

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B））

研究期間：2021～2023

課題番号：21KK0082

研究課題名（和文）分野間融合による高特性シンチレータ及び半導体結晶の創製

研究課題名（英文）Creation of high-performance scintillator and semi-conductor crystals by fusion of fields

研究代表者

横田 有為（Yuui, Yokota）

東北大学・金属材料研究所・准教授

研究者番号：60517671

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：高度化した融液成長技術を駆使することで、共晶点組成における自己組織化を利用した共晶体シンチレータ結晶、および高融点を有する酸化物シンチレータ結晶の材料開発を行い、新たな結晶材料を複数開発するとともに、それらの局所構造観察・組成分析・物性評価を行い、発光メカニズムを明らかにした。共晶体シンチレータ結晶に関しては、1 μ mを切る解像度のイメージングシステムにおけるライン撮像に成功し、高融点酸化物シンチレータでは、既存材料を大きく凌駕する9.7 g/cm³もの超高密度シンチレータ結晶を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

未探索領域であった高融点の酸化物材料のシンチレータとハロゲン化物シンチレータの共晶体結晶に関して材料探索および物性解明を行ったことで、既存材料を凌駕する高密度シンチレータを開発することができ、既存材料の代替によるPbフリー化やより効率的な高エネルギー放射線の計測が期待される。開発した共晶体ハロゲン化物シンチレータ結晶においても、その作製と評価を行い、空間分解能に優れた放射線検出器の実現に向けた材料開発を進めることができた。

研究成果の概要（英文）：By advanced melt-growth technologies, we have developed eutectic scintillator crystals using self-assembly at the eutectic composition and oxide scintillator single crystals with high melting points. Several new crystals could be developed by the material research. The mechanism of luminescence was elucidated. As for the eutectic scintillator crystals, we succeeded in line imaging in an imaging system with a resolution of less than 1 μ m. In the oxide scintillator single crystals with high melting point, we developed the scintillator single crystal with ultra high density of 9.7 g/cm³, which is far superior to existing materials.

研究分野：無機材料学

キーワード：シンチレータ 単結晶 共晶体 高融点

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

放射線を光に変換可能なシンチレータ単結晶を用いた放射線検出器は、サーベイメータやガンマカメラによる環境放射線測定、陽電子断層撮像(PET)等による医療応用、宇宙物理などその応用は多岐に渡っている。しかし、既存のシンチレータは、TOF-PET や陽電子寿命測定法等の次世代検出器で要求される「高発光量」「高エネルギー分解能」「高速寿命」「高密度」「高有効原子番号」「バックグラウンドに影響する内在放射線を含まない」を満たさず、新たな高特性単結晶材料の開発が期待されている。

新規高特性シンチレータ単結晶材料の開発では、世界的に塩化物・臭化物・ヨウ化物のハロゲン化物シンチレータ材料が大きな注目を集めてきた。ハロゲン化物材料は、酸化物やフッ化物に比べて小さなバンド幅を有しており、それに起因した高い発光量と優れたエネルギー分解能を示すことが知られている。しかし、ハロゲン化物材料の多くが高い吸湿性を有することから、世界的にも高品質の単結晶が作製可能な技術を有する機関に限られており、大規模な材料探索が行われてこなかった。そのような中、代表者らは独自の H- μ -PD 法による材料探索と Eu:SrI₂ 単結晶を搭載したデバイス開発等を行い、世界的に存在感を示してきた。

また、代表者は共晶体構造を利用した機能性材料の開発も行ってきた。共晶体構造材料とは、2~3 種類の化合物が同時に析出する共晶点において、融液から一方向凝固することで自己組織化の結果得られる構造材料である。共晶点組成の制御により、マトリックス相中にロッド状の相を有する構造を融液から直接バルク体として製造でき、さらに育成速度の制御によりロッド相のサイズ制御が可能である。これまで 2 相が複雑に絡み合った高強度材料やロッド状のシンチレータ相が均一分散した光導波型シンチレータが開発されてきたが、共晶体構造を利用した半導体材料開発や共晶体構造をナノレベル化した例はなく、半導体材料のナノワイヤーが均一分散したナノ構造材料がバルク体として得られる可能性がある。

