

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 25 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360284

研究課題名(和文)多機能融合酸化物薄膜への機能元素ドーピング効果とフェロイック物性間の関係解明

研究課題名(英文)Functional element doping effect to multifunctional oxides thin films and elucidation of relationships among ferroic properties

研究代表者

坂本 渉 (Sakamoto, Wataru)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教授

研究者番号：50273264

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円、(間接経費) 4,560,000円

研究成果の概要(和文)：複数のフェロイック機能を併せ持つ機能融合酸化物薄膜の作製を組成制御が容易な化学溶液プロセスにより行い、望む物性を達成するための機能元素(Mn)のドーピングの最適化に成功した。また、機能元素のドーピングによる機能向上メカニズムの解明については、ドーピング元素の価数状態と電気的特性および磁気的特性の間の欠陥化学に基づく関係について明らかにした。さらに、強誘電ドメインと磁気ドメインの相互作用について可視化に成功した。

研究成果の概要(英文)：Fabrication of the functional fusion oxide thin films which had a number of ferroic properties was carried out by the chemical solution deposition process that composition control was facile, and optimization of the doping of the functional element (Mn) to obtain desired properties was successfully achieved. In addition, for the elucidation of the properties improvement mechanism by the doping of the functional element, the valence state of the doped element and relations based on the defect chemistry between electrical and magnetic properties were clarified. Furthermore, visualization of the interaction between ferroelectric and magnetic domains was achieved.

研究分野：無機材料科学

科研費の分科・細目：工学・無機材料物性

キーワード：誘電体物性 強誘電特性 磁気的特性 格子欠陥 薄膜作製 機能元素ドーピング リーク電流特性

1. 研究開始当初の背景

マルチフェロイクスとは強誘電性、強磁性、強弾性など、二つ以上のフェロイックな特性を併せ持つ多機能融合材料のことを指す。マルチフェロイクスに分類される物質は、磁場による誘電特性の制御や電場による磁気特性の制御ができると考えられており、磁気電気相互作用を利用した次世代メモリや新規センサデバイスなどへの応用が期待されている。そのため、新規強磁性強誘電体の設計・合成および電子デバイス化に繋がる薄膜化と物性制御に関する研究が現在強く求められるようになった。しかしながら、強磁性と強誘電性を併せ持つ化合物の候補は非常に少なく、通常のデバイス作動温度域でそれらの性質を安定して同時発現させるためには、スピン構造の制御および十分な絶縁性の達成が困難なため非常に難しい。よって、これまで単結晶・多結晶体といったバルク材料において望む十分な物性を有する試料の作製は非常に困難であった。しかし最近、薄膜作製の例ではあるが、ペロブスカイト BiFeO_3 薄膜において巨大な強誘電性の発現およびその磁気的性質が報告された。それ以後、機能融合材料に関する研究が精力的に行われるようになった。研究代表者らも、他に先駆けて結晶格子歪み制御により、強磁性と強誘電性を室温域で同時に示す BiFeO_3 - PbTiO_3 系薄膜の作製に成功した。しかし、実用薄膜材料としては、デバイス作動温度域での良好な強誘電性と強磁性の同時発現、高電場印可下での電気抵抗率劣化などの問題点があり、薄膜中の格子欠陥と各物性との関係、これら薄膜が発現する磁気的特性と構成遷移金属イオンの価数(電子)状態、さらには電気的緒特性との相関の解明も十分になされておらず、実用化には至っていない。そのため、今後の更なる研究の発展に期待が持たれるようになった。

2. 研究の目的

本研究では、巨大物性の発現および新しい電子デバイス誕生の可能性を秘めた格子歪みを有する磁性元素含有ペロブスカイト型酸化物 (BiFeO_3) を中心とした強誘電性固溶体薄膜を実現するため、以下のようなことを目的とした。

- (1) デバイス作動温度域で望むマルチフェロイック機能を発現する BiFeO_3 系化合物薄膜を精密な組成制御が可能な化学的手法による作製を行う。
- (2) 目的化合物組成の設計により、結晶構造の安定化はもちろんのこと、結晶構造中の格子歪みの維持と欠陥生成による影響を最小限にする。
- (3) 望む物性発現の鍵を握る機能ドーブ元素(イオン)に関する働きを明らかにするため、局所構造(主に電子構造)解析と結晶構造および微構造解析、磁気・電気特性解析をもとに、各種特性の向上メカ

