

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02626

研究課題名（和文）高品質ハライド強誘電体薄膜を基盤とするシフト電流光電変換のデバイス実証

研究課題名（英文）Demonstration of shift current photovoltaic response in high-quality thin films of halide ferroelectrics

研究代表者

中村 優男（Nakamura, Masao）

国立研究開発法人理化学研究所・創発物性科学研究センター・上級研究員

研究者番号：50525780

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,400,000円

研究成果の概要（和文）：空間反転対称性の破れた物質では、シフト電流と呼ばれる量子位相に駆動される光電流が発生する。しかし、薄膜デバイス構造でのシフト電流の実証例はこれまで皆無であった。本研究では、大きな自発分極と可視光域で強い光吸収を持つハライドの強誘電半導体をターゲットとし、薄膜試料でのシフト電流による光電変換を実証した。まず、分子線エピタキシー法によって分極軸の揃ったハライド強誘電半導体の高品質薄膜の作製に成功した。この薄膜を光吸収層とする光電変換素子を作製し、可視光照射下での光起電力を測定した結果、シフト電流の発生を観測することに成功し、その電流の大きさがバルク試料の場合よりも数桁も増強されることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、エピタキシャル薄膜におけるシフト電流応答の実証を行った。トポロジカルな起源を持つシフト電流は、格子欠陥によるキャリアの散乱の影響を受けにくく、パルス光に対して非常に高速の応答性を示すことに加えて、バンドギャップを超える高い電圧出力が可能という特性を持つことから、革新的な光電変換素子の動作原理として期待されている。本研究の成果によって、シフト電流による光電変換の薄膜デバイス動作の研究が今後発展していくことが期待される。

研究成果の概要（英文）：Materials with broken inversion symmetry exhibit photocurrent driven by quantum-mechanical phase, called shift current. However, experimental demonstration of shift current in thin-film device structures has been lacking. In this study, we target halide ferroelectric semiconductors, which have large spontaneous polarization and strong optical absorption in the visible light range, and demonstrate photovoltaic conversion by shift current mechanism in thin film samples. We first prepared high-quality thin films of ferroelectric halide semiconductors with well-defined polarization axes by molecular beam epitaxy. Then, we successfully observed shift current response in the thin-film device structure. The observed current was found to be enhanced by several orders of magnitude compared to that in bulk samples.

研究分野：薄膜界面物性

キーワード：シフト電流 光電変換 ハライド 強誘電体 分子線エピタキシー

1. 研究開始当初の背景

強誘電体を含む空間反転対称性の破れた結晶構造を持つ物質は、p-n 接合のような界面構造なしに光起電力が得られることが知られており、この現象はバルク光起電力効果と呼ばれている。近年、バルク光起電力効果が、光学遷移に伴う電子波動関数の幾何学的位相(ベリー位相)の変化によって生じる「シフト電流」と呼ばれる光電流に起源を持つことが明らかになってきた。トポロジカルな起源を持つシフト電流は、不純物散乱などによるキャリアの局在化に対して極めて堅牢であることや、超高速の応答性やバンドギャップを超える高い電圧出力も可能であることから、光電変換素子の革新的な動作原理として期待されている。しかし、シフト電流に関するこれまでの研究は主にバルク結晶を用いて行われており、薄膜デバイス構造での動作評価はほとんど行われていなかった。応用を目指す上で、薄膜デバイス構造においてもシフト電流による高い光電変換特性が得られるのか、さらに薄膜デバイス構造にすることでバルク試料では得られない特性が発現しないのか、という点を解明する必要があった。

2. 研究の目的

上記の問いに答えるため、本研究では以下の2点を研究目的とした。

(1)シフト電流光電変換のデバイス実証に適したハライド強誘電体の高品質薄膜成長方法の確立

(2)高品質ハライド強誘電体薄膜を用いたデバイス構造でのシフト電流光電変換特性の検証、ヘテロ接合化による特性向上

研究対象にハライドを選んだ理由は、硫化ヨウ化アンチモン(SbSI)に代表されるように、大きな自発分極を持ちながら、可視光域に強い光吸収を持つ半導体が多彩に存在することと、ペロブスカイト型ハライドにおいて新しい極性半導体が相次いで開発されていたためである。

