

令和 2 年 9 月 10 日現在

機関番号：12604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05052

研究課題名(和文)酸化チタン単結晶及び薄膜表面近傍における欠陥の構造と欠陥に対する水素の挙動

研究課題名(英文) Study of the structure and behavior of hydrogen on the defects near the surface of single crystal and thin film of TiO₂

研究代表者

松本 益明 (MATSUMOTO, Masuaki)

東京学芸大学・教育学部・准教授

研究者番号：40251459

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：二酸化チタンは光触媒機能を持ち、紫外線の照射により水の分解や殺菌などの機能を発揮するが、水素を用いたバンドギャップ制御により可視光での触媒能力を高められる可能性がある。本研究では水素とチタンおよび二酸化チタンとの相互作用について、水素を繰り返し吸収・放出させた時の酸素欠損の生成・消失に伴う幾何学的・電子的な構造変化、表面及び内部の水素密度等の温度及び水素圧力依存性を測定し、バンドギャップ制御に向けた基礎的な知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

二酸化チタンは光触媒として機能するが、バンドギャップが広く紫外光が必要であるという欠点がある。可視光での効率を高めるためのバンドギャップ制御を水素によりおこなえる可能性があり、その可能性を探るために欠かせない水素の吸収・放出特性や表面及び内部での水素密度などの測定手法を開発し、基礎的な知見を得た。本研究をさらに進めることにより、水の分解による水素精製や殺菌作用など、これからの新しい生活様式において重要な役割を果たす光触媒の開発へ繋がることが期待される。

研究成果の概要(英文)：The titanium dioxide (TiO₂) is one of the most widely used photocatalysts. By absorbing the ultraviolet light, it creates electron-hole pairs and generates free radicals, which would cause water decomposition, sterilization and so on. The bandgap narrowing by using hydrogen is one of the promising candidates for the technology to enhance photocatalytic efficiency. In this research, the interaction between hydrogen and TiO₂ (and also Ti) was researched. The incorporation and release properties of hydrogen into the Ti or TiO₂ causes production and dissipation of oxygen vacancies, which causes the change in the geometric and electronic structures, and the density of hydrogen at the surface or in the bulk. Some basic knowledges about their temperature and pressure dependences were acquired.

研究分野：表面・界面物性

キーワード：酸化チタン チタン 水素 核反応解析法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1 研究開始当初の背景

金属や半導体の酸化物においては、金属及び半導体と酸素が化学量論的に決まった価数で結合が生じ、チタンの場合にはTiO₂の形でチタンが酸化されて絶縁体となっている。

しかし、実際には酸素欠損や格子間原子等の数多くの欠陥が存在しており、それらが酸化物の電子的な性質に大きく影響を与え、酸化物の絶縁体的・半導体的・金属的な振る舞いを決定している。欠陥による電子的性質の違いは、触媒機能や発光などの特性を生じたり、電気伝導性を大きく変化させたりする効果をもたらすため、欠陥をうまく制御することが応用上極めて重要である。さらに、TiO₂の場合には、ルチル型・アナターゼ型などの安定・準安定な構造が複数存在しており、さらに元素が追加されたSrTiO₃はペロブスカイト型で、その物性が大きく異なるなど、酸化物は純粋な金属では実現不可能な機能に関する可能性を多く持っている。

水素は、酸化物表面の酸素と結合し引き抜くことで還元をおこない、酸素欠損を作る作用と、逆に酸素欠損に水素が吸着して電子を奪い、表面を酸化する作用の両方の作用を持つことが知られてきており、水素を用いて酸化物の電子状態を制御することができるかと期待されている[1]。しかしながら、詳細については不明であるため、水素に関する異なる挙動の要因やその根底にある物理がまだ明らかになっておらず、欠陥の制御に利用することが困難な状況である。

