

(様式第5号)

実施課題名 X線吸収分光による錫ドープ酸化インジウム結晶の局所構造解析
Local structure analysis of tin-doped indium oxides by X-ray absorption spectroscopy

著者・共著者 氏名 蟹江澄志, 西堀麻衣子, 真木祥千子, 二宮翔, 瀬戸山寛之
Kiyoshi Knie, Maiko Nishibori, Sachiko Maki, Sho Ninomiya, Hiroyuki Setoyama

著者・共著者 所属 東北大学, 九州大学, 九州シンクロトロン光研究センター
Tohoku University, Kyushu University, Kyushu Synchrotron Light Research Center

- ※1 先端創生利用(長期タイプ)課題は、実施課題名の末尾に期を表す(I)、(II)、(III)を追記してください。
- ※2 利用情報の公開が必要な課題は、本利用報告書とは別に利用年度終了後2年以内に研究成果公開(論文(査読付)の発表又は研究センターの研究成果公報で公表)が必要です(トライアル利用を除く)。
- ※3 実験に参加された機関を全てご記載ください。
- ※4 共著者には実験参加者をご記載ください(各実験参加機関より1人以上)。

1. 概要 (注: 結論を含めて下さい)

「インク塗布法」により ITO 薄膜を調製する上では、ITO ナノ粒子の低抵抗化が必要不可欠である。本研究では、i) スズドープ量の異なる ITO ナノ粒子および ii) サイズ・形態制御により得た抵抗値の異なる ITO ナノ粒子 について、X線吸収分光によるスズドープ酸化インジウム結晶の局所構造解析を行った。その結果、抵抗値が異なるサンプルについても In および Sn の価数に大きな変化は見られず、抵抗値の低下は他の要因であることが示された。

(English)

Introduction of low resistivity into ITO nanoparticles is essential for the preparation of ITO thin films by the ink-coating method. In this study, local structure analysis of tin-doped indium oxide (ITO) crystals was performed by X-ray absorption spectroscopy for i) ITO nanoparticles with different amounts of tin doping and ii) ITO nanoparticles with different sizes and morphologies. As a result, there was no significant change in the valence of In and Sn even for the samples with different resistance values, indicating that the decrease in resistance was due to other factors.

2. 背景と目的

現在、薄型テレビ、パソコン、モバイル機器や太陽電池には欠かすことのできない透明電極には、低抵抗性・高透過率や化学的安定性の観点からスパッタ製膜法による ITO (スズドープ酸化インジウム) 薄膜が広く使用されている。一方、フレキシブルフィルムや電子ペーパーへの適用を考慮すると、スパッタ法に置き換わる根本的な技術革新が必要不可欠である。その一つとして、ITO ナノ粒子を基板上に塗工する「インク塗布法」に注目が集まっている。「インク塗布法」の問題点としては、用いる ITO ナノ粒子の抵抗値がスパッタ成膜に比べて高いことが挙げられる。代表者らはこれまでに、「ナノ粒子のサイズ・形態制御液相合成法」により、低抵抗 ITO ナノ粒子の合成に取り組んできた。その結果、従来の ITO ナノ粒子に比べ、二桁以上抵抗値が低いナノ粒子の合成に成功している。¹⁾ しかしながら、スパッタ法に対抗するには、さらに一桁以上抵抗値を下げるのが必須である。この際、さらなる低抵抗の発現には、ドーパントとしてのスズのナノ粒子結晶中での状態、すなわち、酸素欠陥の分布を詳細に解明することが必要不可欠である。具体的には、i) スズドープ量の異なる ITO ナノ粒子および ii) サイズ・形態制御により得た抵抗値の異なる ITO ナノ粒子 について、X線吸収分光によるスズドープ酸化インジウム結晶の局所構造解析を行う事を目的としている。TEM 観察, X線構造解析, 抵抗特性評価, スズドープ量測定, 比表面積測定, および UV-vis-NIR 測

定など、多岐にわたる各種比較分析を行った材料について局所構造解析を行うことは、多角的な解析となり、より精密な構造解析を行う際の対象としても好適な材料であると考えられる。

3. 実験内容 (試料、実験方法、解析方法の説明)

図1に、測定に用いた立方体型形状 ITO ナノ粒子および突起型形状 ITO ナノ粒子²⁾の透過型電子顕微鏡像を示す。この際、Snのドーパ量は、Inに対して10 mol%とした。また、XAFS測定に際し、ITO粉を水素雰囲気下で還元熱処理することにより、処理前後の効果を検証することとした。ITO粉は、乳鉢を用いて窒化ホウ素粉に混合・希釈後、ペレット成形することで測定サンプルとした。室温でのXAFSスペクトルの吸収端は、Sn-K (29.2 keV), In-K (27.9 keV)とし、透過法にて測定を行った。得られた吸収スペクトルの解析は、Athenaにより行った。

