

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14378

研究課題名(和文) 応力誘起変態制御による新奇蛍石型強誘電体薄膜の単相化とドメイン形成のダイナミクス

研究課題名(英文) Elucidation of Phase Stability and Novel Fluorite Type Ferroelectric Phase Thin Films by Controlling Stress Induced Phase Transition

研究代表者

木口 賢紀 (Takanori, Kiguchi)

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：70311660

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：非鉛かつ非ペロブスカイト型構造の新奇強誘電体材料として注目されているHf<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.5</sub>O<sub>2</sub> (HZO) は、薄膜状態において広いHf/Zr組成域で空間群Pca21の直方晶の準安定相を形成しうるが、配向制御した試料を使った結晶構造や微細組織の研究が立ち遅れている。本研究では、基板による弾性的拘束に起因する自己弾性場を利用した固相エピタキシーにより、HZO薄膜のエピタキシャル成長に初めて成功し、薄膜中のナノ組織、直方晶相や共存する単斜晶相のドメイン構造を明らかにするとともに、固溶効果と弾性的拘束効果の二つの効果が直方晶相の相安定性向上に不可欠であることを見出した。

研究成果の概要(英文)：Recently, HfO<sub>2</sub>-based novel phase without spatial symmetry, which is interesting ferroelectric material as Pb-free and non-perovskite-type structure. Hf<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.5</sub>O<sub>2</sub> (HZO) thin films are one of the representative materials with the orthorhombic phase Pca21 in the wide compositional range. We have attempted and realized the epitaxial growth of HZO thin films with the orthorhombic phase Pca21 using solid-state epitaxy with ion-beam sputtering followed by rapid thermal annealing. We have also described the nanoscale morphology and the domain structure of orthorhombic (Pca21) and coexisting monoclinic (P21/c) phases in HZO thin films using the aberration-corrected scanning transmission electron microscopy. These results indicate that two effects, the solute and the elastic constraint effects, are necessary for the stabilization of the orthorhombic phase.

研究分野：無機材料物性、結晶工学、電子顕微鏡学

キーワード：蛍石型強誘電体 ハフニア ジルコニア 直方晶相 極性構造 相安定性 応力誘起変態 ドメイン構造

1. 研究開始当初の背景

ZrO<sub>2</sub>、HfO<sub>2</sub> 及び関連材料は、常圧下で高温側から立方相-正方相-単斜相と逐次相転移を起こす常誘電体である。近年、強誘電性を発現する HfO<sub>2</sub> 基超薄膜材料が発見され、非鉛かつ非ペロブスカイト型構造の新奇強誘電体材料として注目されている。この材料は c 軸方向の空間対称性が破れた斜方相 HfO<sub>2</sub> (空間群 Pca2<sub>1</sub>) を持つ。この HfO<sub>2</sub> ベースの強誘電性超薄膜は、膜厚が薄くなってもサイズ効果を示さない画期的な材料である。この事実は、電気双極子である自発分極の長距離相互作用がこの材料の極性発現の直接的な起源ではないことを示しており、ペロブスカイト型強誘電体とは異なる間接型強誘電体であることを示唆している。よって、斜方晶相の結晶構造の対称性が破れるような原子変位、弾性場によって相安定性を制御できうることを示している。ここに、本材料の面白さと革新的特徴がある。しかし、未だ斜方相の単相化や詳細な結晶構造等に関する知見は理解が進んでいないため、斜方相の相・結晶構造の安定性の基礎学理の究明が求められている。