最近、TiO₂のナノ粒子を20barという高圧水素の下で473 Kに5日間保って黒色化することにより、可視光下での光触媒活性が高くなることが報告された[2]。これはブラックチタニアと呼ばれ、黒色化により、3 eV以上あったバンドギャップが1.5eV程度まで狭小化したと考えられている。しかし、ブラックチタニア中に含まれる水素の量や黒色化とそれに伴うバンドギャップの狭小化に水素が果たす役割等の詳しい機構は分かっていない。また、高圧水素下での長時間の加熱が必要で作製が困難であるという欠点がある。これらの問題を解決することは光触媒の活用をおこなう上で重要であると考えられる。

チタニアを構成しているTiは特に水素との結合の強さが良く知られており、超高真空を維持するための気体のゲッター材として広く用いられている。近年は大型の加速器などで安価に超高真空を維持するために、真空容器内壁に非蒸発ゲッター(NEG)材をコーティングしてポンプとして使用することが行なわれている。主にTi、Zr、Vなどから構成される合金が用いられているが、最近Tiを水素吸収材として用い、表面をPdでコーティングすることで複数回利用可能な無酸素Pd/Tiコーティングが開発されている。このTi膜への水素の吸収・放出特性を調べることがTi酸化物と水素の反応を調べる上で有用であると考えられる。

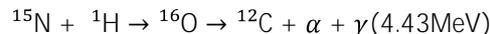
2 研究の目的

本研究の目的は、TiおよびTiO₂と水素との相互作用について、水素の吸収・放出過程、電子状態、結晶構造等に注目して、核反応解析法(NRA)、光電子分光法(XPS/UPS)走査型透過顕微鏡法(STEM)、X線回折法(XRD)を用いて研究し、将来水素を利用したTiO₂のバンドギャップ制御を可能とするための基礎的な情報を得ることである。

3 研究の方法

3.1 実験手法

本研究ではチタン及び酸化チタンに対する水素の挙動を調べるために核反応解析法(NRA)を用いた。NRAは東京大学タンデム加速器研究施設(MALT)の5 MVペレットロンタンデム加速器を利用した。使用した核反応は



であり、加速器により約6.385 MeVまで加速された¹⁵N²⁺イオンを試料に照射し、核反応により生成された4.43 MeVのガンマ線をBGOシンチレーターにより検出した[3]。入射イオン電流により規格化されたガンマ線強度は入射イオンの到達した位置に存在する水素原子の数に比例している。この反応の共鳴エネルギーは $E_R = 6.385 \text{ MeV}$ であり、このエネルギーで入射されたイオンは表面で反応する。共鳴エネルギーよりも高い $E_R + \Delta E$ で入射されたイオンは試料の表面から内部へとエネルギーを失いながら侵入し、共鳴エネルギーになった時点での位置に存在する水素と反応する。これにより深さ分布を測定することができる。共鳴幅は1.8 keVであり、深さによるエネルギー損失(stopping power)はTiの場合で2.335 keV/nmである。これらは E_R に比べて非常に小さいため、高い深さ分解能で水素の量を定量的に評価することができる。実際には水素の振動によるドップラー効果や侵入時の経路の曖昧さによるストラグリングのため、深さ分解能は表面付近で2~3 nmであり、深くなるほど分解能は落ちるが、本研究で利用した数十nm程度の深さにおいては5 nm程度の分解能を有している。水素のような軽元素の量を非破壊で定量できる数少ない手法の一つである。

Ti薄膜の構造測定には、物質・材料研究機構(NIMS)の走査型透過電子顕微鏡(STEM)を用いた。集束レンズによって細く絞った電子線プローブを試料上で走査し、各々の点での透過電子を検出することで像を得る。微少領域の電子回折や元素分析が可能であり、本研究では高角度散乱環状暗視野STEM(HAADF-STEM)と呼ばれる暗視野を観察した。また、電子線照射により生じた蛍光X線を分析することで薄膜を構成する元素の分析を行った(エネルギー分散型蛍光X線分析(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy; EDS))。

