コランダム構造酸化ガリウムの結晶成長とデバイス応用†

金子 健太郎* 織田 真也** 高塚 章夫**

人羅 俊実** 藤田 静雄*

Crystal Growth and Device Applications of Corundum-Structured Gallium Oxide

by

Kentaro KANEKO*, Masaya ODA**, Akio TAKATSUKA**, Toshimi HITORA** and Shizuo FUJITA*

This paper reviews the evolution of corundum-structured gallium oxide (α -Ga₂O₃) semiconductors from crystal growth of single-crystalline films to potential device applications. In spite of thermodynamically metastable phase, high-quality α -Ga₂O₃ can be grown on sapphire substrates by the use of mist chemical vapor deposition (CVD), or mist epitaxy, allowing low-cost and high performance power devices. N-type conductivity control is achieved by Sn doping with the carrier concentration from 10¹⁷ to 10¹⁹ cm⁻³. Marked progress in performance of Schottky barrier diodes (SBDs) has been brought by the development of device structures. The most up-to-date results show on resistance and breakdown voltage of 0.1 m Ω ·cm² and 531 V (SBD1) or 0.4 m Ω ·cm² and 855 V (SBD2), respectively, and the record-low on resistance was demonstrated at the high breakdown voltage. These results encourage the future development of low cost and high performance power devices with α -Ga₂O₃.

Key words:

Gallium oxide, Corundum, Wide bandgap, Power devices, Schottky barrier diodes, Mist deposition, Sapphire substrates, On resistance

1 結 言

Ge, Si から始まった半導体デバイスの進展は、一つの方向としてバンドギャップのより大きな材料の開拓と言う道を進んできた。3 eV 以上のバンドギャップを持ち、ワイドギャップ半導体と称される SiC および GaN は、現在における一つの到達点にあり、青色発光ダイオード(light emitting diodes; LEDs)やこれをベースとした白色 LED, 紫外レーザダイオード(laser diodes; LDs), また低損失の電力制御を達成するパワーデバイス等への応用により、省エネルギーの社会を実現する大きな鍵を握っている。

一方、次のターゲットと考えられている材料の一つに酸化物半導体がある。酸化物半導体の特徴として、例えば、絶縁体に近い高抵抗から透明導電膜として用いられるほどの低抵抗を示すほか、光・電子・磁気機能に亘る多様な特性を示すことが挙げられる。多くの材料は広いバンドギャップを持ち、透明トランジスタ、紫外光機能デバイス、パワーデバイス等への応用が期待されるとともに、新しいスピントロニクス材料としての応用も考えられる。酸化物半導体のもう一つの側面は、環境に優しい材料という点である。酸化物は多くのものが安定で、酸化反応は多くの金属にとって最も生じやすい反応である。酸化物半導体が社会で利用されることにより、製造や廃棄プロセスまで含めて、安全・安心・省エネルギーをもたらしてくれる。

このようにデバイス応用の観点で多くのポテンシャルを持つ酸化物半導体であるが、2000 年以前には半導体となりうる高品質材料を育成するに十分な結晶成長制御が困難であったために、現実のデバイスを目指す研究がなかなか進まなかった、すなわち成長層表面での化学反応や吸着種のマイグレーションといった過程が十分に制御されず、酸素空孔に代表される欠陥を生み、半導体としての特性を示さなかったことが挙げられる。しかし、禁制帯幅 3.4 eV を持つ ZnO が紫外発光デバイスとして注目に至ったことをきっかけに、成長層表面の構造、極性制御、ステップフロー成長、ヘテロ界面での 2 次元電子ガス形成などが可能となり、酸化物半導体の応用に現実的な期待が高まったわけである。

