

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25286050

研究課題名(和文) ミスト成長法による機能性単結晶酸化物薄膜の創成

研究課題名(英文) Evolution of functional single-crystalline oxide thin films by mist deposition

研究代表者

藤田 静雄 (Fujita, Shizuo)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20135536

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：「単結晶」酸化物半導体の薄膜および多層構造により、デバイス応用につながる新しい光・電子・磁気融合機能を創成することを目的とした。豊富な資源に支えられた元素を用い、成長に「ミストCVD法」を用いることにより、成長から廃棄までのプロセスで安全・安心・省エネルギーを達成し、地球環境に優しい半導体技術として寄与することを目指した。バンドギャップエンジニアリングと機能エンジニアリングにより、混晶化による新たな相互作用が発現し、コランダム構造酸化ガリウムを基盤とするワイドギャップ半導体系、室温以上のキュリー温度を持つ強磁性半導体など、今後の新しい原理に基づくデバイス応用につながる材料開発を実証した。

研究成果の概要(英文)：Our goal was to establish new photonic-electronic-magnetic multifunction for novel devices by "single-crystalline" oxide semiconductor films and heterostructures. With the use of abundant elements and "mist CVD", we aimed at environmental-friendly semiconductor technology from the growth to disposal. The band gap engineering and function engineering of alloys led new multifunctional materials such as corundum-structured gallium oxide-based wide band gap semiconductor system and ferromagnetic semiconductors with Curie temperature above room temperature, which are effective for next generation devices with novel physics.

研究分野：半導体結晶工学

キーワード：酸化物半導体 環境材料 結晶成長 省エネルギー 電子デバイス・機器 多機能デバイス

### 1. 研究開始当初の背景

新しい半導体材料の開発は、新しい機能を持つデバイスの実現を通じて私たちの社会に一層の豊かさをもたらしてくれる。窒化ガリウム(GaN)で青色発光の夢が実現したのはその一例で、さらなる新機能・多機能と環境への優しさを持ち合わせた半導体の開拓が求められている。「単結晶」の酸化膜半導体を用いたデバイスでは、SiやGaAsで実現されてきた各種デバイスに対し、以下のような特徴が期待される。

- (1) 多くの金属は酸素と化合して酸化物を作り、酸化物は多くのが安定である。
- (2) 酸化は容易に起こる反応で、不純物の影響を受けにくいいため、成長装置を簡素化できる。
- (3) 酸化物は、多様な光機能、電子機能、磁気機能を持つ。
- (4) 各種酸化物のバルク基板は、熔融法等を用いて成長が容易である。

つまり、「単結晶」の酸化物半導体は、新しい光・電子・磁気融合機能とともに、成長から廃棄までのプロセスにおける安全・安心・省エネルギーをもたらしてくれる。このことから、「単結晶」の酸化物半導体の研究開発が待望されているところであった。

### 2. 研究の目的

酸化物半導体の成長技術には、ミスト気相(CVD)成長法を用いることが本研究の大きな特徴の一つである。これにより、成長に係る安全性やコストの点で応用上の利点を高める。研究対象としては、酸化物半導体として従来の研究が結実しつつあるZnOや $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>以外の、新たな「単結晶」酸化物半導体を取りあげ、その未知の機能を開拓し、薄膜および多層構造により、デバイス応用につながる光・電子・磁気融合機能を発現させることを目的とした。従来から待望されている新規デバイスの実現を安全な成膜技術と豊富な元素に支えられた酸化物半導体で実現する結果につながると期待され、ここに先進的寄与をなすのが本研究の意義である。

### 3. 研究の方法

(1) 酸化物半導体は、酸素が不純物にならないことから、従来の結晶成長技術とは異なった考えで結晶成長を行うことが可能である。そこで本研究では、われわれが従来から研究に用いてきた「ミストCVD法」を用いて結晶成長を行うことにした。装置の概略を図1

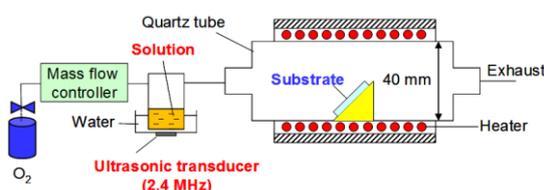


図1 ミストCVD装置の概略図。

に示す。ここでは、安全な原料の水またはアルコール溶液に超音波を印加してミスト化し、これをキャリアガスで反応部へ送り込むという手法を用いた。

(2) 本研究で対象とする材料として、従来の研究でわれわれが独自に開発してきたコランダム構造の酸化ガリウム( $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)を第一にとりあげることにした。その理由は以下のとおりである。

- ① Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>はバンドギャップが約5 eVと大きく、SiCやGaNより高耐圧のパワーデバイス応用が期待されている。 $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>はサファイア基板上に成長でき、応用上の利点が多い。
- ② 図2に $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を中心に各種コランダム構造の酸化物のバンドギャップとボンド長の関係を示す。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>混晶による「バンドギャップエンジニアリング」でデバイスに必要なヘテロ接合や多層構造を実現できる。
- ③ コランダム型酸化物には、図2に示す遷移金属酸化物も多数存在し、これらとの混晶で新しい機能の創成に向けた「機能エンジニアリング」が期待できる。

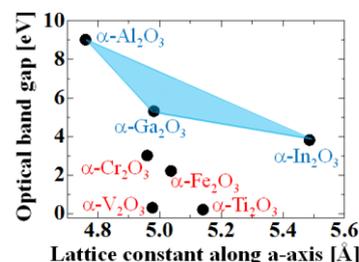


図2 各種コランダム構造酸化物。

### 4. 研究成果

(1) 図2に示したGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>混晶による「バンドギャップエンジニアリング」は、ヘテロ構造によるワイドギャップ半導体デバイスの創成につながる技術である。そこで、混晶の成長制御について検討した。図3は、 $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の上に各種Al組成を持つ $\alpha$ -(Al,Ga)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を100 nm成長した試料のX線(1129)回折の逆格子マッピングである。Al組成が増加するにつれ、コヒーレント成長、歪を内包した成長、格子緩和した成長、と一般的なヘテロ成長の傾向を示し、臨界膜厚も従来の理論で予測しうるものであった。また界面は導電帯に多くのオフセットを持つタイプI型を示し、ヘテロ接合デバイスとしての機能を持つことが示された。図4に、実験で得られた各種 $\alpha$ -(Al,Ga,In)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>混晶のバンドギャップとボンド長を示す。3.4 eVから7.8 eVのバンドギャップエンジニアリングを達成することができた。ただし $\alpha$ -(In,Ga)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>においては、中間組成でInGa<sub>2</sub>Nと類似の相分離が見られ、共通の物理として興味深い。こ

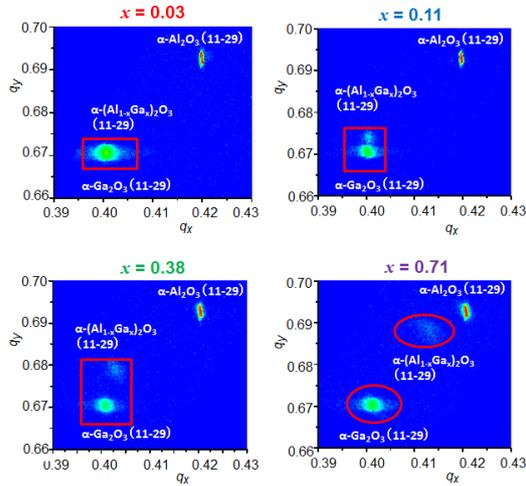


図3 サファイア基板上 $\alpha$ -(Al,Ga) $_2$ O $_3$  (100 nm)/ $\alpha$ -Ga $_2$ O $_3$  構造試料のX線(11 $\bar{2}$ 9)回折逆格子マッピング。

ここで、図中  $b$  で示した値はボウイングパラメータである。 $\alpha$ -(Al,Ga) $_2$ O $_3$  については、 $b$  は 0.1 eV と小さい値をとる一方で、 $\alpha$ -(In,Ga) $_2$ O $_3$  については、 $b$  は 1.1 eV と大きい。これも  $\alpha$ -(In,Ga) $_2$ O $_3$  において非混和性が大きいことに対応しているものと考えられる。

