

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289239

研究課題名(和文)三元系ウルツ鉱型ナローギャップ酸化半導体；薄膜化・薄膜太陽電池素子への展開

研究課題名(英文) Ternary wurtzite-type narrow band gap oxide semiconductor; Fabrication of thin-films and application to thin-film solar cells

研究代表者

小俣 孝久 (Omata, Takahisa)

東北大学・多元物質科学研究所・教授

研究者番号：80267640

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では前駆体 -NaGaO_2 の薄膜堆積と、そのイオン交換により -CuGaO_2 薄膜の作製方法を研究した。 -NaGaO_2 をターゲットとしたスパッタ法で -NaGaO_2 薄膜の堆積に成功した。薄膜を CuCl 蒸気に暴露するイオン交換により、薄膜表面状態が良好な -CuGaO_2 薄膜を得た。電子ビーム蒸着法では、基板に応じた配向方位の制御も可能であることを見出し、イオン交換時の亀裂発生の抑制技術を確立した。一方、スパッタ法、蒸着法などのPVD法ではNaが欠損した組成の -NaGaO_2 膜となることが明らかとなり、CVD法が化学量論組成の -NaGaO_2 薄膜作製に適した方法であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：We studied fabrication method of -CuGaO_2 thin-films. First, we fabricated -NaGaO_2 thin-films as precursor materials; then, the film was subjected to ion-exchange of Na^+ ions in the precursor films with Cu^+ . We successfully fabricated -NaGaO_2 thin-films by magnetron sputtering using -NaGaO_2 as a target material. -CuGaO_2 thin-films that exhibits good surface morphology were fabricated by ion-exchange of Na^+ ions in the precursor -NaGaO_2 thin-film with Cu^+ ions in CuCl vapor. Although the preferential orientation of the -NaGaO_2 films could not be controlled by magnetron sputtering, it was successfully controlled using electron-beam evaporation and sapphire substrates with various crystal orientations. However, the composition of precursor -NaGaO_2 film fabricated by sputtering and evaporation methods exhibited Na-poor composition. We found CVD is the preferable method to fabricate high quality and stoichiometric -NaGaO_2 precursor films.

研究分野：無機材料科学

キーワード：結晶成長 太陽電池 セラミックス 先端機能デバイス 光物性

1. 研究開始当初の背景

ZnO, IGZO など $nd^{10}(n+1)s^0$ 電子配置の典型元素から成る酸化物半導体は、LED や TFT などの応用が広がり、再び注目を集めている。従来、酸化物半導体に求められる機能では、酸化物のワイドバンドギャップ (>3eV) が中心的役割を担ってきた。2eV 以下のナローギャップの領域では、III-V や II-VI カルコゲナイド化合物半導体の独壇場となっているが、酸化物の大気中での安定性や、酸素は安全で豊富な元素という特徴を活かせば、ナローギャップ領域でも活躍の機会が必ずある。代表者は、ウルツ鉱型の派生構造 (β -NaFeO₂ 型構造) を有する三元系 I-III-O₂ 化合物でナローギャップ酸化物半導体の物質探索を行い、バンドギャップ 1.47eV の直接遷移型半導体 β -CuGaO₂ を見出し、光吸収を強いこと、p 型伝導性であり ZnO との格子不整合が小さいので ZnO とのヘテロ p-n 接合が期待できること、n 型伝導性も期待できるのでホモ p-n 接合の可能性もあることなどを明らかにしてきた。

2. 研究の目的

β -CuGaO₂ の 1.47eV というバンドギャップは単接合太陽電池の最高の理論限界変換効率を達成できる値であり、1 項で示した β -CuGaO₂ の特徴は単接合薄膜太陽電池に最適な材料であることを示している。本研究では、 β -CuGaO₂ を用いた全酸化物薄膜太陽電池を開発することを目指し、 β -CuGaO₂ 薄膜の作製方法を研究した。

3. 研究の方法

(1) スパッタ法による β -NaGaO₂ 薄膜の作製とそのイオン交換

NaCO₃ と Ga₂O₃ を原料とした固相反応法により、スパッタリングのターゲットとする β -NaGaO₂ 粉末を作製した。マグネトロンスパッタリング装置を用いて、表 1 に示す条件で C 面サファイアを基板として、 β -NaGaO₂ 薄膜を堆積した。得られた β -NaGaO₂ 薄膜を図 1 に示す装置中で 300 に保持し、約 10⁰Pa の CuCl 蒸気に暴露することで、前駆体薄膜中の Na⁺ を Cu⁺ へとイオン交換した。イオン交換後の薄膜は超純水で洗浄した。薄膜の組成は EDX により、配向方向は XRD により研究した。