これらの成果を背景に、最近になって酸化ガリウム(Ga₂O₃)半導体についての関心が高まってきた。Ga₂O₃ 半導体は、ZnO より大きい約 5 eV に及ぶ広いバンドギャップを持つ。したがって、ZnO よりさらに短波長光領域の開拓につながるるとともに、高い絶縁破壊電圧とパワーデバイス応用が考えられる。Ga₂O₃ の応用として、従来から深紫外光検出器¹⁾、ガスセンサ^{2),3)}、電界効果トランジスタ⁴⁾、スピントロニクスデバイス⁵⁾等を目指す研究が行われてきたが、高品質の単結晶薄膜を実現し、伝導性制御をもとにトランジスタ等半導体デバイスの実現につなげてゆこうとする研究は、まだ道途上である。

† 原稿受理 平成28年 3月 24日 Received Mar. 24, 2016 ©2016 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 京都大学 工学研究科 光・電子理工学教育研究センター 〒615-8520 京都市西京区京都大学桂
Photonics and Electronics Science and Engineering Center, Kyoto University, Nishikyo-ku, Kyoto 615-8520.

** (株) FLOSFIA 〒615-8245 京都市西京区御陵大原
FLOSFIA INC., Nishikyo-ku, Kyoto 615-8245.

本稿では、最近の進展が著しく、パワーデバイスとしての広い普及が期待されるコランダム構造 Ga_2O_3 ($\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$)を対象に、結晶成長とデバイス応用の進展についてまとめ、今後のデバイス応用への展望を示したい。

2 Ga_2O_3 半導体の結晶構造と特徴

Ga_2O_3 半導体は、 $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \epsilon$ 型と表記される結晶構造を持つ。これらのうち、最も熱的に安定なものが単斜晶系の β 型とされており、⁶⁾ バンドギャップは 4.8-4.9 eV と報告されている。⁷⁾ 光吸収特性等から直接遷移型のバンド構造を持つと考えられているが、⁸⁾ 間接遷移型とする計算結果もある。⁹⁾ また、 α 型はコランダム構造をとり、準安定な相といわれている。 γ 型はスピネル構造を持つ。酸素空孔が生じやすいという酸化物半導体に共通の問題から n 型伝導を示すが、 Sn 、¹⁰⁾ Si ¹¹⁾ のドーピングにより n 型伝導性を制御する試みがある。またアクセプタ形成を目指して Zn ドーピングを試みた報告もある。¹²⁾

Ga_2O_3 が最近になって注目されるようになったのは、バンドギャップが SiC や GaN より大きいために高い絶縁破壊電界が期待でき、また高品質の $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 基板が得られホモエピタキシャル成長によるデバイスが実現できることが大きな理由である。とくに、研究初期において、ドーピングやイオン注入によるキャリア密度制御が示され、^{13), 14)} トランジスタ動作が実証^{15), 16)}されたことが、研究を大きく加速させた。今後高性能のデバイスに向けた進展が大いに期待される。

他方、われわれは、酸素という安全な元素をもつ酸化物半導体の結晶成長について、従来から一般的な結晶成長法によらずとも、より安全で簡便な方法があるのではないかと考え、ミスト気相成長(chemical vapor deposition; CVD)法の研究開発を進めてきた。興味ある結果は、この技術を用いることで、サファイア基板上に準安定相の $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ が成長することを見出したことである。これがデバイス応用にまで進めば、安価な基板上に安価で省エネルギーの技術で結晶成長ができ、デバイスを安価に供給できる可能性がある。このことから、 $\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$ をベースとしたデバイスの研究開発を進めているところである。

3 コランダム構造 Ga_2O_3 半導体の結晶成長

3・1 ミスト CVD 法

Fig. 1 Schematic illustration of mist generator.

