

Title	太さ数nm以下の金属ナノワイヤ列を含む繊維状複合薄膜の非線形光学物性
Author(s)	水谷, 五郎
Citation	科学研究費助成事業研究成果報告書: 1-12
Issue Date	2020-05-26
Type	Research Paper
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/16737
Rights	
Description	基盤研究(C) (一般), 研究期間: 2015 ~ 2019, 課題番号: 15K05126, 研究者番号: 30183958, 研究分野: 非線形光学を用いた表面界面光物性

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：13302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K05126

研究課題名(和文) 太さ数nm以下の金属ナノワイヤ列を含む繊維状複合薄膜の非線形光学物性

研究課題名(英文) Nonlinear optical properties of fibrous composite thin films containing metallic nanowire arrays with thickness less than a few nm

研究代表者

水谷 五郎 (Mizutani, Goro)

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号：30183958

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：結晶表面ステップに付着した金属等マテリアルのナノワイヤ列からなる繊維状の物質列の接触界面の電子的原子的振る舞いを実験的に調べた。光触媒Au/TiO₂(320)では、TiO₂[001]方向のステップエッジ界面列からのSHG応答を選択的に検出し、4.6eVにAuとOの結合状態を、2.7eVに反結合状態を見出した。9.5°のオフ角度を持つSi(111)を水素終端した面のテラスとステップSi-H振動をSFG法で観察し、基板温度を673 KにしてモニターしたH₂の脱離スピードは、593Kのものより約45倍大きいことを見出し、脱離活性化エネルギー約1.6eVを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

表面のステップのみに注目した物性の研究は、手法の感度の問題で過去に多くは見られない。本研究では、対称性の破れに敏感でゼロ背景からのシグナルを検出できる二次的非線形分光法を用いて2つの例について、ステップとそれに隣接するナノワイヤからなる繊維状の物質の界面からのシグナルを感度よく観測できたところに大きな意義がある。二次の光学的非線形効果をもつ物質は、光通信の波長分割多重(WDM)技術のための波長変換に用いる物質として重要で、今回はそのための新しい複合物質の開発のための原理的な指針を与える知見を提示している。

研究成果の概要(英文)：We experimentally investigated the electronic and atomic behavior of the contact interface of nanowire-like material arrays of fibrous materials such as metals attached to the crystal surface steps. In the photocatalyst Au / TiO₂ (320), the SHG response from the step edge interface array in the TiO₂ [001] direction was selectively detected, and the bonding state of Au and O was found at 4.6 eV and the anti-bonding state at 2.7 eV. The terrace and step Si-H oscillations of the hydrogen-terminated surface of Si (111) with an off angle of 9.5 ° were observed by SFG method. We found that the desorption speed of H₂ monitored at a substrate temperature of 673 K was about 45 times higher than that of 593 K, and the corresponding desorption activation energy was found as about 1.6 eV.

