

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26709048

研究課題名(和文) ns2型発光中心を含有したガラス蛍光体における局所構造と発光特性の制御

研究課題名(英文) Examination of local structure of the ns2-type emission centers in glass phosphors and the emission properties

研究代表者

正井 博和 (MASAI, Hirokazu)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・材料・化学領域・主任研究員

研究者番号：10451543

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ns2型の電子配置を有するカチオン(Sn²⁺、In⁺など)を含有した酸化物ガラス、および非晶質材料を合成し、その光学特性、発光特性、および、価数などの局所状態を調査した。その結果、組成に依存したガラスのネットワークだけでなく、過冷却液体からの凍結過程に発光特性が影響を受けることを見出した。また、他の発光中心とns2型中心との差異を議論した。更に、放射線励起発光と通常の蛍光との差異を詳細に考察し、ガラスベースの発光材料における局所状態、および、ネットワーク構造が重要であることを見出した。

研究成果の概要(英文)：In this study, I examined optical properties, luminescent properties of oxide glasses and amorphous films containing ns2 type cations, such as Sn²⁺, In⁺. I find that the luminescence properties and local coordination states is affected not only by the glass network but also by the cooling process from the supercooled liquid state. We also discussed differences in luminescence between other luminescent centers and the ns2 type center. In addition, the difference between radiation-induced luminescence and conventional fluorescence is discussed. I have emphasized that both the local coordination state of activators and the network structure are important for glass-based emitting materials.

研究分野：無機材料科学

キーワード：ガラス 発光 蛍光体 XANES ns2型中心 ネットワーク構造

1. 研究開始当初の背景

昨今の発光ダイオード(LED)の目覚ましい進展を受け、種々の結晶蛍光体の研究も世界中で活発に行われている。現在の一般的な白色LEDは、青色LEDの光源に対して、黄色の結晶蛍光体有機バインダ中に分散させることにより用いられている。しかし、この手法ではその耐光性、耐熱性の観点から将来のLEDにおける高強度化・あるいは短波長化に対して限界がある。既に産業界からは高強度LEDに耐性を持つ発光部材が求められており、化学的耐久性と耐光性を併せ持つ無機ガラスが必要とされるのは必然の流れである。組成の自由度と優れた賦形性を併せ持つ酸化物ガラスが結晶に匹敵する発光特性を呈することができるならば、その特徴を生かした新規光学部材として社会に発信することが可能である。

本研究では、酸化物ガラスにおける発光中心として、 ns^2 型発光中心に注目する。この発光中心の特徴は、発光中心の最外殻に存在する電子に起因する、励起・発光特性の多様性である。本研究では、熔融法や液相法を用いてバルク、あるいは、薄膜の非晶質蛍光体を作製し、その発光特性・構造を調査し、新規発光部材としての発信を試みた。また、試料の発光特性と構造との相関を解明し、ランダム構造を有するアモルファス部材における光学材料への応用に関する重要な因子を見出すことを目的とした。

2. 研究の目的

本研究は、研究代表者が、これまでに熔融法を用いて作製してきたバルクの Sn^{2+} 含有希土類フリーガラス蛍光体における科学を深化させ、新規アモルファス蛍光材料としての設計指針の確立を目指す。研究期間における目標と明らかにすべき点を以下に示す。

【1】種々のアモルファス部材(バルクガラス、アモルファス薄膜、結晶化ガラス)の創製

【2】局所構造解析・発光ダイナミクス解析による高效率発光機構の解明と配位子場制御

3. 研究の方法

本研究で注目する ns^2 型発光中心は概して、大気熔融中において酸化することが知られている。そこで、ガラスを大気中、および、不活性雰囲気中、還元剤共添加下など、複数の条件で作製し、ガラスの光学特性、発光特性等を調査した。

発光特性としては、基本的に蛍光励起スペクトル測定による蛍光帯、励起帯の3次元化、発光寿命解析、内部量子収率測定によって、発光特性を調査した。また、放射線励起発光材料としての応用を念頭に、X線励起シンチレーションスペクトル、X線励起発光減衰解析をおこなった。これらの測定の一部は、低

