

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K21008

研究課題名(和文)酸素ラジカルアシスト光誘起結晶化プロセスによる光電極の反応安定性の革新的向上

研究課題名(英文)Improvement of chemical stabilities of photoelectrodes by integration of oxygen plasma to an excimer-laser assisted metal organic deposition process

研究代表者

西川 雅美(Nishikawa, Masami)

長岡技術科学大学・工学研究科・助教

研究者番号：20622393

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：光電極の反応安定性を向上させるべく、熱耐性の小さい光電極に、その特性を変化させることなく、化学安定性の高い金属酸化物を複合可能なエキシマレーザー照射法と酸素プラズマ法を融合した酸素ラジカルアシスト光誘起結晶化法を新規に開発した。本研究では、熱耐性の小さいCu<sub>2</sub>O光電極に、本手法によりTiO<sub>2</sub>を積層/結晶化した。酸素プラズマ内でTiO<sub>2</sub>前駆体膜にレーザー照射すると、酸素プラズマ内の活性酸素種により、酸素が十分に取り込まれた状態で前駆体膜が結晶化することで、酸素欠損の少ないTiO<sub>2</sub>膜が得られること、且つ、レーザー照射条件を適切にすることで、Cu<sub>2</sub>Oの変質を極力抑えられることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：For improvement of chemical stabilities of photoelectrodes, compositing of metal oxides with high chemical stabilities on the photoelectrodes is an effective solution. Since most of the photoelectrodes have low heat resistance, it is quite difficult to composite metal oxides on the photoelectrode because the properties of the photoelectrodes are declined during heat treatment for crystallization of metal oxides. In this work, an oxygen-plasma integrated excimer-laser assisted metal organic deposition process was firstly developed for compositing of TiO<sub>2</sub> (as a model material of metal oxides) on Cu<sub>2</sub>O photoelectrodes (as a model material of photoelectrodes). When the laser was irradiated to a TiO<sub>2</sub> precursor film in O<sub>2</sub> plasma, oxygen was sufficiently included in the precursor film and then TiO<sub>2</sub> was sufficiently crystallized with less oxygen defects. Furthermore, the property of the underlying Cu<sub>2</sub>O layer was kept during TiO<sub>2</sub> crystallization.

研究分野：無機工業材料

キーワード：薄膜プロセス エキシマレーザー 光電極

## 1. 研究開始当初の背景

太陽光と水から水素を製造できる光電極は、次世代エネルギー技術の候補の一つであり、種々の光電極材料が開発されている。光電極の高機能化には、異種材料を複合化させることが有効である。例えば、Cu<sub>2</sub>O 光電極は、太陽光で水を還元して水素を製造できるが、同時に自己還元反応も進行し、水還元活性が低下する。この自己還元は、TiO<sub>2</sub> のような化学安定性の高い材料を光電極表面に複合化させることで抑制できる。このように、異なる特性の材料を複合することで、光電極を高機能化することができるが、光電極材料は熱耐性が低い材料が多く、複合プロセス温度に制約がある。例えば、Cu<sub>2</sub>O 光電極に TiO<sub>2</sub> を複合させる際、Cu<sub>2</sub>O は CuO に酸化されやすいため、通常の炉による熱処理では、Cu<sub>2</sub>O の特性を変化させずに結晶性 TiO<sub>2</sub> を複合化させるは極めて困難である。そこで、下地材料(本研究では Cu<sub>2</sub>O)の特性を変化させずに、結晶性の高い金属酸化物(本研究では TiO<sub>2</sub>)を複合化させる手法が求められている。

エキシマレーザー照射を用いた光誘起結晶化法は、種々の金属酸化物の低温結晶化に有効であり、本手法を用いれば、Cu<sub>2</sub>O の特性を変化させずに結晶性 TiO<sub>2</sub> を複合化できることを明らかにしてきた (Appl. Sur. Sci, 2016, 363, 173)。しかし、光誘起結晶化法は、酸素欠損が形成されやすいという欠点があり、一方、光電極の高機能化には、良好な結晶性の金属酸化物の複合化が重要であるため、光有機結晶化法を、酸素量(結晶性)を制御可能なプロセスへと進展させることが望まれる。