表 1. スパッタ法による β -NaGaO₂ 薄膜作製条件

Substrate	(0001)-Al ₂ O ₃
Gas flow rate	10 sccm
RF power	50 W
Deposition time	4 h
Substrate temperature	550 °C
Sputtering atmosphere	100% Ar
Pressure	0.4 Pa

(2) 電子ビーム蒸着による β -NaGaO₂ 薄膜の配向性制御

固相反応法により作製した β -NaGaO₂ を蒸着源として、加速電圧 3.5~4kV の電子ビーム

を照射し 550 に加熱した各種基板上に堆積を行った。基板には C 面, A 面, R 面のサファイア単結晶と SiO₂ ガラスを使用した。

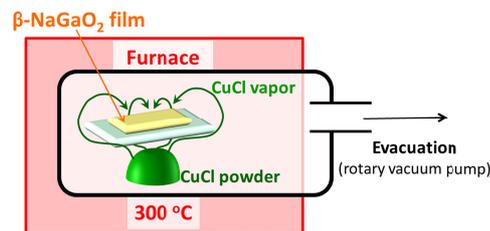


図 1. β -NaGaO₂ 薄膜のイオン交換装置の模式図

4. 研究成果

(1) スパッタ法による β -NaGaO₂ 薄膜の作製とそのイオン交換

図 2 に得られた薄膜の XRD パターンを β -NaGaO₂ 粉末のそれとともに示す。基板以外の回折線は全て β -NaGaO₂ で同定され、 β -NaGaO₂ 薄膜が得られたことを示している。薄膜の XRD パターンでは 200 および 320 回折線の強度が強くその方位に配向していることを示している。EDX により求められた薄膜の組成は Na_{0.9}GaO₂ であり、10%ほど Na が欠損した組成であった。 β -NaGaO₂ 薄膜は大気中の水蒸気と反応し結晶が破壊していくので、イオン交換はグローブボックス中でガラス管内に挿入し、速やかに図 1 の装置にセットして行った。

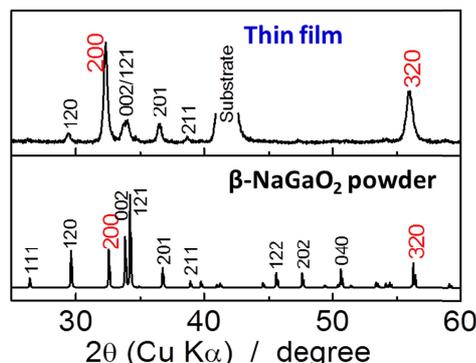


図 2. β -NaGaO₂ 薄膜と粉末の XRD パターン

図 3 にイオン交換前後の EDX スペクトルを示す。イオン交換前に観察された Na K α 線がイオン交換後の薄膜では消失し、新たに Cu K α 線が現れていた。これより CuCl 蒸気への暴露で Na⁺ → Cu⁺ のイオン交換が進行することが明らかとなった。図中の写真を見ると、イオン交換前では無色透明であったものが、黒色に変化しており、ナローギャップの化合物に変わったことを示している。イオン交換後の薄膜の組成は Cu_{0.9}GaO₂ であり、前駆体中の Na の全てが Cu に置換されていた。

図 4 にイオン交換前後の XRD パターンを示す。イオン交換後の回折線は全て β -CuGaO₂ のそれと一致し、 β -CuGaO₂ 薄膜の作製に成功した。注目すべきはイオン交換の前後で配向方位に変化がないことである。このことは、イオン交換がトポタクティックに進行していることを示している。すなわち、前駆体と