既存シンチレータの多くが融点 2100°C以下となっているが、既存結晶成長法において融点が約 2450°Cの Ir 坩堝を用いているからである。一方、代表者は近年 Mo(融点:2623°C)、W(3422°C)が結晶育成用の坩堝として利用可能であり、Ir 坩堝では不可能であった高融点の材料系の単結晶育成が可能であることを明らかにした。

2. 研究の目的

上記の背景を踏まえて、本研究では、高い機能性を有しているにも関わらず、高い吸湿性のためにこれまでに詳細な材料開発・物性解明が行われてこなかったハロゲン化物結晶材料および、従来技術では育成できなかった高融点酸化物材料を開発対象とする。当該材料系において、国際的に最先端のデータ科学・結晶科学、光物性、放射線物理の異分野を横断した研究開発を実施することによって、次世代の放射線を利用した医療機器や環境測定機器に要求される新規シンチレータや半導体の材料開発・検出器応用を行う。

3. 研究の方法

3.1 高融点シンチレータ単結晶の開発

新規高融点酸化物シンチレータ結晶の開発を行うために、代表者が確立した高融点酸化物単結晶の育成技術を用いた。従来の坩堝材である Ir よりも高温での使用が可能な W 製の μ -PD 法用坩堝を設計・作製するとともに、育成環境中に酸素を放出しないように脱酸素化したジルコニア断熱材(脱酸素断熱材)を準備した。断熱材の脱酸素化は、カーボン炉を用いて 2000°C、12 時間、Ar 雰囲気の下で行った。育成する高融点材料として、従来の Ir 坩堝を用いた μ -PD 法では育成不可能であった 2283°Cの融点を有する La₂Zr₂O₇ (LZO) および 2418°Cの融点を有する La₂Hf₂O₇ (LHO) これまで単結晶化が全く試みられてこなかった Lu₃TaO₇ (LTO) を選定した。さらに、LHO の希土類を全置換した Gd₂Hf₂O₇ (GHO) や、各材料系の希土類サイトに発光中心として 0.5~1%の希土類イオンである Ce, Eu, Tb, Tm, Er を添加した単結晶の育成も試みた。

3.2 共晶体ハロゲン化物シンチレータ結晶の開発

次に、共晶体ハロゲン化物シンチレータ結晶の育成を行った。共晶体結晶の作製には、正確な共晶点組成が分かる状態図が必要であるが、ハロゲン化物の擬二元系状態図は、酸化物やフッ化物に比べて報告例が非常に少ない。そこで、まずはアルカリ土類金属ヨウ化物 AEI₂ と希土類ヨウ化物 REI₃ の共晶体シンチレータ結晶を作製することを目標として、AEI₂-REI₃ 擬二元系状態図を作製し、共晶点組成を明らかにすることを目的とした。アルカリ土類金属ヨウ化物 AEI₂ と希土類ヨウ化物 REI₃ のどちらも高い吸湿性を有するため、吸湿性に対応した評価機器によって状態図の作製を行った。その結果得られた状態図から、作製可能な共晶体構造を予想し、共晶点においてナノ構造化共晶体シンチレータ結晶を作製した。結晶作製には、高周波加熱型の垂直ブリッジマン(VB)炉を用い、共晶点で混合した原料を石英管に真空封入して育成を行った。

4. 研究成果

4. 1 高融点シンチレータ単結晶の開発

W 坩堝とカーボン炉で市販のジルコニア断熱材を脱酸素化した脱酸素断熱材を用いて、無添加の LZO 単結晶の育成を実施した。脱酸素断熱材を用いることで、市販の断熱材で発生していた結晶育成中の酸素を抑制することが可能となった。この脱酸素処理した断熱材を用いて Ar 雰囲気下で W 坩堝による LZO 結晶育成を試みたところ、安定した固液界面形状を維持しながら、結晶育成を行うことができた。得られた結晶の表面には、光沢を有する金属粒子は確認されなかった。そこで、粉末 X 線回折 (XRD) 測定による育成結晶の相分析を行った結果、W 由来の回折ピークは確認されず、LZO の単相であることが明らかとなった。結晶内研磨面の SEM 観察においても、W 粒子は確認されず、育成中における W の混入を抑制することに成功した。