温(~10 K)から室温までの温度範囲で測定し、温度依存性を議論した。

一方、発光中心の局所状態、価数は、基本的にSPring-8やSAGA LSなどの大型放射光施設においてX線吸収微細構造(XAFS)測定を行い、評価した。

ガラスの特徴であるランダムなネットワーク構造は、NMR、XAFS、中性子回折、逆モンテカルロシミュレーションなどで3次元化を試みた。ネットワークの弾性率は、ブリルアン散乱を用いて評価した。

上記、多様な測定、解析法は、本研究の連携研究者によってなされたものである。

4. 研究成果

(1) 酸化物ガラスにドーブされたスズのXAFS解析

一般に、ガラス中のスズの価数を定量的に測定する方法としては ^{119}Sn メスパワー分光測定が挙げられるが、組成によってはメスパワー分光測定が困難な組成があり、この場合は放射光施設を利用したNear Edge Structure (XANES)測定がその定量性を評価しうる代替手法であるといえる。そのため、 ^{119}Sn メスパワー分光測定を用いてスズ元素の価数評価を行い、同時に、Sn K端XANES、および、L端XANES測定を行うことにより、XANESを用いた価数の評価の妥当性に関して議論をおこなった。測定の結果、ガラスのSn K端XANES測定では、作製条件に依存した明瞭な吸収端エネルギーの差異が確認できなかった。図1には、異なる条件で作製したSn含有ZPガラスのSn L_{II} 端XANESスペクトルを示す。図のように、作製条件、つまり、Snの価数に依存した明瞭な変化が L_{II} 端XANESスペクトルにおいては確認された。同様の変化はSn含有ZBガラスにおいても確認され、 L_{II} 端XANES測定の有用性が明らかになった。

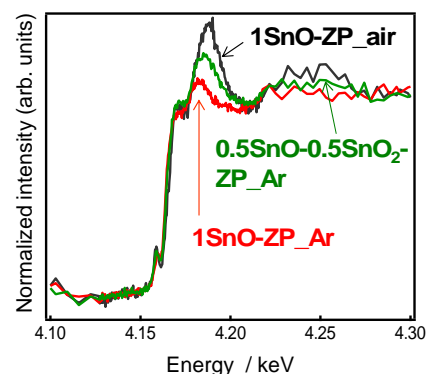


図1 異なる条件で作製したSnドーブ60ZnO-40P₂O₅(ZP)ガラスのSn L_{II} 端XANESスペクトル

(2) Sn^{2+} ドーブ蛍光体薄膜の作成

これまでの Sn^{2+} 発光中心を有する非晶質材料は、熔融法で作製したバルク酸化物ガラスであったが、これを薄膜化することにより応

用範囲の拡大が期待される。作製手法として、リン酸と金属塩化物を混合後、熱処理することにより、蛍光特性を有する薄膜を得ることに成功した。得られた透明な薄膜は、図2に示すように、紫外線照射により明瞭な発光を呈した。さらに、共添加カチオンを加えることにより、発光色の制御にも成功した。



図2 作成したSnをドープした蛍光体薄膜の写真(下部は紫外線(254nm)照射時)

(3) ガラスにおける In^+ , Te^{4+} の発光の実証

Sn^{2+} と同様の電子配置を有する In^+ および Te^{4+} をドープしたガラスからの発光に関する報告例はこれまでにない。

本研究では、 In^+ や Te^{4+} をドープした酸化ガラスを熔融急冷法で作製し、光学特性、発光特性を調査した。図3は、 Te^{4+} をドープした亜鉛ホウ酸塩ガラスのUV光励起時のストリーク像、および、発光減衰曲線である。その結果、他の ns^2 型発光中心と同様、マイクロ秒の減衰時定数を有する発光(りん光)を呈することを実証した。また、 In^+ の存在に関しては、 In XANES測定をおこない、その存在を実証した。

