

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23750234

研究課題名(和文) マイクロ引き下げ法による形状制御ランガサイト型圧電結晶育成技術の開発

研究課題名(英文) Development of Crystal Growth Technology of Shaped Langasite-type Piezoelectric Crystals by Micro-Pulling-Down Method

研究代表者

横田 有為 (Yuui, Yokota)

東北大学・未来科学技術共同研究センター・准教授

研究者番号：60517671

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：自動車の燃焼圧センサ用圧電結晶に用いられるランガサイト型圧電結晶は、高い特性のために次世代の高温用圧電材料として注目されているが、製造コストが高いという問題がある。そこで、本研究では、マイクロ引き下げ法を用いた形状制御ランガサイト型圧電結晶の製造技術を確立することで、デバイス形状の単結晶素子を一工程で作製することを目的とした。形状制御結晶育成用Pt合金坩堝を設計・開発し、それを用いたマイクロ引き下げ法により、様々なランガサイト型圧電材料の形状制御結晶を作製したところ、円柱状、平板上、チューブ状等の形状制御結晶の育成に成功した。さらに、それらの結晶性、圧電特性は従来の結晶と同等の性能を示した。

研究成果の概要(英文)：Shape-controlled langasite-type piezoelectric single crystals were grown by micro-pulling-down method and the physical properties of grown crystals were investigated. Columnar, plate and tube-shaped crystals with a-axis and c-axis in growth direction were grown and the diameters of grown columnar-shaped crystals were controlled approximately 3 mm from initial to later part. The grown crystals without cracks indicated relatively high crystallinities and a single phase of langasite-type structure in the powder XRD patterns. The piezoelectric constant d_{11} of CNGS crystal indicated 3.98 pC/N which was well accorded with the previous report.

研究分野：化学

科研費の分科・細目：材料化学・無機工業材料

キーワード：結晶・多結晶材料

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化への対策が世界中で講じられている中、自動車業界ではハイブリッド車や電気自動車の開発を中心としたさらなる燃費の向上、エミッション(CO₂やNO_x)排出量の低減が精力的に試みられている。これらの取り組みの中で、ガソリンのエンジン部においてはその燃焼効率を上げるためにエンジンの燃焼室内の圧力を直接検知して空燃比を希薄燃焼限界近傍にフィードバック制御する希薄燃焼(リーンバーン)技術の開発が行われている。この希薄燃焼技術にはエンジン部温度の正確なセンシングが必要となるが、現在では酸素センサによる間接的な検出が行われており、燃焼の精密な制御のためには無冷却で400 以上の高温で長期間安定に作動する直接検出型の燃焼圧センサの開発が要求されている。現状圧電材料として最も多く生産されているやチタン酸ジルコン酸鉛(PZT)を用いた圧電センサでは耐熱温度(約300)を超えてしまうため冷却なしでは使用できない。また、チタン酸ジルコン酸鉛(PZT)は鉛含有複合化合物であるため、機械的な応力の繰り返しによる圧電性の低下や有害元素である鉛を含むなどといった問題がある。

そのような中、申請者所属研究室において1350-1500 の融点を有し、**融点までキュリー温度を持たない、つまり高温まで圧電特性を維持することが可能な非鉛系ランガサイト型圧電結晶**を開発した。このランガサイト型圧電結晶は、 $A_3BC_3D_2O_{14}$ の化学式で表されるランガサイト型構造を有する物質群からなり、代表的な物質として $La_3Ga_5SiO_{14}$ (LGS)、 $La_3Nb_{0.5}Ga_{5.5}O_{14}$ (LNG)、 $La_3Ta_{0.5}Ga_{5.5}O_{14}$ (LTG)、 $Ca_3NbGa_3Si_2O_{14}$ (CNGS)、 $Ca_3TaGa_3Si_2O_{14}$ (CTGS)、 $Sr_3NbGa_3Si_2O_{14}$ (SNGS)、 $Sr_3TaGa_3Si_2O_{14}$ (STGS)等が挙げられる。このランガサイト型圧電結晶は水晶の約 2-4 倍もの圧電定数を有し、1000 以上の耐熱性を有するため高温で使用可能な圧電材料として非常に有望な候補材料であるが、製造コストが水晶圧電素子の100 倍以上高価という問題がある。しかし、その高温の安定した圧電特性から高温用圧電材料として世界的に注目されており、今年開催された国際結晶成長学会 ICCG-16 では、ランガサイト型圧電結晶の発表が数多く行われた。