一方、強誘電体・圧電体には、今世紀の大きな課題である電力消費や環境問題解決に向けて、振動発電に代表されるエネルギーハーベスティングや圧電体超薄膜と圧抵抗半導体を利用した低消費電力圧電トランジスタなど大きな役割が期待される。しかし、実用化されているペロブスカイト型強誘電体は、低い絶縁性やサイズ効果による極性の消失など超薄膜化には大きな困難を伴う。本研究で対象とする HfO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 固溶体薄膜ではこれらの問題を解決可能であることから、上記のデバイスに加えて、二次元ナノレイヤ強誘電体の創製によってこれまで実現困難とされてきた不揮発性と超低消費電力での高速動作性を兼ね備え、高密度化が可能な強誘電体トンネル (Ferroelectric Tunnel Junction; FTJ) メモリを実現することも可能となる。ZrO<sub>2</sub> や HfO<sub>2</sub> は既に High-k ゲート絶縁膜材料として超薄膜の形態で既に Si デバイスで実用化されているので、デバイス開発にとっても既存のシリコンプロセスとの親和性が高く応用の観点からも優位性を持つ材料であると言える。

2. 研究の目的

当該研究分野では、世界的に見ると半導体ゲート絶縁膜の分野を中心に主に多結晶無配向膜の電気特性評価の研究が主流であり、材料化学的な観点からの取り組みは極めて少ない。これらの研究に対し、我々は最先端の収差補正電子顕微鏡を活用し、HfO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 固溶体薄膜のエピタキシャル成長と回折実

験では評価が困難なドメイン構造、2相共存組織などの微細組織の局所構造解析を切り口にして研究を進め、自己弾性場を利用したイオンビームスパッタリング法による HfO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 固溶体薄膜の成膜を試み、固相エピタキシーにより直方晶相がエピタキシャル成長可能なこと、直方晶相のドメイン構造、結晶相制御、結晶性の向上、微細組織について検討した。

3. 研究の方法

Zr<sub>x</sub>Hf<sub>1-x</sub>O<sub>2</sub> (x=0.3-0.7) 薄膜は以下の手順で成膜した。Zr<sub>x</sub>Hf<sub>1-x</sub>O<sub>2</sub> (x=0.3-0.7) 組成となるように ZrO<sub>2</sub> 及び HfO<sub>2</sub> 粉末原料を混合し、ディスク状に成形した後 1200°C で焼成してスパッタリング用ターゲットを作製した。YSZ 基板、SiO<sub>2</sub> ガラス基板上にイオンビームスパッタリング法で Zr<sub>x</sub>Hf<sub>1-x</sub>O<sub>2</sub> (x=0.3-0.7) 薄膜を室温下で堆積した。赤外線ランプアニール炉中、酸素フロー条件で 700-1000°C でポストアニールを行い、熱応力や格子ミスマッチといった自己弾性場の下で Zr<sub>x</sub>Hf<sub>1-x</sub>O<sub>2</sub> (x=0.3-0.7) 超薄膜を結晶化した。高分解能 X 線回折 (XRD) 法により相同定と構造解析を行った。収差補正電子顕微鏡による high-angle annular dark field-scanning transmission electron microscopy (HAADF-STEM) 法を併用し、超薄膜の原子分解能観察を行った。直方晶相及び単斜晶相の方位や相同定はマルチスライス法による HAADF-STEM 像シミュレーションにより行った。薄膜の組成は、Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (STEM-EDS) 法で行った。

4. 研究成果

Fig. 1 に SiO<sub>2</sub> ガラス基板上に成膜・結晶化した HZO 薄膜の XRD プロファイルとシミュレーション

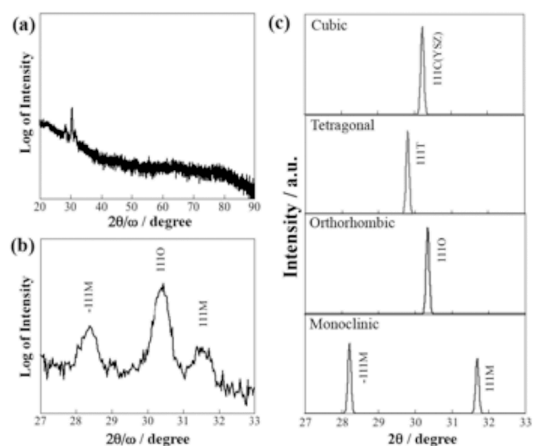


Figure 1 XRD 2θ/ω profile of an Hf<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.5</sub>O<sub>2</sub> thin film deposited on SiO<sub>2</sub> glass substrates followed by annealing at 1073 K, (b) enlarged profiles of (a) around 30 deg, and (c) simulated powder diffraction patterns.