育成した LZO 結晶は黒色を示しており不透明であったが、この黒色は酸素が欠損している影響であると考えた。そのため、育成結晶を 1200°C、12 時間大気アニール処理した(図 1)。通常断熱材の還元雰囲気下で育成した結晶は、大気アニール後は白色の粉末へと変化した。これは、大気アニールによって結晶内の W 金属が酸化タングステンとなり、結晶が粉々に砕けてしまったためと考えられる。一方、脱酸素断熱材の Ar 雰囲気下で育成した結晶は、大気アニールは無色透明な結晶へと変化した。透過スペクトルからは、大気アニール後の結晶は、400 nm 以上の波長域において 70% 以上の透過率を示すことが明らかとなった。

次に、より高い融点を有する LHO についても単結晶育成を試みた。LZO の場合と同様、W 坩堝、脱酸素断熱材を用いた Ar 雰囲気下での結晶育成によって、安定して単結晶育成を行うことができ、図 2 に示すような透明な単結晶を得ることができた。背面反射ラウエ像および X 線ロッキングカーブの結果から、得られた結晶は高い結晶性を有する単結晶であることが分かった。

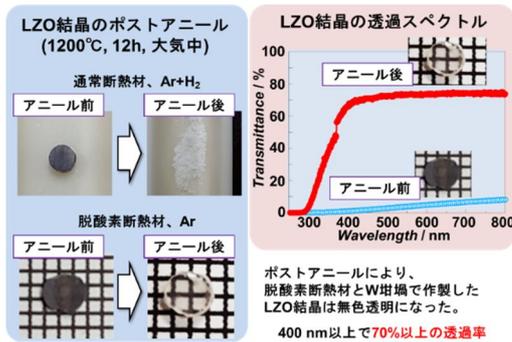


図 1. LZO 結晶のアニール効果と透過率。

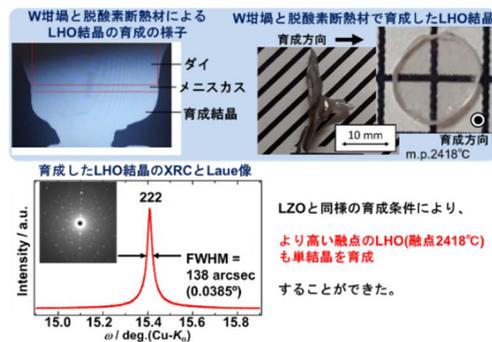


図 2. LHO 単結晶の育成と結晶性評価。

さらに発光中心として Eu や Er を添加した LZO や LHO の単結晶も同様に育成することに成功し、発光中心を添加した単結晶も同様の結晶成長条件で育成できることが分かった。さらに、LHO における希土類サイトの Lu を Gd に全置換した、より高い融点(2440°C)を有する Gd₂Hf₂O₇ (GHO) の作製を試みた。得られた GHO 結晶は、育成前半部分は高い透過性を示したものの、後半部分は透過性がなくなり、W の混入が結晶成長中に発生したことが示唆された。これは、LHO よりも高い温度での結晶育成となったことで、育成前半は脱酸素断熱材による還元効果が働いていたものの、育成途中で断熱材の脱酸素効果がなくなり、断熱材からの酸素の発生が生じてしまったために W 坩堝の安定性が低下したことが予想される。

次に、LZO や LHO 等のパイロクロア系以外でさらに高い密度を有する Lu₃TaO₇ (LTO) に着目し、その結晶育成を試みた。LHO 結晶の育成と同様の育成セットアップを用い、LTO 結晶の育成を行ったところ、安定した固液界面の制御を行うことができ、最終的にファイバー状の無添加 LTO 結晶を得ることができた。得られた結晶は透過性を有さない黒色を示していたが、これは結晶育成中に酸素欠損が生じた影響であると考え、育成後のアニール処理(空气中、1200°C、12 時間)を行った。その結果、無色透明な結晶となり、as-grown 結晶の黒色は酸素欠損の影響であることが明らかとなった。得られた LTO 単結晶は、従来のシンチレータを凌駕する 9.7 g/cm³ もの高密度を有していることが明らかとなり、当該結晶は高いエネルギー用の新たなシンチレータ結晶として大きく期待ができる。当該材料系は高密度シンチレータ材料としての特許出願に繋がった。Ce、Tm、Tb をそれぞれ添加した LTO や Ta サイトに Nb を置換した Lu₃(Ta,Nb)O₇ 単結晶も同様に育成に成功しており、Lu サイトへの希土類イオンの添加や Ta サイトの Nb 置換が可能であることも確認できた。