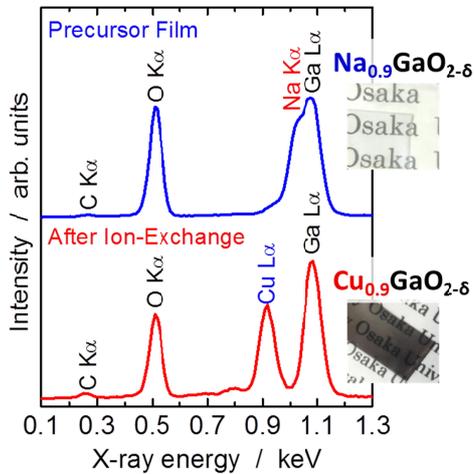


図3. β - NaGaO_2 薄膜のイオン交換前後の EDX スペクトルと薄膜の写真

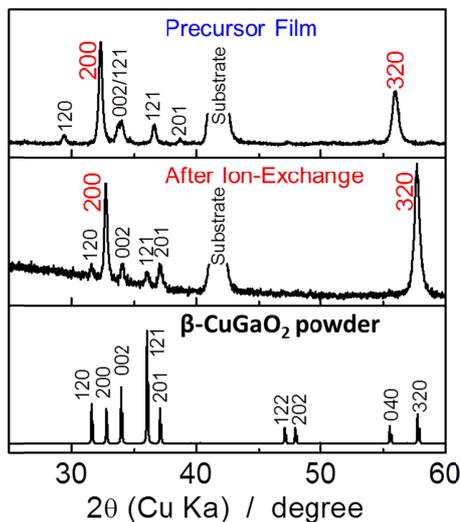


図4. β - NaGaO_2 薄膜のイオン交換前後の XRD パターン

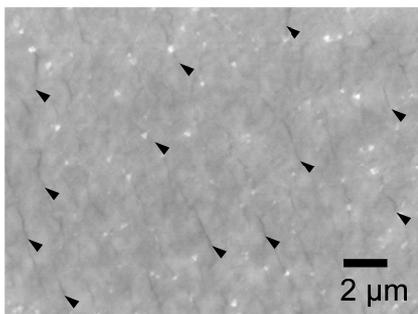


図5. β - CuGaO_2 薄膜の SEM 像

なる β - NaGaO_2 薄膜の配向方位を制御することで、 β - CuGaO_2 薄膜の配向方位を制御できる。

図5に β - CuGaO_2 薄膜の SEM 像を示す。表面は比較的平滑で、イオン交換による膜の損傷はほとんど見られない。しかしながら図中に矢印で示した箇所に多数の亀裂が観察された。 β - NaGaO_2 と β - CuGaO_2 の格子定数および格子体積に基づくと、イオン交換によって9%以上の体積収縮が生じることがわかる。収

縮には異方性があり、 b 軸方向での収縮が最も大きく8.27%に達する。スパッタ法で堆積した β - NaGaO_2 薄膜は100配向性が強いので、薄膜面内に収縮の大きな b 軸が含まれる。このためイオン交換時に薄膜内に亀裂が生じたに違いない。面内の電気的な接続が担保され、多層化した際にショートが生じない良質な β - CuGaO_2 薄膜を得るには、理想的には面内に b 軸を含まない010配向した β - NaGaO_2 薄膜が必要であることが明らかとなった。スパッタリングの条件、基板の種類などを変えて配向方位の制御を試みたが、スパッタリング法では残念ながら制御することはできなかった。

図6に β - CuGaO_2 薄膜の透過スペクトルから算出した T_{auc} プロットを示す。基礎吸収端は1.46eVに観察され、バルク β - CuGaO_2 とバンドギャップが同じであり、結晶相そのもののクオリティは十分高いことがわかる。