ニズムについて明らかにし、 BiFeO_3 化合物と同様に揮発性構成元素を含む他の強誘電体薄膜の例も用いて検証を行う。

- (4) 磁気的特性と電気的特性間の関係(強磁性ドメインと強誘電ドメインの相互作用)の解明を達成し、本材料系薄膜の将来の電子デバイス応用に向けた可能性探索を行う。

3. 研究の方法

本研究では、環境に優しい溶液を用いる化学的方法により薄膜デバイス用基板材料への薄膜の直接作製を行い、望む機能を得るために他のペロブスカイト型化合物(ABO_3)との固溶体形成を中心に考えた材料設計、半導体プロセスに適用可能な薄膜作製条件の最適化、さらに応用上重要となる薄膜の絶縁性に及ぼす因子の解明(リーク電流のメカニズム解析)とその向上のための機能元素のドーブ効果に関する局所構造解析および磁気電気相互作用の評価を達成することを目標とし、 BiFeO_3 系多機能融合材料薄膜を強磁性・強誘電性の両特性を利用した将来の新規薄膜デバイスへ応用するためのアプローチを行う。

ここでは、ペロブスカイト結晶構造の格子歪み状態とドメイン反転挙動、さらには結晶中の各構成元素(特に機能発現の鍵を握る機能元素)の状態と格子中の欠陥構造を正確に解析する手法を確立し、望む機能の発現メカニズムの解明と各特性の向上を達成する。強誘電性と強磁性という全く異なる物性間に働く関係(それぞれのドメインの相互作用)について評価を行えるようにする。さらに光学的特性についても調べ、実際の薄膜デバイス応用へ向けた問題点の抽出と解決策の提案を行い、薄膜の微細加工に関する検討も行った。

4. 研究成果

- (1) マルチフェロイック BiFeO_3 系薄膜における結晶構造・特性の制御と機能元素ドーブ効果の解明に関しては、以下に示す成果が得られた。

出発金属-有機化合物原料の選択、溶液反応の制御など種々の調製条件の最適化により得られた均一かつ安定な BF-ATiO_3 (A : Pb , Ba) 系前駆体溶液から作製した薄膜(結晶化処理後)の結晶相について調べた。その結果、 ATiO_3 (AT) を 20 mol%以上固溶した BF-AT 薄膜において幅広い温度域でペロブスカイト単相の薄膜が得られ、 ATiO_3 固溶によるペロブスカイト構造の安定化が達成された。また、表面微構造も ATiO_3 固溶により薄膜中の結晶粒子の粒径のばらつきが少なくなり、均質な微構造が得られるようになった。一方、比較のため作製した BiFeO_3 薄膜においては、ペロブスカイト単相膜が得られるプロセスウィンドウが非常に狭くなり、電気的特性においても、電気絶縁性が低く、磁化値も小さく、反強磁性に近い挙動を示した。試料の抵抗率が

高くなる低温域(83 K)における強誘電特性を評価した結果、この化合物に特徴的な巨大な強誘電性は確認できたものの、分極方位の反転に重要な抗電界が非常に大きい(500 kV/cm以上)という欠点が明らかとなった。