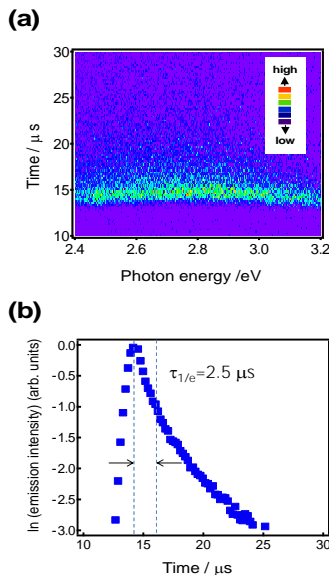


図3 (a) $1\text{TeO}_2\text{-}50\text{ZnO-}49\text{B}_2\text{O}_3$ ガラスのUV (250 nm) 照射におけるストリーク像 (b) $1\text{TeO}_2\text{-}50\text{ZnO-}49\text{B}_2\text{O}_3$ ガラスの発光減衰曲線

(4) Ce ドープガラスの X 線シンチレーションにおけるエネルギー移動過程

X 線を照射して確認されるシンチレーシ

ン特性において、結晶材料に比べてガラスは性能が劣っているというのが実情である。実用化を検討するにあたり、その発光機構に寄与する因子を特定し、制御することが重要であると考えられる。本研究では、Ce ドープ $40\text{Li}_2\text{O-}y\text{B}_2\text{O}_3\text{-}(60-y)\text{SiO}_2$ (LBSy) ガラスにおいて、組成、Ce の価数を精査した。図4に 0.5Ce:LBSy ガラスにおける Ce L_3 端 XANES より求めた Ce^{3+} 比: $\text{Ce}^{3+}/(\text{Ce}^{3+}+\text{Ce}^{4+})$ 、内部量子収率 Q_{eff} 、および、シンチレーションピーク面積を Ce:LBS ガラスの実効原子番号 Z_{eff} に対してプロットした。 Z_{eff} の増加により、 Q_{eff} 、および、 Ce^{3+} 比が減少し、シンチレーション強度が増加した。シンチレーション発光の変化を、組成を基に算出した X 線減衰(吸収)係数の変化と比較すると、 SiO_2 量の増加に伴い、より効果的に発光を示すことが明らかになった。このことは、吸収されたエネルギーが発光中心まで到達するまでのエネルギー輸送過程がガラスのシンチレーション過程において重要であることを示唆している。

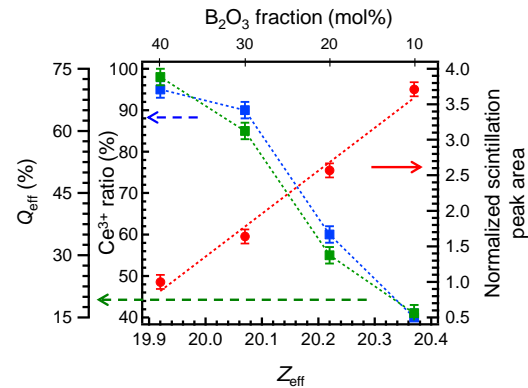


図4 0.5Ce:LBSy ガラスにおける内部量子収率 Q_{eff} 、 Ce^{3+} 比、シンチレーションピーク面積の Z_{eff} および B_2O_3 分率依存性

(5) $\text{ZnO-P}_2\text{O}_5$ ガラスにおける熱膨張係数と構造との相関

ガラスの構造を理解するためには、複数の実験手法を用いて、実際の3次元構造に注目する必要があると考えられる。今回、 Sn^{2+} 発光中心のホストガラス組成としてしばしば用いてきた $\text{ZnO-P}_2\text{O}_5$ ($x\text{ZP}$) ガラスに注目した。 ^{31}P MAS NMR、量子ビームの回折実験、Zn K 端 Extended X-ray Absorption Fine Structure (EXAFS) 解析の結果を基に、逆モンテカルロ(RMC)シミュレーションを用いて、 $\text{ZnO-P}_2\text{O}_5$ ガラスの構造の3次元化を試みた。また、得られた構造と物性との相関を議論した。 $x\text{ZP}$ ガラスにおける熱膨張特性を図5に示す。一般に、ガラスは、ガラス転移温度(T_g)が低い試料ほど大きな熱膨張特性を示す。しかし、本ガラス系では、高い T_g を示す試料において大きな熱膨張特性を呈することが判る。また、 ^{31}P MAS NMR 測定により、 ZnO 量増加に伴い、リン酸塩が Q^0 、 Q^1 といった