これらの研究から、 β - NaGaO_2 薄膜を CuCl 蒸気に暴露する方法で β - CuGaO_2 薄膜が作製できることが見いだされた。

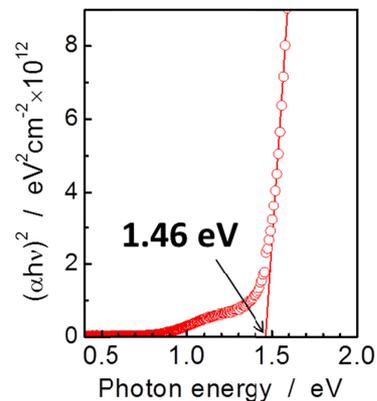


図6. β - CuGaO_2 薄膜の T_{auc} プロット

(2) 電子ビーム蒸着による β - NaGaO_2 薄膜の配向性制御

図7にC面、A面、R面サファイア単結晶および SiO_2 ガラスを基板として、電子ビーム蒸着によって堆積した β - NaGaO_2 薄膜の XRD パターンを示す。C面上では110配向、A面上では121配向、R面上では100配向の薄膜が堆積し、電子ビーム蒸着では基板の方位により β - NaGaO_2 薄膜の配向方位を制御することが見いだされた。スパッタリング法に比べて電子ビーム蒸着法では、基板に到達する際の粒子の運動エネルギーが小さく、基板表面の原子配列の影響を堆積時により受けやすいためであると推察される。 β - NaGaO_2 を β - CuGaO_2 へとイオン交換した際に生じる収縮率は、R面上に堆積した121配向膜が-4.7%と最も小さい。この収縮率はスパッタリング法で得られた100配向膜の面内収縮率(-8.7%)の半分程度であり、イオン交換による膜の亀裂の発生を抑制できそうだ。

薄膜の組成は蒸着時間が長くなると Na 欠損が進むことが明らかとなった。これは Na_2O

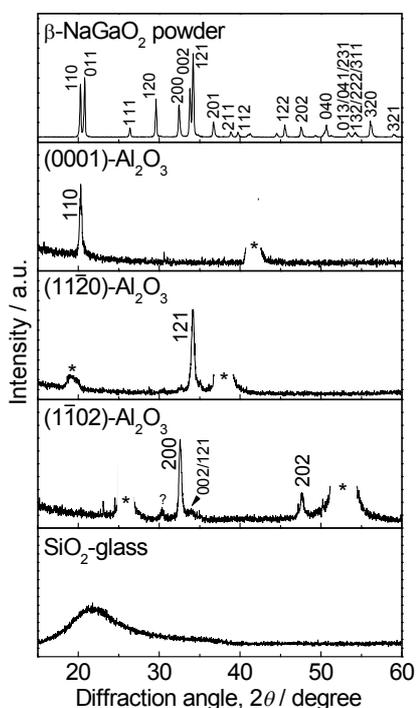


図7. 電子ビーム蒸着法により各種基板に堆積した β - CuGaO_2 薄膜の XRD パターン

の蒸気圧が Ga_2O_3 のそれに比べ著しく大きく、蒸着中に Na_2O 成分が優先的に蒸発し、蒸着の進展とともに蒸着源の組成が Na 欠損へと移っていくことによる。すなわち、電子ビーム蒸着法では、薄膜の配向方位は制御できるものの、化学量論組成の β - NaGaO_2 薄膜を得ることはできないことがわかった。蒸着法同様に堆積時の粒子の運動エネルギーが小さく、かつ、蒸気の組成を自在に制御できる CVD 法であれば、薄膜の配向方位を制御しつつ、化学量論組成を達成した β - NaGaO_2 薄膜が得られるはずである。

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 10 件) 全て査読有

“Multinary wurtzite-type oxide semiconductors: present status and perspectives”, I. Suzuki, T. Omata, *Semicond. Sci. Technol.* 32, 013007(2017) (doi:10.1088/1361-6641/32/1/013007)

“First-principles study of CuGaO_2 polymorphs: Delafossite α - CuGaO_2 and wurtzite β - CuGaO_2 ”, I. Suzuki, H. Nagatani, M. Kita, Y. Iguchi, C. Sato, H. Yanagi, N. Ohashi, T. Omata, *Inorg. Chem.* 55, 7610–7616(2016). (doi: 10.1021/acs.inorgchem.6b01012)

“High temperature phases with wurtzite-derived structure in $\text{Zn}_2\text{LiGaO}_4$ - ZnO alloy system”, M. Kita, T. Fukada, S. Yamaguchi, T. Omata, *J Alloys Comp.* 688, 69-76 (2016).

(doi:10.1016/j.jallcom.2016.06.249)

“First principles calculations of ternary wurtzite β - CuGaO_2 ”, I. Suzuki, H. Nagatani, M. Kita, Y. Iguchi, C. Sato, H. Yanagi, N. Ohashi, T. Omata, *J. Appl. Phys.* 119, 095701 (2016). (doi: 10.1063/1.4942619)

“Wurtzite-derived ternary I-III- O_2 semiconductors”, T. Omata, H. Nagatani, I. Suzuki, M. Kita, *Sci. Technol. Adv. Mater.* 16, 024902 (2015). (doi:10.1088/1468-6996/16/2/024902)