本研究で検討した BiFeO_3 への ATiO_3 の固溶は絶縁性の向上と抗電界の減少による強誘電特性の改善にも効果的であることがわかった(図1に BaTiO_3 との固溶体系における強誘電特性の BaTiO_3 固溶量依存性を示す)。しかしながら、作製した BF-AT 薄膜の電気的特性において、特に比較的 ATiO_3 の固溶量が小さい組成領域での絶縁特性の改善は十分でなく、印加可能電界も小さく、良好な強誘電特性を得ることが困難であった。一方、磁気的特性については、図2に示す BaTiO_3 との固溶体系における BaTiO_3 固溶量依存性のデータのように ATiO_3 の固溶(10-20 mol%)により飽和磁化および残留磁化の増加が見られ、かつ強磁性体に特徴的な挙動の安定化が達成された。ここで、電気的な特性の改善を目的として、BF-AT 薄膜(AT: 20-40 mol%)中の Fe サイトへの機能元素としての Mn ドープを試みた結果、強誘電特性は大きく改善された。Mn (3-5 mol%) ドープした薄膜は絶縁性が大きく向上し、印加可能電界が増加したため、組成によっては比較的大きな残留分極値($P_r > 50 \mu\text{C}/\text{cm}^2$)を得ることができた(図3に 30 mol% の PbTiO_3 を含有する $0.7\text{BiFeO}_3\text{-}0.3\text{PbTiO}_3$ 薄膜における強誘電特性の Mn ドープ量依存性を示す)。また、Mn ドープによるリーク電流特性の改善について各種リーク電流メカニズムを考えた解析を行ったところ、Mn ドープした薄膜では比較的高電界域までオーミックな導電挙動が維持され、かつアクセプタとして働く多価イオンである Mn イオンの働きによって高電界域でのリーク電流の急激な上昇およびプール・フレネル導電も抑制されていることがわかった。特に高電界域でのリーク電流密度は Mn ドープにより2桁以上減少し、薄膜の抵抗率が大きく上昇した(図4に 30 mol% の BaTiO_3 を含有する $0.7\text{BiFeO}_3\text{-}0.3\text{BaTiO}_3$ 薄膜におけるリーク電流特性の Mn ドープ量依存性を示す)。

さらに、 BiFeO_3 系マルチフェロイック酸化物薄膜における機能元素(特に Mn)のドープがその電気的特性に及ぼす影響について、磁気的特性を中心に欠陥構造との関係を調べた。X線光電子分光分析など分光学的手法による解析により、Mn のドープにより Mn は BiFeO_3 構造中に Mn^{2+} として導入されやすく、それにより薄膜中の Fe^{2+} の割合が減少し、 Fe^{3+} イオンの価数変化が抑制されるという結果が得られた。また、磁気的特性の詳細な評価を行ったところ、化合物中の Fe サイトに対する Mn 置換量を変化させると磁化値が増減する挙動(図5に 30 mol% の BaTiO_3 を含有する $0.7\text{BiFeO}_3\text{-}0.3\text{BaTiO}_3$ 薄膜における各 Mn ドープ量に対する磁化 - 磁場特性を示す)が得