## 2. 研究の目的

光誘起結晶化法によって形成する酸素欠損を解消すべく、活性酸素種を生成させる酸素プラズマ法に着目した。酸素プラズマ中には原子状酸素のような酸化力の高い活性酸素種が存在するため、酸素プラズマ雰囲気中でレーザー照射することで、活性酸素種により酸素欠損が解消し、酸素量を制御できることを期待した。本研究は、酸素プラズマ法と光誘起結晶化法の融合プロセスである酸素ラジカルアシスト光誘起結晶化法を新規に確立し、活性酸素種がレーザー照射による TiO<sub>2</sub> の結晶化に与える影響を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (光誘起結晶化法による TiO<sub>2</sub> 複合化)

Cu<sub>2</sub>O 光電極上に TiO<sub>2</sub> の前駆体溶液をスピンコートし、200 °C で乾燥した後に、酸素プラズマ雰囲気内(または大気中)で、KrF エキシマレーザー(λ:248 nm)を TiO<sub>2</sub> 前駆体膜表面から照射して、TiO<sub>2</sub>/Cu<sub>2</sub>O 光電極を得た。レーザーのフルエンスは 20-80 mJ/cm<sup>2</sup>、周波数は 10Hz にした。作製した TiO<sub>2</sub>/Cu<sub>2</sub>O 光電極の結晶性は、薄膜 XRD により評価した。

また、レーザー照射下における光電極の温度は、一次元熱伝導方程式を用いて計算した。

## 4. 研究成果

### 4-(1) 光誘起結晶化法による Cu<sub>2</sub>O 光電極への TiO<sub>2</sub> の複合化

まず、光誘起結晶化法による Cu<sub>2</sub>O 光電極への TiO<sub>2</sub> の複合を検討した。XRD パターンから、エキシマレーザー照射によって生成した相はルチル相のみであった。ルチル相の TiO<sub>2</sub> は、レーザーフルエンスが 40 mJ/cm<sup>2</sup> 以上で生成し、20 mJ/cm<sup>2</sup> では生成しなかった。図 1 に、レーザー照射条件とルチル TiO<sub>2</sub>

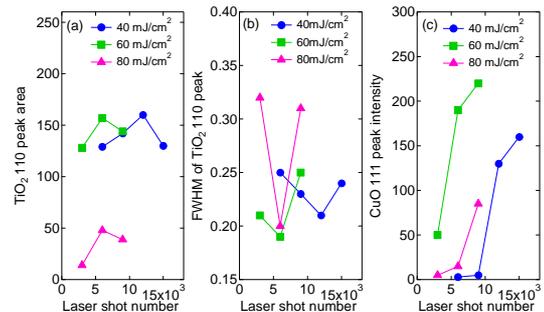


図 1 レーザー照射条件と(a)ルチル TiO<sub>2</sub> 生成量 (b)ルチル TiO<sub>2</sub> の結晶性 (c)CuO 生成量の関係

相の量(ルチル相 TiO<sub>2</sub> 110 回折ピーク面積)とルチル TiO<sub>2</sub> 相の結晶性(TiO<sub>2</sub> 相 110 ピークの半値幅)および CuO 生成量(CuO 相 111 ピーク強度)の関係を示す。この図より、ルチル相 TiO<sub>2</sub> 量は、レーザー照射ショット数の多くなるにつれて増加するが、ある一定の照射数を超えると減少する。また、レーザーフルエンスが 40 mJ/cm<sup>2</sup> が最も多く、レーザーフルエンスが高くなるにつれて、減少した。レーザー照射下の光電極のシミュレーション温度を図 2 に示す。TiO<sub>2</sub> 前駆体膜は、ナノ秒スケールで温度が急上昇し、そして室温に急速に低下する。従って、この過程は熱非平衡過程であり、TiO<sub>2</sub> 前駆体を含む光電極自体の平衡温度は室温であるため、炉等による熱処理の熱平衡プロセスと比べて、下地材料への熱ダメージは極めて小さいと考えられる。TiO<sub>2</sub> 前駆体膜の最表面温度は、レーザーフルエンスが 40 mJ/cm<sup>2</sup> では 800 °C、60 mJ/cm<sup>2</sup> で 1200 °C、80 mJ/cm<sup>2</sup> で 1600 °C である。熱平衡論的には、ルチル相が生成する温度は 800 °C 程度であることから、ルチル相の TiO<sub>2</sub> の生成には、熱効果の温度が重要であると言える。また、80 mJ/cm<sup>2</sup> では、到達温度も高く、急激な温度上昇を経るため、アブレーションを起こし、ルチル相 TiO<sub>2</sub> 生成量が減少したと考えられる。アブレーションは 40 mJ/cm<sup>2</sup> でも起きており、過剰に照射すると、TiO<sub>2</sub> 量は減少する。一方、Cu<sub>2</sub>O が酸化して生成する CuO は、40 mJ/cm<sup>2</sup> で、かつレーザー照射ショット数が少ない時は、ほとんど生成しない。このことから、本手法は、Cu<sub>2</sub>O の特性を変化させず(CuO に酸化させず)に、結晶性 TiO<sub>2</sub> を複合化することに有効である