3. 研究の方法

ハライド薄膜の作製には分子線エピタキシー(MBE)法を用いた。MBE法はⅢ-Ⅴ族半導体の高品質薄膜作製では非常に多くの実績があるが、ハライドではほとんど前例がなかった。その理由は、ハロゲン元素の反応性が高く金属を激しく腐食させることと、蒸気圧が非常に高いためフラックスの安定した制御が困難であるためと考えられる。そこで本研究では、ハロゲン元素ではなくハライドの化合物を蒸着源に用いた。また、蒸気圧の高いハライド分子のフラックスを安定して供給するために、水銀や硫黄のように高蒸気圧の元素を含む半導体のMBE成長で用いられるバルブドセルを導入した。成膜条件の最適化に加え、薄膜と基板の格子整合を利用することで、配向の揃った結晶性の高い薄膜を作製を目指した。また、発生したシフト電流を外部回路に効率的に取り出すためには、電極の化学ポテンシャル位置を合わせることが重要であることがわかっている。そこで、電極にもハライドを用い、シフト電流の発生層と電極を全てエピタキシャル薄膜でつないだヘテロ接合を作製し、疑似太陽光源あるいは分光した光を用いてシフト電流光電変換特性を評価した。

4. 研究成果

(1)バルク試料を用いたシフト電流の欠陥耐性の実証

薄膜研究を始める前に、まずハライドのバルク試料を用いたシフト電流の特性評価を行った。量子力学的位相の変化に駆動されるシフト電流は、不純物による散乱やトラップによる局在化の影響を受けない電流であるとされる。しかし、この特性を実証した実験結果はこれまで報告されていなかった。そこで、代表的な強誘電半導体のSbSIを用いて、シフト電流の欠陥耐性の実証を行った。実験には、気相輸送法で成長したSbSIのバルク単結晶試料を用いた。試料合成時の条件をわずかに変えることで、試料の暗伝導度が数桁も変化することを見出した。この暗伝導度の温度依存性から、暗伝導がバリアブル・レンジ・ホッピングに従っており、合成条件によって伝導引き起こす局在準位の密度が大きく変化していることを明らかにした。

次に、欠陥密度の大きく異なる試料をいくつか選び、シフト電流の測定を行った。暗伝導度は試料や温度によって10桁近く変化したが、シフト電流はほぼ変化しないことがわかった。これは、シフト電流の高い欠陥耐性を明確に示す結果である。さらに光電流の励起スペクトルの測定も行った。試料に電場を印加して発生する通常の光電流の励起スペクトルは、バンド端近傍のエネルギーでピークを持ち、連続帯のエネルギー域ではスペクトル強度が顕著に減少する様子が観測された。この理由は、連続帯では光の吸収係数が大きく表面付近での光吸収が強くなる結果、発生する光電流が表面散乱や表面再結合の影響を強く受けるようになるため、光電流が減少すると解釈できる。一方、シフト電流の場合は、連続帯に入ってもスペクトル強度がほとんど減少しないことがわかった。この結果は、シフト電流が表面欠陥に対しても高い耐性を持っていることの明確な証拠である。(PNAS 117, 20411 (2020))

さらに、シフト電流による光電変換素子を設計するためには、等価回路による表現が必要となる。様々な光照射条件で発生するシフト電流を測定した結果、シフト電流の発生機構は電流源と抵抗の並列回路として表すことができ、電極界面でのショットキー障壁や電極間に光が照射さ

れていない部分があるとそれらは直列抵抗として働き、シフト電流を打ち消す還流電流を生じさせることを明らかにした。この結果は、デバイス設計や変換効率の向上を目指す上で重要な知見を与える結果である。(Appl. Phys. Lett. 116, 122902 (2020))