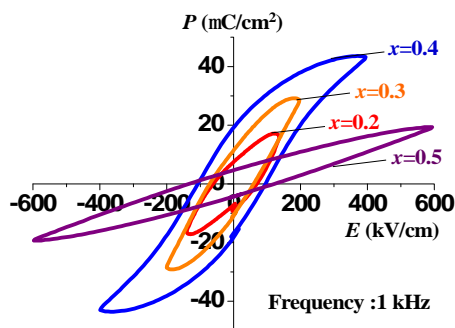


図1 室温で測定した(1-x)BiFeO₃-xBaTiO₃薄膜の各BaTiO₃固溶量に対する分極(P) - 電界(E)特性

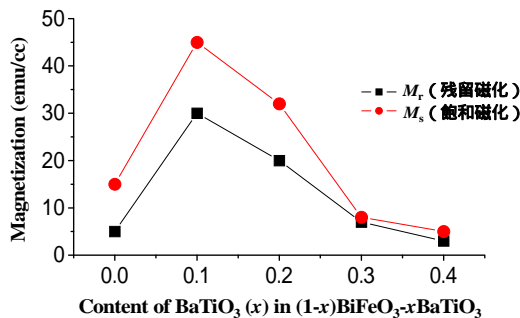


図2 10 Kで測定した(1-x)BiFeO₃-xBaTiO₃薄膜のBaTiO₃固溶量と飽和磁化(M_s)および残留磁化(M_r)との関係

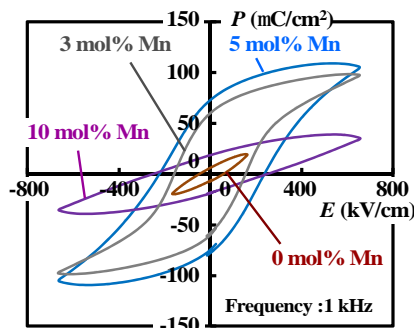


図3 室温で測定した0.7BiFeO₃-0.3PbTiO₃薄膜の各Mnドープ量に対する分極(P) - 電界(E)特性

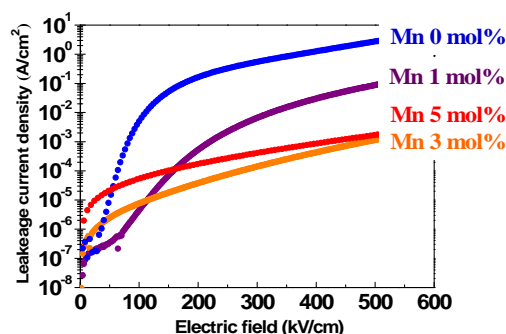


図4 室温で測定した0.7BiFeO₃-0.3BaTiO₃薄膜の各Mnドープ量に対するリーク電流密度 - 電界特性

られ、これにより微量ドープ元素の Mn の価数変化が薄膜の磁気特性に影響を及ぼし、かつ磁気特性と薄膜の強誘電特性(+絶縁特性)改善との間には密接な関係があることを見いだした。これにより薄膜の磁気特性から

薄膜中の欠陥構造の予測が初めて可能となり、ドーパ量の最適化を含め目標である室温におけるマルチフェロイック特性を発現するBiFeO₃系薄膜の作製に成功した(図6に20 mol%のBaTiO₃を含有する0.8BiFeO₃-0.2BaTiO₃薄膜における5 mol% Mnドーパ薄膜に対する分極-電界および磁化-磁場特性を示す)。

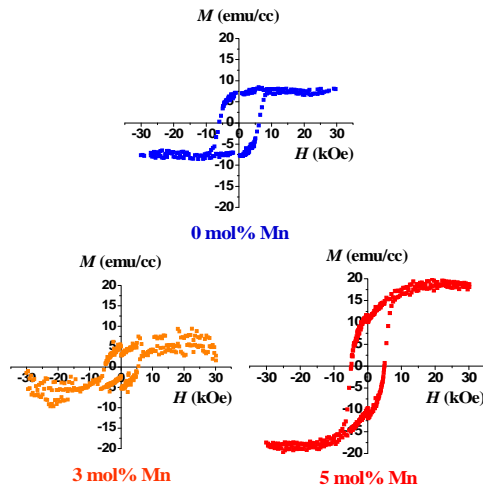


図5 10 Kで測定した0.7BiFeO₃-0.3BaTiO₃薄膜の各Mnドーパ量と磁化(M) - 印可磁場(H)曲線との関係

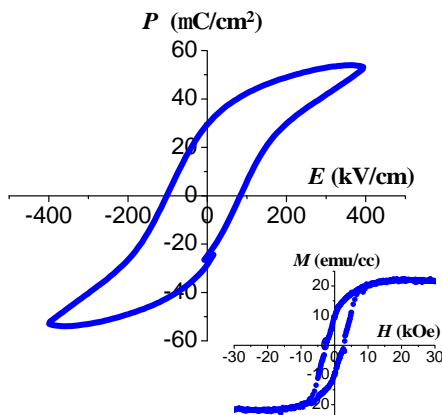


図6 室温で測定したMn 5 mol%ドーパ0.8BiFeO₃-0.2BaTiO₃薄膜の分極(P) - 電界(E)および磁化(M) - 磁場(H)曲線

さらに Mn ドーパ以外の重要なプロセス因子として、仕込み(溶液調製)時での揮発性の構成元素の過剰組成の設定が挙げられる。これにより金属陽イオンの欠損に起因する異相の生成が抑制でき、ペロブスカイトBF相単相への結晶化および強誘電特性改善の鍵となる結晶中での欠陥生成の抑制に有効であることがわかった。