酸化物半導体が他の半導体と大きく異なる点として、「酸素が不純物とならない」ことが挙げられる。これは結晶成長において大きなマージンをもたらすと言える。なぜなら、酸素は一般の半導体成長において最も除外に努力を要し、また影響の大きい不純物の代表であるためである。あわせて、 AsH_3 , PH_3 のような危険な原料を用いる必要がない。以上をあわせ考えると、酸化物半導体の結晶成長は他の半導体の結晶成長と異なったコンセプトで行うことができるのではないかとと思われる。この考えをもとにわれわれが応用を進めているのがミスト CVD 法である。

ミスト CVD 法とは、目的とする酸化物を構成する金属元素を含む化合物を原料とし、これを水またはアルコールに溶解した溶液に超音波を印加し、得られる霧状のミストをキャリアガスで輸送して反応に用いる方法である。原料としては、金属の酢酸塩やアセチルアセトナトなど、安全で安価なものを利用できる。ミスト発生部(原料供給部)の概略を Fig.1 に示す。この技術は、従来スパッタリング等の真空技術を用いて成膜されていた酸化物透明電極を、非真空技術で成膜することを目指して開発してきたものである。¹⁴⁾⁻¹⁹⁾

このような方法で半導体が成長可能になれば、成長コストと成長に要するエネルギーの大幅な削減をもたらす、また溶媒が強い酸化剤として働いて酸素空孔の生成を抑える効果があると思われる。実際、この方法で ZnO 単結晶を成長したところ、良好な電気的特性とステップフロー成長を実現できたことから、^{20), 21)} 酸化物半導体の単結晶薄膜の成長技術として大きなポテンシャルを持つと考えられる。

3・2 結晶の評価

Fig.2 は、ミスト CVD 法により得られた Ga_2O_3 薄膜の X 線回折測定結果²³⁾である。ここから、得られた Ga_2O_3 薄膜は α 型であることがわかった。MBE 法では熱的に安定な β 型が得られる²²⁾のに対し、これは興味ある結果である。さらに、(0006)回折に対するロッキングカーブ半値幅は

Fig. 2 XRD $2\theta/\theta$ scanning spectra of Ga_2O_3 films grown by mist CVD on sapphire substrates at various temperatures.²³⁾

Fig. 3 Cross sectional TEM image at α -Ga₂O₃/sapphire (α -Al₂O₃) interface.²⁴⁾

100 arcsec 以下と狭い。また、バンドギャップは 5.3 eV と、 β -Ga₂O₃ より大きい値が得られた。²³⁾ このように、コランダム構造の α -Ga₂O₃ が成長するのは、コランダム構造のサファイアを基板に用いたためと推察されるが、MBE では β 型が主となることから、単なる基板の結晶構造への引き込み効果ではなく、ミスト CVD 特有の低エネルギーの結晶成長により、基板表面から薄膜への結晶格子のロッキング作用が、他の成長方法に比べて強く働いている事が関係していると推察される。しかし、サファイアと Ga₂O₃ のボンド長には 4% 程度の不整合がある。にもかかわらず、結晶性の高い薄膜が得られることは、興味深いことである。基板近傍の断面の TEM 観察の結果²⁴⁾ を Fig.3 に示す。 α -Ga₂O₃ 成長層には欠陥があまり見られず、ロッキングカーブ半値幅が小さいことを支持する。ここで、界面の構造に着目すると、約 9 nm を周期とするコントラストが見られる。 α -Ga₂O₃ の(1010)方向(構造に平行な方向)の格子定数が 0.43 nm であり、サファイアのそれは 0.41 nm である。これらは前者の 20 周期、サファイアの 21 周期にあたる約 8.6 nm と良い一致を示すことから、約 9 nm を大きな周期とした格子整合構造を持って成長したのではないかとと思われる。²⁴⁾