孤立した構造をとることが確認された。

^{31}P MAS NMR、放射光実験、既報の中性子回折実験の結果を基に、RMC シミュレーションを用いて描写された 70ZP ガラスにおける Zn_xO_y の結合状態を 1 例として図 6 に示す。70ZP ガラス、60ZP ガラスの主たるネットワークはそれぞれ、 Zn_xO_y 、および、リン酸塩鎖で構成されており、この差異が熱膨張係数の変化の起源であると結論できる。

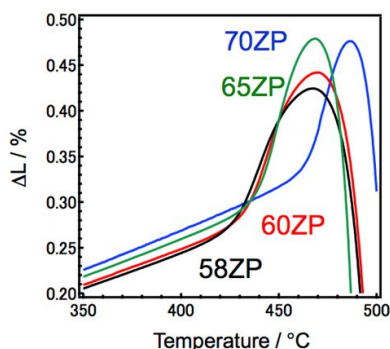


図 5 58ZP, 60ZP, 65ZP, および、70ZP ガラスの熱膨張曲線

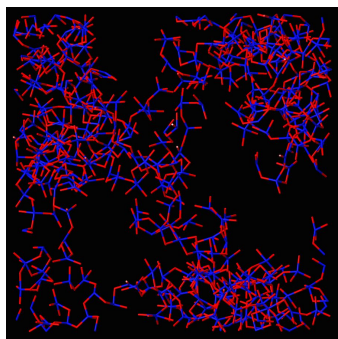


図 6 70ZP ガラスにおける Zn_xO_y 多面体の連結性。Zn および O 原子をそれぞれ青、赤色で表記

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 45 件)

- [1] Relationship between Near Infrared Emission of Bi-Doped Glass and the Preparation Condition. H. Masai, et al. *Sensor. Mater.* accepted (2018). 査読有
- [2] Structure studies of BaO-TiO₂-SiO₂ glass-ceramics using ^{29}Si MAS NMR and Raman spectroscopy. H. Masai, Bull. Chem. Soc. Jpn., accepted (2018). 査読有
- [3] Scintillation properties of BaO-TiO₂-GeO₂-SiO₂ glass-ceramics, T. Kato, G. Okada, N. Kawaguchi, H. Masai, T. Yanagida, *J. Non-Crystal. Solids*, accepted (2018). 査読有
- [4] Scintillation and thermoluminescence

properties of transparent glass-ceramics containing Sr_{0.5}Ba_{0.5}Nb₂O₆ nanocrystallites. N. Kawaguchi, H. Masai, H. Kimura, G. Okada, T. Yanagida, *J. Non-Crystal. Solids*, accepted (2017). 査読有

[5] Photoluminescence and X-ray-induced scintillation of BaO-TiO₂-SiO₂ glasses and the glass-ceramics. H. Masai, et al. *J. Non-Crystal. Solids*, accepted (2017). 査読有

[6] Optical and scintillation properties of 30BaO-(70-x)TiO₂-xGeO₂ (x=50,55,60) glass-ceramics. T. Yanagida, H. Masai, G. Okada, N. Kawano, N. Kawaguchi, *J. Non-Crystal. Solids*, accepted (2017). 査読有

[7] Scintillation and optical properties of TiO₂-ZnO-Al₂O₃-B₂O₃ glasses and glass-ceramics. Y. Usui, G. Okada, N. Kawaguchi, H. Masai, T. Yanagida, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 57, 046203 (2018). 査読有

[8] Correlation between emission properties, valence states of Ce and chemical compositions of alkaline earth borate glasses. A. Torimoto, H. Masai, G. Okada, N. Kawaguchi, T. Yanagida, T. Ohkubo, *J. Lumin.*, 197, 98-103 (2018). 査読有