(2) (1)で考察した機能元素ドーパ効果の検証については、以下に示す成果が得られた。

BiFeO₃系マルチフェロイック酸化物と同様に構成元素として揮発性元素(K, Na, Bi)を含有するペロブスカイト強誘電体酸化物

の薄膜における機能元素の微量ドーパがその電気的特性(特に絶縁特性)に及ぼす影響について明らかにした。機能元素ドーパ効果の検証については、(K,Na)NbO₃(KNN)および(Bi_{1/2}Na_{1/2})TiO₃(BNT)薄膜を用いて検討を行った。目的化合物中の揮発性元素の過剰組成を含む薄膜作製条件の最適化により、揮発性金属イオンの加熱処理時の揮発による不純物相(Aサイトイオン欠損相)の生成を抑制することができ、ペロブスカイト単相の薄膜が作製可能となった。しかしながら、ここで作製したKNN薄膜においては、酸素欠陥の生成を伴ったKおよびNa成分の揮発によるショットキー欠陥の生成が原因となり絶縁性の高い試料の作製が難しく、その大きなリーク電流により印可電界を高くすることができず、良好な電気的特性を得ることが困難であった。そこで、ここでは特に(1)と同様に機能元素として特性向上の効果が顕著であったマンガン(Mn)を中心に検討した。図7(a)にMnドーパによる(K_{0.5}Na_{0.5})NbO₃薄膜における強誘電特性の改善例を示す。Mnドーパについては薄膜中の揮発性金属元素(Pb, Bi, アルカリ金属など)が結晶化のための加熱処理過程で酸素空孔の生成を伴って欠損した後に、生成した酸素空孔が再び酸化されることに起因するホール導電(絶縁性劣化)を抑制する効果があることを実験的に明らかにした。BiFeO₃系化合物においてはFeのようなMnと同様の電子構造を有する遷移金属元素を含むため、Mnの価数解析が非常に困難であったが、ニオブ酸・チタン酸化合物のような他のペロブスカイト強誘電体酸化物について電子スピン共鳴(ESR: Electron Spin Resonance)法を用いて調べることで、Mnの価数状態解析を行うことができた。例えば、KNN薄膜中にドーパしたMnは2価あるいは3価の状態で存在していることが示唆され、この価数変化によりキャリアの補足を行い、薄膜の絶縁性を高めていることがわかった(図7(b)を参照)。このようなMnドーパ効果は、KNNと同様に揮発性元素が主構成成分であるBNT強誘電体薄膜においても確認された。この結果は(1)における、BiFeO₃系マルチフェロイック酸化物薄膜での光電子分光法による解析結果を支持するものであり、ドーパ元素であるMnには、その価数変化により上記ホール導電の原因となるホールをトラップし、薄膜の絶縁性を高めるはたらきがあることがわかった。

(3) 複数の機能間の相互作用に関する問題点と新規応用探索については、以下に示す成果が得られた。

強誘電特性と磁気特性間にはたらく磁気・電気相互作用の検知に関して、本研究では導電性カンチレバーを備えた走査型プローブ型顕微鏡(静電気力顕微鏡)を応用し、作製した薄膜中の任意の領域への電界印可による強誘電ドメイン反転現象を生じさせ、

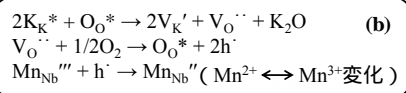
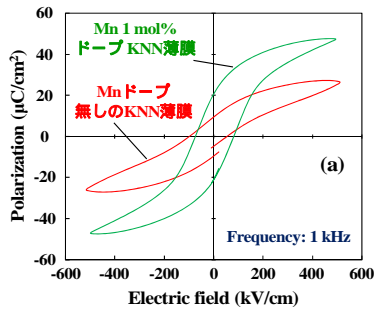


図7 (a) 室温で測定したMn 1 mol%ドープあり・なしに対する $(K_{0.5}Na_{0.5})NbO_3$ 薄膜の分極(P) - 電界(E)曲線および (b) アルカリ金属元素の揮発による欠陥形成と酸素空孔の酸化によるキャリア(ホール)生成、Mnイオンの価数変化によるキャリアトラップのメカニズム

その挙動を撮像することに成功した(図8(a)に静電気力顕微鏡により撮像したデータを示す)。さらに、電界印可により分極反転させたエリアにおいてその領域の磁気的な構造変化を磁気力顕微鏡像として撮像することに成功し、磁気的な応答変化(磁気電気相互作用)を検知する目標も達成することができた(図8(b)に磁気力顕微鏡により撮像したデータを示す)。しかし、デバイス化を考えた磁化現象と分極反転現象の相互作用から生じる信号強度という観点からは十分な変化とは言えなかった。