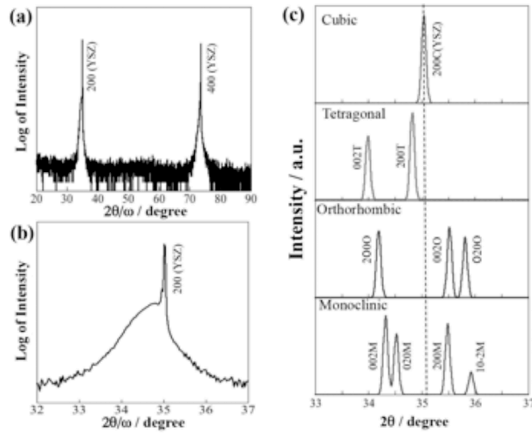


Figure 2 (a) XRD  $2\theta/\omega$  profile of an  $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$  thin film deposited on YSZ (100) substrates followed by annealed at 1073 K, (b) enlarged profiles of (a) around 35 deg, and (c) simulated powder diffraction patterns.

ヨンによる単斜晶相、直方晶相、正方晶相、立方晶相のプロファイルを示す。 $\text{SiO}_2$ ガラス基板では単斜晶相111, 11-1ピークに加え直方晶相の111ピークのみが確認されたことから、111の一軸配向膜であると考えられる。ガラス基板への結晶成長であることから、薄膜基板間の格子マッチングの影響は小さく、蛍石型構造の最稠密面である(111)面が優先的に成長したと理解できる。 $\text{ZrO}_2$ を同様の膜厚まで成膜を行うとほぼ単斜晶相が形成されることから、このHZO薄膜において不完全ながら直方晶相が得られたことは、Zr中へのHfの固溶の効果が考えられる。ただし、バルク結晶では $\text{HfO}_2$ は $\text{ZrO}_2$ の安定化剤になり得ないことから、いわゆる安定化剤とは異なり、薄膜化の際に現れる弱い効果であろうと推測され

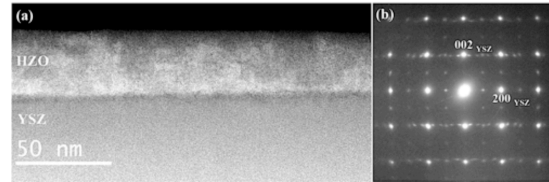


Figure 3 (a) HAADF-STEM image of  $\text{Hf}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_2$  thin film and (b) selected area electron diffraction pattern.

る。既往の研究では、 $\text{SiO}_2$ や $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等安定化剤ではない元素の固溶でも直方晶相が報告されており、 $\text{HfO}_2$ も同様の役割を果たしている者と考えられる。

次に、YSZ単結晶基板に成膜・結晶化したHZO薄膜のXRDプロファイルとシミュレーションによる単斜晶相、直方晶相、正方晶相、立方晶相のプロファイルを図. 2に示す。YSZ基板002, 004ピークの低角側のテールに重なる形で薄膜のブロードなピークが見られる。このピーク位置に相当するピークとしては、シミュレーションパターンの $2\theta = 34\text{--}35$  degに存在する単斜晶相002/020、直方晶相200、正方晶002の可能性が挙げられるが、XRDパターンのみではこれ以上の判別は困難である。そこで、Fig. 3に薄膜断面構造を観察したHAADF-STEM像と制限視野電子回折図形を示す。制限視野電子回折図形からYSZ基板に帰属されるスポットに加え、複数相のスポットが観察され、基板に対して特定の方位関係を示しCube-on-cubeライクなエピタキシャル成長している。HAADF-STEM像は10 nm程度の不均一なコントラストを示している。HAADF-STEM像は、一般に原子番号コントラストを強く反映するが、粒界、ドメイン構造、配向の乱れに起因