Fig. 4 Composition control of α -(Al,Ga)₂O₃ and α -(In,Ga)₂O₃.²⁶⁾

このように、ミスト CVD 法により α -Ga₂O₃ が成長することは、同じコランダム構造を持つ他の酸化物半導体との広い組成にわたる混晶を成長可能なことを示唆する。 β 型は特殊な結晶構造で β -Ga₂O₃ が存在するのみであるが、 α 型については α -Al₂O₃ および α -In₂O₃ が存在することが知られている。したがって、これらの混晶すなわち α -(Al, Ga, In)₂O₃ によるバンドギャップエンジニアリングおよび多層構造による物性創成という、デバイスの基本要件を満たすことができる。ただし、 α -In₂O₃ は準安定状態であるため、その成長条件を踏まえて混晶の成長を行う必要がある。われわれは、サファイア基板上的 α -Fe₂O₃ バッファ層を用いることで α -In₂O₃ の成長が可能になることを見出した。²⁵⁾ 引き続き、Fig.4 に示すように α -(Al, Ga, In)₂O₃ 混晶によるバンドギャップ制御を示した。²⁶⁾ ここで、 α -(Al,Ga)₂O₃ は全体の組成範囲にわたって単一相の混晶が得られ、ボウイングパラメータも小さいのに対し、 α -(Ga, In)₂O₃ については中間の組成領域で相分離が見られ、ボウイングパラメータも大きい。この傾向は AlGa₂N および InGa₂N とそれぞれ対応するもので、金属元素の種類による共通の効果があるようである。また、コランダム構造を持つ酸化物半導体としては、半導体以外の多様な機能を持つ遷移金属酸化物(Fe₂O₃, Cr₂O₃ など)が存在する。 α -Ga₂O₃ とこれらの混晶化により、新規な機能の創成が考えられる。例として、 α -Ga₂O₃ と α -Fe₂O₃ とを混晶化した α -(Fe_xGa_{1-x})₂O₃ において、室温以上での強磁性を持つ半導体を実現し得た。²⁷⁾

3・3 ドーピングによる電気特性制御

α -Ga₂O₃ はバンド絶縁体であり、ノンドーブでは電気伝導性を示さない。しかしながら、2012 年に川原村等²⁸⁾ 赤岩等²⁹⁾ が相次いで Sn ドープによる導電性 n 型 α -Ga₂O₃ の作製を報告した。特に赤岩等は、Sn を 0.4% ドープした試料において、Hall 移動度 2.8 cm²/Vs, キャリア密度 2.7×10^{19} /cm³ の値を得た。しかしながら、当時のミスト CVD 装置は、ステンレス部材からの金属溶出を十分に防ぎきれておらず、また多くのシリコン製部材を使用していたことから、薄膜中に金属部材からの Fe や Cr イオンを

Fig. 5 Atomic densities of impurities of C, H, N, Si and Al in non-doped α -Ga₂O₃ films measured by SIMS technique.²⁹⁾

Fig. 6 SIMS spectrum of C^{12} and Ga elements in the α - Ga_2O_3 thin film and sapphire substrate.³⁰⁾

はじめ, C, H, N, Si が 10^{17} - $10^{19}/cm^3$ 存在し (Fig.5), それぞれ中性不純物やドナーとして作用するため, 電子走行パスを阻害し, また意図した以上のキャリアが発生するため, 電気伝導性を阻害する原因となっていた. そのため, 得られた電気特性は, 半導体よりも, むしろ金属の電気特性に近い, 高キャリア密度, 低移動であった.

しかしながら, その後の装置改良等により, 薄膜中の Fe や Cr 等の不純物の濃度を低減させる事に成功した. 2014 年の ROCA 株式会社 (現 (株) FLOSFIA) からの報告では, 前駆体溶液の作製条件を工夫し, Ga のハロゲン化合物を用いることで, カーボンコンタミの劇的な低減に成功した. Fig.6 は SIMS 測定による, α - Ga_2O_3 薄膜中における Ga と C^{12} の深さ方向濃度の測定結果²⁹⁾である. 薄膜表面では, 空気中から飛散したカーボンコンタミが確認されるが, 薄膜中においてその濃度は非常に小さく, 検出限界 ($10^{17}/cm^3$) 未満の領域も確認できる.³⁰⁾ さらに, 2015 年に赤岩等によって Hall 移動度 $24cm^2/Vs$ をもつ α - Ga_2O_3 薄膜の作製が報告されており, その電気特性は年々向上している.³¹⁾