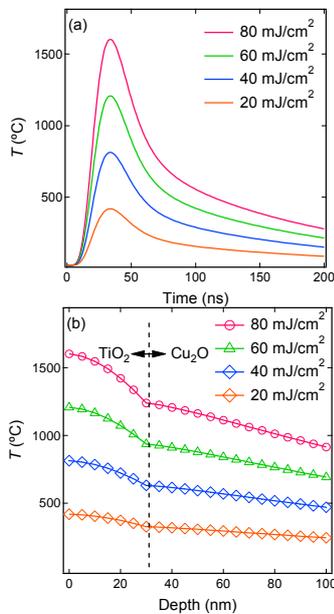


図 2 レーザー照射下の光電極のシミュレーション温度 (a)TiO<sub>2</sub> 層の最表面 (b)深さ方向

と言える。しかし、40 mJ/cm<sup>2</sup> でもレーザーショット数を上げるとCuOが生成するため、レーザーフルエンスとレーザーショット数を適切に選定することが必要である。

#### 4(2) 光誘起結晶化法への酸素プラズマ融合効果～結晶化への酸素プラズマの影響～

酸素アシスト光誘起結晶化法にて作製したTiO<sub>2</sub>/Cu<sub>2</sub>O光電極のXRDパターンを図3

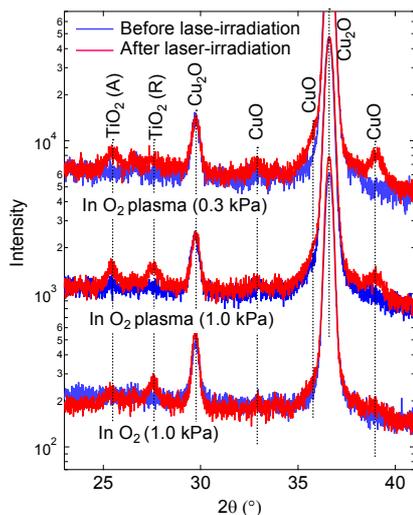


図 3 TiO<sub>2</sub>/Cu<sub>2</sub>O 光電極の XRD パターン (レーザー照射雰囲気の影響)

に示す。レーザーフルエンスを 40 mJ/cm<sup>2</sup>、レーザーショット数を 18000 に固定し、酸素プラズマ装置のチャンバー内の酸素圧を 1.0 と 0.3 kPa とした。酸素プラズマ融合効果を調べるため、酸素圧 1.0 kPa において、酸素プラズマなしで作製した TiO<sub>2</sub>/Cu<sub>2</sub>O 光電極の XRD パターンも併せて示す。まず、酸素プラズマ無し (酸素圧:1.0 kPa) では、主にルチル相 TiO<sub>2</sub> の回折ピークが観測され、アナターゼ相 TiO<sub>2</sub> の回折ピークもわずかに観