ランガサイト型結晶は、これまでにチョクラルスキー(Cz)法やブリッジマン(BS)法に代表される結晶作製法によって作製されてきた。これらの方法では、一度の結晶作製において数インチの大型バルク単結晶が得られる一方、多結晶体では容易であった形状制御が困難であり、円柱状の大型のバルク単結晶を作製した後、必要とされる形状に切断、加工する必要がある(図 1)。特に単一のドメイン構造を有する単結晶は、特定の面方向で劈開やクラックが入りやすく、特殊な技術による精密な切断、加工が要求されるため、それ

らの行程に必要とされるコストは大きい。さらに、切断回数が多くなるに従ってその工程に伴う原料のロスが増加する上、Cz 法では用いる部材の消耗が早いことなども結晶製造コストが高くなる要因となっている。

2. 研究の目的

このような中、申請者が所属する研究グループでは、独自で開発した単結晶作製法である**マイクロ引き下げ(μ -PD)法を用いた機能性単結晶材料の形状制御技術の開発**を進めてきた。この結晶作製法は、**独自で設計・開発したダイ付き坩堝を用いて熔融原料を下方へと引き下げることにより、ダイの形に応じて様々な形状の単結晶が作製可能となることが特徴**である。

しかし、このランガサイト型結晶の μ -PD 法を用いた形状制御結晶成長は、コストダウンの観点から多くの企業が挑んだが、いずれも成功していない。最大の問題点はランガサイトの融液と形状制御用坩堝治具の金属との濡れ角が小さすぎる点であり、融液と坩堝金属との濡れ角は安定した結晶成長の達成に最も重要な要素である。**我々は、近年、20 種類以上の合金とランガサイト融液の濡れ角試験を行った結果、最適な濡れ角を持つ合金を見出した。**本研究ではこれを用いて一工程でデバイス形状とする形状制御結晶作製技術を開発する。**本技術確立に成功できるのは世界でも最適合金を知る我々のみである。**また、本研究では同時にランガサイト型圧電結晶の特性向上も行う。具体的には、Al 等の酸素との結合の強い元素の部分置換、育成雰囲気制御、出発化学組成制御、ポストアニール処理等により高温での Ga 元素の揮発や酸素不足比性の制御を試み、高温で使用する圧電センサとして重要なファクターとなる高温における電気抵抗率の低下抑制を実現する。

3. 研究の方法

μ -PD 法による安定した形状制御単結晶育成には、結晶育成時における熔融原料と坩堝との濡れ角が最も大きな影響を及ぼす。そこで、まずはランガサイト型結晶と最適な濡れ角を有する合金を用いた坩堝を設計・開発する。さらに、その坩堝を用いて実際に μ -PD 法により形状制御したランガサイト型圧電結晶 LTG, LGS, LNG, CNGS, CTGS, SNGS, STGS の育成を試みる。育成したランガサイト型圧電結晶は、研究室保有の粉末 X 線回折による相の同定、X 線ロックングカーブによる格子歪みや積層欠陥等の評価、Laue 法による結晶方位決定、偏光顕微鏡によるドメイン観察を行う。これらの物性測定により、良質な単結晶であることが確認できた単結晶試料は、EDS や EPMA により化学組成分析を行う。さらに、圧電特性評価においては、保有する装置を用いて、室温から 600 までの圧電定数、電気機械結合定数、周波数温度特性、誘電率、機械損失係数、電気抵抗率の評価を行う。ま

た、ランガサイト型圧電結晶の高温における圧電特性改善のために、Al 等の酸素との結合の強い元素の部分置換、育成雰囲気制御、出発化学組成制御、ポストアニール処理等を行うことで高温における Ga の飛散や不定酸素量を制御する。