(2) MBE 法による SbSI の高品質薄膜作製

上記の実験で明確なシフト電流特性が観測された SbSI を、MBE 法によって薄膜化することに取り組んだ。蒸着源には SbI_3 と Sb_2S_3 を用い、両者を共蒸着することで SbSI 薄膜を得た ($\text{SbI}_3 + \text{Sb}_2\text{S}_3 \rightarrow 3\text{SbSI}$)。また、 SbI_3 は蒸気圧が極めて高く、通常の蒸発セルでは安定したフラックス制御が困難なため、 SbI_3 の蒸発にはバルブドセルを用いた。室温において Sb_2S_3 に対して SbI_3 のフラックスを 10 倍以上供給することで、薄膜中の S と I の比が 1:1 になり、狙い通りの組成の薄膜が得られることがわかった。さらに、薄膜成長後に Ar 雰囲気中で 150 °C でアニールすることで結晶化させた。X 線回折測定の結果、Pt/Si(001)基板上に作製した SbSI 薄膜において 002 回折ピークのみ明確に観測されたことから、分極軸である c 軸が面直方向に揃って成長していることがわかった。これは、SbSI における配向膜の作製に初めて成功した例である。さらに、作製した薄膜の強誘電特性をピエゾ応答力顕微鏡 (PFM) によって調べた結果、電場印加によって明確な分極反転が観測され、また電場で書き込んだ分極状態を保持できていることも確認した。以上から、本研究で確立した MBE 法による薄膜成長が、ハライド薄膜の高品質化に有効であることが明らかになった。(Appl. Phys. Lett. 116, 072902 (2020))

(3) SbSI をベースとする薄膜素子における光起電力の観測

上記の薄膜作製では、基板に Pt/Si(001)基板を用い、面直方向を c 軸に揃えることができたが、面内方向は配向が揃っておらずランダムであった。高い光起電力特性を得るためには、薄膜の面内配向を揃えて結晶性をさらに高める必要がある。そこで、市販で入手できる基板材料で SbSI と格子整合のとれる物質を探した結果、InAs の(110)面を用いると、SbSI の ab 軸と高次の格子整合が得られることがわかった。さらに、面直方向への起電力を測定するためには、SbSI と化学ポテンシャル位置が揃った電極が必要となる。そこで、InAs と格子整合がよく、SbSI と化学ポテンシャル位置の整合のとれ、可視光域に吸収のない CuI を電極材料に選んだ。CuI は代表的な p 型の透明半導体であり、最近是有機薄膜太陽電池やペロブスカイト太陽電池でも利用されている。

CuI/SbSI/CuI/InAs(110)接合構造を MBE 法で作製した。まず、InAs(110)基板上への CuI 薄膜の成長条件を最適化し、極めて結晶性の良いエピタキシャル CuI 薄膜の作製に成功した (Appl. Phys. Lett. 116, 192105 (2020), Appl. Phys. Lett. 118, 012103 (2021), Phys. Rev. B 106, 125307 (2022))。次に、この CuI 薄膜上へ SbSI 薄膜を作製した結果、SbSI 薄膜の面内格子が 2 つの配向方向に揃っていることがわかった。これは、Pt/Si(001)基板上の薄膜が面内で無配向であったことを考えると、大幅に結晶性が向上していることを示唆する。最後に SbSI 薄膜上に CuI 薄膜を再び堆積し、上部電極とした。それぞれの層の膜厚は、SbSI が 240 nm、CuI の上部下部電極はどちらも 20 nm 程度とした。X 線回折から、InAs(110)基板上に CuI/SbSI/CuI 薄膜が全てエピタキシャル成長していることを確認した。また PFM 測定によって SbSI 薄膜の強誘電特性も確認した。

上記の薄膜から 1mm の接合素子を作製し、可視光照射下での光起電力を測定した。その結果、ゼロバイアスで有限の光電流を観測した。光電流の大きさは 0.2 mA/cm^2 であった (3 W/cm^2 の光照射時)。デバイス構造は、上部下部電極が同じ CuI であることから、発生した光電流は p - n 接合に由来するドリフト拡散電流ではなく、シフト電流であると考えられる。また、観測された光電流の大きさはバルク試料と比べて 1000 倍以上大きかった。この結果は、バルク試料に対する薄膜素子の優位性を示している。一方で、解放端電圧は 0.1 mV と非常に小さな値しか得られなかった。この理由は薄膜の絶縁性が低いためだと考えられる。絶縁性が悪い原因としては、薄膜中の組成ずれや格子欠陥によるキャリアの存在が考えられる。今後は成膜条件をさらに最適化して絶縁性の高い薄膜を作製することで、光電変換効率が飛躍的に向上すると期待される。