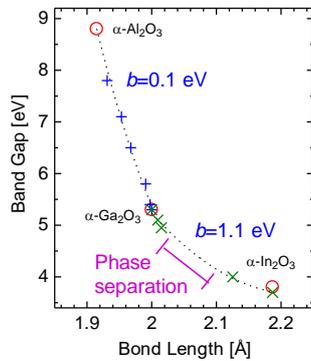


図4  $\alpha$ -(Al,Ga,In) $_2$ O $_3$  混晶のバンドギャップとボンド長の関係。

(2)  $\alpha$ -Ga $_2$ O $_3$  の機能を活かすために、ドーピングによる電気伝導度制御を行った。ドーパント元素として Sn を選択し、原料には SnCl $_2$  を用いて Ga 原料と同時に溶解させた。本研究の最初の時期において、n 型伝導を実現できたが、キャリア密度が  $10^{19}$  cm $^{-3}$  台と高いレベルでしか制御できず、移動度は最大でも 2.8 cm $^2$ /Vs と小さかった。この要因は、不純物の混入や結晶欠陥によるものと考えられ、これを除くために装置部材の改良、成長方法の改善、バッファ層の導入、等の対策を行った。その結果、図 5 に示すように n 型のキャリア密度として  $10^{17}$  cm $^{-3}$  台の制御可能となった。また移動度は最大 24 cm $^2$ /Vs と大きくなった。さらに  $10^{16}$  cm $^{-3}$  台の試料を得ることができたが、その制御が課題として残された。おそらくメモリー効果の影響が大きいと考えられ、成長装置の皆瀬改良が今後必要と考えられ

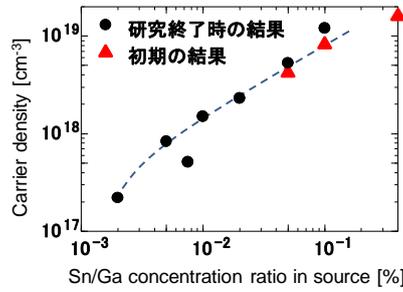


図5 Sn ドープ $\alpha$ -Ga $_2$ O $_3$  のキャリア(電子)密度とドーピング密度との関係。

る。また移動度については、結晶欠陥における粒界散乱に影響を受けていることがわかり、今後結晶欠陥の低減に向けた研究が必要である。

(3) 得られた酸化物半導体の機能がデバイス応用にかなうレベルであることを明確にすることが必要である。そこでまず $\alpha$ -Ga $_2$ O $_3$  を用いた MOSFET を試作した。その結果、ゲート電圧によるドレイン電流の変調を観測することができた。しかしながら、 $\alpha$ -Ga $_2$ O $_3$  のキャリア密度が  $10^{19}$  cm $^{-3}$  台と高かったため、ソース・ドレイン間の空乏層が十分に伸びず、電流のオフができなかった。その後前述のように  $10^{17}$  cm $^{-3}$  台に低減できたものの、バッファ層が必要なためやはりオフが困難であった。今後、高抵抗のバッファ層を利用してトランジスタを作製することで、デバイスとしての品質を評価してゆく予定である。一方で、 $\alpha$ -In $_2$ O $_3$  が 100 cm $^2$ /Vs 以上のキャリア移動度を示し、また  $10^{18}$  cm $^{-3}$  台のキャリア密度が得られたため、これを用いて MOSFET を試作し、単結晶成長技術としてのミスド CVD の位置づけを検討することにした。図 6 にドレイン特性を示す。このように飽和特性を持つ結果が得られ、オン/オフ比は  $10^5$ 、電界効果移動度は 187 cm $^2$ /Vs であった。このようにコラダム構造を持つ酸化物半導体で大きな電界効果移動度を持つ FET が得られた例は過去になく、この材料系がワイドギャップを活かしたパワーデバイス等電子デバイス応用につながることを示唆する結果である。