4. 研究成果

(1)ランガサイト型形状制御結晶育成用の坩堝の設計及び開発

μ -PD 法を用いたランガサイト型圧電結晶の形状制御結晶育成を行うための坩堝の設計を行った。デバイス形状として考えられる円柱状、平板状、チューブ状の育成を目的とした。

まずは、円柱状のランガサイト型圧電結晶の育成を可能とする μ -PD 法用坩堝の設計を行った。形状制御を行うダイ部は、 ϕ 3 mm となっており、この坩堝を用いて結晶育成を行うことで外径 ϕ 3 mm の円柱状単結晶が育成できることになる。

次に、平板状のランガサイト型圧電結晶の育成を可能とする μ -PD 法用坩堝の設計を行った。坩堝内部の構造はほぼ円柱状結晶育成用坩堝と同じである。坩堝ダイ部はデバイス形状を考慮して $1 \times 3 \text{ mm}^2$ の形状とした。これにより、 $1 \times 3 \text{ mm}^2$ の断面形状を有する平板状単結晶が育成できることになる。

チューブ状のランガサイト型圧電結晶の育成を可能とする坩堝の設計では、ダイ部の形状は外径 ϕ 5 mm、内径 ϕ 3 mm とした。これにより、外径 ϕ 5 mm、内径 ϕ 3 mm のチューブ状の単結晶が育成できるとなる。

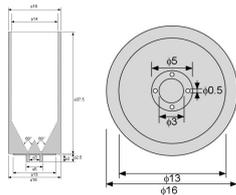


図 1. チューブ状結晶育成用坩堝図面。

さらに、形状制御マルチ単結晶育成を可能とする坩堝の設計を行った。 $1 \times 3 \text{ mm}^2$ の断面形状を有する平板状単結晶が 6 本同時に育成可能な坩堝であり、 $1 \times 3 \text{ mm}^2$ の底面を有するダイを坩堝下部に 6 ヶ所設置した。



図 2 円柱状結晶



図 3 平板状結晶

育成用 Pt 合金坩堝。 育成用 Pt 合金坩堝。

Pt 合金坩堝は結晶育成による高温での使用により次第にダイ部が劣化する。その劣化

は結晶育成の安定性を悪くするために、育成結晶の形状制御が次第に困難になることがこれまでの研究結果により明らかとなっている。ただし、ダイ部のみの劣化によって坩堝全体を改鑄することは坩堝のコスト増大を招いてしまうため、本研究では坩堝ダイ部を取り外し可能にし、ダイ部の劣化に伴ってダイ部のみを交換する機構を検討した。

様々な取り外し機構を検討した結果、Pt 合金材料における高温での接着特性の影響により、結晶育成後のダイ部分のみの取り外しは困難であると結論付けた。しかし、この高温での接着特性を利用することでダイ部のみを切断し、新たなダイ部を高温で接着する機構を考えた。この機構が達成された場合、ダイ部のみを交換によりその劣化に対応することができるため坩堝コストを大幅に低減することが可能である。さらに、一度加工済みの坩堝のダイ部を新たな形状に変更する際も、坩堝全部を加工することなく、ダイ部のみを交換により対応が可能となる。これは、貴金属である Pt の使用量削減にもつながる。また、坩堝全体を高価な Pt 合金金属で作製する必要がなくなり、ダイ部のみ Pt 合金金属で作製し、ダイ部以外の坩堝はより安価な Pt 金属で作製可能である。

1400 24 時間空気中で接着させた後の坩堝胴体部及びダイ部を図 4 に示した。問題なくダイ部と坩堝胴体部は接着できており、多少の衝撃では位置のずれも生じなかった。これにより、坩堝ダイ部の交換には成功した。本坩堝を用いての育成実験の結果に関しては後述する。