作製した LZO、LHO 単結晶の結晶構造の評価を行う

表 1 リートベルト解析による LZO、LHO の結晶構造解析結果

	La ₂ Zr ₂ O ₇	La ₂ Hf ₂ O ₇
結晶系	立方晶系	立方晶系
空間群	Fd-3m	Fd-3m
格子定数	10.7984 Å	10.7847 Å
R _{exp}	5.51	5.75
R _{wp}	8.45	8.43
S (R _{wp} /R _{exp})	1.53	1.47
La-O平均結合長さ	2.5671 Å	2.4263 Å
Distortion index	0.045	0.019

ために、XRD パターンを用いてリートベルト解析を行った。表 1 にリートベルト解析の結果を示したが、B サイトが Zr から Hf へと変わることによって格子定数はわずかに小さくなることがわかった。これは、Hf のイオン半径が Zr のイオン半径よりもわずかに小さいことに起因する。発光中心が存在する La サイトの結晶場の強さや対称性の変化について評価すると、結晶場の強さを表す La-O 間の平均結合長さは LZO で 2.5671 Å、LHO で 2.4263 Å と LHO のほうが平均結合長さは短いため、結晶場の強さは大きいと考えられる。また、サイトの対称性を以下の式で示される Distortion index を用いて評価した結果、LZO のほうが La サイトの対称性が悪いことがわかった。

育成した各単結晶を厚さ 1 mm で両面研磨を行った後に光学特性を評価した。どちらの結晶も吸収がない波長領域で 70% と高い透過率を有していることが明らかになった。さらに、LZO は約 300 nm、LHO は約 250 nm にバンド端吸収が確認された。これより、Zr から Hf へと母材の組成を変えることでバンドギャップエネルギーが大きくなることが明らかになった。Eu³⁺ を添加した Eu:LZO および Eu:LHO 単結晶の発光特性を評価するためにフォトルミネッセンス(PL)スペクトル測定を行った(図 11)。⁵D₀ から ⁷F₁ への磁気双極子遷移による発光が 600 nm 近傍に見られ、また ⁵D₀ から ⁷F₂ への電気双極子遷移による発光が 610 nm 近傍に見られた。Judd-Ofelt 理論から、Eu³⁺ の 4f 軌道間の電気双極子遷移は禁制遷移であるが、結晶場の対称性が崩れることで一部許容化されることがわかっており、発光特性から結晶場の対称性を評価するために電気双極子遷移と磁気双極子遷移の発光強度を比較した。LZO および LHO の(⁵D₀ - ⁷F₂)/(⁵D₀ - ⁷F₁)は、それぞれ 0.62 および 0.55 であり、LZO のほうが Eu³⁺ が存在する La サイトの対称性が悪いことがわかった。この結果は結晶構造解析から評価した La サイトの対称性の結果とも一致した。

図 3 には Er:LHO 結晶の PL 測定の結果を示した。図 4(左)に示した可視領域での発光スペクトルからは、Er³⁺ イオンに起因する発光ピークが 550 nm 近傍で複数確認された。これらは、Er³⁺ イオンの ⁴S_{3/2}-⁴I_{15/2} および ²H_{9/2}-⁴I_{13/2} の遷移に起因する発光であると思われる。さらに、大阪大学レーザー研究所の協力によって、赤外領域における発光スペクトルの取得が可能となり、図 12 右のような結果が得られた。赤外領域では、1000 および 1500 nm 近傍に発光ピークが確認でき、それぞれ Er³⁺ イオンの ⁴I_{11/2}-⁴I_{15/2} および ⁴I_{13/2}-⁴I_{15/2} の遷移に起因することが分かった。