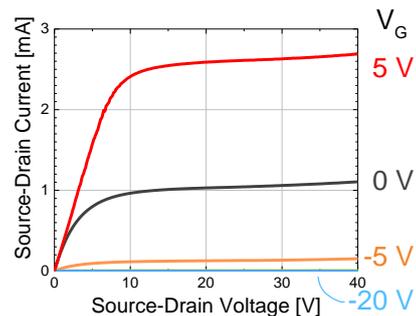


図6  $\alpha$ -In $_2$ O $_3$  MOSFET のドレイン特性。

(4) コランダム構造を持つ酸化物半導体と遷移金属酸化半導体とを混晶化させるという「機能エンジニアリング」により、磁気機能を併せもつ材料特性を得ることを目指した。 $\alpha\text{-In}_2\text{O}_3$ と $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の混晶である $\alpha\text{-(In,Fe)}_2\text{O}_3$ は、全組成領域において固溶であり、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の組成が50%を越えても $10^3\sim 10^4\ \Omega\text{cm}$ の抵抗率ではあるが導電性を示す。また抵抗率は高温で低下する半導体的な特性を示す。一方、図7の磁化特性に示すように、室温においても強磁性を示すことがわかった。すなわち、室温において磁性と半導体特性を併せ持つスピントロニクス新材料が創成できたといえる。強磁性を示すキュリー温度は、この試料の場合620 Kと極めて高いことが明らかになった。スピントロニクス材料としてさまざまなものが研究開発されているが、室温以上の温度で強磁性と半導体的特性とを併せ持つ材料として大きなインパクトにつながった。

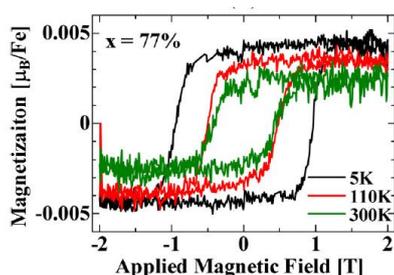


図7  $\alpha\text{-(In,Fe)}_2\text{O}_3$ の磁化特性。Fe組成77%のものを示す。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計10件)

- (1) Kentaro Kaneko, Itsuhiro Kakeya, Sachio Komori, Shizuo Fujita, "Band gap and function engineering for novel functional alloy semiconductors: Bloomed as magnetic properties at room temperature with  $\alpha\text{-(GaFe)}_2\text{O}_3$ ", Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.113, 2013, 233901(6pages). DOI: 10.1063/1.4807651
- (2) Sam-Dong Lee, Kazuaki Akaiwa, Shizuo Fujita, "Thermal stability of single crystalline alpha gallium oxide films on sapphire substrates", Physica Status Solidi (c), 査読有, Vol.10, 2013, pp.1592-1595. DOI: 10.1002/pssc.201300259
- (3) Kentaro Kaneko, Hiroshi Ito, Sam-Dong Lee, Shizuo Fujita, "Oriented growth of beta gallium oxide thin films on yttrium-stabilized zirconia substrates", Physica Status Solidi (c), 査読有, Vol.10, 2013, pp.1596-159. DOI: 10.1002/pssc.201300257
- (4) Shizuo Fujita, Kentaro Kaneko, Takumi Ikenoue, Toshiyuki Kawaharamura,

Mamoru Furuta, "Ultrasonic-assisted mist chemical vapor deposition of II-oxide and related oxide compounds", Physica Status Solidi (c), 査読有, Vol.11, 2014, pp.1225-1228.

DOI: 10.1002/pssc.201300655

- (5) Shizuo Fujita, Kentaro Kaneko, "Epitaxial growth of corundum-structured wide band gap III-oxide semiconductor thin films" Journal of Crystal Growth, 査読有, Vol.401, 2014, pp.588-592. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2014.02.032
  - (6) Norihiro Suzuki, Kentaro Kaneko, Shizuo Fujita, "Growth of corundum-structured  $(\text{In}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3$  alloy thin films on sapphire substrates with buffer layers", Journal of Crystal Growth, 査読有, Vol.401, 2014, pp.670-672. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2014.02.051
  - (7) Kentaro Kaneko, Yoshito Ito, Takayuki Uchida, Shizuo Fujita, "Growth and metal-oxide-semiconductor field-effect transistors of corundum-structured alpha indium oxide semiconductors", Applied Physics Express, 査読有, Vol.8, 2015, 095503(4 pages). DOI: 10.7567/APEX.8.095503
  - (8) Sam-Dong Lee, Yoshito Ito, Kentaro Kaneko, Shizuo Fujita, "Enhanced thermal stability of alpha gallium oxide films supported by aluminum doping", Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol.54, 2015, 030301(4 pages). DOI: 10.7567/JJAP.54.030301
  - (9) Kazuaki Akaiwa, Kentaro Kaneko, Shizuo Fujita, Ekaterina Chikoidze, Yves Dumont, "Room temperature ferromagnetism in conducting  $\alpha\text{-(In}_{1-x}\text{Fe}_x)_2\text{O}_3$  alloy films", Applied Physics Letters, 査読有, Vol.106, 2015, 062405(4 pages). DOI: 10.1063/1.4908050
  - (10) Kentaro Kaneko, Kenta Suzuki, Yoshito Ito, Shizuo Fujita, "Growth characteristics of corundum-structured  $\alpha\text{-(Al}_x\text{Ga}_{1-x})_2\text{O}_3/\alpha\text{-Ga}_2\text{O}_3$  heterostructures on sapphire substrates, Journal of Crystal Growth, 査読有, Vol.436, 2016, pp.150-154. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2015.12.013
- [学会発表] (計25件)
- (1) Kentaro Kaneko, Kazuaki Akaiwa, Sam-Dong Lee, Shizuo Fujita, "Band gap engineering and function engineering with corundum-structured gallium oxide-based compounds and alloys", 55th Electronic Materials Conference, 2013/6/26, South Bend, USA.
  - (2) Shizuo Fujita, "Epitaxial growth of wide