研究分野：非線形光学を用いた表面界面光物性

キーワード：繊維状複合物質 ナノワイヤ Au TiO₂ Si 水素 原子ステップ 脱離

1. 研究開始当初の背景

異種のマテリアルを用いた複合非線形光学材料は、ポリマーと金属の混合、ゾルゲル法、インターカレーションなど化学的方法により作られるものが多い。この化学的方法はコストが安い反面、細かい構造の制御が難しい。一方でナノ構造の陰影効果を用いたシャドウデポジション法を用いれば、構造の対称性の制御など、化学的方法ではできない複合材料の創製ができる。たとえば、研究代表者らは、平成 23 年に開始した「基盤研究(C)一般」のプロジェクトにおいて、MgO(210)面に成長する MgO のファセット面上に、斜めから Pt を蒸着して、2nm の太さの白金のナノワイヤ列を作ること成功した。そして、この材料は数 nm の厚さの膜ではあるが、バルクに換算すると非常に大きな単位体積あたりの二次の非線形光学定数($2 \times 10^{-11} \text{m/V}$)を持つことがわかった。この場合、二次の非線形光学効果は媒質の構造の反転対称性の破れにより誘起された。また、これ以外にもナノワイヤの断面を、ブーメラン型や、数字の 6 の形に制御したものも作ることができ、シャドウデポジション法の有用性を示した。光通信などに用いるためのバルクの二次の光学的非線形物質を作るためには、このような非対称な構造を 3 次元的に積み上げなければならない。この 3 次元的な積み上げを行う方法を提案し、有用な複合材料を作り、新しい非線形材料の物理を開発することが本研究の当初の背景であった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、電子の量子閉じ込め効果により大きな非線形効果が期待できる太さ 2nm 程度の金属ナノワイヤが方向をそろえて繊維のように凝集する薄膜を創製することである。この薄膜を作るためにシャドウデポジション法を用いて作ったナノワイヤ列を、繰り返し基板へ転写して重畳する方法を開発することを当初の目的としたが、シャドウデポジションを行うための真空装置と蒸着源に不具合が生じたので、当初の目的を以下の様に修正した。そもそも本研究の基礎となっている要素は、結晶表面ステップに付着した金属マテリアルのワイヤー状の物質およびそれらの接触面が、どういう非線形電子的光学的振る舞いをするかということである。そこで本研究では、間隔 10nm 程度、幅 1nm 以下のマテリアルワイヤ列を製作し、その二次の非線形効果を測定し、高い非線形感受率を発現する物理学的起源を探索する。そのために以下の 2 つの系について計測と解析を行う。

- (1) 光第二高調波発生分光法によるモデル光触媒 Au/TiO₂(320)のステップの電子状態の分析
- (2) SFG 分光法による水素終端した Si(111)のオフ基板表面上のステップからの水素の脱離

3. 研究の方法

- (1) 光第二高調波発生分光法によるモデル光触媒 Au/TiO₂(320)のステップの電子状態の分析

モデル光触媒試料 Au/TiO₂(320)の調製

片側鏡面研磨で厚さ 0.5 mm のルチル型 TiO₂(320)単結晶基板を K&R Creation から購入し、5%フッ化水素酸 (HF) 溶液で 10 分間エッチングして、800 °C で 2 時間大気中アニールして、AFM、SEM、EDX で表面を確認した。次に真空槽内で約 0.1nm/sec の堆積速度で 2nm の厚さの Au 膜を堆積させた。

波長可変 SHG 分光

本研究では励起光源として Mode-Locked Nd³⁺ : YAG Laser の 3 倍波 (355nm) で励起した OPG/OPA (Optical Parametric Generator/Amplifier) (EKSPLA 社製 : PG401VIR/SH) を用いた。方位角依存性を計測するときは、試料を法線周りに回転させ、波長依存性を計測するときは、-SiO₂(0001)試料と正確に同じ位置に交換できる試料ホルダーを用いて、SHG 強度の絶対値を比較した。