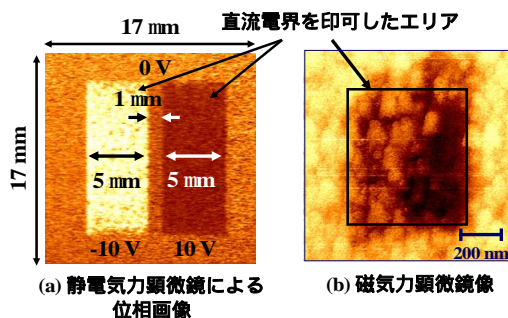


図8 室温で測定したMn 5 mol%ドープ $0.8BiFeO_3-0.2BaTiO_3$ 薄膜における直流電界印可後の(a)静電気力顕微鏡像(位相像)と(b)磁気力顕微鏡像

作製した機能融合材料薄膜のデバイス応用(センサ素子など)に対する可能性探索に関しては、通常の半導体プロセスが微細加工プロセスとして適応可能なこと、バンドギャップが比較的小さい酸化鉄系強誘電体化合物に特徴的な分極反転現象と可視光との相互作用から生じる光電流・光起電力の挙動を見いだすことができた。将来の新しいエネルギーハーベスターとしての応用が期待される。

5. 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 9 件)

1. W. Sakamoto, N. Makino, B.-Y. Lee, T. Iijima, M. Moriya and T. Yogo, "Influence of Volatile Element Composition and Mn Doping on the Electrical Properties of Lead-Free Piezoelectric $(Bi_{0.5}Na_{0.5})TiO_3$ Thin Films", Sensors and Actuators A, 査読有, vol.200, pp.60-67 (2013). DOI: 10.1016/j.sna.2012.10.006
2. Y. Ito, M. Moriya, W. Sakamoto and T. Yogo, "Ferroelectric Properties Improvement of Mn-Doped $0.7BiFeO_3-0.3BaTiO_3$ Thin Films Fabricated by Chemical Solution Deposition", Key Engineering Materials, 査読有, vol.566, pp.159-162 (2013). DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.566.159
3. Y. Ito, W. Sakamoto, M. Moriya and T. Yogo, "Synthesis and Properties of Multiferroic $0.7BiFeO_3-0.3BaTiO_3$ Thin Films by Mn Doping", Ceramics International, 査読有, vol.39, pp.S451-S455 (2013). DOI: 10.1016/j.ceramint.2012.10.112
4. T. Matsuda, W. Sakamoto, B.-Y. Lee, T. Iijima, J. Kumagai, M. Moriya, T. Yogo, "Electrical Properties of Lead-Free Ferroelectric Mn-Doped $K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3-CaZrO_3$ Thin Films Prepared by Chemical Solution Deposition", Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, vol.51, pp.09LA03-1-6 (2012). DOI: 10.1143/JJAP.51.09LA03
5. 坂本 渉, 浅野秀文, "マルチフェロイック酸化物の作製と物性 - $BiFeO_3$ と積層構造 -", まぐね/Magnetics Jpn., 査読有, vol.7, no.3, pp.114-122 (2012). http://www.magnetics.jp/journal/magn_e.html
6. V. Tuboltsev, A. Savin, W. Sakamoto, A. Hieno, T. Yogo, J. Räisänen, "Nanomagnetism in Nanocrystalline Multiferroic Bismuth Ferrite Lead Titanate Films", Journal of Nanoparticle Research, 査読有, vol.13, pp.5603-5613 (2011). DOI: 10.1007/s11051-010-0134-9
7. A. Hieno, W. Sakamoto, M. Moriya, T. Yogo, "Synthesis of $BiFeO_3-Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO_3$ Thin Films by Chemical Solution Deposition and Their Properties", Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, vol.50, pp.09NB04-1-6 (2011). DOI: 10.1143/JJAP.50.09NB04

その他 2 件

〔学会発表〕(計 42 件)

1. 吉田 健司, 守谷 誠, 坂本 涉, 余語 利信, 「化学溶液法により調製した Mn ドープ BiFeO_3 薄膜の光電流特性」, 第 23 回日本 MRS 年次大会 2013 年 12 月 9 日, 横浜情報文化センター (横浜市)
2. W. Sakamoto, N. Makino, K. Yoshida, M. Moriya and T. Yogo, "Synthesis and Photo-Induced Electrical Properties of Bismuth Ferrite-Based Thin Films", The 10th Pacific Rim Conference on Ceramic and Glass Technology (PacRim10-2013), June 4 (2013), San Diego (U.S.A.)
3. W. Sakamoto, Y. Kawabata, D. Maeda, M. Moriya, T. Yogo, "Processing and Characterization of Multiferroic Composite Films Using Metal-Organic Precursor Solutions", 37th International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites (ICACC '13), January 28 (2013), Daytona Beach (U.S.A.)
4. 牧野 成道, Bong-Yeon Lee, 守谷 誠, 坂本 涉, 飯島 高志, 余語 利信, 「 $\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{TiO}_3$ 系化合物薄膜への Mn ドープが特性に及ぼす効果」, 第 32 回エレクトロセラミックス研究討論会, 2012 年 10 月 27 日, 東京工業大学 (東京都)
5. W. Sakamoto, Y. Ito, M. Moriya, T. Yogo, "Chemically Synthesized Mn-Doped BiFeO_3 - BaTiO_3 Thin Films and Their Properties", Materials Science & Technology 2012, October 9 (2012), Pittsburg (U.S.A.)
6. 吉田 健司, 守谷 誠, 坂本 涉, 余語 利信, 「化学溶液法による $\text{Bi}(\text{Fe}, \text{Mn})\text{O}_3$ 薄膜の作製と電氣的・光学的特性」, 日本セラミックス協会第 25 回秋季シンポジウム, 2012 年 9 月 19 日, 名古屋大学 (名古屋市)
7. 坂本 涉, 「マルチフェロイック酸化物の材料設計と強磁性強誘電体薄膜作製へのアプローチ」, 日本セラミックス協会 東海支部 第 44 回東海若手セラミスト懇話会 2012 年夏期セミナー, 2012 年 6 月 28 日, ウェルシーズン浜名湖 (浜松市)
8. 坂本 涉, 「機能性酸化物材料のケミカルプロセスによる合成と特性評価 - 強誘電体薄膜を中心に - 」, 平成 24 年度応用物理学会北陸・信越支部講演会, 2012 年 6 月 6 日, 金沢大学 (金沢市)
9. 坂本 涉, 伊藤 裕矢, 前田 大樹, 守谷 誠, 余語 利信, 「 BiFeO_3 系化合物薄膜への Mn ドープが特性に及ぼす効果」, 第 31 回エレクトロセラミックス研究討論会, 2011 年 10 月 28 日, 東京大学 (東京都)
10. W. Sakamoto, T. Matsuda, Y. Nakashima, B.-Y. Lee, T. Iijima, M. Moriya, T. Yogo, "Mn Doping Effect on Electrical Properties of Lead-Free $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$ Thin Films", Materials Science & Technology 2011, October 18 (2011), Columbus (USA)
11. 坂本 涉, 日恵野 敦, 守谷 誠, 余語 利信, 「化学溶液法により作製した BiFeO_3 - $(\text{Bi}_{0.5}\text{Na}_{0.5})\text{TiO}_3$ 薄膜の電氣的特性に対する Mn ドープ効果」, 第 72 回応用物理学会学術講演会 2011 年 8 月 31 日, 山形大学 (山形市)
12. W. Sakamoto, Y. Ito, M. Moriya, T. Yogo, "Mn Doping Effect on Electrical and Magnetic Properties of BiFeO_3 - BaTiO_3 Thin Films Prepared by Chemical Solution Deposition", International Symposium on Integrated Functionalities (ISIF) 2011, August 2 (2011), Cambridge (England)
13. W. Sakamoto, Y. Ito, A. Iwata, M. Moriya, T. Yogo, "Synthesis and Properties of Multiferroic BiFeO_3 -Based Thin Films by a Crystal Lattice Distortion Control", 12th Conference of the European Ceramic Society (ECerS XII), June 22 (2011), Stockholm (Sweden)

その他 29 件

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂本 涉 (SAKAMOTO, Wataru)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・准教授

研究者番号: 5 0 2 7 3 2 6

(3) 連携研究者

余語 利信 (YOGO, Toshinobu)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授
研究者番号: 0 0 1 3 5 3 1 0