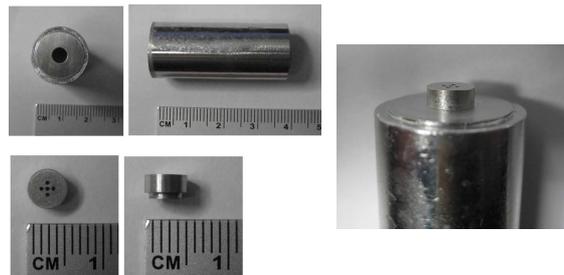


図 4. (左) 使用後の加工済み坩堝と接着用ダイ部。(右) 接着後の坩堝。

(2) μ -PD 装置による形状制御ランガサイト型圧電結晶の育成技術の開発

ランガサイト型形状制御圧電結晶の育成技術を開発することを目的に、開発した形状制御結晶育成用 Pt 合金坩堝を用いてランガサイト型圧電結晶の育成を行った。

実験の手順を図 5 に示した。まずは、原料粉末である高純度(4N 以上)の CaCO_3 , SrCO_3 , La_2O_3 , Nb_2O_3 , Ta_2O_3 , Ga_2O_3 , SiO_2 粉末を、 $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$, $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$, $\text{Sr}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$, $\text{Sr}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$, $\text{La}_3\text{Ta}_{0.5}\text{Ga}_{5.5}\text{O}_{14}$ の仕込組成で秤量・混合し、1200 で焼結した。焼成粉末は、粉末 X 線回折(XRD)測定により目的とする物質の単相であることを確認した後、形状

制御用の Pt 合金坩堝に入れて高周波誘導コイルにより加熱した。

高周波誘導加熱により坩堝内の原料粉末を溶融した後、ダイの穴から出てきた原料融液を種結晶を用いて下方向に 0.05mm/min で引き下げることによって単結晶育成を行った。育成した単結晶は粉末 XRD 測定による相分析・格子定数評価を、X 線ロッキングカーブ(XRD)測定により結晶性評価を、極点測定により結晶軸評価を、エネルギー分散型 X 線(EDX)分析及び X 線電子プローブ微小部(EPMA)分析により育成した結晶の組成分析をインピーダンスアナライザによる共振反共振法により圧電定数評価を、二端子法により電気抵抗率測定を行った。

形状制御結晶育成は、まずは最も安定して結晶育成が可能だと思われる円柱状の結晶育成から行った。

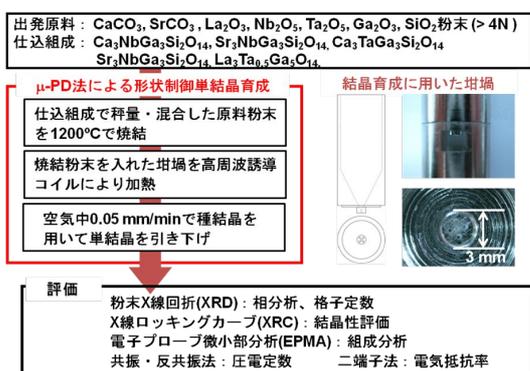


図 6 μ-PD 法による形状制御ランガサイト型圧電結晶の育成手順

図 7 は結晶育成中の固液界面を CCD カメラを用いて撮影した画像である。まず、溶融した原料が坩堝のダイの穴を通して、坩堝の底に出てきたため、種結晶にその融液をタッチさせて下に引き下げた (0.05 mm/min)。融液を引き下げることで徐々に結晶の径が大きくなり、融液がダイの底面で形状が制限されているために、最終的には図 5 下図のようにダイのサイズの径まで結晶の径が大きくなった。

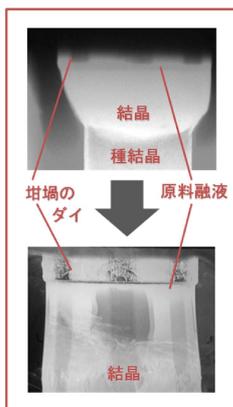


図 7. 育成中の固液界面。

その結果、図 8 示した円柱状の $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ の単結晶の作製に成功した。さらに、種結晶の方位を変えることによって、結晶成長方向が *c* 軸方向と *a* 軸方向の 2 本を作製した。いずれの単結晶も坩堝のダイの形状に制御されて同じ径の単結晶が作製できていることが分かる。育成方向に垂直に切断し、研磨した単結晶において分かるようにクラックのない単結晶が作製できていることが確認できる。

