

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04595

研究課題名（和文）宇宙空間・廃炉現場での動作を可能とする超低損失パワーFETの創出

研究課題名（英文）Study of low-loss diamond power FET with operation in harsh environments

研究代表者

川江 健（Kawe, Takeshi）

金沢大学・電子情報通信学系・准教授

研究者番号：30401897

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ワイドギャップ半導体ダイヤモンドと強誘電体Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub>（PZT）ゲートから成る電界効果トランジスタ（FeFET）を形成し、その過酷環境動作に関する検証を実施した。予備検証としてワイドギャップ半導体ZnOをチャネルとしたFeFETに対する線照射を実施し、デバイス特性の主な劣化要因を調査した。次に、ダイヤモンドチャネルおよびPZTゲートに対する高強度線照射を実施し、最大ドーズ量15.4kGyにおいても特性劣化が生じない事を実証した。以上の結果より過酷環境動作に対するダイヤモンドFeFETの優位性が明らかとなり、当該構造を用いたパワーデバイス開発に資するものと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙空間・廃炉現場といった過酷環境下における電気エネルギーの有効活用に資する新しいパワーデバイスとして、強誘電体をゲートとした電界効果トランジスタ（FeFET）を提案し、その過酷環境動作を検証した。ダイヤモンドと無機強誘電体で構成するFeFETは、宇宙環境で想定される高強度線照射に対して、他材料系で構成されるデバイスと比して非常に優れた耐性を有している事を明らかにした。この結果は、全世界で精力的に進められている宇宙開発・産業育成に対し、本研究が明らかにした新たなデバイス構造に関する知見が学術的成果のみならず人類社会の発展に大きく貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we fabricated a field effect transistor (FeFET) consisting of a wide-gap semiconducting diamond and a ferroelectric Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> (PZT) gate structure, and investigated its operation in harsh environments.

As a preliminary verification, a FeFET structure with a wide-gap semiconductor ZnO as a channel was irradiated with  $\gamma$ -rays, and the main degradation factors of the device characteristics were investigated. Next, high-intensity  $\gamma$ -ray irradiation was performed on the selective grown diamond channel and PZT gate structure, and it was demonstrated that the characteristics did not deteriorate even at the maximum dose of 15.4 kGy.

The above results clarified the superiority of diamond FeFET for operation in harsh environments, and we believe that it will contribute to the development of power devices using this structure.

研究分野：電子デバイス

キーワード：ダイヤモンド 強誘電体 電界効果トランジスタ

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙探査・開発が国際的に活発化し、我が国でも宇宙探査事業への参入を促す宇宙機器産業の活性化が重要技術戦略の一つに掲げられている。宇宙空間で利用する電気機器には、唯一のエネルギー源である太陽電池が作る電気エネルギーを低損失に使用するパワーデバイスが不可欠である。さらに、宇宙デバイスは、放射線や熱線に晒される極めて過酷な環境下での安定動作も絶対条件となる。また、現在の我が国における重要課題である原発廃炉の現場においても、高強度の放射線下で作業用ロボットへの効率的な電力供給を可能とするパワーデバイスの導入が切望される。

優れた放射線耐性と高温動作が期待される次世代パワーデバイス材料としてダイヤモンドが挙げられるが、ダイヤモンドは不純物準位が深いという本質的な課題がある。これは、効率的なキャリア活性化が難しく、オン抵抗・導通損失の低減が容易ではないことを意味する。

上記課題の解決策として、巨大分極と放射線・高温耐性を有する強誘電体とダイヤモンド半導体を融合した、強誘電体ゲート電界効果トランジスタ (FeFET) の創出を提案する。強誘電体ゲートの電界効果でダイヤモンドチャンネルに高密度キャリアが誘起され、超低損失かつ過酷環境での動作を可能とするパワーFETが期待される。一方、個々の材料・デバイスに関する研究報告からの類推ではない、宇宙空間・廃炉現場を想定した過酷環境における FeFET デバイスの動作を実証し、動作限界に対する解決策を明らかにすることが求められる。