“Widely bandgap tunable amorphous Cd-Ga-O oxide semiconductors exhibiting electron mobilities $\geq 10 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ”, H. Yanagi, C. Sato, Y. Kimura, I. Suzuki, T. Omata, T. Kamiya, H. Hosono, *Appl. Phys. Lett.* 106, 082106(2015). (doi: 10.1063/1.4913691)

“Structural and thermal properties of a ternary narrow gap oxide semiconductor; wurtzite-derived β - CuGaO_2 ”, H. Nagatani, I. Suzuki, M. Kita, M. Tanaka, Y. Katsuya, O. Sakata, S. Miyoshi, S. Yamaguchi, T. Omata, *Inorg. Chem.* 54, 1698–1704 (2015). (doi: 10.1021/ic502659e)

“Structure of β - AgGaO_2 ; ternary I-III-VI₂ oxide semiconductor with a wurtzite-derived structure”, H. Nagatani, I. Suzuki, M. Kita, M. Tanaka, Y. Katsuya, O. Sakata and T. Omata, *J. Solid State Chem.* 222, 66–70(2015). (doi: 10.1016/j.jssc.2014.11.012)

“Wurtzite CuGaO_2 : A direct and narrow band gap oxide semiconductor applicable to solar cell absorber”, T. Omata, H. Nagatani, I. Suzuki, M. Kita, H. Yanagi and N. Ohashi, *J. Am. Chem. Soc.* 136, 3378-3381(2014). (DOI: 10.1021/ja501614n) (22)

“Fabrication of β - AgGaO_2 thin film by rf-magnetron sputtering”, I. Suzuki, H. Nagatani, Y. Arima, M. Kita and T. Omata, *Thin Solid Films*, 559, 112-115(2014). (http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2013.10.099)

〔学会発表〕(計 33 件)

「ウルツ鉱型関連構造の4元系ナローギャップ酸化物半導体 $\text{Cu}_2\text{ZnGeO}_4$ の高温における相変化」, 喜多正雄, 井上誠, 和田憲幸, 鈴木一誓, 長谷拓, 小俣孝久, 日本セラミック協会 2017 年年会 日本大学駿河台キャンパス(東京都, 千代田区)(2017年3月17日~19日)

“Development of Cadmium Free Semiconductor Quantum Dot Phosphors”, T. Omata, The 33rd international Korea-Japan Seminar on Ceramics, (2016.11.16-19, Daejeon, Korea)

“New quaternary narrow gap oxide semiconductor $\text{Cu}_2\text{ZnGeO}_4$ with a wurtzite-derived Structure”, M. Kita, I.

Suzuki, H. Nagatani, Y. Mizuno, M. Inoue, T. Omata, The 9th International Workshop on Zinc Oxide and Related Materials (IWZnO 2016), (2016.10.30-11.2 Taipei, Taiwan)

“Flux growth of ternary wurtzite β -NaGaO₂ and β -LiGaO₂ single crystals”, A. Kakinuma, I. Suzuki, M. Ueda, T. Omata, The 9th International Workshop on Zinc Oxide and Related Materials (IWZnO 2016), (2016.10.30-11.2 Taipei, Taiwan)

“Control of Electrical Conductivity of Ternary Wurtzite β -AgGaO₂”, H. Nagatani, I. Suzuki, M. Kita, T. Omata, The 9th International Workshop on Zinc Oxide and Related Materials (IWZnO 2016), (2016.10.30-11.2 Taipei, Taiwan)

“Band Gap Engineering of Wurtzite β -CuGaO₂ by Alloying with β -CuAlO₂ and β -LiGaO₂ and Their Electronic Structures”, T. Omata, H. Nagatani, Y. Mizuno, I. Suzuki, M. Kita, N. Ohashi, The 9th International Workshop on Zinc Oxide and Related Materials (IWZnO 2016), (2016.10.30-11.2 Taipei, Taiwan)

“Band Gap Engineering of Wurtzite-Type Narrow Band Gap Oxide Semiconductor β -CuGaO₂”, T. Omata, Y. Mizuno, H. Nagatani, I. Suzuki, M. Kita, Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science 2016 (PRiME 2016) (2016.10.2-7, Honolulu, USA)

“Ternary and Quaternary Wurtzite-type Oxide Semiconductors: β -CuGaO₂ and Its Related Materials”, T. Omata, Y. Mizuno, I. Suzuki, H. Nagatani, Masao Kita, The 43rd International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS 2016)(Toyama International Conference Center) (2016. 6. 30, Toyama, Japan)