(4) 二次元物質におけるシフト電流

近年、二次元物質においてもシフト電流の研究が盛んに報告されるようになってきているが、主にバルク試料から機械的に剥離した薄膜が用いられている。デバイス応用を目指す上で、エピタキシャル薄膜が必要である。そこで、代表的な二次元ハライド半導体である PbI_2 の薄膜作製に取り組んだ。 PbI_2 は積層構造によって対称性が異なり、4H 構造と呼ばれるポリタイプは反転対称性が破れた結晶構造を持つ。MBE 法による PbI_2 薄膜の成膜条件を最適化した結果、原子レベルで平坦な表面を持つ単結晶薄膜の作製に成功した。また、構造解析および光学スペクトル測定から、作製した薄膜が空間反転対称性の破れた 4H 構造であることを明らかにした。この結果は、今後のエピタキシャル薄膜による二次元物質のシフト電流研究につながる結果である。(Appl. Phys. Lett. 122, 073101 (2023))

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計18件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Nakamura Masao, Namba Ryuichi, Yasunami Takahiro, Ogawa Naoki, Tokura Yoshinori, Kawasaki Masashi	4. 巻 122
2. 論文標題 Crossover from strong to weak exciton confinement in thickness-controlled epitaxial PbI ₂ thin films	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 073101 ~ 073101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0138536	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 -

1. 著者名 Nakamura Masao, Inagaki Sotaro, Okamura Yoshihiro, Ogino Makiko, Takahashi Youtarou, Adachi Kiyohiro, Hashizume Daisuke, Tokura Yoshinori, Kawasaki Masashi	4. 巻 106
2. 論文標題 Band structures in orientation-controlled CuI thin films under epitaxial strain	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 125307-1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.125307	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Okamura Yoshihiro, Morimoto Takahiro, Ogawa Naoki, Kaneko Yoshio, Guo Guang-Yu, Nakamura Masao, Kawasaki Masashi, Nagaosa Naoto, Tokura Yoshinori, Takahashi Youtarou	4. 巻 119
2. 論文標題 Photovoltaic effect by soft phonon excitation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 e2122313119
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2122313119	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 -

1. 著者名 Inagaki S., Nakamura M., Okamura Y., Ogino M., Takahashi Y., Peng L. C., Yu X. Z., Tokura Y., Kawasaki M.	4. 巻 118
2. 論文標題 Heteroepitaxial growth of wide bandgap cuprous iodide films exhibiting clear free-exciton emission	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 012103 ~ 012103
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0036862	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 -

1. 著者名 Sotome M., Nakamura M., Morimoto T., Zhang Y., Guo G.-Y., Kawasaki M., Nagaosa N., Tokura Y., Ogawa N.	4. 巻 103
2. 論文標題 Terahertz emission spectroscopy of ultrafast exciton shift current in the noncentrosymmetric semiconductor CdS	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 L241111 ~ L241111
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.103.L241111	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

1. 著者名 Yasunami T., Nakamura M., Inagaki S., Toyoda S., Ogawa N., Tokura Y., Kawasaki M.	4. 巻 119
2. 論文標題 Molecular beam epitaxy of two-dimensional semiconductor BiI ₃ films exhibiting sharp exciton absorption	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 243101 ~ 243101
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0070762	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 -

1. 著者名 Nakamura M., Hatada H., Kaneko Y., Ogawa N., Sotome M., Tokura Y., Kawasaki M.	4. 巻 116
2. 論文標題 Non-local photocurrent in a ferroelectric semiconductor SbSI under local photoexcitation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 122902 ~ 122902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0001524	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 -

1. 著者名 Inagaki S., Nakamura M., Hatada H., Nishino R., Kagawa F., Tokura Y., Kawasaki M.	4. 巻 116
2. 論文標題 Growth of visible-light-responsive ferroelectric SbSI thin films by molecular beam epitaxy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 072902 ~ 072902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5142642	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 -

1. 著者名 Inagaki S., Nakamura M., Aizawa N., Peng L. C., Yu X. Z., Tokura Y., Kawasaki M.	4. 巻 116
2. 論文標題 Molecular beam epitaxy of high-quality CuI thin films on a low temperature grown buffer layer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 192105 ~ 192105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0007389	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 -

1. 著者名 Hatada Hiroki, Nakamura Masao, Sotome Masato, Kaneko Yoshio, Ogawa Naoki, Morimoto Takahiro, Tokura Yoshinori, Kawasaki Masashi	4. 巻 117
2. 論文標題 Defect tolerant zero-bias topological photocurrent in a ferroelectric semiconductor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 20411 ~ 20415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1073/pnas.2007002117	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Nakamura Masao, Kawasaki Masashi	4. 巻 30
2. 論文標題 Bulk Photovoltaic Effect: A Modern view and Possible Applications	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 AAPPS Bulletin	6. 最初と最後の頁 22 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.22661/AAPPSBL.2020.30.4.22	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 -