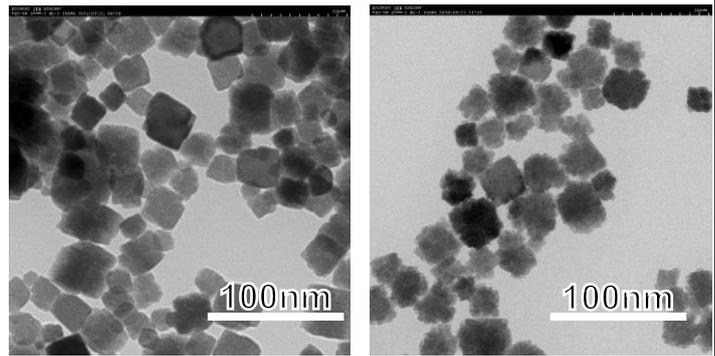


図1. XAFS測定に用いた立方体型形状 ITO ナノ粒子 (左) と突起型形状 ITO ナノ粒子 (右) の TEM 像。

4. 実験結果と考察

図2および図3に、In-K edge および Sn-K edge の XANES 測定結果をそれぞれ示す。標準サンプルとして用いた In Foil に比べ、吸収端が高エネルギー側へシフトしていることから、In は In³⁺ の状態であると理解できる (図2)。還元熱処理前後 (B: 還元処理前, A: 還元処理後) において、スペクトル形状に変化が見られなかったことから還元熱処理前後において、In の価数変化はないと理解できる。また、Sn-K edge XANES 測定結果から (図3)、突起形状を有する ITO ナノ粒子 (還元処理前: merge_Sn_21a4, 還元処理後: merge_Sn_20a5) は、立方体型の ITO 粒子 (還元処理前: merge_Sn_19a6, 還元処理後: merge_Sn_18a9) の吸収端よりわずかながら低エネルギーシフトしている様子がうかがえた。また、エッジジャンプについては、還元熱処理後のサンプルの方が、還元熱処理前のものに比べて高いことがわかった。これらのことから、ITO 粒子の低抵抗化の要因としては、In の価数変化よりも、Sn の価数変化により影響を受けることが推察されるが、その変化はわずかであることから、今後のさらなる解析が必要であると考えられる。

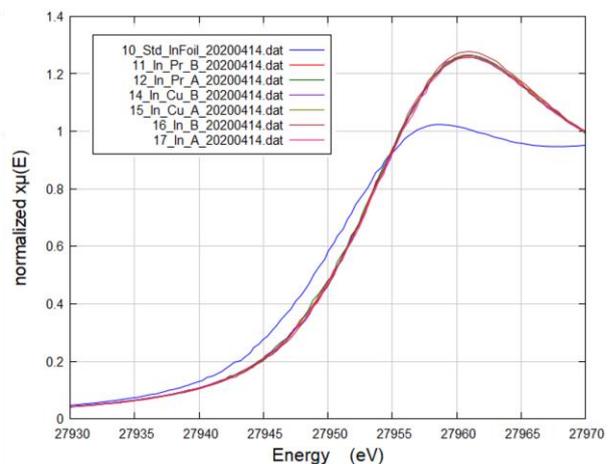


図2. ITO ナノ粒子の In-K edge XANES 測定結果。

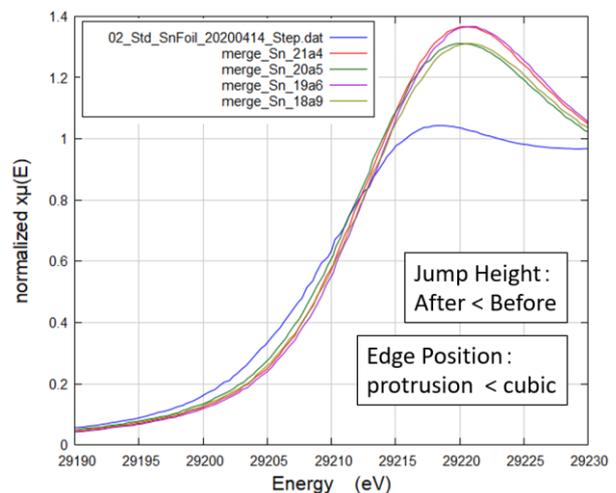


図3. ITO ナノ粒子の Sn-K edge XANES 測定結果。

5. 今後の課題

今回の測定では、ITO ナノ粒子のさらなる低抵抗化の実現を目指し、X線吸収分光法により、In および Sn の価数変化および局所構造変化について解析を行った。その結果、Sn の価数変化がわずかに観察された。従って、Sn の価数変化が抵抗値の変化に影響を及ぼす可能性があることが示唆された。しかしながら、その変化がわずかであることから、その確証を得るには、Sn のドーパ量を変えたサンプルに関する測定や精密結晶構造解析などの併用によるさらなる解析が必要であると考えられる。今後のさらなる解析により、低抵抗化の指針を導く予定である。