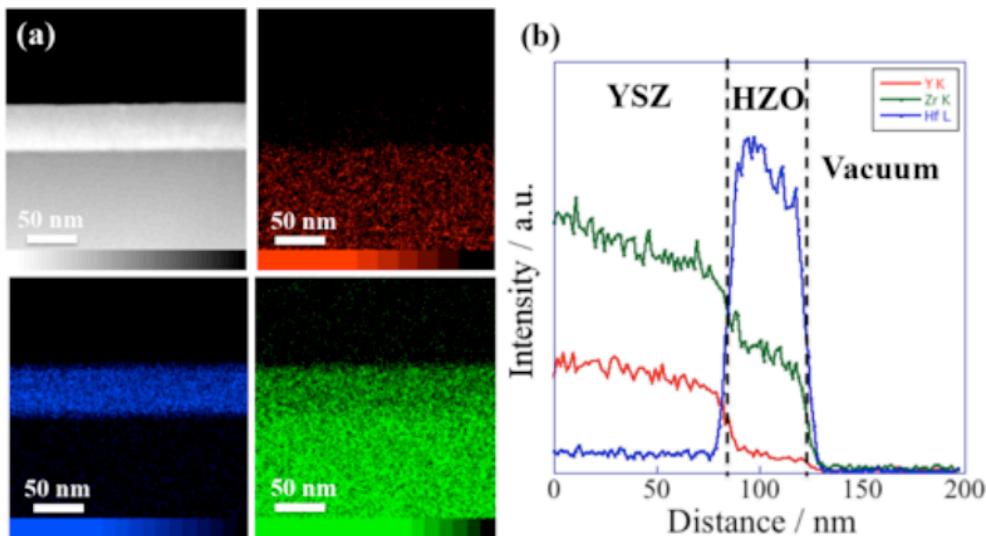


Figure 4 (a) STEM-EDS mapping, using the net intensity of Y-K, Zr-K, and Hf-L characteristic X-rays, with a HAADF-STEM image obtained simultaneously, and (b) the line profiles of Y-K, Zr-K, and Hf-L elemental maps, which were integrated along the in-plane direction.