Fig. 7 Relationships between optical band-gaps with a-axis lattice constant (a), c-axis one (b), ionic radii (c). (d) is a dependence of c/a ratio of lattice constant and ionic radii.³²⁾

4 コランダム構造 Ga_2O_3 半導体を用いたデバイス

コランダム構造酸化物のデバイス応用を考慮した場合, α - Ga_2O_3 は大変重要な役割を担う. Fig.7 は 8 種類存在するコランダム構造酸化物の光学バンドギャップと, (a) a 軸長, (b) c 軸長, (c) イオン半径の関係と, c/a 軸比とイオン半径の相関を示した図である.³²⁾ いずれの図中においても, α - Ga_2O_3 は中央に位置し, 混晶作製において α - Ga_2O_3 の作製がキーテクノロジーとなる事が示される. 特にデバイス作製においては, バンドギャップ値が大きく異なる α - In_2O_3 (3.7 eV) と α - Al_2O_3 (8.7 eV) の高品質混晶作製は困難であり, α - Ga_2O_3 を介してバンドギャップチューニングする事によって, 高品質な混晶の作製が可能となり, 将来的には高速電子デバイス (high electron mobility transistor; HEMT) をはじめ, ヘテロ構造を利用したデバイスへの応用が期待できる. そして, α - Ga_2O_3 単体も, 光学バンドギャップ値が 5.3 eV というダイヤモンド (5.49 eV) に匹敵する大きなバンドギャップを有する魅力的な材料であり, パワーデバイス応用をはじめ, 様々なデバイスへの展開が期待される. (株) FLOSFIA からは, これまで, c 面サファイア基板上に作製した高品質 α - Ga_2O_3 薄膜を利用したショットキーバリアダイオードが報告されている.

4・1 横型ショットキーバリアダイオード

Fig.8 は, ミスト CVD 法により作製した横型ショットキーバリアダイオード (SBD) の構造と, その電流-電圧特性である. Pt をショットキー電極に用いることでショット

Fig. 8 Schematic image of horizontal SBD based on α - Ga_2O_3 (a) and I-V characteristic (b).³³⁾

Fig. 9 Forward (inside figure) and reverse J-V characteristics of a α -Ga₂O₃ SBD.³⁴⁾

キ特性が確認され、横型 SBD の作製に成功した。³³⁾ しかしながら、その ON/OFF 値は 10^4 未満と小さく、また順方向電流の値も 10V で 100 μ A 未満であり、パワーデバイス応用を目指した SBD の特性としては十分なものではなかった。その原因として、膜中の不純物密度が高く、 α -Ga₂O₃ 薄膜の比抵抗値が高いため、横方向の電流値が低く、また表面平坦性も十分ではなかったため、ショットキー電極下でのリーク電流が原因で、低い逆方向耐圧を示す結果となった。

そこで、成長システムの改良により、 α -Ga₂O₃ 膜中の不純物濃度を低減させ、また成長条件を最適化させることで、表面平坦性を向上させた薄膜を用いて SBD を作製した。Fig.9 は、その電流-電圧特性である。³⁴⁾ 逆方向-100V における漏れ電流値は 10nA/cm² 未満であり、さらに絶縁破壊電圧も 500V 以上と高い値を示した。またその障壁高さを計算すると 1.2 eV であった。しかしながら、理想形数

Fig. 10 Forward current density (J) versus voltage (V) characteristics of vertical SBD structure with α -Ga₂O₃ (a) and reverse one (b).³⁵⁾

(n) が 2.3 と大きく、コンタクト抵抗の低減を含めて、順方向特性を改善することが課題であった。

4・2 縦型ショットキーバリアダイオード

α -Ga₂O₃ の移動度は比較的 low、横型 SBD の作製には現状としても課題が多い。また、サファイア基板は熱伝導率が低く、またサファイア基板を用いる限り、横型 SBD しか作製することができない。