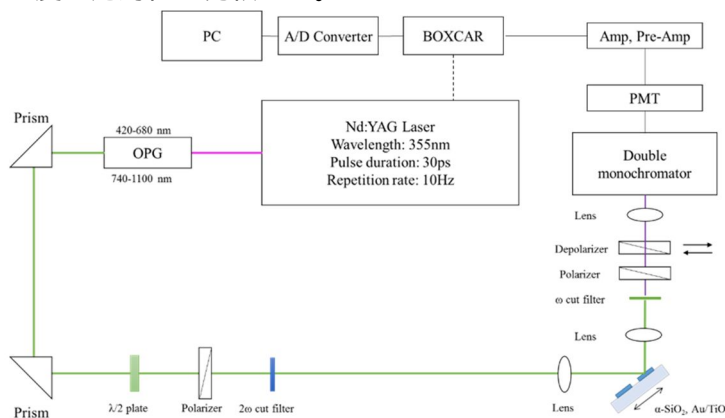


図 1 SHG 強度の測定配置

(2)SFG 分光法による水素終端した Si (111) のオフ基板表面上のステップからの水素の脱離
 抵抗率 10^{-4} cm の P ドープ n 型で $[\bar{1}\bar{1}2]$ 方向に 9.5° 傾けて研磨してある Si (111) 基板を CrysTec GmbH より購入して使用した。最初に試料の自然酸化膜や不純物を 873 K で 6 時間加熱して除去し、次に 1273 K で 60 秒間通電加熱フラッシングして、Si (111) 7×7 の再構成構造を形成させた。その後試料温度を 873 K に下げ、チャンバーに満たした 3.5 Torr の純粋な水素分子ガスに 15 分間曝露した。最後に、H-Si (111) 表面を 593 K で 10 秒ごとに繰り返し加熱し、SFG スペクトルを計測した。

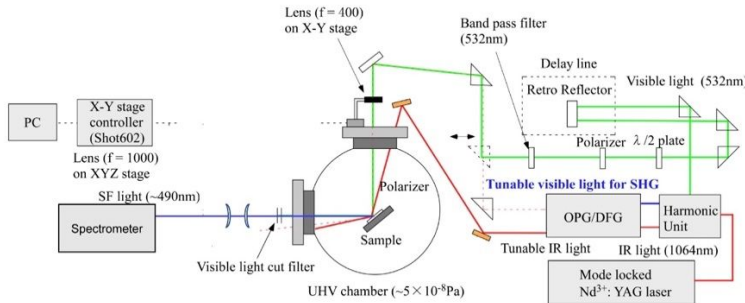


図 2 超高真空中における SFG スペクトルの測定配置

4. 研究成果

(1)光第二高調波発生分光法によるモデル光触媒 Au/TiO₂(320) のステップの電子状態の分析
 (発表雑誌論文 2 件目)

一般に、表面形態は触媒特性に大きな影響を与えるとされる。そして、触媒特性の知られた触媒物質について、透過電顕などを用いた研究が数多く見られる。しかしこれらの試料のモフォロジーは多くの場合偶然発現したものであり、意図してない部分の構造が触媒活性に影響していないとも限らない。本研究においては、繊維状の Au と TiO₂ の界面の列を整然と作成し、その部分のみを選択的に観測できる光第二高調波法を用いて、電子準位スペクトルを求めた。従って、本研究の試料作りと観測は双方とも偶然の要素をできるだけ排除していると言える。

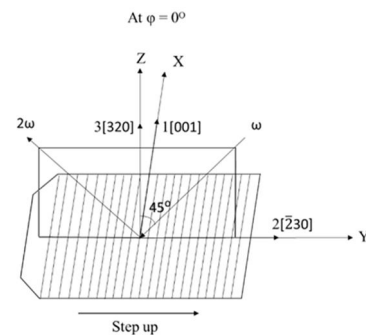


図 3 TiO₂(320)試料の方位の定義

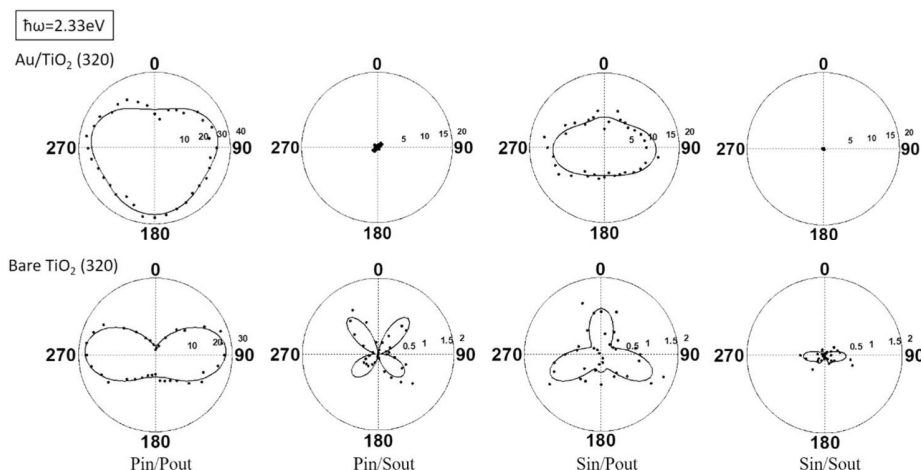


図 4 Au/TiO₂(320)および TiO₂(320)界面の方位角依存 SHG 強度パターン。励起光の光子エネルギーは 2.33eV である。ゼロ度は、入射面に $[2\bar{3}0]$ 方向が含まれる配置に対応する。入射角は 45° 。点と線がそれぞれ実験と計算。