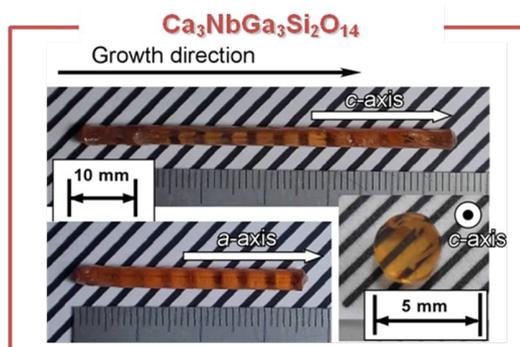


図 8 μ-PD 法で作製した円柱状 $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ 単結晶。

さらに、 $\text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}, \text{Sr}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}, \text{Sr}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}, \text{La}_3\text{Ta}_{0.5}\text{Ga}_{5.5}\text{O}_{14}$ の組成においても同様に円柱状の形状制御単結晶の育成を行った。 $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ と同様に φ3mm の径を有した円柱状の単結晶が得られており、全ての結晶で高い透明度を示した。結晶育成中の固液界面は、全て $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ と同様であり、同じ形状制御用坩堝を用いることで円柱状の形状制御が可能であることが明らかとなった。育成した結晶を育成方向と垂直に切断し、光学研磨をしたが、結晶内部にクラックは確認されなかった。

育成した円柱状ランガサイト型圧電結晶は全て粉末 XRD 測定を行うことによってその相の同定を行った。得られた粉末 XRD パターンからは、全て回折ピークがランガサイト型構造のピークと一致し、不純物のピークも見られなかったため、育成した全ての結晶でランガサイト型構造の単相が得られたことが明らかとなった。

また、得られた単結晶の粉末 XRD パターンを用いてその格子定数を調べた。格子定数の評価には、Ti 粉末を内部標準試料として用い、最小二乗法により計算を行った。その結果、得られた $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}, \text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}, \text{Sr}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}, \text{Sr}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}, \text{La}_3\text{Ta}_{0.5}\text{Ga}_{5.5}\text{O}_{14}$ の単結晶の格子定数(*a* 軸長、*c* 軸長)はそれぞれ、 $a = 8.100 \text{ \AA}, c = 4.979 \text{ \AA}, a = 8.109 \text{ \AA}, c = 4.985 \text{ \AA}, a = 8.280 \text{ \AA}, c = 5.074 \text{ \AA}, a = 8.288 \text{ \AA}, c = 5.074 \text{ \AA}, a = 8.239 \text{ \AA}, c = 5.124 \text{ \AA}$ となった。これらは、全てこれまでに報告されているチョクラルスキー法で育成された結晶の結果と同様の値を示していることを確認した。

育成した円柱状ランガサイト型圧電結晶の結晶性を調べるために、育成方向に垂直に切った断面の X 線ロッキングカーブ測定を行った。 $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}, \text{Ca}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}, \text{Sr}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}, \text{Sr}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ の円柱状単結晶は、すべての XRC ピークの半値幅が 100 arcsec 程度であり、左右対称のシングルピークが確認できた。これは、育成した単結晶内にモザイク構造等の局所歪みが存在せず、さらにチョクラルスキー法で育成した単結晶と比べてもほぼ遜色のない結晶性を有して

いることを示している。

次に、育成した形状制御単結晶の結晶方位を調べるために、育成方向に垂直に切った断面の極点測定を行った。結晶育成方向に a 軸の結晶方位を有する種結晶を用いて形状制御結晶育成を行った円柱状 $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ 単結晶において(400)ピークの極点測定を行った。その結果、(400)ピークは極図のほぼ中央に現れた。これは、切断面がほぼ(400)面となっていることを意味しており、つまり育成された単結晶が育成方向に対して a 軸の結晶方位を有していることが明らかとなった。これにより、種結晶により育成する結晶の結晶方位を制御することに成功した。

$\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ 単結晶に関しては、 a 軸方向に結晶成長を行った試料に関して、共振反共振法によりその圧電定数を測定した(図 9)。下記の計算法を用いて d_{11} を求めた。その結果、 $d_{11} = 3.97 \text{ pC/N}$ となり、チョクラルスキー法で育成した結晶とほぼ同等の値を示すことが明らかとなった。さらに、その圧電定数の温度依存性を調べたところ、室温から約 550 までの温度範囲において、ほぼ文献値通りの圧電定数を示すことが明らかとなった。

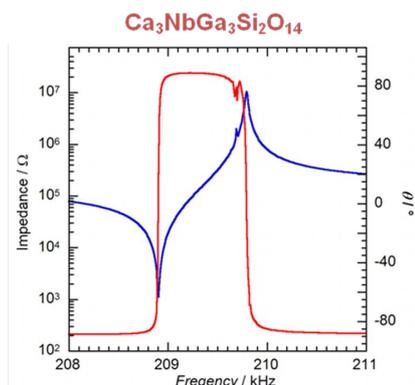


図 9 形状制御 $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ 結晶の圧電定数測定。

電気抵抗率の温度依存性では、200 ~ 600 においてチョクラルスキー法で育成した単結晶とほぼ同等の挙動を示しており、500 における電気抵抗率と比較しても約 $10^8 \text{ } \Omega\text{cm}$ の値を示した。

以上の結果から、 μ -PD 法で育成した円柱状ランガサイト型圧電結晶は、勅らするキー法で育成した既存のランガサイト型圧電結晶と同様の結晶性および圧電特性を有していることが明らかとなった。

次に、平板状およびチューブ状のランガサイト型圧電結晶の作製技術の開発を行った。これらは、既に開発を行った形状制御用坩堝を用いて行った。

まずは、平板状ランガサイト型圧電結晶育成の結果を示す。坩堝のダイは、 $1 \times 3 \text{ mm}^2$ のものを用いて行った。結晶育成手順は円柱状結晶育成の際と同様であり、原料には $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ を用いた。ダイ部の穴が丸穴 3

個の際には原料融液の供給が安定していなかったものの、ダイ部の穴をスリットタイプにしたところ安定して原料融液の供給が行われた。その結果、結晶引き下げに従って、メニスカスが坩堝ダイ部で制御されている様子が CCD カメラにより観察された。

結晶育成後の結晶は、断面がほぼ $1 \times 3 \text{ mm}^2$ の形状を有しており、平板状の $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ 結晶の育成に成功した。育成した結晶の結晶性を X 線ロックアップにより測定した結果、半値幅が 38.2 arcsec と非常に高い結晶性を示した。

チューブ状のランガサイト型圧電結晶では、シードも同様にチューブ状の種結晶を用意した。シードタッチ後は中が中空のチューブ状にメニスカスが広がる様子が観察された。一方、外径形状はダイ部よりもわずかに広がる傾向が見られたが、これは、印加出力の調整によって制御可能である。このメニスカス形状を保ちながら 0.05 mm/min において結晶引き下げをおこなったところチューブ状形状制御 $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ 結晶の育成に成功した。

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 9 件)

- Effects of growth atmosphere on crystal growth and optical properties for $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ single crystals
Y. Yokota, M. Sato, K. Tota, S. Kurosawa, K. Onodera, A. Yoshikawa
Ferroelectrics 449 (2013) 147-153 査読有
DOI:10.1080/00150193.2013.822780
- Annealing effects for $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ piezoelectric single crystals grown by micro-pulling-down method
Y. Yokota, M. Kitahara, S. Kurosawa, M. Sato, K. Tota, K. Onodera, A. Yoshikawa
Ferroelectrics 445 (2013) 1-5 査読有
DOI:10.1080/00150193.2013.843383
- Fabrication and physical properties of $\text{Ca}_3\text{Nb}(\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x)_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ piezoelectric materials
M. Kitahara, Y. Yokota, A. Medvedev, Y. Futami, S. Kurosawa, Y. Fujimoto, M. Sato, K. Tota, K. Onodera, A. Yoshikawa
Ferroelectrics 456 (2013) 107-112 査読有
DOI:10.1080/00150193.2013.846667
- Growth of column-shaped and plate-like langasite-type piezoelectric single crystals and their physical properties