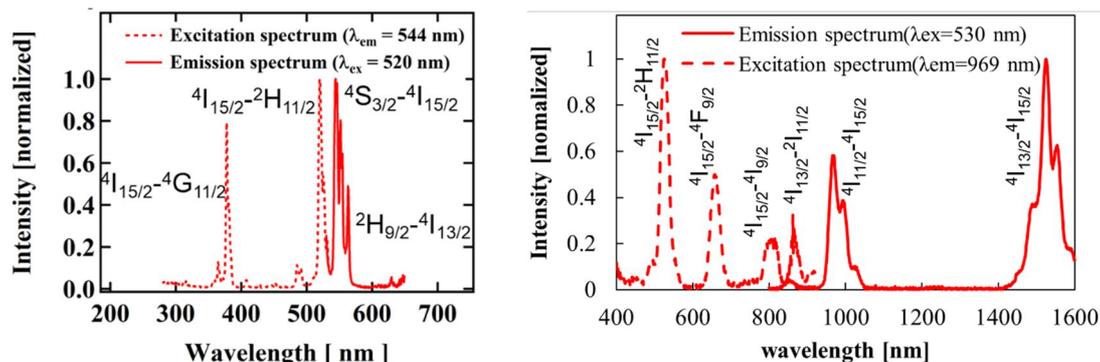


図 3 Er:LHO 結晶の PL スペクトル。(左)可視領域、(右)赤外領域。

無添加および Ce 添加 LTO 結晶の PL 測定の結果から、無添加および Ce 添加の両方の試料において、350 nm 近傍にブロードな発光ピークが確認できており、ホスト(LTO)からの発光が確認された。一方で、Ce³⁺ イオン由来のピークは確認できなかったが、これは LTO のバンドギャップが比較的小さく、Ce³⁺ の 5d、4f 準位とうまくマッチングしなかったことが原因であると考えられる。一方で、Tm 添加および Tb 添加した LTO 結晶では、無添加では見られなかった発光ピークが X 線ラジオリミネッセンススペクトルにおいて 400 nm 近傍で確認された。この結果から、シンチレータ結晶として発光中心として添加した元素からの発光を利用することが可能であることを示した。

4.2 共晶体ハロゲン化物シンチレータ結晶の開発

様々な組成比で溶融凝固した BaI₂/CeI₃ および BaI₂/GdI₃ の粉末 XRD パターンから、どちらの試料に関しても全ての組成比において、出発原料に由来する回折ピークのみが確認され、新たな相の生成は生じないことが分かった。次に、BaI₂/CeI₃ および BaI₂/GdI₃ の混合粉末試料の DSC 曲線から、BaI₂/CeI₃ においては、両端組成の BaI₂ および CeI₃ は、融点における吸熱ピークのみが確認されたのに対して、BaI₂/CeI₃ の混合試料では、2 つの吸熱ピークが現れ、60%BaI₂/40%CeI₃

近傍で2つのピークが重なることが分かった。一方で、 BaI_2/GdI_3 においては、 BaI_2/CeI_3 の際に確認された吸熱ピークに加えて、 GdI_3 の構造相転移に起因すると考えられる吸熱ピーク(約 760)が合わせて確認された。 BaI_2/GdI_3 においてピークが重なった組成は、70% $BaI_2/30\%CeI_3$ 近傍であった。XRD 測定による相転移点の結果を合わせることで、擬二元系状態図を作製した。 BaI_2-CeI_3 擬二元系状態図では、62.5% $BaI_2/37.5\%CeI_3$ において、555 の共晶点を有する状態図となった。一方、 BaI_2-GdI_3 擬二元系状態図では、70% $BaI_2/30\%GdI_3$ において BaI_2 と GdI_3 の共晶点(587)が存在することが分かった。

そこで、これらの状態図において、実際にどのような共晶体構造が自己組織化によって形成されるかを明らかにするため、それぞれの共晶点組成において、H- μ -PD 法による一方凝固によって結晶作製した試料の組織観察を行った。得られた SEM 像では、実際に2相分離した共晶体構造が確認され、これらの材料系において共晶体構造を有する結晶が作製できることを明らかにした。