### 2. 研究の目的

本研究では、宇宙空間と廃炉現場での活用を指向した超低損失パワーデバイスとして FeFET を提案し、デバイス使用環境を想定した高強度ガンマ線照射耐性を検証する。同時に、過酷環境に晒される時間やストレス強度に対するデバイス動作限界について、その要因および解決策をデバイス工学・プロセス工学・材料科学の観点から明らかにすることを旨とする。

### 3. 研究の方法

ガンマ線照射に対する FeFET デバイスの特性劣化に関する予備検証として、バックゲート型 ZnO チャンネル FeFET を作製した。その際、強誘電体ゲートとする Pb(Zr,Ti)O<sub>3</sub> (PZT) 薄膜について、ガンマ線照射による変性・劣化の有無を検証する事を目的とし、2種の成膜法を用いて堆積した。1種目として Pt/SiO<sub>2</sub>/Si 基板上に Chemical Solution Deposition (CSD) 法を用いて、2種目として、SrRuO<sub>3</sub> 下部電極を形成した(100)SrTiO<sub>3</sub> 基板上に Pulsed Laser Deposition (PLD) 法を用いて PZT を堆積させた。これら2種の成膜法は本質的に「大気圧環境下で比較的マイルドに結晶化を促す (CSD)」と「減圧雰囲気下でエピ成長させる (PLD)」ものであり、形成した PZT ゲートの結晶性に対して意図的に差異を与える事を目的として選択した。その後、PLD 法を用いてチャンネル層としてアモルファス Al 添加 ZnO (Al-ZnO) を室温で堆積した。最後に、PLD 法を用いて Ni、Pt を堆積させ、ソース・ドレイン電極を作製した。また、各試料の同一基板上にゲート PZT の特性検証用に強誘電体キャパシタを形成した。

次に、高強度ガンマ線照射を行う試料として、Au/PZT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/p<sup>+</sup>ダイヤモンドの MFIS ゲートおよび p 型ダイヤモンドチャンネルの2種のデバイス構造を作製した。MFIS ゲート構造は、Au は真空蒸着法、PZT は CSD 法、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は ALD 法を用いて堆積した。なお、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層は ZnO を用いた予備検証で明らかにされた「ガンマ線照射時におけるチャンネル-強誘電体ゲート界面の元素拡散」を考慮し、緻密な界面バリア層として機能させる事を目的として、サーマル ALD 法を用いて形成した。p 型ダイヤモンドチャンネル構造は、p 型ダイヤモンド (B 濃度: 10<sup>17</sup>[cm<sup>-3</sup>]) 層を MPCVD 法を用いて、(111)ダイヤモンド基板上に堆積した。その後、p<sup>+</sup>ダイヤモンド層をオーミックコンタクト部として p 型ダイヤモンド (B 濃度: 10<sup>17</sup>[cm<sup>-3</sup>]) 上に選択ホモエピ成長させたソース・ドレイン2端子構造を作製した。

作製した試料に対し、QST 高崎量子応用研究所・コバルト第1棟および食品棟において、最大照射強度 3.84[kGy/h]の条件でガンマ線照射を行った。試料の評価として、ガンマ線照射前後における試料の XRD、P-V、I-V、C-V 特性をそれぞれ検証した。

### 4. 研究成果

#### 4.1.1 ガンマ線照射に対する ZnO-FeFET の特性変化

作製した試料はいずれも n チャンネル型 FeFET として明瞭な動作を示す事を確認した。また、同一基板上に作製した PZT キャパシタも良好な強誘電性を示した。図1に PLD および CSD を用いて PZT ゲートを作製した FeFET に対する照射強度 20[Gy/h]のガンマ線照射前後における I<sub>D</sub>-V<sub>D</sub> 特性を記す。両試料において、ガンマ線照射により I<sub>D</sub> の低下が確

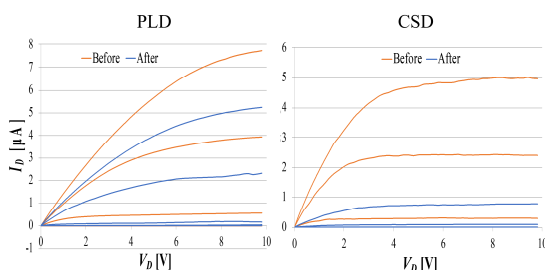


図1 ZnO FeFET 試料に対するガンマ線照射前後の I<sub>D</sub>-V<sub>D</sub> 特性の変化 (トータルドーズ量 20[Gy])