“Fabrication of β -CuGaO₂ thin films; An Oxide Thin-Film Solar Cell Absorber”, Issei Suzuki, Hiraku Nagatani, Masao Kita and Takahisa Omata, 2015 MRS Fall Meeting & Exhibit, Boston, USA, December 2, 2015

“Fabrication of β -CuGaO₂ Thin Films; An Oxide Thin-Film Solar Cell Absorber”, Issei Suzuki, Hiraku Nagatani, Masao Kita and Takahisa Omata, The 9th Symposium on Transparent Oxide and Related Materials for Electronics and Optics (TOEO-9), Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, October 20, 2015

“Band Gap Engineering of Wurtzite-type Narrow Band Gap Semiconductor β -CuGaO₂”, Yuki Mizuno, Hiraku Nagatani, Issei Suzuki, Masao Kita and Takahisa Omata, The 9th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-9), Tsukuba International

Congress Center, Tsukuba, Japan, October 20, 2015.

“Flux Growth of β -NaGaO₂ Single Crystals and their Ion-Exchange to Fabricate β -CuGaO₂ and β -AgGaO₂”, Ayako Kakinuma, Issei Suzuki, Masato Ueda and Takahisa Omata, The 9th International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC-9), Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan, October 20, 2015.

「ウルツ鉱型関連構造の四元系ナローギャップ酸化物半導体 Cu₂ZnGeO₄ の合成」, 喜多正雄, 鈴木一誓, 長谷拓, 水野裕貴, 小俣孝久, 日本セラミックス協会 第28回秋季シンポジウム, 富山大学 (富山県富山市), 2015年9月18日

「ウルツ鉱型酸化物半導体 β -CuGaO₂, β -AgGaO₂ への不純物ドーピング」, 長谷拓, 鈴木一誓, 小俣孝久, 喜多正雄, 日本セラミックス協会 第28回秋季シンポジウム, 富山大学 (富山県富山市), 2015年9月18日

「ウルツ鉱型ナローバンドギャップ半導体 β -CuGaO₂ のバンドエンジニアリング」, 水野裕貴, 長谷拓, 鈴木一誓, 喜多正雄, 小俣孝久, 日本セラミックス協会 第28回秋季シンポジウム, 富山大学 (富山県富山市), 2015年9月18日

“Fabrication of β -CuGaO₂ Thin Films”, Issei Suzuki, Hiraku Nagatani, Masao Kita and Takahisa Omata, 17th International Conference on II-VI Compounds and Related Materials, Paris, France, September 15, 2015.

「酸化物薄膜太陽電池材料 β -CuGaO₂ の薄膜作製」, 鈴木一誓, 長谷拓, 喜多正雄, 小俣孝久, 資源素材学会 平成27年度資源・素材関係学協会合同秋季大会, 愛媛大学 (愛媛県松山市), 2015年9月8日

「フラックス法による β -NaGaO₂ 単結晶の育成とそのイオン交換」, 柿沼綾子, 鈴木一誓, 上田正人, 小俣孝久, 資源素材学会 平成27年度資源・素材関係学協会合同秋季大会, 愛媛大学 (愛媛県松山市), 2015年9月8日

「ウルツ鉱型酸化物半導体の物質開拓 I-III-O₂ および I₂-II-IV-O₄ 化合物」, 小俣孝久, 電気化学会 固体化学の新しい指針を探る研究会 第78回研究会, 2015.10.2, 大阪大学 (大阪府吹田市)

“Ternary and Quaternary Wurtzite-type Oxide Semiconductors; New Materials and Their Properties”, T. Omata, SPIE: Photonics WEST2015; Oxide based Materials and Devices VI, San Francisco, USA (Feb. 7-12, 2015)

② “Novel Ternary Wurtzite-type Semiconductor, β -CuGaO₂”, I.