この問題に対し、(株) FLOSFIA では、サファイア基板から α -Ga₂O₃ 薄膜層を剥離して、その裏面にオーミック電極を形成することで、自立型の縦型 SBD を作製するという考え方を実現するに至った。Fig.10 はその電流-電圧特性である。順方向において $n=1.1$ と大きく改善されており、SBD として理想的特性に大きく近づいた。また、逆方向特性において、絶縁破壊電圧は 300 V 近くあり、大きな耐圧を有している事が示された。³⁵⁾

さらに最適化を進めた結果得られた SBD の電流-電圧特性が Fig.11 である。³⁵⁾ これより、オン抵抗と絶縁破壊電圧の値について、SBD1 ではそれぞれ 0.1 m Ω -cm², 531 V, SBD2 において、0.4 m Ω -cm², 855 V の値が得られた。ここで得られた 0.1 m Ω -cm² というオン抵抗値は、SiC SBD と比較して十分小さい値であり、結晶性の向上と成長層の基板からはく離という相乗効果によりもたらされたものといえる。またサファイア基板をはく離したことで、デバイスを放熱板に直接マウントして放熱効果を高めることも可能である。

Fig. 11 Forward current density versus applied voltage characteristics of α -Ga₂O₃ SBDs.³⁶⁾

5 結 言

ミスト CVD という安全、簡便、省エネルギーの結晶成長技術により、サファイア基板上に高品質のコランダム構造 α -Ga₂O₃ 半導体を得られる。これを用いたデバイスの研究開発は、高性能なデバイスを安価に供給できるという意義を持ち、パワーデバイスの大いなる普及に貢献するものと考えられる。きわめて低いオン抵抗をもつ SBD の実証はその一例であり、今後その実用化と各種デバイスへの展開が大いに期待される。