電子状態の測定にはX線/紫外線光電子分光法(XPS/UPS)を用いた。XPSではAlのK線(1486.6 eV)を利用し主に内殻の電子状態を測定し、UPSではHe I線(21.2 eV)を利用して荷電子帯の電

子状態を測定した。

ナノ粒子については、RIGAKU製の試料水平型多目的X線装置Ultimaを用いて結晶相と結晶子サイズを調べた。X線源はCu K線であり、入射波長 λ は0.1541nmである。結晶相におけるアナターゼの割合 f_{anatase} はピーク積分値の比で評価した。また、結晶子サイズ D の算出には(1)式のScherrer式を用いた。回折ピークをガウス関数でフィッティングして半値全幅 β を決定し、形状因子 K は0.9とした。

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (1)$$

3.2 Ti 薄膜の作製

酸化前のTiと水素の反応を調べるため、無酸素Pd/Ti薄膜をステンレス(SS)表面上に作製した。図1に示されているように、ステンレス基板上に20 nm程度のTiを蒸着し、その上にTiの酸化を防ぐためにPdを、超高真空を保ったまま蒸着した(無酸素Pd/Tiコーティング)。このコーティングは宮澤らにより新しいNEGコーティングとして開発されたものであり、表面のPdは気相の水素を容易に解離させTi内部へ拡散させるため超高真空領域ではポンプとして作用することが確かめられている[4]。彼らは、Pdを20 nm程度、Tiを1 μm 程度蒸着した試料を使用しているが、本研究ではNRA測定用に小さな膜厚の試料を作製した。それぞれの膜厚は予め水晶振動子式膜厚計を利用して決めた蒸着速度を元に蒸着時間により決めた。そのため実験結果の膜厚が設定した膜厚と異なる結果が得られた場合もある。Pdコートされた試料は大気中へ取り出されたが、Pdでコーティングされているため大気中でも長時間安定であった。試料はSTEMやNRAを測定する数日前に作製し、それぞれNIMSやMALTに運び真空中へ導入して実験をおこなった。

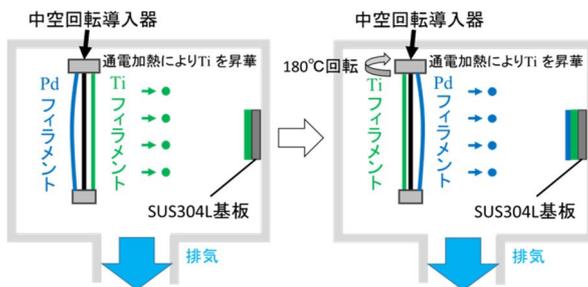


図1 無酸素Pd/Tiコーティングの方法

3.3 TiO₂ ナノ粒子の水素化

チタン酸化物と水素との相互作用について調べるために新しく作製装置を製作した。図2に作製に用いた装置の模式図を示す。試料用のタングステン(W)ポートを真空容器に設置し、約5mm離れた直上のWフィラメントを用いて原子状水素を生成した。水素雰囲気下でWフィラメントを1923 K程度まで加熱すると水素分子が約1.5%解離することが報告されている。Wフィラメントの直径は0.2 mmとした。試料には平均粒径7 nmのアナターゼ型チタニアナノ粒子を用いた(ST-01, 石原産業)。真空容器を 1.0×10^{-4} Pa程度になるまで排気した後、Wポートを適当な設定温度まで、Wフィラメントを1973 Kにそれぞれ加熱して高純度の水素を導入し、原子状水素曝露を行った。