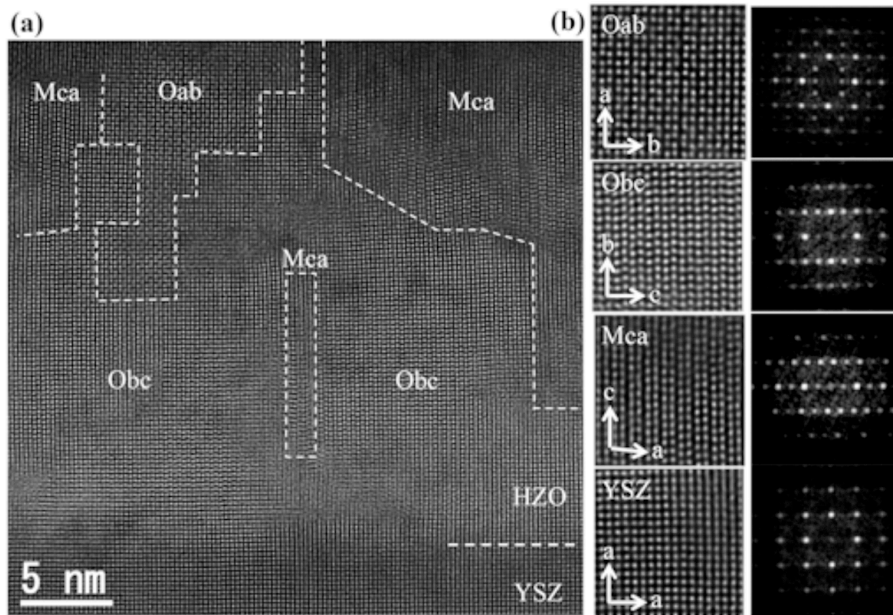


Figure 5 (a) an atomic-resolution HAADF-STEM image of thin film with (b) enlarged images of typical region in (a) for orthorhombic, monoclinic, and cubic phases (YSZ) with corresponding diffractograms. Here, the notation “Axy” signifies A (orthorhombic or monoclinic) phase with the orientation x-axis and y-axis in the out-of-plane and in-plane directions.

した回折コントラストも無視できない。そこで、Fig. 4に薄膜断面のSTEM-EDS観察結果を示す。HfとZrの元素マップからいずれの元素も均一に分布していることから、Fig. 3のHAADF-STEM像のコントラストは回折コントラストに起因すると判断できる。また、組成はHf:Zr=47:53 (at%)であり、スタンダードレスEDS定量分析では、ターゲット仕込み組成に50:50とよい一致を示しており、ほぼ1:1組成のHZO薄膜が成長していることを示している。

ここで、この回折コントラストの起源について考える。Fig. 5は、HZO薄膜の(a)原子分解能HAADF-STEM像と各ドメインに拡大像と対応した(b)拡大像とDiffractogramを示す。薄膜はPca21の直方晶相とP2<sub>1</sub>/cの単斜晶相の2相共存組織を形成し、いずれの相も数nm-10 nm程度のドメインに分かれていることが分かった。ここで、ドメインの配向を示すため、記号Axy (A:相 (M: 単斜晶相, O: 直方晶相)、x: 面外方向を向く結晶軸、y: 面内方向を向く結晶軸) を定義する。直方晶相のドメイン境界は(110)、(100)、(001)等の特定の結晶面に平行に入り、境界は原子レベルで急峻であることから、軸比に伴うドメイン境界の歪みは小さい。直方晶相の長軸であるa軸が約8°傾斜して単斜晶相の長軸であるc軸に変化することから、単斜晶相の核生成・成長には巨大な応力が発生する。その結果、単斜晶相のみならず、周囲の直方晶相も大きく変形し、結晶面の回転が起きている。その結果、エピタキシャル薄膜の結晶完全性の低下をもたらしたと考えられる。したがって、単斜晶相の抑制

により単相化や配向の完全性の向上のためにも重要となる。

本研究から、直方晶相の相安定化には基板界面の格子整合や熱応力による基板の拘束と異種元素の固溶の2つの効果が重要な役割を果たすと考えられる。この点は、ドーパントの固溶だけバルク状態でも相安定性向上が見込まれる正方晶相と異なる点であり、直方晶相の安定化にはドーパントと弾性的拘束の両者の寄与が不可欠であることが明らかになった。

直方晶相は、正方晶相から単斜晶相へのマルテンサイト変態の中間状態であることから、正方晶相から中間状態の直方晶相で相転移が停止し、単斜晶相への相転移をぎりぎりのところで抑制するようなドーピングが必要であると考えられる。いわゆるバルクのZrO<sub>2</sub>の安定化剤としては効果が不十分なドーパントイオンが相転移制御に有効であると推察される。現在、結晶化条件により直方晶相の配向完全性のさらなる向上が可能であることを見出し、条件を精査している。これら結晶化条件の最適化と安定化剤のドーピングによって単斜晶相の生成を完全に抑制できれば、直方晶相単相化の実現が可能となる。紙面の関係で省略するが、Zr/Hf組成比の異なる直方晶相エピタキシャル薄膜の作製や、XANS・EELSなどの吸収分光法によって局所的な配位構造、結合状態の特異性に基づいた直方晶相安定性の議論や添加元素が強誘電相安定化に及ぼす効果に関する系統的な研究を進めている。