- Y. Yokota, M. Sato, V. Chani, Y. Futami, K. Tota, S. Kurosawa, K. Onodera, A. Yoshikawa
Sensors and Actuators A (2012) 200 (2013) 56-59 査読有
DOI: 10.1016/j.sna.2012.10.017
5. Shaped crystal growth of langasite-type piezoelectric single crystals and their physical properties
Y. Yokota, A. Yoshikawa, Y. Futami, M. Sato, K. Tota, K. Onodera, T. Yanagida
IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectrics. Freq. Contr. 59 (2012) 1868-1871 査読有
DOI:10.1109/TUFFC.2012.2398
6. Shape-controlled crystal growth of $\text{Sr}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ and $\text{Sr}_3\text{TaGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ piezoelectric single crystals by micro-pulling-down method
Y. Yokota, Y. Futami, M. Sato, K. Tota, K. Onodera, T. Yanagida, A. Yoshikawa
IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectrics. Freq. Contr. 59 (2012) 1864-1868 査読有
DOI: 10.1109/TUFFC.2012.2397
7. Crystal growth and physical properties of shape-controlled $\text{La}_3\text{Ta}_{0.5}\text{Ga}_{5.5}\text{O}_{14}$ single crystals by micro-pulling-down method
Y. Yokota, M. Sato, Y. Futami, K. Tota, T. Yanagida, K. Onodera, A. Yoshikawa
J. Cryst. Growth 352 (2012) 147-150 査読有
DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2012.01.012
8. Study on phase diagram of $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ piezoelectric material by differential thermal analysis and X-ray diffraction measurement
Y. Futami, Y. Yokota, M. Sato, K. Tota, J. Pejchal, T. Yanagida, K. Onodera, A. Yoshikawa
Key Engineering Materials 508 (2012) 247-252 査読有
DOI:10.4028/www.scientific.net/KEM.508.247
9. Growth of Shape-Controlled $\text{Ca}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ and $\text{Sr}_3\text{NbGa}_3\text{Si}_2\text{O}_{14}$ Single Crystals by Micro-Pulling-Down Method and Their Physical Properties
Y. Yokota, M. Sato, K. Tota, Y. Futami, T. Yanagida, K. Onodera, A. Yoshikawa
Jpn. J. Appl. Phys. 50 (2011) 09ND03 査読有

DOI: 10.1143/JJAP.50.09ND03

〔学会発表〕(計 20 件)

1. Development of functional single crystals by micro-pulling-down method C35
Y. Yokota, S. Kurosawa, K. Nishimoto, M. Sato, H. Goto, K. Shikimura, K. Tota, T. Ito, T. Kagaya, K. Onodera, K. Kamada, A. Yoshikawa
2013 Collaborative Conference on Crystal Growth (3CG), Cancún, Mexico (June 12, 2013)[招待講演]
2. Material Research of Scintillator Crystals and Growth of Shape-controlled Crystals by Micro-Pulling-Down Method
Y. Yokota, A. Yamajia, Y. Futami, Y. Fujimoto, T. Yanagida, M. Sato, K. Tota, K. Onodera, N. Kawaguchi, K. Fukuda, D. Totsuka, A. Yoshikawa
2011 KACG, South Korea (October 14, 2011)[招待講演]
3. Shaped crystal growth of langasite-type piezoelectric single crystals and their physical properties
A. Yoshikawa, Y. Yokota, M. Sato, K. Tota, Y. Futami, A. Yamaji, T. Yanagida, K. Onodera
IEEE 20th ISAF-PFM, Canada (July 30, 2011) [招待講演]

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織
(1)研究代表者
横田 有為 (YUUI, YOKOTA)
東北大学・未来科学技術共同研究センター・准教授
研究者番号 : 60517671