認められた。また、CSD でゲートを作製した試料に対し、より大きな  $I_D$  の低下が見られた事に関しては、CSD で堆積した PZT 薄膜に多く含まれるアモルファス成分がガンマ線照射によって Al-ZnO チャンネル側に熱拡散され、チャンネルのキャリア移動度が低下した事が要因の一つとして考えられる。これに対し、PLD は高エネルギー粒子を減圧雰囲気下で堆積させる手法である事から、作製された PZT 薄膜がより緻密かつアモルファス成分が相対的に僅かである事により、Al-ZnO チャンネルへの元素拡散が相対的に少なかったものと考えられる。

図 2 に同試料に対するガンマ線照射前後における  $I_D$ - $V_G$  特性を記す。ガンマ線照射前後における変化として、「飽和電流の低下」、「特性カーブの正バイアス側への  $V_{th}$  シフト」が確認された。飽和電流の減少に関して、その要因として(1)Al-ZnO チャンネルの劣化と(2)PZT ゲートの分極誘起能の低下が要因として挙げられる。また、 $V_{th}$  シフトに関して、オン/オフ電流が切り替わる閾値電圧 (= PZT の抗電圧) の顕著な増加は確認されなかった事から PZT 中の分極ドメイン反転に対するピンングセンタの増加は考えにくい。主な原因として、(1)に関連する Al-ZnO と PZT の界面に生じた界面準位が考えられる。一方、オフ電流の増加は両試料ともに生じておらず、PZT の絶縁性は保持されている事が分かる。

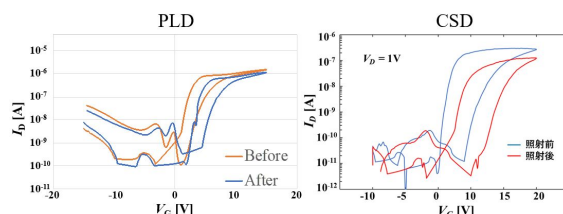


図 2 ZnO FeFET 試料に対するガンマ線照射前後の  $I_D$ - $V_G$  特性の変化 (トータルドーズ量 20[Gy])

#### 4.1.2 ガンマ線照射に対する各種 PZT 薄膜キャパシタの P-V 特性の変化

図 3 に同試料の PZT キャパシタに対するガンマ線照射前後における P-V 特性を記す。両試料に共通の振る舞いとして、絶縁性低下に伴う P-V 特性が丸みを帯びるといった変化、飽和分極値および残留分極値の低下といった PZT の分極誘起能の劣化は生じていない事が分かる。

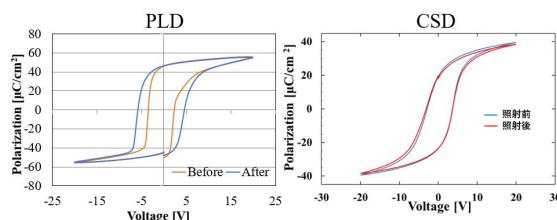


図 3 異なる成膜法で堆積した PZT 薄膜キャパシタの P-V 特性の変化 (トータルドーズ量 20[Gy])

一方、PLD で作製した試料についてのみ観測された振る舞いとして、抗電圧  $2V_c$  の増加が見られた。PLD 試料で観測された  $2V_c$  の増加の起源として挙げられる事項として、ガンマ線照射により PZT 中に酸素欠損などが形成され、それらが分極ドメイン反転に対するピンングセンタとなった事が示唆される。同様の振る舞いが CSD 試料で観測されなかった理由としては、CSD 試料はアモルファス成分を多く含む事から「仮にガンマ線照射による酸素欠損が生じて、周辺に存在する自由度の高いアモルファス成分が欠損成分を補填した」可能性が考えられる。