以上のように、本研究では固相エピタキシーによるHZO薄膜のエピタキシャル成長を初めて実現し、添加元素と弾性的拘束の二つの効果が直方晶相形成に不可欠であることを明らかにした。エピタキシャル薄膜においては、既往の研究で重視されていた薄膜表面キャッピング効果は直方晶相安定化の本質ではなく、基板による弾性的拘束も同等の効果を示す。また、ナノサイズの直方晶相ドメイン構造を持つと同時に単斜晶相が共存すること、単斜晶の成長が直方晶相の結晶完全性を低下させることを初めて明らかにした。添加元素と弾性的拘束の二つの効果を最適化することによって、直方晶相の更なる安定性向上が期待でき、本研究はその方向性を示唆する先駆的な成果であると言える。本研究成果を進展させ、非鉛・非ペロブスカイト型の強誘電体超薄膜材料創製を実現できれば、サイズ効果や絶縁性の問題が無く、Siプロセスへの適合性を活かして、強誘電・圧電デバイスと半導体デバイスと融合させた新奇電子デバイスの創出への展開が期待される。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

1. T. Kiguchi, S. Nakamura, A. Akama, T. Shiraishi, T.J. Konno, *J. Ceram. Soc. Jpn.* **124**, 689-693 (2016) 査読有.
  2. 白石貴久, 木口賢紀, 今野豊彦「 $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 添加 HfO<sub>2</sub> 極薄膜の組織観察」, *まてりあ*, **55**, 599 (2016) 査読有.
  3. T. Shiraishi, K. Katayama, T. Yokouchi, T. Shimizu, T. Oikawa, O. Sakata, H. Uchida, Y. Imai, T. Kiguchi, T.J. Konno, and H. Funakubo, "Impact of mechanical stress on ferroelectricity in (Hf<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.5</sub>)O<sub>2</sub> thin films", *Appl. Phys. Lett.* **108**, 262904 (5 pages) (2016) 査読有.
  4. T. Shimizu, K. Katayama, T. Kiguchi, A. Akama, T.J. Konno, O. Sakata, and H. Funakubo, "The demonstration of significant ferroelectricity in epitaxial Y-doped HfO<sub>2</sub> film", *Sci. Rep.* **6**, 32931 (8 pages) (2016) 査読有.
  5. T. Mimura, K. Katayama, T. Shimizu, H. Uchida, T. Kiguchi, A. Akama, T. J. Konno, O. Sakata, and H. Funakubo, "Formation of (111) orientation-controlled ferroelectric orthorhombic HfO<sub>2</sub> thin films from solid phase via annealing", *Appl. Phys. Lett.* **109**, 052903 (4 pages) (2016) 査読有.