- band gap III-oxide semiconductor thin films (招待講演)", 17th Int. Conf. Crystal Growth and Epitaxy, 2013/8/13, Warsaw, Poland.
- (3) Norihiro Suzuki, Kentaro Kaneko, Shizuo Fujita, "Growth of corundum-structured  $\alpha$ -(In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alloy thin films on sapphire substrates with buffer layers", 17th Int. Conf. Crystal Growth and Epitaxy, 2013/8/11, Warsaw, Poland .
  - (4) Kazuaki Akaiwa, Yoshito Ito, Shizuo Fujita, "Growth and characterization of alpha-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films on sapphire substrates with alpha-(AlGa)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> buffer layer", 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, 2013/9/18, Kyoto.
  - (5) Kazuaki Akaiwa, Norihiro Suzuki, Kentaro Kaneko, Shizuo Fujita, "Doping and alloying to alpha-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films on sapphire substrates", 2013 JSAP-MRS Joint Symposia, 2013/9/20, Kyoto.
  - (6) Shizuo Fujita, Kentaro Kaneko, Shigetaka Katori, Toshiyuki Kawaharamura, Mamoru Furuta, "Ultrasonic-assisted mist deposition for green materials and devices", 45th Int. Conf. Solid State Devices and Materials, 2013/9/26, Fukuoka.
  - (7) Shizuo Fujita, Kazuaki Akaiwa, Norihiro Suzuki, Kentaro Kaneko, "Growth and properties of corundum-structured wide band gap  $\alpha$ -(Al,Ga,In)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> semiconductor alloys", 41st Int. Symp. Compound Semiconductors, 2014/5/13, Montpellier, France.
  - (8) Shizuo Fujita, Kazuaki Akaiwa, Norihiro Suzuki, Kentaro Kaneko, "Epitaxial growth of corundum-structured  $\alpha$ -(Al,Ga,In)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> semiconductor alloys on sapphire substrates (招待講演)", IUMRS - Int. Conf. Electronic Materials, 2014/6/13, Taipei, Taiwan.
  - (9) Shizuo Fujita, Norihiro Suzuki, Kazuaki Akaiwa, Kentaro Kaneko, "Growth and Properties of Corundum-Structured  $\alpha$ -(Al,Ga,In)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> semiconductor alloys on sapphire substrates", 46th Electronic Materials Conference, 2014/6/27, Santa Barbara, USA.
  - (10) Shizuo Fujita, "Mist deposition technology as a green route for thin film growth (招待講演)", 14th Int. Workshop Active- matrix Flatpanel Displays and Devices, 2014/7/3, Kyoto.
  - (11) Kentaro Kaneko, Shigenori Ueda, Shizuo Fujita, "Room temperature ferromagnetism in alpha-(Ga,Fe)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> semiconductor", 32nd Int. Conf. on the Physics of Semiconductors, 2014/8/14, Austin, USA.
  - (12) Masaya Oda, A. Takatsuka, Toshimi Hitora, J. Kikawa, Kentaro Kaneko, Shizuo Fujita, " $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Schottky barrier diodes fabricated by mist epitaxy technique", 46th Int. Conf. on Solid State Devices and Materials, 2014/9/9, Tsukuba
  - (13) Shizuo Fujita, "Growth, properties and devices of gallium-oxide-based widgap semiconductors (招待講演)", Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. Spring Meeting, 2015/3/19, Berlin, Germany.
  - (14) Shizuo Fujita, Sam-Dong Lee, Kazuaki Akaiwa, Yoshito Ito, Masashi Kitajima, Kentaro Kaneko, "Crystal stability and electrical defects in corundum-structured  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based semiconductor thin films (招待講演)", 2015 Materials Research Society Spring Meeting, 2015/4/9, San Francisco, USA.
  - (15) Shizuo Fujita, Yoshito Ito, Takayuki Uchida, Riena Jinno, Kentaro Kaneko, "Growth and properties of corundum-structured  $\alpha$ -(In,Ga)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> semiconductor alloys on sapphire substrates for electrical applications", 57th Electronic Materials Conference, 2015/6/24, Columbus, USA.
  - (16) Kentaro Kaneko, Yoshito Ito, Takayuki Uchida, Riena Jinno, Shizuo Fujita, "Issues on Corundum-Structured  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and  $\alpha$ -In<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOSFETs on sapphire substrates", 42nd Int. Symp. Compound Semiconductors, 2015/6/30, Santa Barbara, USA
  - (17) Kazuaki Akaiwa, Kentaro Kaneko, Shizuo Fujita, "Electrical property of Sn-doped corundum-structured Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films on sapphire substrates", 42nd Int. Symp. Compound Semiconductors, 2015/6/30, Santa Barbara, USA.
  - (18) Shizuo Fujita, Sam-Dong Lee, Kazuaki Akaiwa, Yoshito Ito, Kenta Suzuki, Kentaro Kaneko, "Green oxide devices with green growth technology (招待講演)", Workshop on Frontier Photonic and Electronic Materials and Devices --- 2015 German-Japanese-Spanish Joint Workshop ---, 2015/7/12, Kyoto.
  - (19) Shizuo Fujita, "Recent evolution of oxide semiconductors (招待講演)", 5th Int. Workshop Epitaxial Growth and Fundamental Properties of Semiconductor Nanostructures (SemiconNano), 2015/9/10, Hsinchu, Taiwan.
  - (20) Shizuo Fujita, Kazuaki Akaiwa, Sam-Dong Lee, Yoshito Ito, Kenta Suzuki, Ryota Takagi, Kentaro Kaneko, "Ultrasonic-assisted mist chemical vapor deposition for oxide and sulfide semiconductor thin films", 17th Int. Conf. II-VI Compounds and Related Materials, 2015/9/14, Paris, France
  - (21) E.Chikoidze, E.Shigematsu, G. Bouchez, Y. Chang, Y. Dumont Kazuaki Akaiwa, Kentaro Kaneko, Shizuo Fujita, H.J. von Bardeleben, J.L.Cantin, "Investigation of