#### 4.2 ZnO FeFET を用いて確認された劣化事項の主因と対策

本実験で観測された結果をまとめると、トータルドーズ量 20[Gy]のガンマ線照射に対し、作製した Al-ZnO チャンネル FeFET における劣化現象として、(1)Al-ZnO チャンネルの導電性低下、(2)  $V_{th}$  シフトが確認された。一方、(1')Al-ZnO と Source/Drain 電極界面、(2')PZT ゲートの絶縁性・強誘電性に関する致命的な劣化は確認されなかった。以上の事より、Al-ZnO チャンネルと PZT 界面における元素拡散により、「Al-ZnO の移動度低下」、「界面準位の形成」がガンマ線照射に対する FeFET の主な劣化と考えられる。

確認された劣化現象を回避し、本研究課題で目標として挙げる「過酷環境で動作可能なパワー FeFET」を実現するには、チャンネル-強誘電体ゲート界面での元素拡散現象の抑制が早急に解決すべき課題である事が明らかになった。当該事象に対する解決策として、(A)界面部にバリア層を導入する、(B)予め熱履歴を与えるプロセスを実施するといった方法が挙げられる。(A)に関しては、ダイヤモンド ( $E_g = 5.47$ [eV]) と無機強誘電体 ( $E_g = 3-4$ [eV]) 間でのバンドオフセット確保を目的とした絶縁層導入により解決されると推察される。また、(B)については、ガンマ線照射による熱拡散が主な要因と考えられる事から、熱拡散する可能性がある自由度の高いアモルファス成分や C などの軽元素を予めフォーミング処理で固定化するプロセスが有効であるものとする。

#### 4.3.1 高強度ガンマ線照射に対するダイヤモンド MFIS 構造の各種特性の変化

図 4 に記す P-V 特性の測定結果より、作製した試料はいずれもリーク電流が低く、明瞭な強誘電性ヒステリシスループを示す事を確認した。また、観測された残留分極値は  $40-60$ [ $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ ] であり、PZT の物性値に対する顕著な劣化等は生じていない。一方、P-V 特性における抗電圧  $2V_c$  は約  $40$ [V]程度と大きく、飽和分極状態に要する印加電圧も  $60$ [V]超であった。これは、PZT に直列に導入された厚さ  $10$ [nm]の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  層の容量成分により PZT に対する実効的な印加電圧が減少した事に由来するものと考えられる。

図 5 に MFIS 構造に対するトータルドーズ量 15.4[kGy]のガンマ線照射前後における P-V 特性を記す。予備検証で実施した照射量の 700 倍超のガンマ線照射に対し、両試料においてガンマ線照射による顕著な特性劣化は確認されなかった。特に、PZT-ダイヤモンド界面における構成元素成分の熱拡散に由来する非対称特性も観測されなかった。この結果は、PZT-ダイヤモンド界面に導入した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層がバリア層として機能した事を強く示唆する結果と考える。また、リーク電流に関してガンマ線照射に伴うリーク電流の増加現象は一切確認されなかった。なお、ダイヤモンド基板上に形成した MFIS 構造に対し、トータルドーズ量 15.4[kGy]のガンマ線照射後に最大印加電圧を 100[V]まで変化させても、絶縁耐圧の低下は一切見られず、当該構造の優れたガンマ線照射耐性が確認された。

次に、ガンマ線照射に伴う各構成物質およびアモルファス成分の変質に由来する特性変化の有無に関する検証として、試料の C-V 特性を評価した。図 6 にガンマ線照射前後の試料の C-V 特性を示す。分極反転に伴うバタフライ構造の形状や抗電圧の値に大きな変化は生じていない事が分かる。一方、C-V 特性のゼロバイアス点における容量値から算出した MFIS 構造の誘電率に関して、基板面内に複数作製した試料構造の一部においてガンマ線照射に対して最大で約 20%の増減が見られた。この原因として、基礎特性に対する試料面内の顕著な不均一性は確認されていない事から、上述の構成物質・アモルファス成分の僅かな変質が考えられる。

一方、ガンマ線照射後試料の XRD 計測において、明らかな構成物質の変質は観測されなかった。また、本実験では各種電気特性の測定系としてニードルタイプのプローバシステムを用いており、複数回の測定に伴う上部電極の一部が削れた事による実効的な電極面積の変化も無視できない事から、より多くの試料に対する追加検証や XPS を用いた構成物質の結合状態などに関する詳細解析が必要であると考えられる。