同様の手法で、 $AE = Ba, Sr, Ca$ および $RE = Ce, Gd, Y, Lu$ の組み合わせ全てにおいて、その状態図を作製し、得られた共晶点組成および共晶点温度を明らかにした。全ての組み合わせにおいて、両端の元素(AEI_2 と REI_3)による共晶点を1つ有する状態図となった。得られた共晶点組成において、H- μ -PD 法による一方凝固によって結晶作製した試料の組織観察を行った結果、 $AE = Ba$ と $RE = Gd, Y, Lu$ の組み合わせが、ロッド相(REI_3)とマトリックス相(AEI_2)の2相分離構造を示し、他の組み合わせにおいてはラメラ型の2相分離構造を示した。

AEI_2-REI_3 擬二元系状態図における共晶点組成(共晶点における AEI_2 濃度)と共晶点温度を RE もしくは AE のイオン半径に従ってプロットした結果、 AE を固定して RE のイオン半径依存性を見た場合、 RE のイオン半径が減少するにしたがって、系統的に共晶点における AEI_2 濃度と共晶点温度が低下することが明らかとなった。これは、 RE のイオン半径が REI_3 の化学ポテンシャルに大きく影響した結果、共晶点が系統的にシフトしたことを示唆している。一方で、 AE のイオン半径依存性では、系統的变化が見られず、 AEI_2 の結晶構造が大きく変化していることが、状態図に影響している可能性がある。

得られたロッド相とマトリックス相になる組み合わせの中で、 BaI_2/LuI_3 の共晶体シンチレータ作製を試みた(図4)。図4に示すように、 BaI_2-LuI_3 擬二元系状態図では、共晶点は77.5% $BaI_2/22.5\%LuI_3$ であり、その組成において Ce を添加した Ce 添加 77.5% $BaI_2/22.5\%LuI_3$ 共晶体シンチレータ結晶を H- μ -PD 法による一方凝固によって作製した。その結果、目的とするロッド相とマトリックス相で構成される2相分離構造が得られ、しかも結晶は光導波している(結晶の下の線が浮き上がる)ことが分かった。

Ce 添加 77.5% $BaI_2/22.5\%LuI_3$ 共晶体シンチレータ結晶の X 線ラジオリミネッセンスと線励起下での蛍光寿命測定結果を図20に示した。X 線ラジオリミネッセンススペクトルにおいては、470 と 520 nm の2つの発光ピークが重なったブロードな発光ピークが見られた。また、線励起下の蛍光寿命曲線から、31 ns の蛍光寿命であることが分かった。この結果により、Ce 添加 LuI_3/BaI_2 共晶体シンチレータ結晶の発光は、 LuI_3 ロッド相を置換した Ce^{3+} イオンの 5d-4f 遷移に起因することが分かった。

4.3 X線イメージングシステムの構築

構築したサブミクロン評価が可能な X 線イメージングシステムを用いて、共晶体シンチレータ結晶の空間分解能評価を行った。新規共晶体シンチレータ結晶の試料を X 線イメージングシステムに組み込み、X 線を照射、透過像を取得した。さらにマイクロフォーカス X 線を照射した共晶体シンチレータ結晶の X 線透過像から 2.0 ~ 8.0 LP/mm の全ての画像でラインを分離して撮像することに成功した。