参 考 文 献

- 1) Y. Kokubun, K. Miura, F. Endo and S. Nakagomi, "Sol-gel prepared β -Ga₂O₃ thin films for ultraviolet photodetectors", *Applied Physics Letters*, Vol.90, Iss.3, 031912(1-3) (2007).
- 2) C.-Cheng Chen and C.-Chen Chen, "Morphology and electrical properties of pure and Ti-doped gas-sensitive Ga₂O₃ film prepared by rheotaxial growth and thermal oxidation", *Journal of Materials Research*, Vol.19, No.4, pp.1105-1117 (2004).
- 3) M. Ogita, K. Higo, Y. Nakanishi and Y. Hatanaka, "Ga₂O₃ thin film for oxygen sensor at high temperature", *Applied Surface Science*, Vol.175-176, pp.721-725 (2001).
- 4) K. Matsuzaki, H. Yanagi, T. Kamiya, H. Hiramatsu, K. Nomura, M. Hirano and H. Hosono, "Field-induced current modulation in epitaxial film of deep-ultraviolet transparent oxide semiconductor Ga₂O₃", *Applied Physics Letters*, Vol.88, Iss.9, 092106(1-3) (2006).
- 5) H. Hayashi, R. Huang, H. Ikeno, F. Oba, S. Yoshioka, I. Tanaka and S. Sonoda, "Room temperature ferromagnetism in Mn-doped γ -Ga₂O₃ with spinel structure", *Applied Physics Letters*, Vol.89, Iss.18, 181903(1-3) (2006).
- 6) P. P. Macri, S. Enzo, G. Sberveglieri, S. Groppellib, and C. Perego, "Unknown Ga₂O₃ structural phase and related characteristics as active layers for O₂ sensors", *Applied Surface Science*, Vol.65-66, pp.277-282 (1993).
- 7) H. H. Tappin, "Optical absorption and photoconductivity in the band edge of β -Ga₂O₃", *Physical Review*, Vol.140, Iss.1A, pp.A316-A319 (1965).
- 8) M. Orita, H. Ohta, M. Hirano, and H. Hosono "Deep-ultraviolet transparent conductive β -Ga₂O₃ thin films", *Applied Physics Letters*, Vol.77, Iss.25, pp.4166-4168 (2000).
- 9) K. Yamaguchi, "First principles study on electronic structure of β -Ga₂O₃", *Solid State Communications*, Vol.131, Iss.12, pp.739-744 (2004).
- 10) N. Ueda, H. Hosono, R. Waseda and H. Kawazoe, "Synthesis and control of conductivity of ultraviolet transmitting β -Ga₂O₃ single crystals", *Applied Physics Letters*, Vol.70, No.26, pp.3561-3563 (1997).
- 11) E. G. Villora, K. Shimamura, Y. Yoshikawa, T. Ujiie and K. Aoki, "Electrical conductivity and carrier concentration control in β -Ga₂O₃ by Si doping", *Applied Physics Letters*, Vol.92, No.20, 202120(1-3) (2008).
- 12) P.C. Chang, Z. Fan, W.Y. Tseng, A. Rajagopal and H.G. Lu, " β -Ga₂O₃ nanowires: Synthesis, characterization, and p-channel field-effect transistors", *Applied Physics Letters*, Vol.87, No.22, 222102(1-3) (2005).
- 13) K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui, E. G. Villora, K. Shimamura and S. Yamakoshi, "Device-quality β -Ga₂O₃ epitaxial films fabricated by ozone molecular beam epitaxy", *Applied Physics Express*, Vol.5, No.3, 035502(1-3) (2012).
- 14) 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", *Applied Physics Express*, Vol.6, No.8, 086502(1-3) (2013).
- 15) M. Higashiwaki, K. Sasaki, A. Kuramata, T. Masui and S. Yamakoshi, *Applied Physics Letters*, "Gallium oxide (Ga₂O₃) metal-semiconductor field-effect transistors on single-crystal β -Ga₂O₃(010) substrates", Vol.100, No.1, 013504(1-3) (2012).
- 16) M. Higashiwaki, K. Sasaki, T. Kamimura, M. H. Wong, D. Krishnamurthy, A. Kuramata, T. Masui and S. Yamakoshi, "Depletion-mode Ga₂O₃ metal-oxide-semiconductor field-effect transistors on β -Ga₂O₃ (010) substrates and temperature dependence of their device characteristics", *Applied Physics Letters*, Vol.103, No.12, 123511(1-3) (2013).
- 17) T. Kawaharamura, H. Nishinaka, K. Kametani, Y. Masuda, M. Tanigaki and S. Fujita, "Fabrication and properties of ZnO thin films prepared by fine channel mist method", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.55, No.2, pp.153-158 (2006).
- 18) H. Nishinaka, T. Kawaharamura and S. Fujita, "Low-temperature growth of ZnO thin films by linear source ultrasonic spray chemical vapor deposition", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.46, No.10A, pp.6811-6813 (2007).
- 19) T. Kawaharamura, H. Nishinaka and S. Fujita, "The effect of fine channel & collisional mixing on mist CVD method", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.57, No.5, pp.781-487 (2008).
- 20) H. Nishinaka, Y. Kamada, N. Kameyama and S. Fujita, "Epitaxial ZnO thin films on a-plane sapphire substrates grown by ultrasonic spray-assisted mist chemical vapor deposition", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.48, No.12, 121103(1-5) (2009).
- 21) H. Nishinaka and S. Fujita, "Step-flow growth of homoepitaxial ZnO thin films by ultrasonic spray assisted MOVPE", *Journal of Crystal Growth*, Vol.310, Iss.23, pp.5007-5010 (2008).
- 22) T. Oshima, T. Okuno and S. Fujita, "Ga₂O₃ thin film growth on c-plane sapphire substrates by molecular beam epitaxy for deep-ultraviolet photodetectors", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.46, No.11, pp.7217-7220 (2007).
- 23) D. Shinohara and S. Fujita, "Hetero-epitaxy of corundum-structured α -Ga₂O₃ thin films on α -Al₂O₃ substrates by ultrasonic mist chemical vapor deposition", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.47, No.9, pp.7311-7313 (2008).
- 24) K. Kaneko, H. Kawanowa, H. Ito and S. Fujita, "Evaluation of misfit relaxation in α -Ga₂O₃ epitaxial growth on α -Al₂O₃ substrate", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.51, No.2, 020201(1-3) (2012).
- 25) N. Suzuki, K. Kaneko and S. Fujita, "Growth of corundum-structured In₂O₃ thin films on sapphire substrates with Fe₂O₃ buffer layers", *Journal of Crystal Growth*, Vol.364, Iss.2, pp.30-33 (2013).
- 26) S. Fujita and K. Kaneko, "Epitaxial growth of corundum-structured wide band gap III-oxide semiconductor thin films", *Journal of Crystal Growth*, Vol.401, pp.588-592, (2014).
- 27) K. Kaneko, I. Takeya, S. Komori and S. Fujita, "Band gap and function engineering for novel functional alloy semiconductors: Bloomed as magnetic properties at

- room temperature with α -(GaFe)₂O₃”, Journal of Applied Physics, Vol.113, Iss.23, 233901(1-6) (2013).
- 28) T. Kawaharamura, G. T. Dang and M. Furuta, “Successful growth of conductive highly crystalline Sn-doped α -Ga₂O₃ thin films by fine-channel mist chemical vapor deposition” Japanese Journal of Applied Physics, Vol 51, No.4R, 040207(1-3) (2012).
 - 29) K. Akaiwa and S. Fujita, “Electrical conductive corundum-structured α -Ga₂O₃ thin films on sapphire with tin-doping grown by spray-assisted mist chemical vapor deposition” Japanese Journal of Applied Physics, Vol 51, No.7R 070203(1-3) (2012).
 - 30) M. Oda, K. Kaneko, T. Hitora and S. Fujita, “Synthesis of α -Ga₂O₃ thin films for device applications” 33th Electronic Materials Symposium, We2-4.
 - 31) K. Akaiwa, K. Kaneko and Shizuo Fujita, “Electrical property of Sn-doped corundum-structured Ga₂O₃ thin films on sapphire substrates” 42nd International Symposium on Compound Semiconductors, Mo4PP-E.21
 - 32) K. Kaneko, “Fabrication and physical properties of corundum-structured alloys based on gallium oxide” Doctor thesis, Kyoto Univ. (2013)
 - 33) M. Oda and T. Hitora, “Growth of high quality α -Ga₂O₃ thin films on 4-Inch sapphire wafer” Materials Research Conference Fall Meeting 2013,
 - 34) M.Oda, A. Takatsuka, T. Hitora, J. Kikawa, K. Kaneko and S. Fujita, “ α -Ga₂O₃ Schottky barrier diodes fabricated by Mist Epitaxy technique” 46th International Conference on Solid State Device and Materials N-1-5
 - 35) M.Oda, J. Kikawa, A. Takatsuka, R. Tokuda, T. Sasaki, K. Kaneko and S. Fujita, and T. Hitora ,” Vertical Schottky Barrier Diodes of α -Ga₂O₃ Fabricated by MIST EPITAXY®” 73rd Device Research Conference P29
 - 36) M. Oda, R. Tokuda, H. Kambara, T. Tanikawa, T. Sasaki and T. Hitora, “Schottky barrier diodes of corundum-structured gallium oxide showing on-resistance of 0.1m Ω cm⁻² grown by MIST EPITAXY®”, Applied Physics Express, Vol.9, No.2, 021101(1-3) (2016).