the opto-electronic properties of Sn doped  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>", 1st Int. Workshop Gallium Oxide and Related Materials, 2015/11/4, Kyoto.

- (22) Kazuaki Akaiwa, Kentaro Kaneko, Shizuo Fujita, "Electrical properties of Sn-doped corundum-structured Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films on sapphire substrates", 1st Int. Workshop Gallium Oxide and Related Materials, 2015/11/4, Kyoto.
- (23) Masashi Uchida, Kazuaki Akaiwa, Sachio Komori, Itsuhiro Takeya, Kentaro Kaneko, Shizuo Fujita, "Electrical properties of Sn-doped  $\alpha$ -(In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> alloy thin films with room temperature ferromagnetism", 1st Int. Workshop Gallium Oxide and Related Materials, 2015/11/4, Kyoto.
- (24) Sam-Dong Lee, Shizuo Fujita, "Fabrication of conductive Sn-doped  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> films by mist chemical vapor deposition", 1st Int. Workshop Gallium Oxide and Related Materials, 2015/11/5, Kyoto, Japan.
- (25) Sam-Dong Lee, Shizuo Fujita, "Homo epitaxial growth of beta gallium oxide films by mist chemical vapor deposition", Materials Research Society Fall Meeting, 2015/12/3, Boston, USA.

[その他]

ホームページ等

<http://pesec.t.kyoto-u.ac.jp/ematerial/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

藤田 静雄 (SHIZUO FUJITA)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20135536

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

川原村 敏幸 (TOSHIYUKI KAWAHARAMURA)

高知工科大学・総合研究所・准教授

研究者番号：00512021