1. 著者名 中村 優男、五月女 真人、小川 直毅、川崎 雅司	4. 巻 90
2. 論文標題 空間反転対称性の破れた物質における量子力学的な光起電力「シフト電流」	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 応用物理	6. 最初と最後の頁 98 ~ 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11470/oubutsu.90.2_98	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 -

1. 著者名 小川 直毅、五月女 真人、中村 優男、森本 高裕	4. 巻 75
2. 論文標題 光起電力の新しい量子力学的描像「シフト電流」	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本物理学会誌	6. 最初と最後の頁 154 ~ 159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11316/butsuri.75.3_154	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 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 6件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 中村 優男、稲垣 宗太郎、岡村 嘉大、荻野 慎子、高橋 陽太郎、足立 精宏、橋爪 大輔、十倉 好紀、川崎 雅司
2. 発表標題 配向制御したCuI薄膜における 歪み誘起バンド構造変化
3. 学会等名 2022年 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 中村 優男、難波 隆一、安波 貴広、小川 直毅、十倉 好紀、川崎 雅司
2. 発表標題 膜厚制御されたPbI ₂ 薄膜における二次元励起子閉じ込め効果
3. 学会等名 2023年 第70回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安波 貴広、中村 優男、小川 直毅、十倉 好紀、川崎 雅司
2. 発表標題 MBE成長したCuI薄膜における金属的な低温伝導特性の観測
3. 学会等名 2023年 第70回応用物理学会 春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Masao Nakamura
2. 発表標題 Molecular beam epitaxy of single-crystalline iodide films toward the development of halide electronics
3. 学会等名 Annual Meeting and Status Seminar FOR2857 Fall School “Halogen Semiconductors” (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masao Nakamura
2. 発表標題 Shift current of topological origin in polar semiconductors
3. 学会等名 MRM2021 Materials Research Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村優男
2. 発表標題 量子力学的位相に駆動されるシフト電流の実験検証
3. 学会等名 東京工業大学 量子物理学・ナノサイエンス第329回セミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村優男
2. 発表標題 量子位相に駆動される低散逸で高速応答の シフト電流光電変換
3. 学会等名 分子研研究会 「エネルギー科学の最前線：階層横断的な理解に向けて」 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村優男
2. 発表標題 分子性結晶における非線形光電流応答
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会 「分子性結晶におけるトポロジカル物性の展開」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Nakamura, S. Inagaki, Y. Okamura, M. Ogino, Y. Takahashi, L. C. Peng, X. Z. Yu, Y. Tokura, and M. Kawasaki
2. 発表標題 Extremely sharp free exciton emission in heteroepitaxial cuprous iodide thin films grown by MBE
3. 学会等名 2021 Virtual MRS Spring Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 稲垣宗太郎, 中村優男, 岡村嘉大, 荻野慎子, 高橋陽太郎, Licong Peng, Xiuzhen Yu, 十倉好紀, 川崎雅司
2. 発表標題 ヘテロエピタキシャル成長したCuI 単結晶薄膜における自由励起子発光
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安波貴広, 中村優男, 稲垣宗太郎, 豊田新悟, 小川直毅, 十倉好紀, 川崎雅司
2. 発表標題 層状化合物BiI ₃ 薄膜のエピタキシャル成長と光学特性評価
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 Masao Nakamura
2. 発表標題 Nonlinear photocurrent generation in halide and organic polar semiconductors
3. 学会等名 CEMS Topical Online Meeting “Nonlinear electric and optical responses in quantum materials” (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 1. 稲垣宗太郎, 中村優男, 相澤直矢, Licong Peng, Xiuzhen Yu, 十倉好紀, 川崎雅司
2. 発表標題 分子線エビタキシー法による高品質ヨウ化銅薄膜の作製
3. 学会等名 2020年応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中村優男
2. 発表標題 大きな電子分極を持つ有機・ハライド強誘電体における低散逸で高速応答のシフト電流発生
3. 学会等名 第5回分子性固体オンラインセミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔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
---------	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------