#### 4.3.2 高強度ガンマ線照射に対する p-ダイヤモンドチャンネル構造の I-V 特性の変化

図 7 に p-ダイヤモンドチャンネル構造に対するトータルドーズ量 15.4[kGy]のガンマ線照射前後における I-V 特性を記す。同一基板上に形成した複数試料の測定結果に関して、ガンマ線照射前後において明確な電流値の減少は確認されなかった。また、線形プロットで記した同試料に対する測定結果より、ガンマ線照射に伴う線形性の消失も確認されなかった。以上の事より、ダイヤモンドチャンネルおよび p-/p+ホモエピ層界面の劣化現象（ショットキー障壁の形成など）は生じていないものと考えられる。この結果は、改めてダイヤモンド半導体の優れたガンマ線照射耐性を裏付けたものと言える。

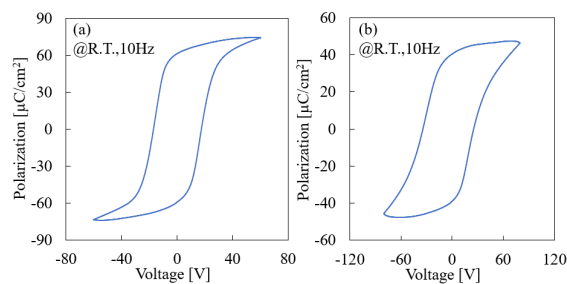


図 4 (a)Pt/Si 基板および(b)p<sup>+</sup>ダイヤモンド基板上に作製した MFIM 型キャパシタの P-V 特性

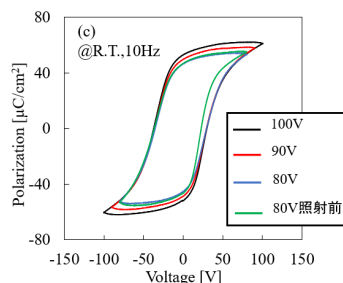
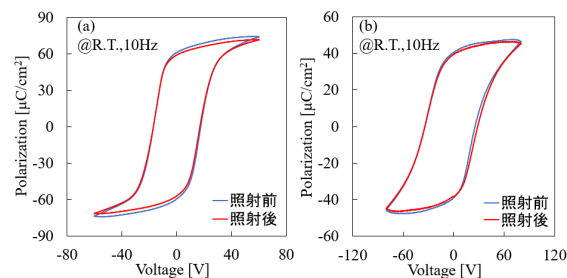


図 5 (a)Pt/Si 基板および(b),(c)p<sup>+</sup>ダイヤモンド基板上に作製した MFIM 型キャパシタに対するガンマ線照射前後の P-V 特性の変化 (トータルドーズ量 15.4[kGy])

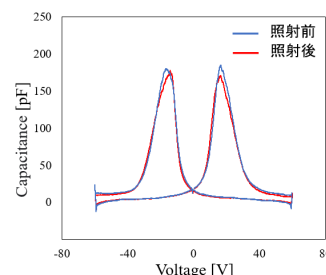


図 6 MFIM 型キャパシタに対するガンマ線照射前後の C-V 特性の変化 (トータルドーズ量 15.4[kGy])

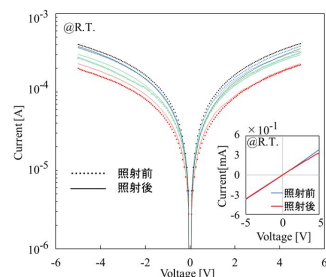


図 7 p-ダイヤモンドチャンネルに対するガンマ線照射前後の I-V 特性の変化 (トータルドーズ量 15.4[kGy])

#### 4.4 まとめ

本研究で実施遂行した検証結果をまとめると、トータルドーズ量 15.4[kGy]のガンマ線照射に対する MFIS ゲート構造における変質として、(1) PZT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> バイレイヤー構造の誘電率の変化 (最大約 20%) が試料の一部で確認された。一方、(2) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> バリア層と p<sup>+</sup>ダイヤモンド界面、(3) PZT ゲートの絶縁性・強誘電性、(4) p<sup>+</sup>ホモエピ層をコンタクトとした p<sup>-</sup>ダイヤモンドチャンネルに関する特性劣化は確認されなかった。