6. 参考文献

1) Quaternary Ammonium Hydroxide-assisted Solvothermal Synthesis of Monodispersed ITO Nanoparticles

with a Cubic Shape: **K. Kanie***, T. Sasaki, M. Nakaya, and A. Muramatsu; *Chemistry Letters*, **42**, 738-740 (2013).

2) Single-Crystalline Protrusion-Rich Indium Tin Oxide Nanoparticles with Colloidal Stability in Water for Use in Sustainable Coatings: R. Suzuki, Y. Nishi, M. Matsubara, A. Muramatsu, and **K. Kanie***, *ACS Applied Nano Mater.* **3** (5), 4870-4879 (2020).

7. 論文発表・特許 (注: 本課題に関連するこれまでの代表的な成果)

1) Direct Synthesis and Size Control of Highly Crystalline Cubic ITO Nanoparticles in Concentrated Solution System: Y. Endo, T. Sasaki, **K. Kanie***, A. Muramatsu, *Chem. Lett.*, **37**, 1278-1279 (2008).

2) One-step Solvothermal Synthesis of Cubic-shaped ITO Nanoparticles Precisely Controlled in Size and Shape and their Electrical Resistivity: T. Sasaki, Y. Endo, M. Nakaya, **K. Kanie***, A. Nagatomi, K. Tanoue, R. Nakamura, A. Muramatsu, *J. Mater. Chem.*, **20**, 8153-8157 (2010).

3) Quaternary Ammonium Hydroxide-assisted Solvothermal Synthesis of Monodispersed ITO Nanoparticles with a Cubic Shape: **K. Kanie***, T. Sasaki, M. Nakaya, and A. Muramatsu; *Chemistry Letters*, **42**, 738-740 (2013).

4) Direct Hydrothermal Synthesis of Size-Controlled Co_3O_4 Nanocubes under Highly Condensed Conditions: **K. Kanie***, Y. Tsujikawa, A. Muramatsu, *Materials Transactions*, **58**, 1014-1019 (2017).

5) Liquid Phase Synthesis of Functional Inorganic Nanoparticles Controlled in Size and Shape and Application to Hybrid Materials by the Surface Modification: **K. Kanie***, A. Muramatsu, *J. Jpn. Assoc. Cryst. Growth*, **44**, 66-73 (2017).

6) Mechanochemically Assisted Hydrothermal Synthesis of Sn-substituted MFI-type Silicates: **K. Kanie***, M. Sakaguchi, F. Muto, M. Horie, M. Nakaya, T. Yokoi, A. Muramatsu, *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **19**, 545-553 (2018).

7) Ambient Aqueous-Phase Synthesis of Copper Nanoparticles and Nanopastes with Low-Temperature Sintering and Ultra-High Bonding Abilities: Y. Kamikoriyama, H. Imamura, A. Muramatsu, **K. Kanie***, *Scientific Reports*, **9**, 899 (2019).

8) Single-Crystalline Protrusion-Rich Indium Tin Oxide Nanoparticles with Colloidal Stability in Water for Use in Sustainable Coatings: R. Suzuki, Y. Nishi, M. Matsubara, A. Muramatsu, and **K. Kanie***, *ACS Applied Nano Mater.* **3** (5), 4870-4879 (2020).

8. キーワード (注: 試料及び実験方法を特定する用語を2~3)

ナノ粒子, 錫ドープ酸化インジウム, X線吸収分光

9. 研究成果公開について (注: ※2に記載した研究成果の公開について①と②のうち該当しない方を消してください。また、論文(査読付)発表と研究センターへの報告、または研究成果公報への原稿提出時期を記入してください。提出期限は利用年度終了後2年以内です。例えば2018年度実施課題であれば、2020年度末(2021年3月31日)となります。)

長期タイプ課題は、ご利用の最終期の利用報告書にご記入ください。

① 論文(査読付)発表の報告

(報告時期: 2021年 3月)