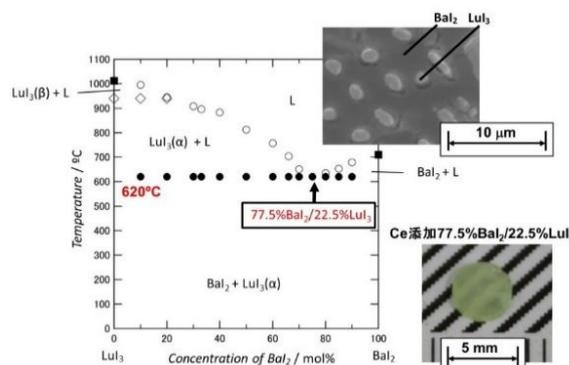


図4. BaI_2-LuI_3 擬二元系状態図と共晶点組成で作製した Ce 添加 77.5% $BaI_2/22.5\%LuI_3$ 共晶体シンチレータ結晶。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Horiai Takahiko, Pejchal Jan, Paterek Juraj, Kucerkova Romana, Yokota Yuui, Yoshikawa Akira, Nikl Martin	4. 巻 61
2. 論文標題 Crystal growth and optical properties of Ce-doped (Y, Lu)AlO ₃ single crystal	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 072002 ~ 072002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac7271	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 Hayashi Naomoto, Yokota Yuui, Horiai Takahiko, Yamanoi Kohei, Yoshino Masao, Yamaji Akihiro, Murakami Rikito, Hanada Takashi, Sato Hiroki, Ohashi Yuji, Kurosawa Shunsuke, Kamada Kei, Sarukura Nobuhiko, Yoshikawa Akira	4. 巻 63
2. 論文標題 Crystal growth, luminescence, and scintillation properties of Er-doped La ₂ Hf ₂ O ₇ single crystal	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 03SP15 ~ 03SP15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ad1e97	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7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yuui Yokota, Takahiko Horiai, Naomoto Hayashi, Masao Yoshino, Akira Yoshikawa
2. 発表標題 Growth of La ₂ Zr ₂ O ₇ and La ₂ Hf ₂ O ₇ Single Crystals with High Melting Point by Novel Growth Method and their Luminescent Properties
3. 学会等名 The 6th International Conference on the Physics of Optical Materials and Devices (ICOM2022)（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横田有為, 堀合毅彦, 林直志, 吉川彰
2. 発表標題 2200 を超える高融点酸化物の単結晶育成技術開発
3. 学会等名 第16回日本フラックス成長研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横田有為, 須田貴裕, 堀合毅彦, 吉野将生, 吉川彰
2. 発表標題 W坩堝を用いたマイクロ引き下げ法による高融点酸化物単結晶の結晶作製技術開発
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takahiko Horiai, Christo Gugushev, Yuui Yokota, Masao Yoshino, Jan Pejchal, Akira Yoshikawa
2. 発表標題 Crystal Growth of Ce-doped (Gd,Y)ScO ₃ Scintillators by Micro-Pulling-Down Method and Their Optical Properties
3. 学会等名 The 6th International Conference on the Physics of Optical Materials and Devices (ICOM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林直志, 横田有為, 堀合毅彦, 山ノ井航平, 吉野将生, 山路晃広, 村上力輝斗, 花田貴, 佐藤浩樹, 豊田智史, 大橋雄二, 黒澤 俊介, 鎌田圭, 猿倉信彦, 吉川彰
2. 発表標題 Er添加La ₂ Hf ₂ O ₇ の結晶育成と光学特性
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 堀合毅彦, Gugushev Christo, Ganschow Steffen, 吉野将生, 横田有為, 吉川彰
2. 発表標題 Ce添加(Gd,Y)ScO ₃ の単結晶育成および光学特性
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 Naomoto Hayashi, Yuui Yokota, Takahiko Hori, c, Masao Yoshino, Akihiro Yamaji, Rikito Murakami, Takashi Hanada, Hiroki Sato, Satoshi Toyoda, Yuji Ohashi, Shunsuke Kurosawa, Kei Kamada, Akira Yoshikawa
2. 発表標題 Crystal growth and optical properties of Er-doped La2Hf2O7 by micro-pulling-down method
3. 学会等名 The 6th International Conference on the Physics of Optical Materials and Devices (ICOM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 日本フラックス成長研究会、吉川 彰、横田 有為、我田 元	4. 発行年 2021年
2. 出版社 日刊工業新聞社	5. 総ページ数 216
3. 書名 液相からの結晶成長入門 - 育成技術と評価方法 -	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 結晶材料、シンチレータ、および放射線検出器	発明者 横田有為、須田貴裕、堀合毅彦、吉野将生、鎌田圭、吉川	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-092879	出願年 2022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	豊田 智史 (Toyoda Satoshi) (20529656)	東北大学・未来科学技術共同研究センター・准教授 (11301)	
研究分担者	吉野 将生 (Yoshino Masao) (30789938)	東北大学・金属材料研究所・助教 (11301)	

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			
チェコ	IP of CAS			
ドイツ	IKZ			