以上の事より、「PZT/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> バイレイヤー構造中の構成物質・アモルファス成分の変質」が现阶段におけるガンマ線照射に対する主なデバイス特性の劣化と考えられる。確認された変質現象に対する本質的な起源の解明には、XPS による結合状態の評価・検証が求められる。

また、ALD 法で堆積した Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> バリア層を MFIS ゲート構造に導入する事により優れた絶縁性と界面保護の効果が得られ、過酷環境で動作可能なパワー-FeFET の創出に関する懸念事項であったチャンネル-強誘電体ゲート界面での元素拡散現象に対する有用な解決策である事が明らかにされた。一方、形成した MFIS ゲート構造の分極反転に 60[V]超の動作電圧が必要であった。これは、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> バリア層の厚さが 10[nm]である事から、PZT-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 直列キャパシタ構造から見積もられる印加電圧に対する分圧比が PZT: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 1 : 3 に依るものと考えられる。より薄膜化しても Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層の絶縁性が維持される事を前提とすれば、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 層の厚さを 2[nm]とする事で分圧比は PZT: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 1 : 0.6 となり、分極反転動作に必要な最大印加電圧は 24[V]程度まで低減可能となる (FeFET デバイスを動作させる際は直流電圧駆動であり、約 15[V]程度相当と予想する)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Antoro Iwan Dwi, Kawae Takeshi	4. 巻 10
2. 論文標題 Selective Growth and Micropatterning Technique for Oxide Thin Films by Sacrificial a-CaO Layer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ECS Journal of Solid State Science and Technology	6. 最初と最後の頁 083005 ~ 083005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1149/2162-8777/ac1c9d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 高橋克弥、松本 翼、徳田規夫、川江 健
2. 発表標題 ダイヤモンド基板上へのPb(Zr,Ti)O <sub>3</sub> を用いたMFIS構造の作製
3. 学会等名 強制的秩序とその操作に関わる第15回 夏の学校
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高橋克弥、水戸守輝、山河智哉、松本 翼、徳田規夫、岡崎宏之、八巻徹也、川江 健
2. 発表標題 強誘電体キャパシタに対する高強度ガンマ線照射耐性の検証
3. 学会等名 第6回 有機・無機エレクトロニクスシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 芦原凜太郎、河原正美、川江 建
2. 発表標題 自己配向LaNiO <sub>3</sub> 薄膜上へのペロブスカイト酸化物多層膜の気相合成
3. 学会等名 第83回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 梶谷亮介、川江 建
2. 発表標題 BHF処理を施したSrTiO <sub>3</sub> 基板に対する水リフトオフプロセスの検討
3. 学会等名 第83回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 芦原凜太郎、河原正美、川江 建
2. 発表標題 自己配向LaNiO <sub>3</sub> 薄膜 を用いたペロブスカイト酸化物の気相合成
3. 学会等名 強制的秩序とその操作に関わる研究グループ 第13回 研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 芦原凜太郎、河原正美、岡崎宏之、山本春也、川江 健
2. 発表標題 CSD法によるLaNiO <sub>3</sub> 薄膜の自己配向成長と成膜条件の相関
3. 学会等名 第82回 応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takeshi Kawae
2. 発表標題 Inspection of pseudo normally-off operation of ferroelectric gate diamond FET
3. 学会等名 4th International Seminar on Metallurgy and Materials 2020 Invitation (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Iwan Dwi Antoro, and Takeshi Kawae
2. 発表標題 Selective growth and micropatterning technique for oxide thin films by sacrificial a-CaO layer
3. 学会等名 強的秩序とその操作に関わる研究会 第12回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 橋本 歩、玉村 達哉、川江 健
2. 発表標題 Sr3Al2O6を用いたペロブスカイト酸化物薄膜の異種基板上への転写プロセスの検討
3. 学会等名 強的秩序とその操作に関わる研究会 第12回講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 川江健	4. 発行年 2022年
2. 出版社 化学工業社	5. 総ページ数 7
3. 書名 月刊「化学工業」	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 酸化物膜のパターン形成方法	発明者 川江健、梶谷亮介、 後開拓也、大澤信	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-026832	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-



6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	岡崎 宏之  (Okazaki Hiroyuki)  (90637886)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・高崎量子応用 研究所 先端機能材料研究部・主任研究員     (82502)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関