  6. T. Shiraishi, K. Katayama, T. Yokouchi, T. Shimizu, T. Oikawa, O. Sakata, H. Uchida, Y. Imai, T. Kiguchi, T.J. Konno, and H. Funakubo, "Effect of the film thickness on the crystal structure and ferroelectric properties of (Hf<sub>0.5</sub>Zr<sub>0.5</sub>)O<sub>2</sub> thin films deposited on various substrates", *Mater. Sci. Semicond. Process.* **70**, 239-245 (2017) 査読有.
- 〔学会発表〕(計 23 件)
1. 白石 貴久, Sujin Choi, 清水 荘雄, 木口賢紀, 舟窪 浩, 今野 豊彦, 「エピタキシャル CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> 薄膜の作製とその結晶構造評価」, 第 65 回 応用物理学会 春季学術講演会, 2018 年 3 月 17-20 日, 早稲田大学 (東京) .
  2. Sujin Choi, 白石 貴久, 木口賢紀, 今野豊彦, 清水 荘雄, 舟窪浩, 「ZrO<sub>2</sub> 薄膜の結晶構造に対するドーパント効果」, 日本セラミックス協会 2018 年年会, 2018 年 3 月 15-18 日, 東北大学 (仙台) .
  3. 三村 和仙, 清水 荘雄, 木口賢紀, 赤間章裕, 今野 豊彦, 勝矢 良雄, 坂田 修身, 舟窪 浩, 「エピタキシャル成長した HfO<sub>2</sub> 基強誘電体膜における結晶構造の膜厚依存性」, 日本セラミックス協会 2018 年年会, 2018 年 3 月 15-18 日, 東北大学 (仙台) .
  4. T. Shimizu, T. Mimura, T. Kiguchi, T. Shiraishi, A. Akama, T.J. Konno, O. Sakata, H. Funakubo, "Domain switching in epitaxial ferroelectric HfO<sub>2</sub> films", The American Ceramic Society 2018 Conference on Electronic and Advanced Materials (EAM 2018), Jan. 17-19, Florida, USA.
  5. Sujin Choi, 白石貴久, 木口賢紀, 今野豊彦, 「ZrO<sub>2</sub> 薄膜による結晶構造へのドーパント効果」, 第 134 回東北大学金属材料研究所講演会, 2017 年 11 月 29-30 日, 東北大学 (仙台) .
  6. 白石 貴久, Choi Sujin, 清水 荘雄, 舟窪 浩, 木口賢紀, 今野 豊彦, 「固相エピタキシー法による強誘電体 HfO<sub>2</sub> 基薄膜の作製」, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017 年 9 月 5-8 日, 福岡国際会議場 (福岡) .
  7. Sujin Choi, 白石 貴久, 木口賢紀, 清水 荘雄, 舟窪 浩, 今野 豊彦, 「ドーパント添加 ZrO<sub>2</sub> エピタキシャル薄膜の結晶構造と電気特性調査」, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017 年 9 月 5-8 日, 福岡国際会議場 (福岡) .
  8. 木口賢紀, 白石 貴久, Sujin Choi, 舟窪 浩, 今野 豊彦, 「HfO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> エピタキシャル薄膜における斜方晶相の安定性」, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017 年 9 月 5-8 日, 福岡国際会議場 (福岡) .
  9. Sujin Choi, 白石 貴久, 木口賢紀, 今野 豊彦, 「ZrO<sub>2</sub> 超薄膜の結晶構造に対するドーパント効果」, 日本顕微鏡学会第 73 回学術