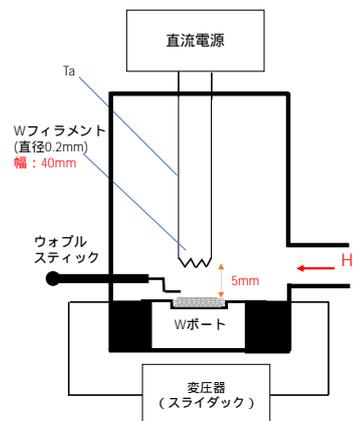


図2. 作製装置図

白色の二酸化チタンナノ粒子の黒色変化の様子はデジタルカメラを用い、設定時間毎に撮影することにより行った。撮影した写真から、試料の一部を選択し、白色度を観察開始時の試料の色で規格化して数値化し、その時間変化を観察した。

ブラックチタニアの作製における黒色変化は、水素圧力依存性や水分圧依存性、作製温度依存性について測定した。水素圧力依存性は、ポートの加熱なしで水素原子曝露を行い、曝露開始と同時に黒色変化の様子を観察した。水分圧依存性は、水を真空槽内に導入した後、水素原子曝露を行い、黒色変化の様子を観察した。水素圧力は 3.3×10^{-2} Paに固定し、水の分圧は 7.8×10^{-3} Pa, 5.5×10^{-3} Paで行った。温度依存性の観察では、試料用のポートを設定温度で30分程度十分に加熱し、水素原子曝露と同時に黒色変化の様子を観察した。設定温度は、300 K, 440 K, 573 K, 673 K, 773 Kとした。作製した試料は、RIGAKU製の試料水平型多目的X線装置Ultimaを用いて結晶相と結晶子サイズを調べた。

4 研究成果

4.1 Pd/Ti 薄膜への水素の吸収・放出特性の研究[5]

まず、酸化される前のTi 薄膜への水素の吸収・放出特性を調べた。図3にPd/Ti コーティングのSTEM 暗視野像とEDS マッピングを示す。暗視野像では原子番号の大きなPdが明るく見えており、EDS マッピングではPd, Ti 及びステンレス(SS)の成分であるCr, Fe, Ni を可視化してある。図3からPdとTiの膜厚を求めると、それぞれ6 nmと14 nmであり、明確に層状成長していることが分かる。NRAは垂直方向の分解能は高いが、水平方向の分解能は低いので、この様に層状成長していることが重要である。この薄膜試料を真空に入れて排気した直後、40000 L(1 L = 1.33 × 10⁻⁴ Pa·s)の水素曝露後、曝露後に443 Kに加熱した後のNRA 深さ分析結果を図4に示す。横軸は入射イオンのエネルギーであり、6.385 MeVが表面をあらわす。上側の軸にはPdとTiのstopping powerに基づき換算した表面からの深さを書いてある。図4から、真空排気直後は表面とTi/SS界面付近に水素がわずかに分布しており、水素に曝露すると表面及びPdは変化せず、Ti膜中にほぼ一様に水素が吸収されること、さらに443 Kへの加熱により、ほとんどの水素が脱離することが分かる。最初の水素曝露後のTi膜中の水素の濃度を見積もると3 × 10²² cm⁻³で、H/Ti比は0.55であった。その後水素曝露と473 K加熱による水素の吸収・放出実験を繰り返したときのNRA強度(水素濃度に比例)の変化を図5に示す。2回目の水素曝露で一旦水素濃度が増大した後に半分ほどに減少し、安定化した。これは、Ti膜中に水素が吸収されたときにTiの原子間に水素が入り込むことでTiの構造に変化が生じてHが入りやすくなっていると考えられる。同様の実験を、無酸素Pd/Vについてもおこなったが、水素の吸収量はTiに比べ1桁ほど小さい値となり、Tiの水素吸収能力が非常に高いことが分かった。このようなNEGとしてはたらく薄膜への水素の吸収・放出特性を明らかにしたのは初めてである。

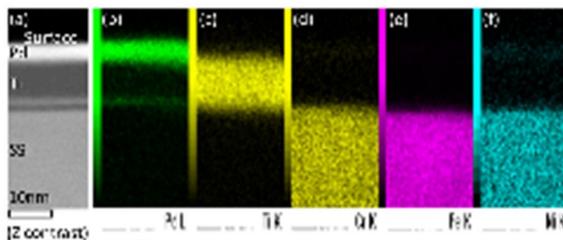


図3 無酸素Pd/Ti コーティングのSTEM 暗視野像とEDS マッピング

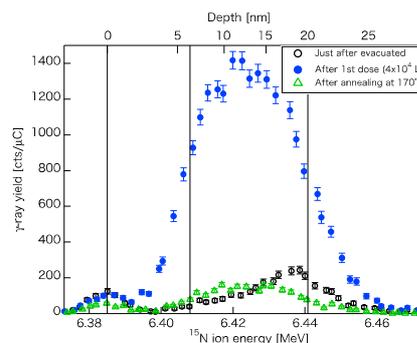


図4 排気直後(○), 水素へ40000L 曝露後(青丸), 曝露後170℃加熱後(青丸)

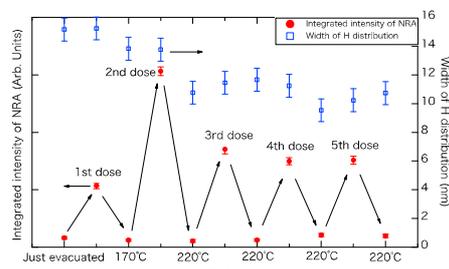
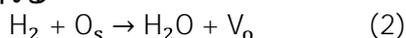


図5 水素への曝露と加熱を繰り返したときのTi 薄膜中の水素濃度の変化

4.2 TiO₂ ナノ粒子の水素化[6]

室温で水素雰囲気中の圧力を3.3 × 10⁻² Paとし、解離用フィラメントを点灯すると、白色のアナターゼTiO₂ ナノ粒子は数分で黒色化した。黒色変化は、フィラメントの直下から始まり、数分後には、表面全体が白色から黒色に変化した。試料の様な領域から白色度を評価した。図6に、水素の圧力を5.0 × 10⁻³ Paから1.0 × 10⁻¹ Paまでのある値に一定に保ち、フィラメント温度を1973 K、ナノ粒子試料の温度を573 Kに保った時の白色度の時間変化を示す。縦軸は、初期の白色度で規格化した白色度を、横軸は水素分子を導入してからの時間を示す。水素の導入により白色度が時間的には指数関数的に減少しており、また、水素の圧力が高いほど急速に黒色化が進むことが分かる。指数関数でのフィッティング結果が実線で示されている。その時定数の逆数は反応速度に相当しており、これを水素の圧力に対してプロットしたグラフが図6の右上に示されている。これから反応速度が水素の圧力に比例していることが示唆される。水素の圧力は水素分子の入射頻度に比例することから、TiO₂と水素の反応を、表面の酸素(O_s)と気相からの水素から水と酸素欠損(V_o)が形成される



であると仮定すると、表面に十分な酸素原子が存在する反応初期においては、水素の入射が律速となって反応が進み、表面の酸素欠損(V_o)が増大するほど黒色になると考えることができる。

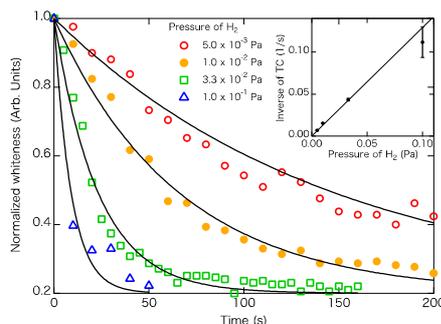


図6 TiO₂ ナノ粒子の白色度の時間変化の水素圧依存性

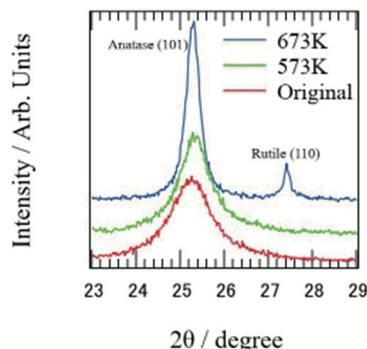


図7 XRD スペクトル

さらに、水素の圧力を 1.0×10^{-2} Pa に保ち、試料温度を 423 K から 763 K までのある温度に保ったときの時間変化を測定したところ、やはり指数関数的な変化を示していた。(2)式をアレニウス型の反応と仮定すると、活性化エネルギーは $E_a = 168 \pm 45$ meV と小さな値であった。この活性化エネルギーの意味することについては、今後の課題である。

図7にアナターゼナノ粒子を水素雰囲気下で熱処理した後に得られた XRD スペクトルを示す。熱処理前に 25.3° に見られた回折ピークはアナターゼ(101)の結晶の存在を示している。このピークは、水素雰囲気下での熱処理により幅が減少しており、さらに 673 K での処理によって 27.4° に新しいピークが現れる。これはルチル(110)の存在を示しており、高温での水素処理により、アナターゼからルチルへの相転移が起きていることが分かる。実験結果から(1)式を用いて評価した結晶サイズの処理温度依存性を図8に示す。また、アナターゼの割合も図8中に示されている。試料温度が 600K 以下ではアナターゼが 100%であったが、高温で処理することにより 673 K で 73%、773 K で 29%に減少し、同時に結晶サイズが 10 nm 程度から 30 nm 程度まで増大することが分かった。水素の存在しない真空中での加熱ではこのような変化は起きないことも確認しており、相転移や結晶サイズの増大が水素による黒色化と関係があると考えている。

4.3 単結晶ルチル TiO_2 (110)面の水素処理

ナノ粒子に加えて単結晶の TiO_2 (110)面についても水素化による黒色化について研究した。ナノ粒子と同様の処理をおこなったところ、ルチル単結晶表面についても黒色化した。図9に示した白色度の時間変化から、ルチル単結晶の場合には黒色化が2段階で進むと思われる。図10にルチル単結晶の UPS スペクトルの水素処理の前後での比較を示す。水素処理により、赤から青にスペクトルが変化している。この図から、荷電子帯の頂上の水素化により 1.48 eV 上側にシフトしているが、ギャップ中準位(IGS)は生じていないことが分かった。また、XPSの結果からは OH 種の存在が確認された。

図11と図12は、それぞれ、アナターゼ TiO_2 ナノ粒子とルチル TiO_2 単結晶を水素化し黒色化した試料の NRA 深さ分析スペクトルを示している。ナノ粒子の粒径は 8 nm 程度であるため、図11の浅い領域は最表面の水素量を示すが、深い領域はナノ粒子中の水素量の平均的な値を反映していると考えられる。解析の結果、平均的には原子数比で 1.52 ± 0.05 atomic% 程度の水素が存在していることが分かった。図12の単結晶の場合は表面が平坦であるため、NRA は実際の単結晶表面付近の水素量を反映している。スペクトルから、表面には 4.76 ± 0.36 ML の水素が存在しており、内部の浅い部分(深さ 10~20 nm のサブサーフェス領域)には 1.56 ± 0.18 atomic% の水素が存在していると見積もられた。表面の水素は水の吸着も反映していると考えられ、黒色化した TiO_2 の領域に存在する水素量はナノ粒子と単結晶ではほぼ一致しており、どちらも TiO_2 の 1/70 程度に過ぎないことが分かった。

<引用文献>

- [1] K. Fukada, M. Matsumoto, K. Takeyasu, S. Ogura, and K. Fukutani, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 064716 (2015).
- [2] X. Chen, L. Liu, P.Y. Yu, and S.S. Mao, Science **331**, 746 (2011).
- [3] M. Wilde and K. Fukutani, Surf. Sci. Rep. **69**, 196 (2014).
- [4] T. Miyazawa, Y. Kano, Y. Nakayama, K. Ozawa, T. Iga, M. Yamanaka, A. Hashimoto, T. Kikuchi, and K. Mase, J. Vac. Sci. Technol. A **37**, 021601 (2019).
- [5] M. Matsumoto, T. Okada, T. Miyazawa, K. Mase, M. Yamanaka, A. Hashimoto, M. Wilde, and K. Fukutani, J. Vac. Sci. Technol. A **37**, 051601 (2019).
- [6] M. Fujimoto, M. Matsumoto, N. Nagatsuka and K. Fukutani, Abstract of the 23rd International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions (IISC-23) p. 68.

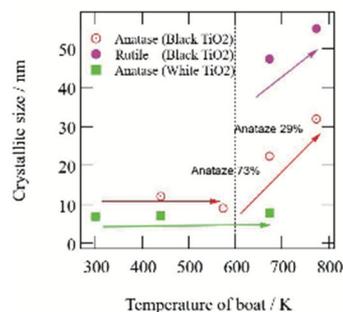


図8 水素処理温度による結晶サイズの変化

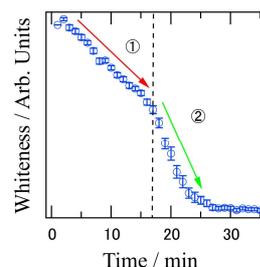


図9 ルチル単結晶の水素処理による白色度の時間変化

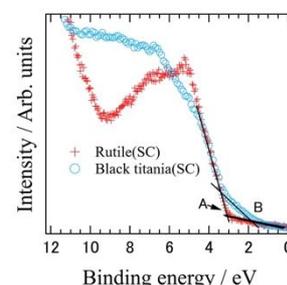


図10 ルチル単結晶の水素処理による荷電子状態の変化

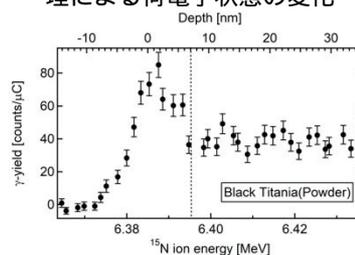


図11 TiO_2 ナノ粒子の水素化後の NRA 深さ分析スペクトル

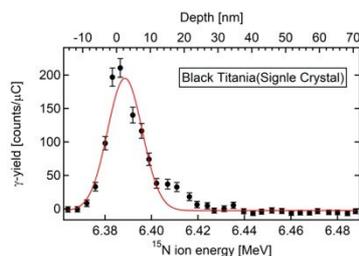


図12 ルチル TiO_2 単結晶の水素化後の NRA 深さ分析スペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Matsumoto Masuaki, Okada Tomohiro, Miyazawa Tetsuya, Mase Kazuhiko, Yamanaka Misao, Hashimoto Ayako, Wilde Markus, Fukutani Katsuyuki	4. 巻 37
2. 論文標題 Hydrogen incorporation and release from nonevaporable getter coatings based on oxygen-free Pd/Ti thin films	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Vacuum Science & Technology A	6. 最初と最後の頁 051601-1~6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1116/1.5108983	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miyazawa Tetsuya, Sugawara Yuta, Yoshikawa Ichiro, Sato Yuta, Ohno Shinya, Okada Tomohiro, Matsumoto Masuaki, Kikuchi Takashi, Mase Kazuhiko	4. 巻 37
2. 論文標題 Surface analysis and pumping speed measurements of oxygen-free palladium/titanium nonevaporable getter after heating at 100-450 °C	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Vacuum Science & Technology B	6. 最初と最後の頁 062923-1~6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1116/1.5111879	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Asakawa Kanta, Miura Yoshio, Nagatsuka Naoki, Takeyasu Kotaro, Matsumoto Masuaki, Fukutani Katsuyuki	4. 巻 99
2. 論文標題 Electronic and spin structure of O- and H-adsorbed Fe3O4(111) surfaces	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 085442-1~8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.99.085442	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yusuke Higashi, Riichiro Takaishi, Koichi Kato, Masamichi Suzuki, Yasushi Nakasaki, Mitsuhiro Tomita, Yuichiro Mitani, Masuaki Matsumoto, Shohei Ogura, Katsuyuki Fukutani, Kikuo Yamabe	4. 巻 70
2. 論文標題 Mechanism of gate dielectric degradation by hydrogen migration from the cathode interface	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Microelectronics Reliability	6. 最初と最後の頁 12~21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.microrel.2017.01.011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 M. Fujimoto, M. Matsumoto, N. Nagatsuka, and K. Fukutani
2. 発表標題 Quantification of Hydrogen in the Black TiO ₂ by Nuclear Reaction Analysis
3. 学会等名 23rd International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions (IISC-23) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Wilde, M. Matsumoto, L. Gao, T. Schwarz-Selinger, A. Manhard, and W. Jacob
2. 発表標題 SIMULTANEOUS 1H AND 2D QUANTIFICATION IN SURFACE LAYERS WITH 15N NUCLEAR REACTION ANALYSIS
3. 学会等名 23rd International Workshop on Inelastic Ion-Surface Collisions (IISC-23) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤本 将秀, 松本 益明, 山崎史也, 長塚 直樹, 福谷 克之
2. 発表標題 原子状水素曝露によるチタニアナノ粒子 の構造変化
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本益明, 岡田朋大, Markus Wilde, 福谷克之, 間瀬一彦, 金秀光, 谷本育律, 本田融
2. 発表標題 核反応解析法による非蒸発ゲッター材料への水素の吸収・放出特性の研究
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本益明, 岡田朋大, Markus Wilde, 福谷克之, 間瀬一彦, 金秀光, 谷本育律, 本田融
2. 発表標題 100 ~ 450 に加熱した無酸素 Pd/Ti 非蒸発型ゲッターのXPS による表面分析と排気速度測定
3. 学会等名 2019年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤本 将秀, 松本 益明, 長塚 直樹, 福谷 克之
2. 発表標題 Black TiO ₂ の水素分布と電子状態
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 藤本将秀, 山崎史也, 渡邊隆太郎, 松本益明, 長塚直樹, Wilde Markus, 福谷 克之
2. 発表標題 原子状水素曝露による二酸化チタン単結晶表面の黒色変化過程
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡田朋大, 松本益明, Markus Wilde, 福谷克之, 佐藤裕太, 大野真也, 間瀬一彦
2. 発表標題 核反応法による非蒸発ゲッター材料への水素の吸収・放出特性の研究
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡田朋大, 堀水滉介, 高橋秀茂, 松本益明, ビルデマーカス, 福谷克之, 橋本綾子, 宮澤徹也, 間瀬一彦
2. 発表標題 核反応法を用いた無酸素Pd/Ti 薄膜の水素吸収・放出特性評価
3. 学会等名 2018年日本表面真空学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤本将秀, 松本益明, 長塚直樹, 福谷克之
2. 発表標題 ブラックチタニアの作製と水素分布の測定
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masuaki Matsumoto, Tomohiro Okada, Tetsuya Miyazawa, Kazuhiko Mase, Ayako Hashimoto, Markus Wilde, Katsuyuki Fukutani
2. 発表標題 Hydrogen absorption and desorption properties of oxygen-free Pd/Ti thin film as a non-evaporable getter (NEG) coating
3. 学会等名 The 9th Vacuum and Surface Science Conference of Asia and Australia (VASSCAA9) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮澤徹也, 栗原真志, 大野真也, 寺島矢, 夏井祐人, 加藤博雄, 狩野悠, 中山泰生, 加藤良浩, 橋本綾子, 松本益明, ビルデマーカス, 福谷克之, 菊地貴司, 間瀬一彦
2. 発表標題 新しい非蒸発ゲッター (NEG) コーティングの応用と評価
3. 学会等名 第65回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----