- Suzuki, H. Nagatani, M. Kita, H. Yanagi, N. Ohashi and T. Omata, 2014 MRS Fall Meeting & Exhibit, Boston, USA (Dec. 1-5, 2014)
- ②② “First Principle Calculations of Wurtzite β -CuGaO₂ and β -AgGaO₂”, I. Suzuki, H. Nagatani, M. Kita, Y. Iguchi, C. Sato, H. Yanagi, N. Ohashi and T. Omata, 2014 MRS Fall Meeting & Exhibit, Boston, USA(Dec. 1-5, 2014)
- ②③ “Phase transition of Zn₂LiGaO₄-ZnO alloy at high temperature”, M. Kita, T. Fukada and T. Omata, 2014 MRS Fall Meeting & Exhibit, Boston, USA(Dec. 1-5, 2014).
- ②④ 「ウルツ鉱型 β -CuGaO₂, β -AgGaO₂ の第一原理計算」, 鈴木一誓, 長谷拓, 喜多正雄, 井口雄喜, 佐藤千友紀, 柳博, 大橋直樹, 小俣孝久, 第 75 回 応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学, 札幌 (2014 年 9 月 19 日)
- ②⑤ "First Principle Calculation of Electronic Band Structure of Wurtzite β -CuGaO₂ and β -AgGaO₂", I. Suzuki, H. Nagatani, M. Kita, Y. Iguchi, C. Sato, H. Yanagi, N. Ohashi and T. Omata, 8th International Workshop on Zinc Oxide and Related Materials, Niagara Falls, Ontario, Canada, (September 7-11, 2014).
- ②⑥ “Band Gap Narrowing of ZnO by Alloying with β -AgGaO₂”, I. Suzuki, Y. Arima, M. Kita, T. Omata, 8th International Workshop on Zinc Oxide and Related Materials, Niagara Falls, Ontario, Canada, (September 7-11, 2014).
- ②⑦ ”A New Ternary Oxide Semiconductor; Wurtzite CuGaO₂”, H. Nagatani, I. Suzuki, M. Kita, H. Yanagi, N. Ohashi and T. Omata, 8th International Workshop on Zinc Oxide and Related Materials, Niagara Falls, Ontario, Canada, (September 7-11, 2014).
- ②⑧ “Wurtzite I-III-O₂ Ternary Oxide Semiconductors; New Materials and Application”, T. Omata, 8th International Workshop on Zinc Oxide and Related Materials, Niagara Falls, Ontario, Canada, (September 7-11, 2014).
- ②⑨ 「ウルツ鉱型 β -CuGaO₂, β -AgGaO₂ の第一原理計算」, 鈴木一誓, 長谷拓, 喜多正雄, 井口雄喜, 佐藤千友紀, 柳博, 大橋直樹, 小俣孝久, 第 9 回日本セラミックス協会関西支部学術講演会, 大阪府立大学, 堺市, 大阪府(2014 年 7 月 25 日)
- ③⑩ 「直接遷移型ナローギャップ半導体; ウルツ鉱型 β -CuGaO₂」, 長谷拓 鈴木一誓, 喜多正雄, 柳博, 田中雅彦, 勝矢良雄, 坂田修身, 大橋直樹, 小俣孝久, 第 9 回日本セラミックス協会関西支部学術講演会, 大阪府立大学, 堺市, 大阪府(2014 年 7 月 25 日)
- ③⑪ 「CuAlO₂ との混晶化によるウルツ鉱型

- CuGaO₂ のバンドギャップエンジニアリング」, 水野裕貴, 長谷拓, 鈴木一誓, 喜多正雄, 小俣孝久, 第 9 回日本セラミックス協会関西支部学術講演会, 大阪府立大学, 堺市, 大阪府(2014 年 7 月 25 日)
- ③② ”First Principle Calculations of Electronic Band Structures of Wurtzite β -CuGaO₂ and β -AgGaO₂”, I. Suzuki, H. Nagatani, M. Kita, Y. Iguchi, C. Sato, H. Yanagi, N. Ohashi and T. Omata, The Eighth International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC8), Merparque Yokohama, Yokohama (June 25-27, 2014)
- ③③ “A New Direct and Narrow Band Gap Oxide Semiconductor; Wurtzite CuGaO₂”, H. Nagatani, I. Suzuki, M. Kita, H. Yanagi, N. Ohashi and T. Omata, The Eighth International Conference on the Science and Technology for Advanced Ceramics (STAC8), Merparque Yokohama, Yokohama (June 25-27, 2014).

〔その他〕
ホームページ等
<http://www2.tagen.tohoku.ac.jp/lab/omata/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小俣 孝久 (Omata, Takahisa)
東北大学・多元物質科学研究所・教授
研究者番号：80267640

(2) 研究分担者

喜多 正雄 (Kita, Masao)
富山高等専門学校・機械システム工学科・准教授
研究者番号：00413758

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし