

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：10101

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25106007

研究課題名(和文)原子層制御による新しい材料機能探索

研究課題名(英文)Searching for new materials functions by atomic layer control

研究代表者

太田 裕道(Ohta, Hiromichi)

北海道大学・電子科学研究所・教授

研究者番号：80372530

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 92,800,000円

研究成果の概要(和文):原子レベルで厚さ制御された薄膜「ナノ層」を作製し、新しい材料機能の探索を行うとともに、作製した試料を他班に提供することでナノ構造情報の開拓に取り組んだ。主な結果を列挙する。1. 酸化物人工超格子で熱を電気に変換する性能をバルク比2倍の増強に成功した、2. 透明酸化物半導体薄膜の電子移動度抑制の起源を解明し、高電子移動度を実現した、3. 半導体二次元電子ガスが高い熱電変換出力因子を示すことを見出した、4. 光透過率・電気抵抗率・磁氣的性質を同時に変えられる薄膜デバイスを実現した、5. 金属テープ基板上で、実用レベルに匹敵する臨界電流密度を示す鉄系超伝導薄膜を実現した。

研究成果の概要(英文): In this study, we fabricated “Nano-layers”, which are thin films controlled in the thickness at the atomic level. We searched for new materials functions, and worked on the development of Nanostructure information by providing the nano-layers to other groups. The major results are listed below. [1] We successfully enhanced the thermoelectric power factor of oxide-based superlattices double compared with the bulk. [2] We clarified the origin of carrier mobility suppression of a transparent oxide semiconductor and successfully realized high carrier mobility. [3] We found that two-dimensional electron gas in semiconductor shows high thermoelectric power factor. [4] We realized thin-film devices, which can switch their optical transmission, electrical resistivity, and magnetic properties simultaneously. [5] We realized iron-based superconducting films on the metallic tapes, which showed high critical current density suitable as practical applications.

研究分野：材料科学

キーワード：ナノ層 人工超格子 電界変調法 鉄系超伝導

1. 研究開始当初の背景

物質表面・界面の厚さ数ナノメートルの領域「ナノ層」は、不連続な原子配列によって電子・イオンが感じるポテンシャルが変化するため、バルクとは全く異なる様々な機能物性を示す。本新学術領域では、触媒材料、固体イオニクス材料、機能性セラミックス材料をコモンサブジェクト課題と位置づけ、ナノ構造（原子配列、電子状態）と機能物性の相関（=ナノ構造情報）を解明し、合理的な材料創製に繋げる「ナノ構造情報のフロンティア開拓」を目指した。

この実現のためには、物質界面の厚さ数ナノメートルの領域を切り出した「ナノ層」を作製し、ナノ構造情報を系統的に解明しなければならない。しかし、従来の絨毯爆撃的な材料研究で用いられていた粉体やセラミックはナノ層の体積分率がバルク成分と比較して極端に小さく、ナノ構造情報の抽出が不可能であるという問題があった。

2. 研究の目的

本班では、原子レベルで厚さ制御された薄膜「ナノ層」を作製し、新しい材料機能の探索を行うとともに、作製した試料を他班に提供することでナノ構造情報を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

本班では、超精密な薄膜合成技術であるパルスレーザー堆積法や独自の電界変調法を駆使して原子層オーダーで厚さ制御した薄膜モデル試料を作製し、電子やイオン輸送特性の計測から新しい材料機能を見出す。次に、表面解析班、界面解析班、電子状態解析班の各班と共同して、ナノ層界面の機能物性発現に関するナノ構造情報を系統的に獲得するというスキームで研究を行った。

4. 研究成果

紙面の都合上、本班で得られた多くの研究成果の中から特に重要度の高いもののみを以下に列挙する。

バルク比2倍の高い熱電変換出力因子を示す酸化物人工超格子を実現

A01(イ)班の原子分解能電子顕微鏡観察技術と A02(エ)班の第一原理計算による電子構造解析技術のサポートを受け、SrTiO₃系人工超格子の熱電特性改善に取り組んだ(図1)。具体的には、ド・ブロイ波長の長い層を二次元的に閉じ込めることで熱電能の更なる増強に取り組んだ。SrTiO₃-SrNbO₃系全率固溶体(SrTi_{1-x}Nb_xO₃)にはx=0.3付近に電子相境界があり、x<0.3の場合にはド・ブロイ波長が4.1 nm、x>0.3の場合には5.2 nmであることが分かっている。[N単位格子SrTi_{1-x}Nb_xO₃][11単位格子SrTiO₃]₁₀人工超格子を作製し、その熱電特性を詳細に調べたところ、N=1、x=0.6の人工超格子が室温で

~5 mW m⁻¹ K⁻²の熱電変換出力因子を示すことが分かった。この出力因子はバルクSrTi_{1-x}Nb_xO₃で得られる最大の出力因子の約2倍である。この研究成果は熱電材料の性能を引き上げるために人工超格子が有効であることを明確に示すものであり、将来の熱電材料開発に有益な情報を与えるものである(論文アクセプト1報)。

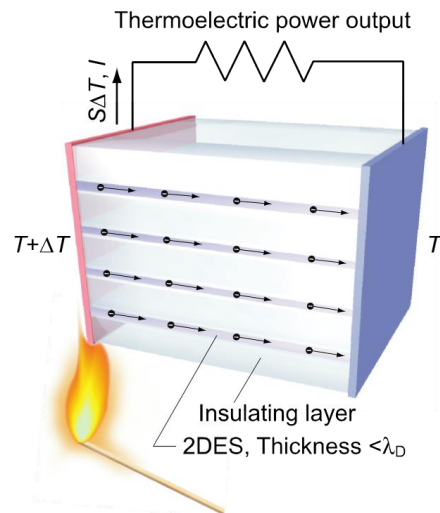


図1 酸化物人工超格子の模式図。ド・ブロイ波長の長い伝導層を薄い領域に閉じ込めることで、バルク比2倍の大きな熱電変換出力因子を達成

高電子移動度を示す透明酸化物半導体薄膜を実現

バルク単結晶が320 cm² V⁻¹ s⁻¹の高い電子移動度を示すことが報告されて以来、LaドーピングBaSnO₃薄膜が新しい透明酸化物半導体として注目されている。しかし、SrTiO₃などの格子定数の異なる単結晶基板上に成膜されたエピタキシャル薄膜の移動度は100 cm² V⁻¹ s⁻¹以下であり、高移動度化が求められている。低い移動度の原因は、格子不整合を起源とする柱状成長したグレインの界面における電子散乱が起こるためと考えられているが、格子整合するBaSnO₃単結晶を基板に用いても移動度は低いことから、格子不整合が起源ではないと考えられる。

本研究では、LaドーピングBaSnO₃薄膜をSrTiO₃基板上に作製し(膜厚20 nm~1 μm)、その電子輸送特性の膜厚依存性を計測したところ、薄膜/基板界面近傍の薄膜側のキャリア濃度、移動度が共に低いことを見出した(図2)(論文審査中1報)。

国際共同研究により、XAS分析を行ったところ、膜中にSn²⁺が生成することが明らかになった。良く知られているIn₂O₃やZnOなどの透明酸化物半導体では、酸素濃度の減少はキャリア濃度の増加に繋がるが、BaSnO₃ではアクセプターとして機能するSn²⁺が生成するため、酸素濃度の減少はキャリア濃度の減少に繋がり、不純物散乱の頻度を高めると

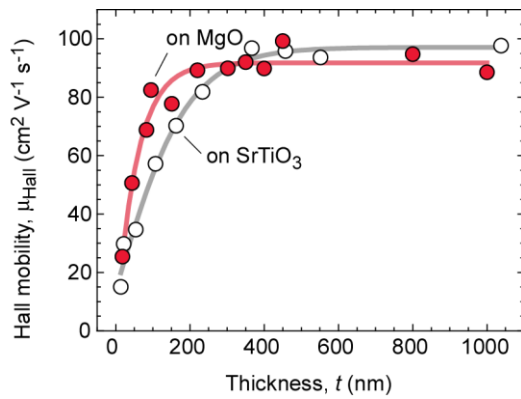


図2 La ドープ BaSnO₃ 薄膜の Hall 移動度の膜厚依存性 (室温)。移動度は膜厚に強く依存するが、基板材料にはほとんど依存しない。

考え、Sn²⁺の生成を抑制しながら薄膜を作製した結果、世界最高レベルの高電子移動度を示す La ドープ BaSnO₃ 薄膜の作製に成功した (論文投稿準備中)。

青色発光ダイオードの材料中に埋め込まれた二次元電子ガスの大きな熱電変換出力因子を発見

青色発光ダイオードの材料である GaN 二次元電子ガスが、既に実用化されている熱電変換材料より 2~6 倍も大きな熱電変換出力因子を示すことを発見した。AlGaIn/GaN ヘテロ界面に自然に蓄積される二次元電子ガスをゲート変調しながら、その熱電能およびトランジスタ特性を計測した (図 3)。二次元電子ガスの熱電能と報告されているバルク GaN の熱電能の比較から、AlGaIn/GaN ヘテロ界面の二次元電子ガスの厚さを見積もったところ、約 2 nm となり、計算によって求められた報告値と非常に良く一致した。

GaN 二次元電子ガスの熱電変換出力因子は最大で約 9 mW m⁻¹ K⁻² であり、バルク GaN (1 mW m⁻¹ K⁻²以下) の 10 倍以上であ

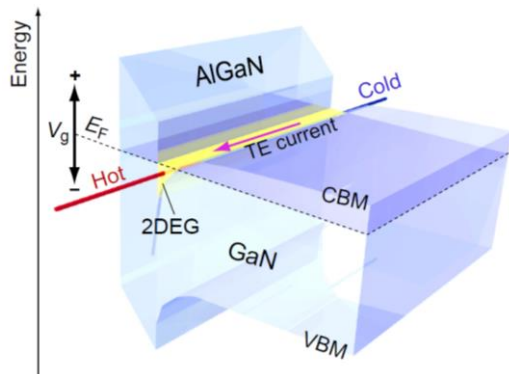


図3 AlGaIn/GaN 二次元電子ガスの熱電能ゲート変調の模式図。二次元電子ガスの高移動度を維持したままキャリア濃度を変調することで高い熱電変換出力因子が得られた。

り、既に実用化されている最先端の熱電変換材料 (1.5~4 mW m⁻¹ K⁻²) の 2~6 倍であった。この研究成果は、半導体二次元電子ガスのように高い電子移動度を維持しながら電子濃度を制御できる構造が、熱電材料の高性能化の鍵であることを明確に示すものである。本モデルは、実用化を抑えた熱電材料を高性能化するための材料設計指針を与えることと期待される。

色と導電性を同時に切り替えられる酸化物薄膜デバイスを実現

酸化・還元状態が安定な酸化物の代表である、WO₃ 薄膜に含水ナノ多孔性ガラス薄膜を堆積させ、3 端子型薄膜トランジスタ構造を作製し、プロトン化/脱プロトン化前後の光・電気特性の変化を調べた。ゲート電極に正電圧を印加して、WO₃ をプロトン化すると、シート抵抗が指数関数的に減少し、熱電能の絶対値も大きく減少した。逆に、負電圧を印加して HWO₃ からプロトンを引き抜くとシート抵抗と熱電能は初期の状態に戻ることが分かった。このプロトン化/脱プロトン化はほぼ 100% 可逆的に進行する。同時に、プロトン化により WO₃ 薄膜は濃青色に呈色し、脱プロトン化により無色透明な状態に戻る、エレクトロクロミズムが観察された。

本研究の CAN/WO₃ 薄膜 3 端子型トランジスタ構造素子を情報表示・記憶装置を用いることにより、例えば、窓ガラスに文字や絵などの情報を表示・記憶することができるようになる。本素子は、室温下で製造することができるので、熱に強いガラスだけではなく、熱に弱いプラスチックなどの上にも作製することが可能という特長に加え、大面積化が可能なることから、安価に情報表示・記憶装置が製造可能である。さらに、不揮発性動作であることから、待機電力が不要という優れた特長も有している。

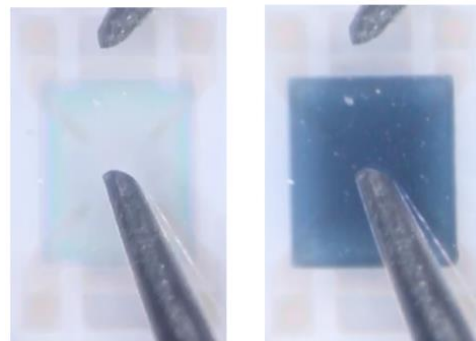


図4 色と導電性を同時に切り替えられる 3 端子薄膜トランジスタ型デバイス。左 (透明・絶縁体) のゲートに正電圧を印加することでプロトン化すると右 (濃青・金属) に変化する。この変化は可逆的であり、右のゲートに負電圧を印加して脱プロトン化すると左に戻る。

磁気特性と導電性が同時に切り替えられる酸化薄膜デバイスを実現

コバルト酸ストロンチウム（化学式： SrCoO_x $2.5 \leq x \leq 3$ ）を活性層として用いることで、磁気特性と導電性を同時に切り替えることが可能な薄膜デバイスを実現した。 $\text{SrCoO}_{2.5}$ は絶縁体で反強磁性体であり、 SrCoO_3 は良導体で強磁性体である。この大きな物性変化を酸化・還元状態だけで切り替えることが可能である。室温下で $\text{SrCoO}_{2.5}$ 薄膜上に含水ナノ多孔性ガラスを堆積し、負の電圧で電流を流すことにより、電気化学的に $\text{SrCoO}_{2.5}$ を酸化し、 SrCoO_3 とした。電気を通さず (=0)、磁石にもつかない (=B) 絶縁体の状態から、電気を良く通し (=1)、磁石につく (=A) 状態に変えることに成功した (図 5)。この成果については 2016 年 3 月 23 日に文部科学省において記者会見を行い、「絶縁体を電気が流れる磁石に一情報記憶容量の大幅向上に新たな道一」として北海道大学からプレスリリースされ(3月30日)、テレビ・新聞・国内外のインターネットニュースで数多く報道された。

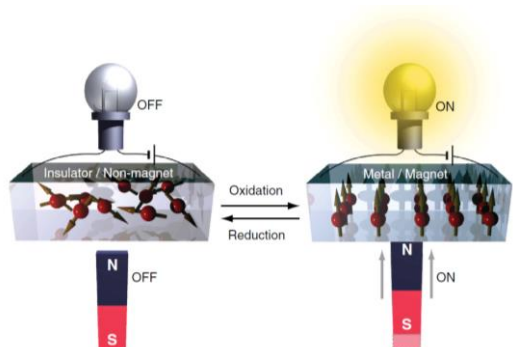


図 5 SrCoO_x 薄膜の電気化学酸化・還元反応を利用した情報記憶デバイス動作の模式図。 $\text{SrCoO}_{2.5}$ (左、絶縁体・磁石ではない) を酸化して SrCoO_3 (右、金属・磁石) とすることで電氣的・磁氣的情報が記憶できる。

実用レベルに匹敵する臨界電流密度を示す鉄系超伝導薄膜を実現

低品質のテープ基板において、9 T の高磁場下で実用レベルに匹敵する 0.1 MA/cm^2 の臨界電流密度を達成した (図 6)。さらに、最適化したテープ基板上的 $\text{BaFe}_2\text{As}_2:\text{P}$ ナノ層を最大 35 T の超高磁場下で評価し、15 T 下で 0.1 MA/cm^2 と高性能のナノ層超伝導線材であることまでを実験的に実証した。このナノ層線材の性能は、例えば実用材料の NbTi 線材と 10 T 程度までは同等で、それ以上の高磁場下の場合、 $\text{BaFe}_2\text{As}_2:\text{P}$ ナノ層線材の方が上回り、 MgB_2 の性能はどの外部磁場領域においても $\text{BaFe}_2\text{As}_2:\text{P}$ ナノ層線材が上回った。さらには、20 T 以上の超高磁場領域において、医療機器 MRI に実装されている Nb_3Sn 線材と全く遜色ない性能であった。

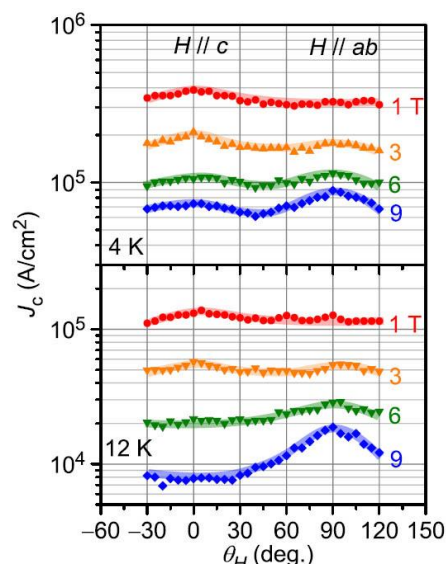


図 6 テープ基板に作製した鉄系超伝導体の臨界電流密度。9 T の高磁場下で実用レベルに匹敵する 0.1 MA/cm^2 の臨界電流密度を達成した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 68 件) 主要論文のみ列挙

- ① Y. Zhang, B. Feng, H. Hayashi, C-P. Chang, Y-M. Sheu, I. Tanaka, Y. Ikuhara, and H. Ohta, “Double thermoelectric power factor of a 2D electron system”, *Nature Commun.* in press 査読有
- ② A. Khare, D. Shin, T. Yoo, M. Kim, T.D. Kang, J. Lee, S. Roh, J. Hwang, S.W. Kim, T.W. Noh, H. Ohta, and W.S. Choi, “Topotactic metal-insulator transition in epitaxial SrFeO_x thin films”, *Adv. Mater.* **29**, 1606566 (2017). (DOI: 10.1002/adma.201606566) 査読有
- ③ H. Ohta, S.W. Kim, S. Kaneki, A. Yamamoto, and T. Hashizume, “High thermoelectric power factor of high-mobility two-dimensional electron gas”, *Adv. Sci.* **4**, 1700696 (2017). (DOI: 10.1002/advs.201700696) 査読有
- ④ Y. Nezu, Y. Zhang, C. Chen, Y. Ikuhara, and H. Ohta, “Solid-phase epitaxial film growth and optical properties of a ferroelectric oxide, $\text{Sr}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$ ”, *J. Appl. Phys.* **122**, 135305 (2017). (DOI: 10.1063/1.4997813) 査読有
- ⑤ A.V. Sanchela, T. Onozato, B. Feng, Y. Ikuhara, and H. Ohta, “Thermopower modulation clarification of the intrinsic effective mass in a transparent oxide semiconductor, BaSnO_3 ”, *Phys. Rev. Materials* **1**, 034603 (2017). (DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.1.034603) 査読有
- ⑥ Y. Zhang, B. Feng, H. Hayashi, T. Tohei, I. Tanaka, Y. Ikuhara, and H. Ohta,

- “Thermoelectric phase diagram of the SrTiO₃-SrNbO₃ solid solution system”, *J. Appl. Phys.* **121**, 185102 (2017). (DOI: 10.1063/1.4983359) 査読有
- ⑦ S. Katayama, T. Katase, T. Tohei, B. Feng, Y. Ikuhara, and H. Ohta, “Reactive solid-phase epitaxy and electrical conductivity of layered sodium manganese oxide films”, *Cryst. Growth Des.* **17**, 1849 (2017). (DOI: 10.1021/acs.cgd.6b01810) 査読有
- ⑧ J. Wang, K. Hanzawa, H. Hiramatsu, J. Kim, N. Umezawa, K. Iwanaka, T. Tada, and H. Hosono, “Exploration of stable strontium phosphide-based electrides: Theoretical structure prediction and experimental validation”, *J. Am. Chem. Soc.* **139**, 15668 (2017). (DOI: 10.1021/jacs.7b06279) 査読有
- ⑨ N. Li, T. Katase, Y. Zhu, T. Matsumoto, T. Umemura, Y. Ikuhara, and H. Ohta, “Solid-liquid phase epitaxial growth of Li₄Ti₅O₁₂ thin film”, *Appl. Phys. Express* **9**, 125501 (2016). (DOI: 10.7567/APEX.9.125501) 査読有
- ⑩ T. Katase, T. Onozato, M. Hirano, T. Mizuno, and H. Ohta, “A transparent electrochromic metal-insulator switching device with three-terminal transistor geometry”, *Sci. Rep.* **6**, 25819 (2016). (DOI: 10.1038/srep25819) 査読有
- ⑪ K. Hanzawa, H. Sato, H. Hiramatsu, T. Kamiya, and H. Hosono, “Electric field-induced superconducting transition of insulating FeSe thin film at 35 K”, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **113**, 3986 (2016). (DOI: 10.1073/pnas.1520810113) 査読有
- ⑫ Y. Hinuma, T. Hatakeyama, Y. Kumagai, L.A. Burton, H. Sato, Y. Muraba, S. Iimura, H. Hiramatsu, I. Tanaka, H. Hosono, and F. Oba, “Discovery of earth-abundant nitride semiconductor by computational screening and high-pressure synthesis”, *Nature Commun.* **7**, 11962 (2016). (DOI: 10.1038/ncomms11962) 査読有
- ⑬ T. Katase, Y. Suzuki, and H. Ohta, “Reversibly switchable electromagnetic device with leakage-free electrolyte”, *Adv. Electron. Mater.* **2**, 1600044 (2016). (DOI: 10.1002/aelm.201600044) 査読有
- ⑭ T. Katase, H. Takahashi, T. Tohei, Y. Suzuki, M. Yamanouchi, Y. Ikuhara, I. Terasaki, and H. Ohta, “Solid-phase epitaxial growth of A-site-ordered perovskite Sr_{4-x}Er_xCo₄O_{12-d}: A room temperature ferrimagnetic p-type semiconductor”, *Adv. Electron. Mater.* **1**, 1500199 (2015). (DOI: 10.1002/aelm.201500199) 査読有
- ⑮ T. Katase, K. Endo, T. Tohei, Y. Ikuhara, and H. Ohta, “Room-temperature protonation-driven on-demand metal-insulator conversion of a transition metal oxide”, *Adv. Electron. Mater.* **1**, 1500063 (2015). (DOI: 10.1002/aelm.201500063) 査読有
- ⑯ W. S. Choi, H. K. Yoo, and H. Ohta, “Polaron transport and thermoelectric behavior in La-doped SrTiO₃ thin films with elemental vacancies”, *Adv. Funct. Mater.* **25**, 799 (2015). (DOI: 10.1002/adfm.201403023) 査読有
- ⑰ W. S. Choi, H. Ohta, and H. N. Lee, “Thermopower enhancement by fractional layer control in 2D oxide superlattices”, *Adv. Mater.* **26**, 6701 (2014). (DOI: 10.1002/adma.201401676) 査読有
- [学会発表] (計 164 件、うち招待 50 件) 招待講演のうち重要なもののみ列挙
- ① H. Ohta, “Electrochemical function modulation of oxides using three-terminal thin film transistor structure with water infiltrated insulator”, The 3rd Functional Oxide Thin Films for Advanced Energy and Information Technology, Roma (Italy) 2017 年 7 月 5 日-8 日
- ② H. Ohta, “Electric field modulation of thermopower in two-dimensional electron gas”, IUMRS-ICAM 2017, Kyoto (Japan) 2017 年 8 月 27 日-9 月 1 日
- ③ 太田裕道, “固相エピタキシャル成長法を駆使した機能性酸化ナノ層の創製”, 日本金属学会 2017 年 秋期講演大会, 北海道大学 (北海道・札幌市) 2017 年 9 月 6 日-8 日
- ④ H. Ohta, Y. Zhang, “Double enhancement of thermoelectric power factor in oxide two-dimensional electron system via precise dimensionality control”, 2017 Fall KPS Meeting, Gyeongju (Korea) 2017 年 10 月 25 日-27 日
- ⑤ T. Katase and H. Ohta, “Room-temperature-protonation-driven optoelectronic device with water-gated thin-film-transistor structure”, the 8th International Conference and Exhibition on Lasers, Optics & Photonics, Las Vegas (USA) 2017 年 11 月 15 日-17 日
- ⑥ H. Ohta and A. Sanchela, “Thermopower of oxide

- heterostructure”, ICAMD2017, Jeju (Korea) 2017年12月5日-8日
- ⑦ H. Hiramatsu and H. Hosono, “Heteroepitaxial growth, critical current, and electric field-induced phase transition of iron-based layered selenides/pnictides”, IUMRS-ICAM 2017, Kyoto (Japan) 2017年8月27日-9月1日
- ⑧ H. Hiramatsu and H. Hosono, “Electronic Phase Transition at Interface between Solid and Ionic Liquid under Gate Voltage”, MRS Fall Meeting 2017, Boston (USA) 2017年11月26日-12月1日
- ⑨ 太田裕道, “導電性酸化物薄膜の物性改質方法”, 第64回応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市) 2017年3月14日-17日
- ⑩ H. Ohta and W. S. Choi, “Unusually large thermopower of nanostructured oxides”, ENGE 2016, Jeju (Korea) 2016年11月6日-9日
- ⑪ 太田裕道, 金木奨太, 橋詰 保, “熱電能電界変調法: AlGa_N/Ga_N-MOSHEMT”, 2016年第77回応用物理学会秋季学術講演会, 朱鷺メッセ (新潟県・新潟市) 2016年9月13日-16日
- ⑫ H. Ohta and T. Katase, “Electro-chemical redox switching of functional oxide thin films using water-infiltrated nanoporous glass”, IWOX-X, Dalian (China) 2016年1月10日-15日
- ⑬ H. Ohta and T. Katase, “Water electrolysis induced modification of functional oxides—Thermoelectric properties—”, IUMRS-ICAM 2015, Jeju (Korea) 2015年10月25日-29日
- ⑭ 太田裕道, “水の電気分解を利用した機能性酸化ナノ層創製”, 日本金属学会2015年秋期講演大会, 九州大学伊都キャンパス (福岡県・福岡市) 2015年9月16日-18日

[図書] (計2件)

- ① H. Ohta and H. Hiramatsu, “Nanoinformatics”, pp. 207-235, Ed. Isao Tanaka, Springer (2018).
- ② H. Ohta, “Metal Oxide-Based Thin Film Structures”, pp. 441-464, Ed. Nini Pryds, Vincenzo Esposito, ELSEVIER (2017).

[産業財産権]

○出願状況 (計3件)

- ① 名称: 半導体装置, 発明者: 太田裕道, 片瀬貴義, 鈴木雄喜, 権利者: 北海道大学, 番号: 特願 2015-002769, 出願年月日: 2015年1月9日, 国内外の別: 国内

- ③ 名称: 高感度昇温脱離ガス分析装置, 発明者: 細野秀雄, 半那拓, 平松秀典, 番号: 特願 2017-034677, 出願年月日: 2017年2月27日, 国内外の別: 国内
- ④ 名称: 半導体装置, 発明者: 太田裕道, 片瀬貴義, 鈴木雄喜, 番号: JP2016/050206, 出願年月日: 2016年1月6日, 国内外の別: PCT

[その他]

○ホームページ

<http://functfilm.es.hokudai.ac.jp/>

<http://www.msl.titech.ac.jp/~hosono/>

<http://www.msl.titech.ac.jp/~tkamiya/>

○新聞報道等 (プレスリリース)

- ① オンデマンド赤外線&電流制御デバイスを実現 (北海道大学、東京大学) 2015年6月26日 (国内1件報道)
- ② 絶縁体を電気が流れる磁石に—情報記憶容量の大幅向上に新たな道— (北海道大学) 2016年3月30日 (国内外で21件報道)
- ③ 窓ガラスがメモリーになる?—新しい情報表示・記憶装置の開発に成功— (北海道大学) 2016年5月16日 (国内で4件報道)
- ④ 青色LED材料を活かして、熱を電気に変換—高性能な熱電材料のための新しい材料設計指針— (北海道大学、韓国・成均館大学校、産総研) 2017年11月27日 (国内外で31件報道)

6. 研究組織

(1)研究代表者

太田 裕道 (OHTA HIROMICHI)
北海道大学・電子科学研究所・教授
研究者番号: 80372530

(2)研究分担者

平松 秀典 (HIRAMATSU HIDENORI)
東京工業大学・フロンティア材料研究所・准教授
研究者番号: 80598136

(3)連携研究者

①片瀬 貴義 (KATASE TAKAYOSHI)
東京工業大学・フロンティア材料研究所・准教授
研究者番号: 90648388

②山ノ内 路彦 (YAMANOUCHI MICHIIHIKO)
北海道大学・電子科学研究所・准教授
研究者番号: 40590899