図4は上段がAu/TiO₂(320)のSHG強度試料回転角パターン、下段がTiO₂(320)のSHG強度試料回転角パターンである。4つのパターンは、図に示す入射出射偏光組み合わせに対応している。2つの試料のSHG強度パターンは明らかに異なっている。しかしすべてのパターンは、0度と180度を結ぶ直線に対しては線対称で、それと直角な直線に対しては非対称な形を示している。従って、図4のSHG強度パターンはAuの存在によってTiO₂(320)上のステップの電子状態が変化したことを表している。

図4において、Sin/Soutの90°の配置は、ステップにおける対称性の破れの応答を表す。またPin/Poutの90°の配置は、テラスによる対称性の破れの応答を表す。従って、これらの配置に光学配置条件を固定し、入射光の光子エネルギーを掃引すれば、それぞれAu/TiO₂ステップおよびテラスの電子状態の対状態密度のスペクトルが得られる。

図5は、図3から試料を90度回転させた配置での、Sin/SoutのSHG光強度スペクトル(ステップの電子状態)と、Pin/Poutの配置でのSHG光強度スペクトル(テラスの電子状態)である。まず $\hbar\omega_{\text{SHG}} > 3.8\text{eV}$ の領域のスペクトルを見る。両者のスペクトルが3.8eVおよび4.9eVの付近にピークを持っている。しかし、Sin-Soutのスペクトルでは4.6eV以下ではSHGがゼロに近いのに対し、Pin/Poutでは連続的に有限な値をとっている。 $\hbar\omega_{\text{SHG}} < 3.3\text{eV}$ の領域のスペクトルを見る。両者とも2.9eV付近にピークを持つスペクトルである。

これらの結果をZhao et al.による第一原理計算の結果と比較する。[Zhao et al., Computational Materials Science 50, 98-104 (2010)]Zhaoらは、SrTiO₃(001)上にAuを堆積させた際の電子準位を第一原理計算により計算した。SrTiO₃結晶はSrをTiでおきかえると、アナターゼ型のTiO₂と類似の結晶構造となるので、計算結果は参考になる。SrTiO₃(001)はTiO₂終端面と、SrO終端面があり、TiO₂終端面上にAuを堆積させた計算結果に注目する。Zhaoらの計算によれば、TiO₂終端面に酸素またはチタン欠陥があり、そこにAuが入りこむと界面のエネルギーが局小化する。Auが酸素欠陥に入り込む前は、0の占有準位は束縛エネルギー1.5eV以上で連続帯を形成するが、Auが酸素欠陥に入り込むと束縛エネルギー1eVまでシフトする。またAuの占有状態は、Auが酸素欠陥に入り込んだ後では入り込む前より、束縛エネルギー3eVの付近の状態数が増える。物理的に考察すると、束縛エネルギー3eVの状態はAuとO結合電子状態、2eVの状態は反結合状態と考えられる。図5aで観察された2.8eVのピークと4.57eVのピークは、Zhaoらの計算結果であるそれぞれ反結合状態と結合状態に対応すると考えられる。ここでZhaoらの計算ではバンドギャップが小さく出ることを考慮した。この反結合状態が観測されたことは、光触媒の活性の起源解明上意義があると考えられる。

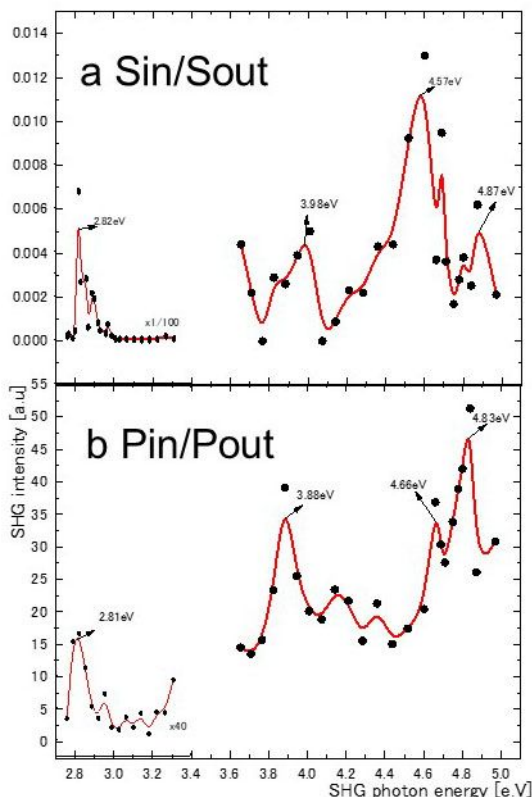


図5 (a)ステップ敏感および(b)テラス敏感な配置での、Au/TiO₂(320)のSHGスペクトル

(2)SFG分光法による水素終端したSi(111)のオフ基板表面上のステップからの水素の脱着
(発表雑誌論文1,3,4件目)

2番目の繊維状ナノワイヤ複合物質として、本研究では、 $[\bar{1}\bar{1}2]$ 方向に9.5°のオフ角度を持って研磨されたSi(111)面を水素終端したものを試料として使用した。この基板の上には600°Cにおける水素分子曝露により水素が吸着する。その際、Si-H₂(ダイハイドライド)がステップに沿って並ぶので、このダイハイドライド列を、ナノメートル以下の径を持つワイヤー列の複合材料とみなすことができる。ここでステップのダイハイドライドが従来議論されている昇温脱離スペクトルにおける₂脱離ピークに寄与するかが今まで未解決の問題であった。

試料準備の段階として、1273 Kでのフラッシュ加熱によってSi(111)テラスが再構成を起こ

し7×7構造のLEED回折スポットが正常に観測され、表面の準備が正しく行われたと判断した。また9.5°のオフ角による3原子層厚の周期的なステップ構造の存在により、水平方向の縞模様が観察され、定量的に正しい回折像であると判断した。この表面に液体窒素温度に冷却したステンレス管を通して水分を除去した高純度の分子状水素を曝露すると、7×7スポットが消えストリークを伴った1×1構造の回折パターンとなった。これで水素によりSi表面が終端されたと判断した。

図6左上に水素吸着直後の2060~2120 cm⁻¹のIR波数におけるssp偏光(s偏光SFG、s偏光可視光、p偏光赤外光)の組み合わせのSFG強度スペクトルを示す。2085 cm⁻¹(A)と2098 cm⁻¹

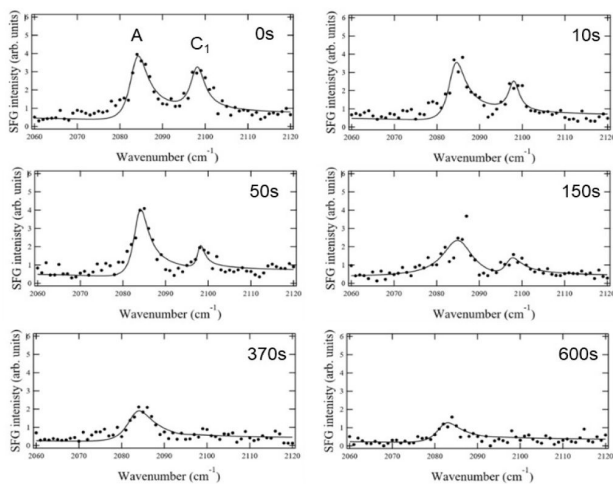


図6 [112]方向へ9.5 degのミスカット角度を持つ水素終端ステップSi(111)表面の、試料温度593 Kにおけるさまざまな経過時間での、ssp偏光におけるSFGスペクトル(Aはテラスピーク、C1はステップピーク)

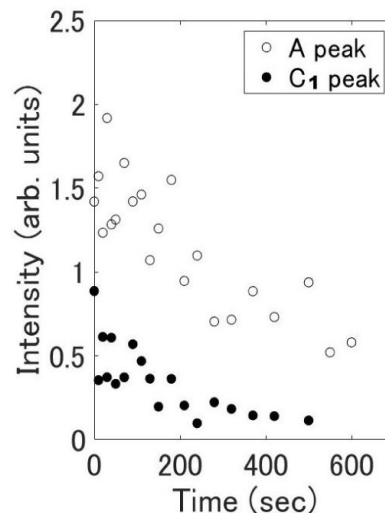


図7 モノヒドライド(A)およびダイヒドライド(C1)のSFG強度の時間依存性。

(C₁)の波数にピークが見える。これらのそれぞれテラスとステップにおけるモノヒドライドSi-HおよびダイヒドライドSi-H₂の振動ピークである。次に基板の温度を593Kに上げて10秒おきにSFGスペクトルを計測したものの抜粋が図6である。図3において、C₁モードはAモードよりも速くゼロになっているように見える。そこで、図6のAモードピークの強度とC₁モードの強度を時間を横軸にプロットしたのが、図7である。黒点のC₁モードは白丸のAモードより早くゼロに近づいている。これらのピーク強度の時間依存性の脱離の次数を求めようとしたが、それぞれデータの揺らぎが大きく、次数は決められなかった。

基板温度を673 Kにした場合の同様の脱離の実験では、C₁モードの脱離スピードは、図6で観測されたものよりも約45倍大きかった。この速度定数の差と、脱離速度kと脱離の活性化エネルギーE_dとの関係式

$$\ln k = -\frac{E_d}{k_B T} + \ln A \quad (1)$$

を用いると、E_dは約1.6 eVと求まった。式(1)でk_Bはボルツマン定数、Tは試料温度、Aは定数である。この値はSi(111)テラスからの水素分子の脱離活性化エネルギー2.5eVよりずっと小さかった。

Kimらによる重水素を吸着したSi(113)面の昇温脱離の実験[Kim et al., Surf. Sci. Lett. 490, L602 (2001)]によれば、β₁(アダトム起源)脱離ピークの活性化エネルギーは、2.58eV、β₂脱離ピークの活性化エネルギーは、2.16eVと報告されている。本研究で観測されたC₁の脱離活性化エネルギー(約1.6eV)は、テラスの水素の活性化エネルギー2.58eVより小さいという意味で、β₂脱離ピークに寄与していることを強く示唆している。しかし、この帰属をより確かなものにするためには、脱離の次数の決定が可能となるようなより精密で正確な実験が必要である。

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 4件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 K.T.T. Hien, M.A. Sattar, Y. Miyauchi, G. Mizutani, and H.N. Rutt	4. 巻 663
2. 論文標題 Sum frequency generation spectroscopy study of hydrogenated stepped Si(111) surfaces	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Surface Science	6. 最初と最後の頁 11-15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.susc.2017.04.007	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 該当する
1. 著者名 Md Ehasanul Haque, Daiki Kobayashi, Yuki Tomatsu, Khuat Thi Thu Hien, Goro Mizutani, Mohammad Mizanur Rahman, and Harvey N. Rutt	4. 巻 7
2. 論文標題 Optical second harmonic generation analysis of the atomically stepped Au/TiO ₂	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 AIP Advances 7, 125011 (2017/12)	6. 最初と最後の頁 125011/1-10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5006847	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 該当する
1. 著者名 Md. Abdus Sattar, Khuat Thi Thu Hien, Yoshihiro Miyauchi, Goro Mizutani, and Harvey N. Rutt	4. 巻 48
2. 論文標題 Hydrogen desorption kinetics from H-Si(111) surfaces studied by optical sum frequency	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Surface and Interface Analysis	6. 最初と最後の頁 1235-1239
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/sia.6099	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 該当する
1. 著者名 Goro Mizutani, Zhipeng Yong, Khuat Thi Thu Hien, Harvey N. Rutt	4. 巻 18
2. 論文標題 Desorption of Hydrogen from the Steps on the Miscut Si(111) Surface Studied by SFG Spectroscopy	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 e-Journal of Surface Science and Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 180-184
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1380/ejssnt.2020.180	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 13件）

1. 発表者名 Md. Ehasanul Haque, Peiyang Gong, Daiki Kobayshi, Yuki Tomatsu, Khuat Thi Thu Hien, Goro Mizutani, and Harvey N. Rutt
2. 発表標題 Azimuthal angle and polarization dependent second harmonic generation investigation from Au/TiO ₂ (320) interface.
3. 学会等名 National Conference on Physics -2019, Bangladesh (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Liu Xiaopeng, Gong Peiyang, haque Mohammad, khuat Thi Thu Hien, Goro Mizutani
2. 発表標題 Optical Second Harmonic Generation(SHG) Analysis of the Atomically Stepped Model Photo-catalyst Au/TiO ₂ (320) Interface
3. 学会等名 JAIST Japan-India Symposium on Advanced Science 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 龍共培陽、Haque Mohammad、Khuat Thi Thu Hien、水谷五郎
2. 発表標題 波長可変SHG分光法によるAu/TiO ₂ 光触媒界面の電子状態の研究
3. 学会等名 第29回光物性研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 龍共培陽、Mohammad Ehasanul Haque、Khuat Hien、水谷五郎
2. 発表標題 波長可変SHG分光法によるAu/TiO ₂ 光触媒界面の電子状態の研究
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Haque MD Ehasanul, Daiki Kobayashi, Yuki Tomatsu, Khuat Thi Thu Hien, Goro Mizutani, and Harvey N. Rutt
2. 発表標題 Surface Second Harmonic Generation (SHG) on the Au/TiO ₂ (320) Interface and Bare TiO ₂ (320)
3. 学会等名 The 6th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Goro Mizutani
2. 発表標題 TEM study of Pd crystalline nanowires on a MgO faceted face and SFG study of hydrogen vibration on a step bunched Si(111) surface
3. 学会等名 大阪電気通信大学国際ワークショップ、日本物理学会大阪支部講演会 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Haque MD Ehasanul, Daiki Kobayashi, Yuki Tomatsu, Khuat Thi Thu Hien, Goro Mizutani, Harvey N. Rutt
2. 発表標題 Observation of Second Harmonic Generation from the Stepped Au/TiO ₂ (320) Interface
3. 学会等名 11th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '17 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Md. Ehasanul Haque, Peiyang Gong, Daiki Kobayashi, Yuki Tomatsu, Khuat Thi Thu Hien, Goro Mizutani and Harvey N. Rutt
2. 発表標題 Study of the Au/ stepped TiO ₂ (320) interface by using second harmonic generation (SHG) as a function of azimuthal angle, polarization and wavelength
3. 学会等名 JAIST World Conference 2018 (JWC2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Md. Ehasanul Haque, Peiyang Gong, Daiki Kobayashi, Yuki Tomatsu, Khat Thi Thu Hien, Goro Mizutani, and Harvey N. Rutt
2 . 発表標題 Analysis of SHG signal from the interface of TiO ₂ (320) decorated by Au thinfilm as a function of azimuthal angle and wavelength
3 . 学会等名 JAIST Japan-India Symposium on Materials Science 2018 (JISMS-2018) (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Ngo Khoa Quang, Yoshihiro Miyauchi, Goro Mizutani, Martin D. Charlton, Ruiqi Chen, Stuart Boden, and Harvey Rutt
2 . 発表標題 Systematic Dependence of the Optical Second Harmonic Generation Intensity on the Designed Parameters of Cr Nanoholes
3 . 学会等名 The 9th International Conference on Photonics and Applications (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 MD Ehasanul Haque, Daiki Kobayashi, yuki tomatsu, Khat Thi Thu Hien, Goro Mizutani, and Harvey N. Rutt
2 . 発表標題 Investigation of the Au/TiO ₂ (320) Interface by Optical Second Harmonic Generation Technique
3 . 学会等名 2016 MRS Fall Meeting and Exhibit (国際学会)
4 . 発表年 2016年

1 . 発表者名 H. MD Ehasanul, D. Kobayashi, Y. Tomatsu, K. T. T. Hien, G. Mizutani, and H. N. Rutt
2 . 発表標題 Observation of the Electronic States from Au/TiO ₂ (320) Interface as a Function of the Azimuthal Angle and Polarization by Optical Second Harmonic Generation
3 . 学会等名 Symposium on Surface Science & Nanotechnology, 25th Anniversary of SSSJ Kansai- (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 Haque MD Ehasanul, Daiki Kobayashi, Yuki Tomatsu, Khuat Thi Thu Hien, Goro Mizutani, and H. N. Rutt
2. 発表標題 The Au/TiO ₂ (320) interface study by using optical second harmonic generation technique
3. 学会等名 JAIST Japan-India Symposium on Materials Science 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 東松祐樹、Mohammad Ehasanul Haque、khuat Thi Thu Hien、水谷五郎、Harvey N. Rutt
2. 発表標題 Au/TiO ₂ (320)表面における光第二高調波発生に関する研究
3. 学会等名 第3回有機・無機エレクトロニクスシンポジウム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 MD Ehasanul Haque, Daiki Kobayashi, Yuki Tomatsu, Khuat Thi Thu Hien, Goro Mizutani, and Harvey Rutt
2. 発表標題 Optical Second Harmonic Investigation of the Au/TiO ₂ (320) Interface
3. 学会等名 日本物理学会2016年秋季大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Haque MD Ehasanul, Daiki Kobayashi, Yuki Tomatsu, Khuat Thi Thu Hien, Goro Mizutani, and Harvey N. Rutt
2. 発表標題 Measurement of the Electronic States from Au/TiO ₂ (320) Interface Using Optical Second Harmonic Generation
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 東松祐樹、Haque MD Ehasanul、Khuat Thi Thu Hien、水谷五郎、Harvey N. .Rutt
2. 発表標題 Au/TiO ₂ (320)表面における光第二高調波発生に関する研究
3. 学会等名 第27回光物性研究会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Goro Mizutani, Yong Zhipeng, Khuat Thi Thu Hien and Harvey N. Rutt
2. 発表標題 Desorption of hydrogen from the steps on the miscut Si(111) studied by SFG spectroscopy
3. 学会等名 12th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Liu Xiaopeng, Gong Peiyang, Haque Mohammad, Khuat Thi Thu Hien and Goro Mizutani
2. 発表標題 Optical Second Harmonic Generation (SHG) Spectroscopy Analysis of the Electronic States of the Stepped Photo-catalyst Au/TiO ₂ (320) interface
3. 学会等名 12th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Liu Xiaopeng, Gong Peiyang, Haque Mohammad, Khuat Thi Thu Hien, Goro Mizutani
2. 発表標題 Optical Second Harmonic Generation (SHG) Spectroscopy of the Stepped Photo-catalyst Au/TiO ₂ (320) Interface
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 Xiaopeng Liu, Peiyang Gong, Haque Mohammad, Khuat Thi Thu Hien, Goro Mizutani
2. 発表標題 Analysis of the Electronic States for model Photocatalyst Au/TiO ₂ (320) 's step structure by Optical Second Harmonic Generation (SHG) Spectroscopy
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 K. T. T. Hien and G. Mizutani	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 5
3. 書名 Optical Second-Harmonic Generation Spectroscopy and Microscopy in "Compendium of Surface and Interface Analysis"	

〔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
研究分担者	K H U A T H i e n (KHUAT Hien) (30729190)	北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教 (13302)	