に議論する。

実験には、(001)面 n 型 β -Ga₂O₃ SBD を用いた。高濃度 Ga₂O₃ 基板上にハライド気相成長法(HVPE)により低濃度 Ga₂O₃ 層を 10 μ m ホモエピタキシャル成長した。エピ層の実効ドナー密度は C - V 測定より 5×10^{15} cm⁻³ であった。エピ層表面に Schottky 電極として Ni/Au、基板裏面に Ohmic 電極として Ti/Au を蒸着した。XPS の測定には、電気的特性を測定したサンプルのうち、表面に電極がない部分を切り出して用いた。

図 1 に XPS から得られた VBM 付近のスペクトルの温度変化を示す。横軸は束縛エネルギー、縦軸は強度である。室温における VBM は $E_{FS} - 4.11$ eV であり、VBM は温度の上昇とともに低束縛エネルギー側に僅かにシフトした。この結果は、バンドギャップ(E_g)が温度上昇とともに縮小するという先行研究の結果と合致する[2]。図 2 には、VBM と障壁高さ($e\phi_b$)[1]のそれぞれについて温度依存性を示す。横軸は温度で、図 2 上側の縦軸は VBM - E_{FS} 、図 2 下側の縦軸は 100 K における値からの変化量である。この温度領域においてそれぞれの温度依存性は非線形であるが、簡易的に直線で近似することとすると、 E_g は -1.15 meV/K [2]、VBM は 0.81 meV/K、 $e\phi_b$ は -0.27 meV/K で温度に対して変化している。図中赤線は $E_g + \text{VBM}$ の値(-0.34 meV/K)であり、伝導帯底(CBM)の温度依存性に相当すると考えられる。簡易的な比較ではあるが、CBM の温度依存性(赤線)は $e\phi_b$ の温度依存性と概ね一致している。この結果より、 β -Ga₂O₃ の障壁高さの温度依存性は温度上昇に伴う CBM の低下を反映したものであることがわかる。このときのバンド図の概略を図 3 に示す。Si や GaAs では障壁高さの温度依存性は温度上昇に伴うバンドギャップの縮小と同程度であるが、 β -Ga₂O₃ では CBM だけでなく VBM も温度に対して顕著に変化するため、バンドギャップの温度依存性を直接は反映せず、障壁高さの温度依存性の起源は温度上昇に伴う CBM の低下であると考えられる。これらの結果は酸化ガリウム電子デバイスの温度依存性を考慮する際に有益である上、金属/ワイドギャップ半導体の物性理解において重要な知見である。

【参考文献】 [1] 棟方 他, 春応物 25p-61A-7 (2024). [2] L. Cheng *et al.*, *J. Phys. Chem. Lett.*, **13**, 3053-3058 (2022).

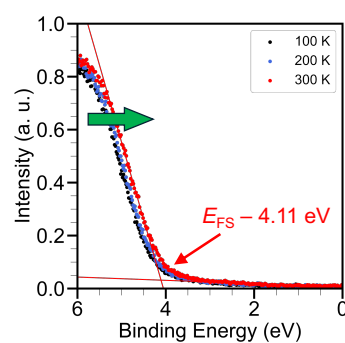


Fig. 1. Temperature dependence of valence band spectra of β -Ga₂O₃ obtained by XPS.

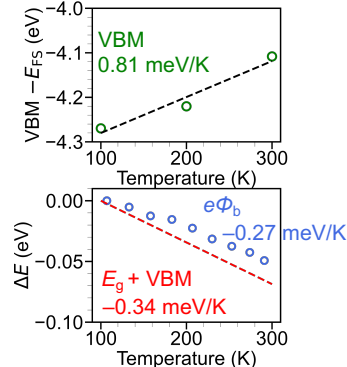


Fig. 2. Temperature dependence of valence band maximum (VBM), barrier height ($e\phi_b$), and (bandgap (E_g) + VBM).

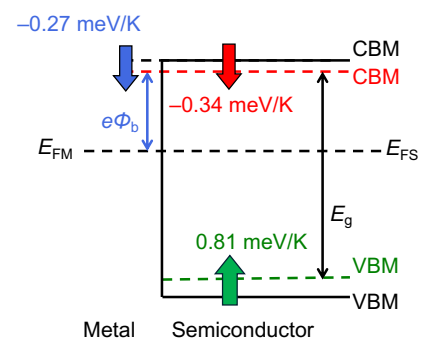


Fig. 3. Schematic of band diagram.

LiNbO₃ 基板と格子整合可能な α -(In, Fe)₂O₃ と α -(In, Ga)₂O₃ の薄膜成長

Exploring of Thin Film Growth and Lattice Matching of α -(In, Fe)₂O₃ and α -(In, Ga)₂O₃ on LiNbO₃ Substrates

京都工繊電子, [○](P) 島添 和樹, 西中 浩之

Kyoto Inst. Tech. [○]Kazuki Shimazoe, Hiroyuki Nishinaka

E-mail: n24a0001@kit.ac.jp

α 型酸化ガリウム(α -Ga₂O₃)はその大きなバンドギャップ(5.3 eV)から、次世代のパワー半導体材料として注目されている。 α -Ga₂O₃は準安定相であるため、サファイア(α -Al₂O₃)基板などの異種基板上に成長する必要がある。異種基板との格子ミスマッチによって薄膜内に生じる欠陥が、応用上の課題となっている。そこで、本研究では成長用基板としてニオブ酸リチウム(LiNbO₃)基板を用いるアプローチを検討した。LiNbO₃は表面弾性波フィルタ用基板として社会で広く用いられている。空間群はR3cに属し、 α -Ga₂O₃の成長用基板として一般的な α -Al₂O₃に非常に近い結晶構造を有している。図1に示すようにLiNbO₃のa軸長は0.5148 nmであり、 α -Ga₂O₃との格子ミスマッチは-3.2%と、サファイアとのミスマッチ(4.7%)より小さい。更に、同じ結晶構造であるrh-In₂O₃との混晶薄膜である α -(In, Ga)₂O₃はLiNbO₃と格子整合する組成が存在する。しかし、LiNbO₃基板上に直接Ga₂O₃を成長した場合は κ -Ga₂O₃が成長する¹⁾。そこで、本研究ではLiNbO₃と格子整合したバッファ層を成長しその上へ α -Ga₂O₃及び α -(In, Ga)₂O₃の成長を試みた。

図1に示すように、rh-In₂O₃へ α -Fe₂O₃を混晶化することでLiNbO₃と格子整合可能である。図2にミストCVDを用いて成長した α -(In, Fe)₂O₃薄膜のXRD 2 θ - ω 測定結果を示す。全てのIn組成比で α -(In, Fe)₂O₃の成長に成功した。一方で、In組成比50%以上ではIn₂O₃の最安定相であるbcc相との相分離が生じた。これはIn組成比の増加に伴って基板との格子ミスマッチが大きくなっていくからであると考えられる。In組成比30%では、ほぼ格子整合した位置に回折ピークが見られ、他の結晶相に起因するピークも観測されなかった。よって α -Ga₂O₃及び α -(In, Ga)₂O₃の成長のためのLiNbO₃とほぼ格子整合した α -(In, Fe)₂O₃薄膜の成長に成功した。当日は α -(In, Fe)₂O₃へのGa₂O₃及び(In, Ga)₂O₃の成長も報告する予定である。

参考文献 1)K. Shimazoe, et al., AIP Advances 10, 055310 (2020)

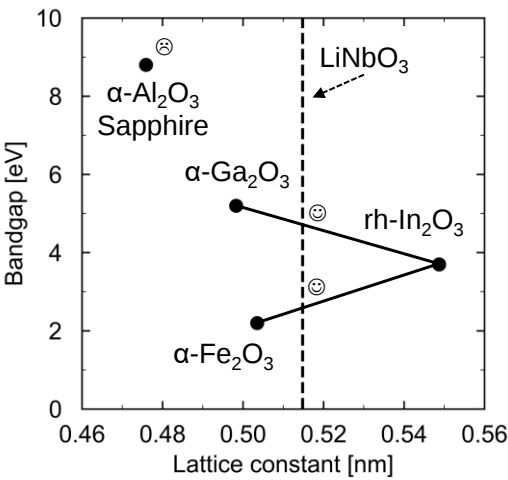


Fig. 1 Relationships between lattice constant and bandgap of the oxides used in this study

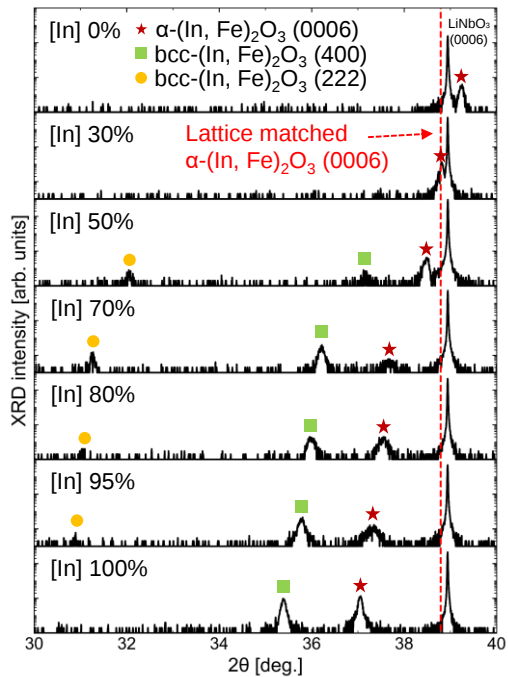


Fig. 2 XRD 2 θ - ω scan results of α -(In, Fe)₂O₃ thin films

液相エピタキシー法によるSnドープβ-Ga₂O₃エピタキシャル膜の育成

Sn-Doped β-Ga₂O₃ Epitaxial Layer Grown by Liquid Phase Epitaxy

三菱ガス化学株式会社 東京研究所

○陳 智璿, 田所 弘晃, 大下倉 太郎, 宮本 美幸, 印南 享, 嘉村 輝雄

Tokyo Research Laboratory, Mitsubishi Gas Chemical Company, Inc.

○Zhijin Chen, Hiroaki Tadokoro, Taro Takakura, Miyuki Miyamoto, Susumu Innan, Teruo Kamura

E-mail: zhijin-chen@mgc.co.jp

β-Ga₂O₃は広いバンドギャップを持ちながら融液法による育成が可能な結晶であり、光デバイス、高出力パワー半導体用途として注目されている。液相成長法の一つである液相エピタキシー (LPE) 法は熱平衡に近い状態で結晶を基板上にエピタキシャル成長できるため、高品位な結晶を高速で得ることができる。著者らはβ-Ga₂O₃基板にLPE法を適用したホモエピタキシャル成長を既に報告した¹。β-Ga₂O₃のパワー半導体材料への適用においては、所望の電気特性を得るために異種元素を精密にドープする必要がある。そこで本発表ではLPE法を用いたβ-Ga₂O₃エピタキシャル膜の育成において、β-Ga₂O₃のドナー性ドーパントであるSnをドープした結果を報告する。

溶媒としてPbO及びBi₂O₃、溶質としてGa₂O₃、ドーパントとしてSnO₂を白金るつぼの中に混合し、電気炉中で加熱して溶解させた。よく攪拌してから温度を降下させ、Edge-defined Film-fed Growth法で製造されたSnドープ(001)β-Ga₂O₃基板を接液させてエピタキシャル成長させた。SnO₂の投入量を調整することにより、ドーピング濃度の制御を試みた。

実験の結果、6~17 μm/hの高い成長速度で厚み5~60 μmのSnドープエピタキシャル層を得た。二次イオン質量分析法 (SIMS) でエピタキシャル層中Sn濃度を測定したところ、定量結果は $9.2 \times 10^{15} \sim 1.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ であった (Figure 1)。エピタキシャル層のSn濃度は溶液のSnO₂濃度に比例することが確認された。Snドープエピタキシャル層の結晶性をX線ロックインカーブ測定 (XRC) で評価したところ、基板と同等の結晶性が確認された。原子間力顕微鏡 (AFM) でAs Grownのエピタキシャル層表面を観察したところ、原子レベルの平坦性が確認された。

以上のことから、LPE法によるβ-Ga₂O₃エピタキシャル層の育成では、Snドープを行う場合でも、高い成長速度と高い結晶性を保つことが示された。さらに、SnO₂の投入量を調整することによりSnドーピング濃度の制御ができることが示された。

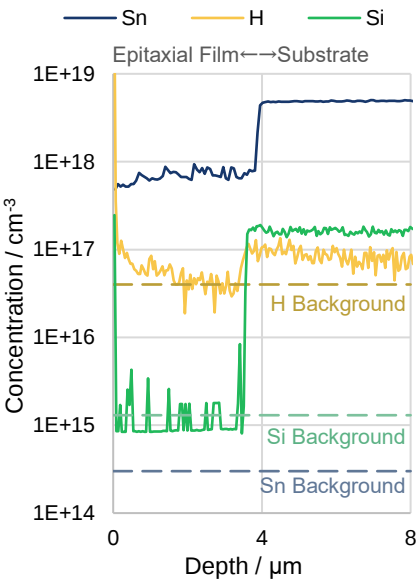


Figure 1 SIMS result showing Sn concentration of $7.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ in Sn-doped epitaxial film and $4.9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ in Sn-doped substrate.

1 田所ら, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会, 23p-31A-2 (2024).

HVPE 法による(011)面 β -Ga₂O₃ 基板上的ホモエピタキシャル成長

Homo-epitaxial growth on the β -Ga₂O₃ (011) substrate by HVPE

株式会社ノベルクリスタルテクノロジー

〇江間 研太郎, 林 家弘, 上田 悠貴, 佐々木 公平, 倉又 朗人

Novel Crystal Technology, Inc., 〇K. Ema, C.-H. Lin, Y. Ueda, K. Sasaki, A. Kuramata

E-mail: ke.ema@novelcrystal.co.jp

β -Ga₂O₃は約 4.5 eV の大きなバンドギャップを有し、SiC や GaN をしのぐ次世代パワー半導体材料として注目を集めている。我々はこれまでに、残留ドナー濃度 $1\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 、膜厚 10 μm のエピウエハ上に作製したショットキーバリアダイオード(SBD)におけるキラ欠陥密度を 0.7 個/ cm^2 まで低減させたエピウエハの開発に成功[1]しており、また 5.0 kV の耐圧を示す single-fin FET[2]などを報告している。一方で、より高耐圧のデバイスを実現するためには、より低濃度、厚膜のエピウエハが求められている。

β -Ga₂O₃ のエピウエハ成膜にはハライド気相成長法(HVPE 法)を用いており、原料生成部において金属 Ga と Cl₂ を反応させることで GaCl を生成し、その後成長部で GaCl と O₂ を反応させて β -Ga₂O₃ を基板結晶上にエピタキシャル成長させる。成長面方位は(001)面が主流であり、また HVPE 法の反応先駆体である GaCl 由来の不純物である Cl やリアクター由来の不純物である Si はドナーとしてはたらくため、これらの残留ドナー濃度を低減させることが要求される。本発表では(001)面に代わる新たな成長面方位の探索として(011)面基板上への成長を試み、表面モフォロジーや不純物取り込み、電気的特性などを評価した。

表 1 は HVPE 法を用いて(001)面および(011)面基板上に同条件で成長させたサンプルの二次イオン質量分析法(SIMS 法)による Cl および Si 濃度の結果を示した。(011)面基板上における成長では(001)面と比較して Cl および Si の取り込みが減少していることが確認され、残留ドナー濃度を低減できる面方位として期待されることが分かった。また、as-grown の表面モフォロジーは(001)面とは大きく異なることが確認され、(001)面に見られる深いピットやウエハ端部の縞状の成長[1]は観察されなかった。一方で、(011)面にも特有の異常成長部が確認されており(図 2)、当日はこれら異常成長部を低減させたエピウエハに作成した SBD の電気的特性についても報告する。

本研究成果の一部は、防衛装備庁の委託研究契約を受注した(株)日本製鋼所の下で得られたものである。

[1] 林 他, 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会(2022). [2] 脇本 他, 第 82 回応用物理学会秋季学術講演会(2021).

	(001)	(011)
Cl (cm^{-3})	8×10^{15}	8×10^{14}
Si (cm^{-3})	3×10^{15}	$< 1\times 10^{15}$

Table I. Cl and Si impurity concentration in β -Ga₂O₃ epitaxial wafer measured by SIMS.

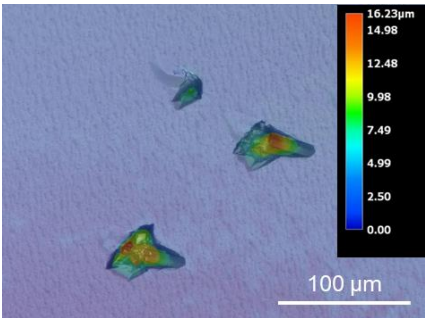


Figure 1. The surface morphology of β -Ga₂O₃ (011) epitaxial wafer grown by HVPE.

β-Ga₂O₃ HVPE エピウエハの活性化アニール条件検討

Investigation of activation annealing condition of β-Ga₂O₃ HVPE epitaxial wafer

株式会社ノベルクリスタルテクノロジー °林 家弘, 尾林 賢郷,
西河 巴賀, 江間 研太郎, 山下 佳弘, 佐々木 公平, 倉又 朗人

Novel Crystal Technology, Inc., °C.-H. Lin, K. Obayashi,
T. Nishikawa, K. Ema, Y. Yamashita, K. Sasaki, A. Kuramata

E-mail: c.lin@novelcrystal.co.jp

β-Ga₂O₃ の厚膜低濃度ホモエピタキシャル成長技術として、ハライド気相成長法(HVPE 法)が知られている。また、β-Ga₂O₃は酸素雰囲気アニールするとドナーが不活性化し、続いて窒素などの不活性雰囲気アニールすると活性化することも知られている。HVPE 成長中は、β-Ga₂O₃ 基板が酸素雰囲気に晒されるため、成膜中に基板のドナー濃度が低下する。そのため、成膜後に不活性雰囲気でのアニール処理が必須である。本研究では、アニール条件と活性化率、熱分解量、ショットキーバリアダイオード(SBD)のオン抵抗(R_{on})への影響を調査した。

最初に、Ga₂O₃ (001)基板(N_d-N_a : $6\cdot10^{18}\text{ cm}^{-3}$)の熱分解量とドナーの活性化率を調査した。熱分解量と活性化率はそれぞれ、電子天秤による重量変化と、容量-電圧特性から求められる N_d-N_a の変化量から推定した。5 つの試料について、O₂ 雰囲気、1 h、1000℃で不活性化させた後、N₂ 雰囲気、1 h で、1200℃から 1450℃まで 50℃刻みで変化させて活性化アニールを行った。Fig. 1(a) と(b)に、それぞれ熱分解量と活性化率のアニール温度依存性を示す。アニール温度が上昇するにつれて熱分解量と活性化率は増加し、熱分解量は 1400℃以上のアニールで急激に増加し、活性化率は 1300℃を超えると 100%に達することがわかった。

次に 2 つのエピウエハに対してそれぞれ、1150℃(Sample A)と 1400℃(Sample B)で活性化アニールを行った。Sample A と B のエピ成膜前の基板の N_d-N_a は、 $6.7\cdot10^{18}\text{ cm}^{-3}$ と $4.7\cdot10^{18}\text{ cm}^{-3}$ であり、エピ膜厚は 8–9 μm 程度である。両試料表面に Ni/Au ショットキー電極と、裏面に Ti/Au カソード電極を形成し、SBD の電流-電圧特性評価を行った。Fig. 2 に、 R_{on} のエピ層の N_d-N_a 依存性を示す。Sample A よりも Sample B の方が R_{on} が全体的に低下している。これは、Sample B の方が基板の活性化率が向上し、抵抗成分が減少したためであると考えられる。

本研究成果の一部は、防衛装備庁の研究委託契約を受注した(株) 日本製鋼所の下で得られたものである。

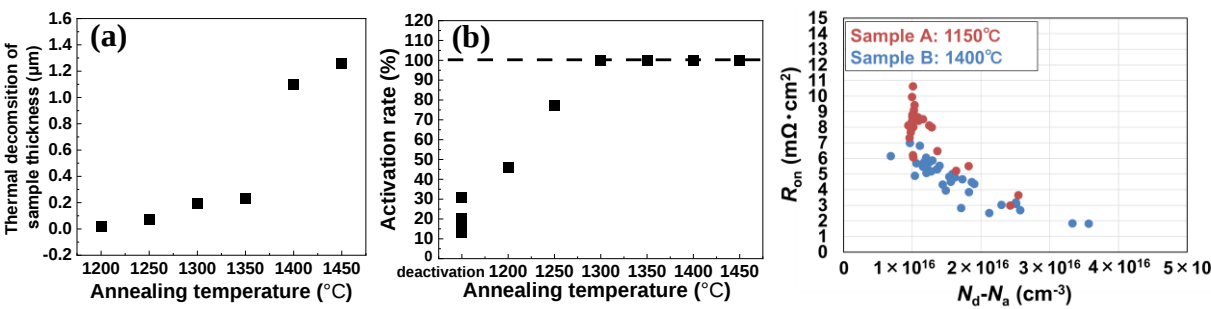


Fig.1 (a) Thermal decomposition of sample thickness and (b) activation rate of β-Ga₂O₃ substrates dependence on annealing temperature.

Fig.2 R_{on} of SBDs with annealing temperatures of 1150 and 1400 °C.

β-Ga₂O₃ 結晶の OVPE 成長における熱力学計算を用いた成長速度制御

Growth rate control of β-Ga₂O₃ crystal growth in OVPE method using thermodynamic calculations

阪大院工¹

○白石 智裕¹，今西 正幸¹，細川 敬介¹，宇佐美 茂佳¹，森 勇介¹

1. Grad. Sch. of Eng., Osaka Univ.

○T. Shiraishi M. Imanishi¹, K. Hosokawa¹, S. Usami¹, Y. Mori¹

E-mail: shiraishi@eei.eng.osaka-u.ac.jp

【はじめに】パワーデバイス半導体需要の高まりにより GaN, SiC, β-Ga₂O₃ といったワイドギャップ半導体に注目が集まっている。特に β-Ga₂O₃ はパワーデバイスへの有用性を示すバリガ指数が極めて高く、液相成長法による高品質なバルク結晶の作製が実用化されていることもあり盛んに研究がなされている。高性能なデバイスを実現するためには高純度なエピ膜が必要不可欠であり、有機金属気相成長法（MOVPE）法やハライド気相成長（HVPE）法によるエピ膜の育成が取り組まれている。^[1,2] 他方、これらの手法は原料由来の不純物である C や Cl が混入する懸念がある。これらの課題に対処するため、我々は酸化物を前駆体とした気相成長法であるオキサイド気相成長法（OVPE）法を用いて酸化ガリウム薄膜作製に取り組んできた。

先行研究より OVPE 法を用いたサファイア基板上 β-Ga₂O₃ 結晶成長において成長速度は熱力学計算の概ね一致することが報告されている。^[3] 今回の報告では、熱力学計算結果を参考に各温度において駆動力が等しくなるようなガス流量条件を算出した後、各流量において(001) β-Ga₂O₃ 基板上に成長を行い、成長速度が維持されるか検証した。

【実験と結果】種基板として長形状（12x25 mm）の Sn ドープ(001) 面 β-Ga₂O₃ 基板を用いた。III 族源として Ga₂O ガスを、VI 族源として H₂O を用いた。Ga₂O ガスは Ga と H₂O ガスを反応させて生成した。まず熱力学計算を用いて各温度帯で同等の成長速度が得られる条件を探索した。解析の結果は Fig. 1 に示しており、各温度において Ga₂O 分圧が等しくなるようなガスフロー条件を定めた。次に得られた条件を用いて各温度で実験を行い再現性の検証を行った。Fig. 2 に実験で得られた温度と薄膜の成長速度の関係を示した。1040℃から 1060℃までは熱力学計算で予測したように、約 1.6 μm/h の成長速度を維持することができた。一方で 1080℃を超えてくると熱力学計算の予測から乖離し、成長速度の著しい低下が見られた。これは高温による脱離の影響が大きくなったためと考えている。

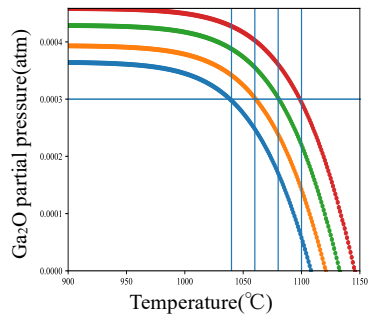


Fig. 1 Thermodynamic analysis of Ga₂O partial pressure.

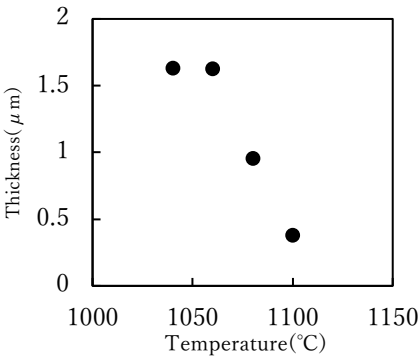


Fig. 2 Growth film thickness.

参考文献：[1] H. Murakami *et al.*, Appl. Phys. Express **8** (2015) 015503. [2] K. Goto *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **60** (2021) 045505. [3] R. Togashi *et al.*, IWGO-4, October 24, 2022, Pos 1-15

垂直ブリッジマン法による β -Ga₂O₃ 基板結晶の X 線トポグラフィによる欠陥解析

X-ray topographic characterization of β -Ga₂O₃ crystals
grown by vertical Bridgman method

産総研¹, (株) ノベルクリスタルテクノロジー² ○山口博隆¹、加藤有香子¹、

五十嵐拓也²、上田悠貴²、奥公祥²、渡辺信也²、山腰茂伸²、倉又朗人²

AIST¹, Novel Crystal Technology, Inc.² Yamaguchi Hiroataka¹, Kato Yukako¹, Igarashi Takuya²,

Ueda Yuki², Koshi Kimiyoshi², Watanabe Shinya², Yamakoshi Shigenobu², Kuramata Akito²

E-mail: yamaguchi-hr@aist.go.jp

β -Ga₂O₃ はパワーエレクトロニクス材料として期待されている SiC や GaN などの物質群で、常圧で単結晶の融液成長が可能である特長をもつ。すでに、100 mm 径の Edge-defined film-fed growth (EFG) 法による電子デバイス用基板結晶が市販されている。さらに高品質化と低コスト化をめざし、垂直ブリッジマン(VB)法による結晶成長技術が開発され、6 インチ径の結晶育成と結晶欠陥の低密度化が実証された[1]。

X 線トポグラフィ (XRT) による欠陥解析では、EFG 結晶と VB 結晶には、欠陥の形態と密度において大きな違いが見られる。EFG 結晶では b 軸に伸びる長い直線状欠陥が顕著である。Fig. 1 は(010)基板の XRT 像であるが、貫通転位密度は、VB 結晶で 400-700 cm⁻²、EFG 結晶で 8000 cm⁻² と、1 ケタの違いが見られる。(001)基板で観察すると、すなわち横から見た貫通転位の正体は、VB 結晶では(001)面内に広がる転位網、EFG 結晶では直線状欠陥であることがわかった。ここで比較している 2 枚は、いずれも結晶の成長方向 (引き上げ方向) は $\langle 010 \rangle$ である。VB 結晶の成長初期の成長方向を含む結晶の XRT 像からは、初期に発生した転位群が成長とともに消失していく様子が観察された。これは、転位が成長方向に引き継がれていく EFG 結晶とは対照的であり、VB 法と EFG 法における結晶成長機構の違いを示唆している。

本研究は、科学技術振興機構研究成果展開事業研究成果最適展開支援プログラム A-STEP 企業主体 (マッチングファンド型) の助成を受けた。

[1] Igarashi *et al.*, International Workshop on Gallium Oxide and Related Materials 2024 (Berlin, Germany).

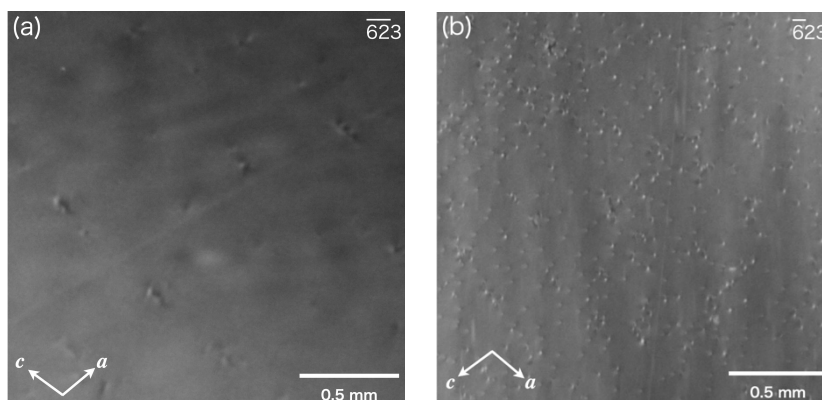


Figure 1 XRT images of β -Ga₂O₃ (010) wafers grown by (a) VB and (b) EFG methods.

MOCVD 法で成膜した(001)面 β -Ga₂O₃ の縦型パワーデバイス実証

Demonstration of vertical power devices of (001) β -Ga₂O₃ grown by MOCVD

株式会社ノベルクリスタルテクノロジー

○江間 研太郎, 佐々木 公平, 倉又 朗人

Novel Crystal Technology, Inc., °K. Ema, K. Sasaki, A. Kuramata

E-mail: ke.ema@novelcrystal.co.jp

有機金属気相成長法(MOCVD 法)は化合物半導体の成膜工程において広く用いられる手法であり、 β -Ga₂O₃ においても(010)面や(100)面での報告が数多く存在する[1]。我々はこれまで、ハライド気相成長法(HVPE 法)を用いて(001)面 β -Ga₂O₃ 基板上にエピタキシャル膜を形成し、ショットキーバリアダイオード(SBD)や高耐圧トランジスタの動作実証を行ってきた。今後のさらなる高耐圧実証のためには、より高純度・低キャリア濃度のエピ膜が必要とされるが、HVPE 法では反応前駆体である GaCl から混入する不純物 Cl により、残留ドナー濃度を低下させることに課題がある。本研究では、MOCVD 法による(001)面 β -Ga₂O₃ 基板上のエピ成膜条件を構築し、膜中の不従物濃度や SBD の特性を評価したので報告する。

成膜装置には大陽日酸(株)製の横型 Hot-wall 式反応炉を用い、有機金属原料にトリメチルガリウムを使用した。図 1 に成長速度 3.4 $\mu\text{m/h}$ で成膜した(001)面 β -Ga₂O₃ 基板上のエピ膜の二次イオン質量分析法(SIMS 法)による不純物深さプロファイルを示している。有機金属原料に含まれる H や C、反応炉の構成材料に含まれる Si はバックグラウンドレベルであり、(001)面上に高純度なエピ膜が成膜できることが確認された。続いて、厚さ 14 μm のアンドープ膜を(001)面 β -Ga₂O₃ 基板上に形成し、SBD の試作を行った。ショットキー電極には Ni を用いた。電極サイズは直径 800 μm である。図 2 の電流密度-電圧(J - V)特性の通り、理想係数が 1.04 の良好な順方向特性と、-400 V まで測定下限程度の低いリーク電流特性が得られた。

本研究成果の一部は、防衛装備庁の委託研究契約を受注した(株)日本製鋼所の下で得られたものである。

[1] 吉永 他, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会(2024).

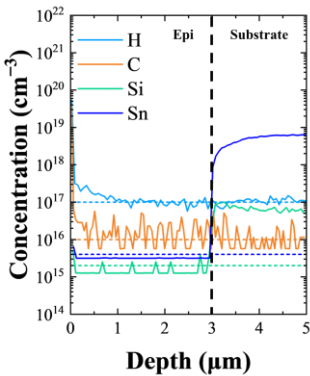


Figure 1. Impurity concentration of (001) β -Ga₂O₃ epitaxial wafer grown by MOCVD.

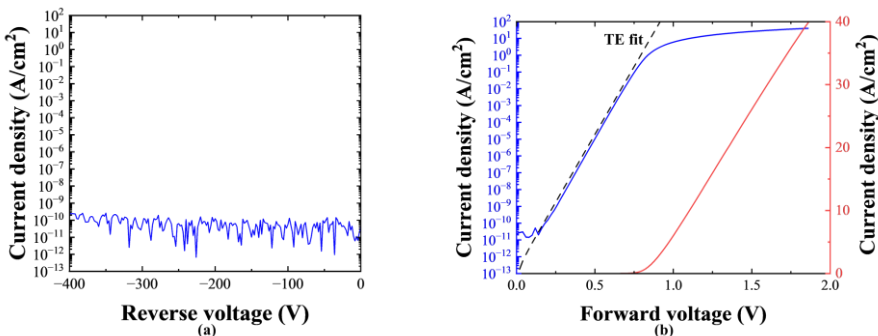


Figure 2. (a) Reverse and (b) forward J - V characteristics of SBD fabricated on (001) β -Ga₂O₃ epitaxial wafer grown by MOCVD.

MBE 法による NiO/ β -Ga₂O₃ ヘテロ接合技術の開発

Study on NiO/ β -Ga₂O₃ heterojunctions grown by MBE technique

産総研¹, (株) ノベルクリスタルテクノロジー² ◯山口博隆¹, 反保衆志¹, 永井武彦¹

中田義昭², 佐々木公平²

AIST¹, Novel Crystal Technology, Inc.² Hirotaka Yamaguchi¹, Hitoshi Tampo¹, Takehiko Nagai¹

Yoshiaki Nakata², Kohei Sasaki²

E-mail: yamaguchi-hr@aist.go.jp

β -Ga₂O₃ はパワーエレクトロニクス材料として期待されている一方、ドーピングによる p 型伝導が困難である。この問題を解決するために、p 型伝導の母物質としての NiO をヘテロ接合することによる pn 接合の開発を進めている。超高真空中で高純度原料を使用した分子線エピタキシー (MBE)によって、原子層単位で制御された高品質薄膜の成長が可能である。

実験は、EFG 法による β -Ga₂O₃ 基板を使用し、(010)、(001)、($\bar{2}$ 01)の各面上に NiO を同条件で成膜した。成膜中の反射高速電子回折 (RHEED) 観察、成膜後の X 線回折および断面の透過型電子顕微鏡 (TEM) 観察により、NiO 膜の結晶方位や界面構造を解析した。基板面と NiO 膜の方位関係は、ゾルゲル法による NiO/ β -Ga₂O₃ について報告されている[1]。MBE 法による薄膜においても、一致した結果が得られた。断面 TEM では、いずれの基板面においても単相の岩塩型 NiO 単結晶が得られており、界面層がない急峻な界面を介してエピタキシャル成長していることが確認された (Fig. 1)。また、界面から立ち上がるコントラストが見られ、格子不整合に起因した転位によるものと考えられる。成長表面はファセット的で、基板の面方位により形状が異なっていることがわかった。

[1] S. Nakagomi, T. Yasuda and Y. Kokubun, Phys. Stat. Solidi B **257**, 1900669 (2020).

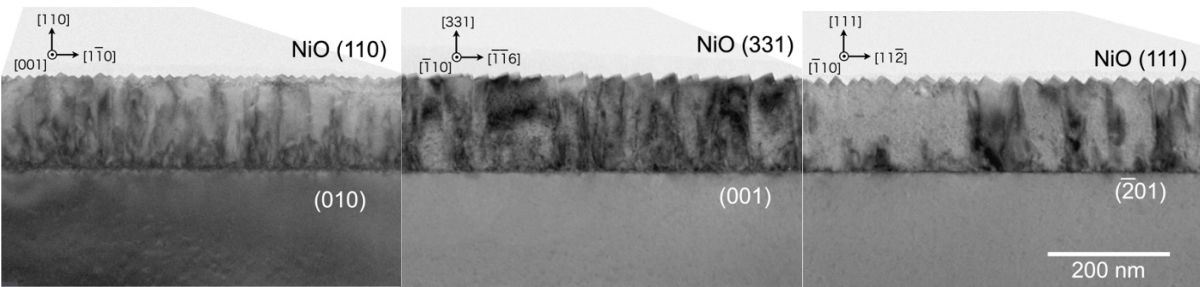


Figure 1 Bright field cross-sectional TEM images of NiO films grown on β -Ga₂O₃ (010), (001) and ($\bar{2}$ 01) substrates.

β -Ga₂O₃ 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

Anomalous Carrier Profile and Its Mobility in β -Ga₂O₃

Induced by Chlorine-Based Dry Etching

情通機構¹, 大阪公立大院工² °上村 崇史¹, 東脇 正高^{1,2}

NICT¹, Osaka Metropolitan Univ.², °Takafumi Kamimura¹, Masataka Higashiwaki^{1,2}

E-mail: kamimura@nict.go.jp

【はじめに】 β -Ga₂O₃ は、4.5 eV の大きなバンドギャップを持つ酸化物半導体であり、融液成長法によるバルク製造が可能なことから性能、コストの両面からパワー半導体材料として注目を集めている。一方で、耐放射線耐性、高温デバイス動作が見込まれることから極限環境デバイスとして、主に高周波デバイス応用にも期待が持たれている。 β -Ga₂O₃ デバイス作製プロセスにおいてメサエッチング、オーミックコンタクト形成、リセスゲート形成等に使用される BCl₃ ガスを用いた反応性イオンエッチング (RIE) は、点欠陥の生成や Cl の拡散により電気的特性に影響を与えることが報告されている[1]。今回、Si イオン注入した β -Ga₂O₃ (010) 基板表面に BCl₃ RIE 処理を行った後、MOS キャパシタを作製し、そのキャリアプロファイル ($N_d - N_a$) を評価した。

【実験】図 1 に MOS キャパシタの模式図を示す。試料作製プロセスは次の通りである。まず、ノンドープ β -Ga₂O₃ (010) 基板 ($n \sim 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) へイオン注入により Si の 60 nm box プロファイルを形成し、活性化アニールを施した。次に、RF パワー 100 W の BCl₃ RIE により 表層 20 nm をエッチング除去した。続いて、Si イオン注入と Ti/Au 蒸着によりオーミック電極を形成した。最後に、原子層堆積法により 20 nm 厚の Al₂O₃ 膜を堆積し、その上に 直径 400 μm の円形ゲート電極を形成した。作製した MOS キャパシタにおいて、ゲート電圧 -10 V 印加状態で 30 分間の光照射 (波長 280 nm) を繰り返し行い、その前後の容量-電圧特性から $N_d - N_a$ の深さプロファイルを見積もった。

【結果と考察】図 2 に $N_d - N_a$ の深さプロファイルを示す。同図上には、SRIM 計算で得た注入 Si のプロファイルも合わせて示す。As pristine の状態で $N_d - N_a$ は、SRIM 計算値を大きく下回った分布をしており、RIE プロセスで誘起された欠陥が Ga₂O₃ 中の Si ドナーの不活性化に関与していると推測される。図 3 に 150 nm 深さでの $N_d - N_a$ の時間依存性を示す。バイアス印加と光照射を繰り返すと、 $N_d - N_a$ は深さ 150 nm 付近を極小点として減少した。この変化はバイアス印加と光照射どちらか一方の条件では観察されなかった。このため、この一連の変化は、光エネルギーにより Si ドナーの不活性化に関与するドナー-欠陥複合体が解離し、欠陥がドリフトによって移動することを示唆していると考えられる。

【謝辞】本研究は、総務省 ICT 重点技術の研究開発プロジェクト (JPMI00316) 次世代省エネ型デバイス関連技術の開発・実証事業 (環境省連携事業) の委託を受け実施したものである。

[1] G. Alfieri *et al.*, J. Appl. Phys. **130**, 025701 (2021).

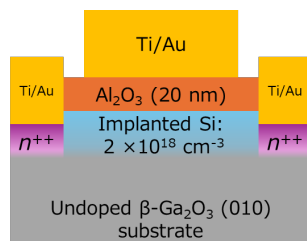


Fig. 1. Cross-sectional schematic of MOS capacitor

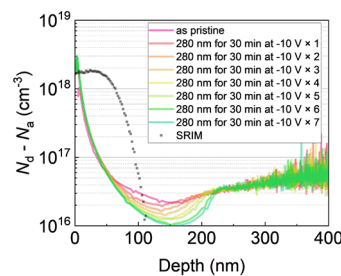


Fig. 2. $N_d - N_a$ depth profiles with repeated bias and exposure

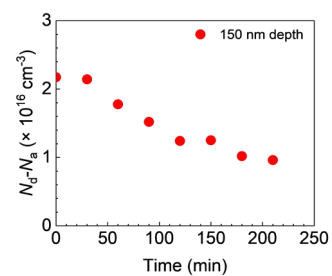


Fig. 3. $N_d - N_a$ at 150 nm depth as a function of bias and exposure time.

C 面サファイア基板上選択成長 α -Ga₂O₃ の発光特性

Optical properties of selective-area-grown α -Ga₂O₃ on *c*-plane sapphire

東大先端研¹, 東大生産研² ○神野 莉衣奈¹, 池 尚致², N. Pholsen¹, 大槻 秀夫¹, 岩本 敏^{1,2}

RCAST Univ. Tokyo¹, IIS Univ. Tokyo², °R. Jinno¹, S. Ji², N. Pholsen¹, H. Otsuki¹, and S. Iwamoto^{1,2}

E-mail: jinno@iis.u-tokyo.ac.jp

コランダム構造酸化ガリウム(α -Ga₂O₃) は 5.4 eV のバンドギャップエネルギーを持つ超ワイドバンドギャップ半導体材料の一つであり、高耐圧パワーデバイス応用が注目されている [1]。 α -Ga₂O₃ は熱的に準安定相のため、600°C 付近で最安定相の β 相への構造相転移が報告されており、高温プロセスへの耐性が課題であった。一方で、近年、選択成長や AlO_x キャップ層の導入により 900°C 以上の高温での構造安定化を報告しており[2,3]、高温での熱処理を用いることでイオン注入による導電性制御や色中心の形成など点欠陥の制御が期待できる。本研究では α -Ga₂O₃ の新奇フォトニクス応用を目的として、高温での熱処理が α -Ga₂O₃ の発光特性に与える影響について調べた。

c 面サファイア基板上に直径 5 μ m の SiO₂ ドット孔パターンを形成し、ミスト CVD 法により成長温度 600°C で α -Ga₂O₃ を選択成長させた。選択成長 α -Ga₂O₃ 上に ALD 法により AlO_x キャップ層を約 100 nm 蒸着した。作製した試料は大気雰囲気下、1050°C で 30 分間熱処理し、降温後、顕微ラマン・フォトルミネッセンス (PL) 測定を行った (励起波長 532 nm)。顕微ラマン測定によりクラックが導入されていない領域では、 α -Ga₂O₃ に起因する 7 つの振動モードが確認され α 相の構造が維持されていた [Figs. 1]。熱処理前の試料はサファイア基板中の Cr³⁺ による発光のみが得られたのに対し、熱処理後は 696, 698 nm に鋭い PL ピークが得られた[Fig. 2]。これらの発光スペクトルは α -Ga₂O₃ 中の Cr³⁺ に起因し[4]、熱処理によりサファイア基板中の Cr 不純物が α -Ga₂O₃ 層へ熱拡散したと考えられる。熱拡散による Cr の添加は α -Ga₂O₃ のフォトニクス応用への展開が期待できる一方で、パワーデバイス応用にとっては高抵抗化の原因となるため、熱拡散の制御が必要とされる。当日は、より詳細な光学特性評価について報告する予定である。

【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。研究遂行に協力いただいた東大先端研・石田 悟己助手、東大生産研・西岡 政雄氏に感謝申し上げます。

[1] K. Kaneko, *et al.*, J. App. Phys. 131, 090902 (2022).

[2] J. McCandless, *et al.*, Appl. Phys. Lett. 119, 062102 (2021).

[3] 神野ら, 2023 年第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 16p-E102-6 (2023).

[4] M. Back, *et al.*, Adv. Optical Mater. 9, 2100033 (2021).

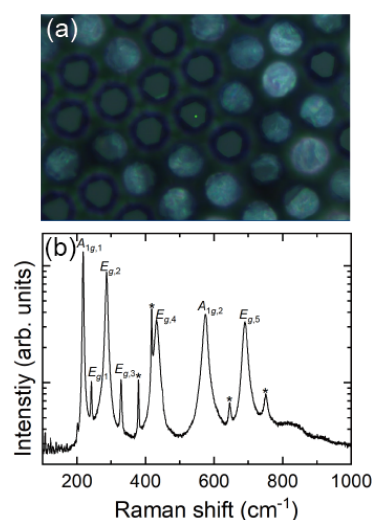


Fig. 1. (a) An optical image of the selective-area-grown Ga₂O₃ after annealing at 1050°C and (b) a typical Raman spectrum obtained at the region without cracks, exhibiting 7 active Raman modes of 2A_{1g} and 5E_g of α -Ga₂O₃.

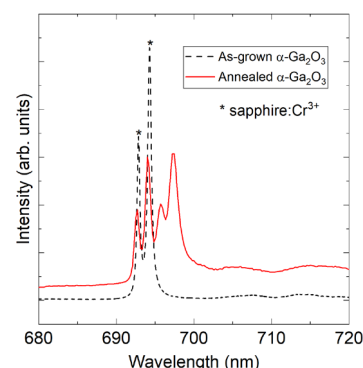


Fig. 2. A photoluminescence spectrum of the α -Ga₂O₃ sample (a) before and (b) after annealing at 1050°C. PL peaks at 693 and 694 nm originate from Cr³⁺-centers in the sapphire substrate.

可視光領域におけるシングルモード α -Ga₂O₃ 導波路の作製と光導波の観測 Fabrication of single-mode α -Ga₂O₃ waveguides and observation of the light propagation in the visible region

東大先端研¹, 東大生産研², 東大院総合文化³

○(M2) 飯嶋 航大¹, 大槻 秀夫¹, 池 尚玟², 神野 莉衣奈^{1,3}, 深津 晋³, 岩本 敏^{1,2}

RCAST U-Tokyo¹, IIS U-Tokyo², Graduate School of Arts and Sciences U-tokyo³

°K.Iijima¹, H.Otsuki¹, S.Ji², R.Jinno^{1,3}, S.Fukatsu³, S.Iwamoto^{1,2}

E-mail: k-ijijima@iis.u-tokyo.ac.jp

超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(Ga₂O₃)は、高耐圧・低損失なパワーデバイス材料として近年活発に研究されている[1]。また、フォトリソの観点からも、広い波長帯で透明である性質から、近紫外-可視域で機能する光集積回路のプラットフォームとしての可能性が検討され始めた材料である[2]。最安定相の β -Ga₂O₃ では、可視光導波路が報告[3]されたが、シングルモード性に関する議論や、面外結合用のインターフェースの作製は十分に行われていない。

本研究では、 β -Ga₂O₃ よりも広いバンドギャップと高い屈折率[3,4]を有する α -Ga₂O₃ に注目し、可視光領域の α -Ga₂O₃ 導波路を作製し、面外結合を通じた光導波の観測に成功したので報告する。

まず、*c* 面サファイア上に、Mist CVD 法により膜厚約 200 nm の α -Ga₂O₃ 薄膜を成長させた。次いで PECVD 法により、SiO₂ 犠牲層を成膜し、その後リフトオフプロセスにより Ni マスクを形成した。Ni マスクと BCl₃/Cl₂ 混合ガスを用いた α -Ga₂O₃ の RIE の後、HF により SiO₂ 犠牲層と Ni エッチングマスクを除去することで、導波路構造を作製した。

作製した導波路の傾斜 SEM 像を Figure 1(a)に示す。約 200 nm のサファイアのオーバーエッチングを含む、導波路幅 1 μ m のハイメサ型 α -Ga₂O₃ 光導波路の構造が得られた。また、Figure 1(a)の挿入図に、SEM 測長の構造パラメータを使った固有モード計算による、導波モードの電場分布を示す。導波し得るモードが TE 偏光のシングルモードであることがわかった。作製した導波路の両端にはグレーティングカップラが形成されており[Figure 1(b)], 波長 633 nm の赤色レーザー光を垂直入射させたところ、光導波が確認された[Figure 1(c)]。当日は、作製プロセスや導波路特性の詳細を紹介する予定である。

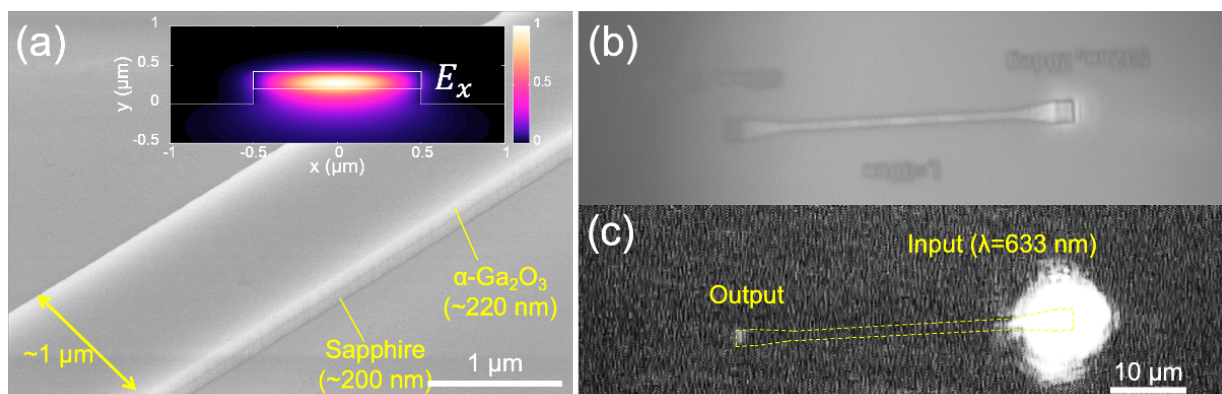


Figure 1 An SEM image of the fabricated α -Ga₂O₃-based high-mesa type waveguide with a width of 1 μ m. The inset shows the electric field mode profile of the waveguide mode, as expected from SEM observations. (b) A CCD image of the fabricated waveguide with a length of 30 μ m. (c) A CCD image of the waveguide supporting the single guided mode of the grating-coupled 633-nm light in TE polarization.

参考文献：[1] S. Pearton, *et al.*, *Applied Physics Reviews*, **5**, 1 (2018). [2] J. Zhou, *et al.*, *Journal of Materials Research* **36**, 4832–4845 (2021). [3] J. Zhou, *et al.*, *Applied Physics Letters*, **115**, 25 (2019). [4] M. Hilfiker, *et al.*, *Applied Physics Letters*, **119**, 9 (2021).

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。研究遂行に協力いただいた東大先端研・石田 悟己助手、東大生産研・西岡 政雄氏に感謝する。

酸化ガリウムを用いたフォトリック結晶ナノビーム共振器の設計

Design of photonic crystal nanobeam cavity in gallium oxide

東大先端研¹, 東大生産研²

○全濟旭¹, 飯嶋航大¹, 原田直¹, 池尚玟², 神野莉衣奈¹, 岩本敏^{1,2}

RCAST U-Tokyo, IIS U-Tokyo ○J. Jeon, K¹. Iijima¹, N. Harada¹, S. Ji², R. Jinno¹, and S. Iwamoto^{1,2}

E-mail: jeonj@iis.u-tokyo.ac.jp

ワイドバンドギャップ半導体材料中の色中心は、深い準位を形成しイオン化しづらい傾向があることから単一光子源への応用が期待されている[1]。β-Ga₂O₃は4.6-4.9 eVのバンドギャップエネルギーを持つワイドバンドギャップ半導体の一つであり、近年FeやCuなど不純物を起因とする1.316μmで発光する色中心が報告された[2]。この発光波長は光通信で使用されるOバンドに位置しており、量子情報通信分野への応用において有望であると考えられる。単一光子光源や量子リピータなど、色中心を用いた高効率量子情報デバイスの実現には、フォトリックナノ構造を用いて光と色中心の相互作用を高めることが必要となる。特にフォトリック結晶(PhC)ナノ共振器は、高いQ値と小さいモード体積V_{eff}を持つことから、ダイヤモンド量子フォトンクスでも広く活用されている[3]。本研究ではβ-Ga₂O₃の色中心の量子フォトンクス応用を目的に、Ga₂O₃で構成されたPhCナノビーム共振器を設計したので報告する。

検討したエアブリッジ型共振器構造をFig. 1に示す。Ga₂O₃-PhCナノビーム中央の空気孔を3つ除いたL3型共振器で、Q値を高めるために欠陥付近の空気孔半径および空気孔を変調した。PhCの格子定数a=470 nm、空気孔の半径R=0.28a、欠陥付近の円孔半径はR₁=0.68R、R₂=0.77R、ビーム幅w=1.5a、ビーム厚みT=(50/47)aである。また、欠陥最近接円孔の位置は外側に0.1aシフトさせた。β-Ga₂O₃の屈折率nは1.95とした[4]。3次元FDTDを用いた解析から、共振器共鳴波長λ₀=1.317 μmに欠陥付近に局在するモード(Fig. 2)が存在するところがあった。このモードのQ値、モード体積はそれぞれ16111、1.32(λ₀/n)³であった。これらを用いて計算した理論パーセル係数は927である。これらの結果は、同構造がβ-Ga₂O₃色中心と光の相互作用増強に活用できる可能性を示している。その他の共振器構造や、作製プロセスについて検討した結果は当日報告する。

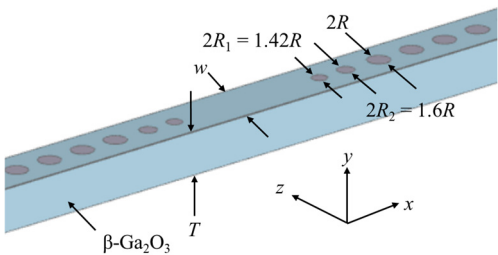


Fig. 1 Schematic view of Ga₂O₃-based PhC nanobeam cavity.

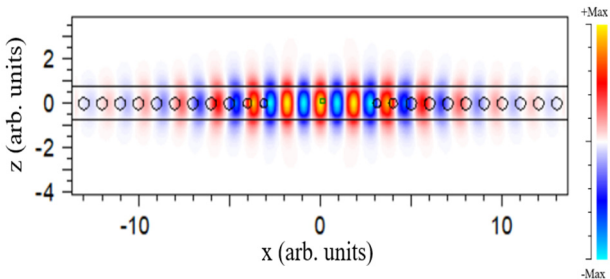


Fig. 2 Cavity field distribution (E_z component)

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。
参考文献：[1] J. R. Weber, *et al.*, Proc. Natl Acad. Sci. USA **107**, 8513–8518 (2010). [2] J. E. Stehr *et al.*, Appl. Phys. Lett. **124**, 042104 (2024). [3] M.Sichen *et al.*, J. Phys. Photonics **2**, 042001 (2020). [4] T. Onuma *et al.*, JJAP. **55**, 1202B2 (2016).