[9] X-ray-induced Scintillation Governed by Energy Transfer Process in Glasses. H. Masai, et al. *Sci. Rep.* 8, 623 (2017). 査読有

[10] Validity of Valence Estimation of Dopants in Glasses using XANES Analysis. H. Masai, et al. *Sci. Rep.* 8, 415(2017). 査読有

[11] Luminescence of Ce³⁺ in aluminophosphate glasses prepared in air. H. Masai, et al. *J. Lumin.*, 195, 413-419 (2017). 査読有

[12] Photoluminescence and radioluminescence in Pr-doped lanthanum aluminoborate glasses. S. Kaneko, H. Masai, G. Okada, N. Kawaguchi, T. Yanagida, *J. Asian Ceram. Soc.* 5, 385-390 (2017). 査読有

[13] X-ray induced luminescence of Sn²⁺-centers in zinc phosphate glasses. A. Torimoto, H. Masai, G. Okada, T. Yanagida, *Rad. Meas.* 106, 175-179 (2017). 査読有

[14] Emission properties of cerium-doped barium borate glasses for scintillator applications. A. Torimoto, H. Masai, G. Okada, T. Yanagida, *Rad. Meas.*, 106, 46-51 (2017). 査読有

[15] Correlations between Glass Structure and Emission Properties of Sn-Doped Zinc Phosphate Glasses Prepared with Different Cooling Rates. A. Torimoto, H. Masai, G. Okada, T. Yanagida, M. Koshimizu, *Sensor. Mater.* 29 [10] 1383-1390 (2017). 査読有

[16] X-ray-induced Luminescence of SnO-SrO-B₂O₃ Glasses Prepared under Different Preparation Conditions. H. Masai, et al. *Sensor. Mater.* 29, 1391-1398 (2017). 査読有

[17] Emission properties of Ce-doped alkaline earth borate glasses for scintillator applications. A. Torimoto, H. Masai, G. Okada, N. Kawaguchi, T. Yanagida, *Opt. Mater.* 73, 517-522 (2017). 査

読有

- [18] Emission properties of Ce^{3+} center in barium borate glasses prepared from different starting materials. A. Torimoto, H. Masai, G. Okada, N. Kawaguchi, T. Yanagida, T. Ohkubo, *Opt. Mater.*, 72, 52-57 (2017). 査読有
- [19] Luminescence of Sn^{2+} center in oxide glass with a tendency toward phase separation. H. Masai, *et al. Opt. Mater. Express*, 7, 2993-3002 (2017). 査読有
- [20] Formation of metallic cation - oxygen network for anomalous thermal expansion coefficients in binary phosphate glass. Y. Onodera, S. Kohara, H. Masai, A. Koreeda, S. Okamura, T. Ohkubo, *Nat. Commun.* 8, 15449 (2017). 査読有
- [21] Additive effects of rare-earth ions in sodium aluminoborate glass using ^{23}Na and ^{27}Al magic angle spinning nuclear magnetic resonance. S. Kaneko, Y. Tokuda, H. Masai, *New J. Glass Ceram.* 7, 58-76 (2017). 査読有
- [22] Structural analysis of mixed alkali borosilicate glasses containing Cs^+ and Na^+ using strong magnetic field nuclear magnetic resonance. S. Kaneko, Y. Tokuda, Y. Takahashi, H. Masai, Y. Ueda, *J. Asian Ceram. Soc.* 5, 7-12 (2017). 査読有
- [23] Inorganic amorphous phosphor containing ns^2 -type Sn^{2+} emission center. H. Masai, *et al. Sci. Adv. Mater.* 9, 464-468 (2017). 査読有
- [24] Improving the stability of CdS quantum dot sensitized solar cell using highly efficient and porous CuS counter electrode. A. Hessein, F. Wang, H. Masai, K. Matsuda, A. Abd El-Moneim *J. Ren. Sustain. Ener.* 9, 023504 (2017). 査読有
- [25] One-step fabrication of copper sulfide nanoparticles decorated on graphene sheets as highly stable and efficient counter electrode for CdS-sensitized solar cells. A. Hessein, F. Wang, H. Masai, K. Matsuda, A. Abd El-Moneim, *Jpn. J. Appl. Phys.* 55, 112301 (2016). 査読有
- [26] Radiophotoluminescence and thermally-stimulated luminescence of Ag-doped $Li_3PO_4-Al(PO_3)_3$ glass. H. Tatsumi, G. Okada, T. Yanagida, H. Masai, *J. Lumin.* 179, 545-549 (2016). 査読有
- [27] X-ray induced effects in Sm^{3+} -doped $ZnO-P_2O_5$ glass for Radiation Measurement. G. Okada, H. Masai, A. Torimoto, S. Kasap, T. Yanagida, *J. Ceram. Processing Res.* 17, 148-151 (2016). 査読有
- [28] Photo- and Radioluminescence of Sn^{2+} Centers in Alkaline Earth-Substituted Zinc Phosphate Glass. H. Masai, *et al. Sensor. Mater.* 28, 871-879 (2016). 査読有
- [29] Correlation between Valence State of Tin and Elastic Modulus of Sn-doped $Li_2O-B_2O_3-SiO_2$ Glasses. H. Masai, *et al. J. Appl. Phys.* 119, 185104 (2016). 査読有
- [30] Photoluminescence of Sn^{2+} -centre as probe

- of transient state of supercooled liquid. H. Masai, *et al. Opt. Mater. Express* 6, 1827-1836 (2016). 査読有
- [31] Correlation between the emission properties of Sn^{2+} center and the chemical composition of $ZnO-P_2O_5$ glasses. A. Torimoto, H. Masai, Y. Tokuda, T. Yanagida, G. Okada, K. Mibu, *J. Ceram. Soc. Jpn.* 124, 554-558 (2016). 査読有
- [32] Scintillation and Dosimeter Properties of Ce-doped $Li_3PO_4-Al(PO_3)_3$ Glasses, H. Tatsumi, G. Okada, T. Yanagida, H. Masai, *J. Ceram. Soc. Jpn.* 124, 550-553 (2016). 査読有
- [33] Radiation induced luminescence properties of pure and Sn-doped $60ZnO-40P_2O_5$ glass. T. Yanagida, Y. Fujimoto, H. Masai, *Phys. Chem. Glasses*, 57, 158-162 (2016). 査読有
- [34] Radio-photoluminescence of Ag-doped $Li_3PO_4-Al(PO_3)_3$ glass. H. Tatsumi, G. Okada, T. Yanagida, H. Masai, *Chem. Lett.* 45, 280-282 (2016). 査読有
- [35] Optical and scintillation properties of Ce-doped $34Li_2O-5MgO-10Al_2O_3-51SiO_2$ glass. T. Yanagida, J. Ueda, H. Masai, Y. Fujimoto, S. Tanabe, *J. Non-Crystal. Solids*, 431, 140-144 (2016). 査読有
- [36] Photoluminescence of ns^2 -type center-containing zinc borate glasses. H. Masai, T. Yanagida, *J. Non-Crystal. Solids*, 431, 83-87 (2016). 査読有
- [37] Photoluminescence of monovalent indium centres in phosphate glass. H. Masai, *et al. Sci. Rep.* 5, 13646 (2015). 査読有
- [38] Local coordination state of rare earth in eutectic scintillators for neutron detector applications. H. Masai, *et al. Sci. Rep.* 5, 13332 (2015). 査読有
- [39] Luminescence of Sn^{2+} Center in $ZnO-B_2O_3$ Glasses Melted in Air and Ar Condition. H. Masai, *et al. Bull. Chem. Soc. Jpn.* 88, 1047-1053 (2015). 査読有
- [40] Emission property of Ce^{3+} -doped $Li_2O-B_2O_3-SiO_2$ glasses. H. Masai, *et al. Opt. Mater. Express* 5, 1851-1858 (2015). 査読有
- [41] Controllable photoluminescence by melting-process temperature in SnO-containing glass. M. Kinoshita, Y. Takahashi, N. Terakado, H. Masai, T. Fujiwara, *J. Ceram. Soc. Jpn.* 123, 611-614 (2015). 査読有
- [42] Tin-Doped Inorganic Amorphous Films for Use as Transparent Monolithic Phosphors. H. Masai, *et al. Sci. Rep.* 5, 11224 (2015). 査読有
- [43] Optically stimulated luminescence in X-ray irradiated $xSnO-(25-x)SrO-75B_2O_3$ glass. H. Nanto, R. Nakagawa, Y. Takei, K. Hirasawa, Y. Miyamoto, H. Masai, T. Kurobori, T. Yanagida, Y. Fujimoto, *Nucl. Instrum. Meth. A*, 784, 14-16 (2015). 査読有
- [44] Photo- and Radioluminescence of ZnO-precipitated Glass-Ceramics. H. Masai, *et al. Sensor. Mater.* 27, 237-245 (2015). 査読有