講演会, 2017年5月30日-6月1日, 札幌国際会議場.

10. 白石 貴久, Sujin Choi, 木口 賢紀, 今野豊彦, 「強誘電体  $\text{HfO}_2$  基超薄膜のドメイン構造評価」, 日本顕微鏡学会第 73 回学術講演会, 2017年5月30日-6月1日, 札幌国際会議場.
11. 白石 貴久, Choi Sujin, 清水 荘雄, 舟窪浩, 木口 賢紀, 今野豊彦, 「エピタキシャル  $\text{Fe:HfO}_2$  薄膜の作製と特性評価」, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017年3月14-17日, パシフィコ横浜 (横浜).
12. 三村 和仙, 片山 きりは, 清水 荘雄, 木口 賢紀, 赤間 章裕, 今野 豊彦, 坂田 修身, 舟窪 浩, 「エピタキシャル  $\text{HfO}_2$  基膜における強誘電相の安定性  $-\text{RE}_2\text{O}_3\text{-HfO}_2$  vs  $\text{ZrO}_2\text{-HfO}_2$ 」, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 2017年3月14-17日, パシフィコ横浜 (横浜).
13. 清水 荘雄, 三村 和仙, 片山 きりは, 木口 賢紀, 赤間 章裕, 今野 豊彦, 坂田 修身, 舟窪 浩, 「電界印加による  $\text{YO}_{1.5}\text{-HfO}_2$  基薄膜の結晶構造変化」, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016年9月13-16日, 朱鷺メッセ (新潟市).
14. 三村 和仙, 清水 荘雄, 内田 寛, 木口 賢紀, 赤間 章裕, 今野 豊彦, 坂田 修身, 舟窪 浩, 「 $\text{HfO}_2$  基強誘電体の結晶構造と特性の熱処理温度依存性」, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 2016年9月13-16日, 朱鷺メッセ (新潟市).
15. 白石 貴久, Sujin Choi, 清水 荘雄, 舟窪浩, 木口 賢紀, 今野 豊彦, 「固相エピタキシャル成長法による Fe 添加  $\text{HfO}_2$  超薄膜の作製と結晶構造評価」, 第 29 回秋季シンポジウム, 2016年9月15-17日, 広島大学東広島キャンパス (東広島).
16. 崔 璉珍, 白石 貴久, 清水 荘雄, 舟窪浩, 木口 賢紀, 今野 豊彦, 「Fe 添加された  $\text{ZrO}_2$  超薄膜の結晶構造調査」, 第 29 回秋季シンポジウム, 2016年9月15-17日, 広島大学 東広島キャンパス (東広島).
17. 白石 貴久, Sujin Choi, 木口 賢紀, 今野豊彦, 「エピタキシャル蛍石型酸化物超薄膜の作製と結晶構造評価」, 誘電体・磁性体若手 夏の学校 2016年8月25-26日, 蔵王温泉 (山形).
18. T. Shimizu, K. Katayama, T. Kiguchi, A. Akama, T.J. Konno, O. Sakata, and H. Funakubo, "Preparation of fluorite-structured ferroelectric thin films and their characterization", 13th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF) and International Workshop on Relaxor Ferroelectrics 2016 (IWRF), Jun 19-23,

2016, Kunibiki Messe (Shimane).

19. T. Mimura, K. Katayama, T. Shimizu, H. Uchida, T. Kiguchi, A. Akama, T.J. Konno, O. Sakata, and H. Funakubo, "Growth of orientation-controlled ferroelectric  $\text{HfO}_2$  thin films by solid phase crystalization and their characterization", 13th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (RCBJSF) and International Workshop on Relaxor Ferroelectrics 2016 (IWRF), Jun 19-23, 2016, Kunibiki Messe (Shimane).
20. 木口 賢紀, 白石 貴久, 清水 荘雄, 舟窪浩, 今野豊彦, 「強誘電性斜方晶ハフニア薄膜における微細構造の STEM 観察」, 日本顕微鏡学会第 72 回学術講演会, 2016年6月14-16日, 仙台国際センター (仙台)
21. 白石 貴久, Sujin Choi, 木口 賢紀, 今野豊彦, 「Fe 添加した  $\text{HfO}_2$  超薄膜の結晶構造調査」, 日本顕微鏡学会第 72 回学術講演会, 2016年6月14-16日, 仙台国際センター (仙台)
22. T. Kiguchi, T. Shiraishi, A. Akama, T. Shimizu, H. Funakubo, T.J. Konno, "Fabrication and Structure Analysis of Orthorhombic Hafnium Oxide Thin films", Summit of Materials Science 2016 (SMS2016), May 16, 2016, Tohoku Univ. (Sendai).
23. S. Choi, T. Shiraishi, T. Kiguchi, T. J. Konno, "Fabrication and Characterization of Fe-doped  $\text{ZrO}_2$  Thin Films", Summit of Materials Science 2016 (SMS2016), May 16, 2016, Tohoku Univ. (Sendai).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

木口 賢紀 (Kiguchi, Takanori)  
東北大学・金属材料研究所・准教授  
研究者番号: 70311660

### (2)研究分担者

白石 貴久 (Takahisa Shiraishi)  
東北大学・金属材料研究所・助教  
研究者番号: 50758399