[45] Photoluminescence and Radioluminescence properties of MnO-doped SnO-ZnO-P₂O₅ glasses. H. Masai, *et al. Opt. Mater.* 42, 381-384 (2015).
査読有

〔学会発表〕(計 120 件)

[1] Luminescence of ns²-type center in oxide glasses, H. Masai, International Conference on Small Science 2015, Phuket, 2015/11/04 (invited)

[2] Fabrication of Inorganic Materials for Phosphor Applications, H. Masai, 3rd International Workshop on Persistent and Photostimulable Phosphors, Arlington, 2015/11/10 (Invited)

[3] Lithium-containing amorphous materials for radiation detection, H. Masai, T. Yanagida, Pacificchem 2015, Honolulu, 2015/12/17 (Invited)

[4] Photoluminescence of Inorganic Amorphous Films Containing ns²-type Emission Center, H. Masai, EMN Ceramics 2016, Hong Kong, 2016/01/26 (Invited)

[5] Activator-Doped Amorphous Materials for Luminescent Application, H. Masai, CIMTEC2016, Perugia, 2016/06/08 (Invited)

[6] Luminescence of Ce-Doped Lithium Borosilicate Glass, H. Masai, A. Torimoto, T. Usui, T. Yanagida, K-J Ceramics, Daejeon, 2016/11/18 (Invited)

[7] Relationship between crystallization of oxide glasses and the preparation condition, H. Masai, Y. Takahashi, T. Fujiwara, Glass & Optical Materials Division Annual Meeting, Waikoloa, 2017/05/25 (Invited)

[8] Luminescence of activators in glass depending on the preparation process, H. Masai, ICACC 2018, Daytona Beach, 2018/01/23 (invited)

など、国際発表 50 件、国内発表 70 件

〔産業財産権〕

取得状況(計 1 件)

名称:「白色発光ガラス、ガラス被覆発光素子及び発光装置」

発明者: 正井博和、横尾俊信、藤原巧、松本修治

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特許 5842269

取得年月日: 2016.1.13

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

正井 博和 (MASAI Hirokazu)

(国) 産業技術総合研究所・材料・化学領域・主任研究員

研究者番号: 10451543

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

柳田 健之 (YANAGIDA Takayuki)

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号: 20517669

河口 範明 (KAWAGUCHI Noriaki)

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授

研究者番号: 50642782

岡田 豪 (OKADA Go)

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教

研究者番号: 90757840

是枝 聡肇 (KOREEDA Akitoshi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号: 40323878

大窪 貴洋 (OHKUBO Takahiro)

千葉大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 50534541

小原 真司 (KOHARA Shinji)

物質材料研究機構・先端材料解析研究拠点・主幹研究員

研究者番号: 90360833

小野寺 陽平 (ONODERA Yohei)

京都大学・複合原子力科学研究所・助教

研究者番号: 20531031

山田 泰裕 (YAMADA Yasuhiro)

千葉大学・大学院理学研究科・准教授

研究者番号: 50532636

(4) 研究協力者