測された。これまで、パルスレーザーアブレーション法で TiO<sub>2</sub> 膜を作製した場合は、ルチル相とアナターゼ相の生成に、酸素分圧が関係し、酸素分圧が小さくなるにつれて、アナターゼ相よりもルチル相が優位に生成し、最終的には、アモルファス相になることが報告されている (J. Phys. Chem. C, 2015, 119, 11578)。これは、酸素欠損がルチル相への相転移を誘発しているためと考えられている。しかし、本研究ではこれと逆の傾向を示し、4-(1)で述べたように、大気中 (酸素分圧:21 kPa) でレーザー照射した場合はルチル相のみが生成し、酸素圧が低くなると、ルチル相とアナターゼ相が生成した。ルチル相とアナターゼ相の生成比率に酸素欠損量に関係していることから、光誘起結晶化法で生成するルチル/アナターゼ生成比率には、レーザー照射する際の雰囲気構成成分 (酸素以外の不純物) が関係したと考えられる。レーザー照射下の結晶化は、図 2 に示すように、数十ナノ秒の瞬間的な熱効果によって進行することに加え、前駆体の有機チタンとレーザーとの光化学反応も結晶化に寄与することがわかっている。これは、レーザーがチタンと有機配位子との結合を切断し、生じたダングリングボンドが酸素との結合を形成することで、金属酸化物への結晶化を促進させるという反応である。この時、大気中の窒素が存在すると、酸素とチタンの反応が進行が抑制され、酸素欠損が生成すると思われる。熱平衡プロセスでは、酸素欠損は解消されるが、光誘起結晶化法は瞬間的な熱効果による熱非平衡プロセスであるため酸素欠損が解消されず、大気中ではアナターゼ相が生成しなかったと考えられる。つまり、光誘起結晶化法は、酸素の存在量 (圧) に加えて、窒素等の不純物の影響を大きく受けると考えられる。

次に、酸素プラズマ雰囲気内 (酸素圧:1.0 kPa) でレーザー照射して作製した TiO<sub>2</sub>/Cu<sub>2</sub>O 光電極の XRD パターンを見てみると、ルチル相とアナターゼ相が生成し、酸素プラズマがない場合と比較して、アナターゼ相の回折ピークが明らかに大きいことから、酸素プラズマ雰囲気はアナターゼ相への結晶化を促進させることがわかった。アナターゼ相の生成は、酸素欠損が比較的出来にくい条件下で起きることから、酸素プラズマ雰囲気は、酸素欠損を解消することを示している。この理由として、次の 2 つ レーザーによって切断された金属のダングリングボンドと酸素との結合を形成する際、酸素プラズマ中の原子状酸素等の活性酸素種によって、金属-酸素間の結合が形成されやすくなり、酸素が十分に取り込まれた状態で金属酸化物 (アナターゼ相) へと結晶化した、TiO<sub>2</sub> が結晶化した後、生成した酸素欠損部に活性酸素種が拡散し、酸素が補てんされ、酸素欠損が解消したと考えられる。

さらに、酸素プラズマ内の酸素圧を 0.3 kPa にした場合、アナターゼ相とルチル相の

回折ピークは、共に小さくなり、特にルチル相の回折ピークの減少は顕著であった。ルチル相の生成が抑制され、アナターゼ相が主に生成したのは、酸素プラズマ内の活性酸素種の比率に関係していると考えられる。酸素プラズマ装置内の活性酸素種濃度については明らかではないが、活性酸素を生成するのに適した酸素圧があり、活性酸素種濃度と酸素圧は比例関係にない。酸素圧が低いと活性酸素種の比率が高くなるため、活性酸素種の比率の向上がルチル相の生成を抑制した要因と考える。また、酸素圧の低下による2つの相の回折ピークの減少は、これまで酸素圧が低いとTiO<sub>2</sub>は結晶化せずにアモルファス相になるという報告に矛盾しないため、酸素圧の低下が結晶化を阻害したものと考える。一般的には、酸素圧の低下に伴い、アナターゼ相よりもルチル相が優勢になり、そしてアモルファス相になるのに対して、光誘起結晶化法は、アナターゼ相が優勢になり、そしてアモルファス相に成るという点で、その他のプロセスとは異なる。

一方、Cu<sub>2</sub>Oが酸化して生成するCuOの回折ピークは、酸素プラズマなしでは、ほとんど観測されなかったが、酸素プラズマ内では、CuOの回折ピークが観測された。このことは、酸素プラズマ内の活性酸素種が膜内部に拡散していくことを示している。通常は、酸素プラズマ処理は表面改質に使用するが、エキシマレーザー照射と融合することで、表面だけでなく、内部まで活性酸素種による酸化反応が起きることが分かった。

次に、酸素プラズマ内の酸素圧を1.0 kPaとし、レーザーフルエンスを変えて作製した光電極のXRDパターンを図4に示す。

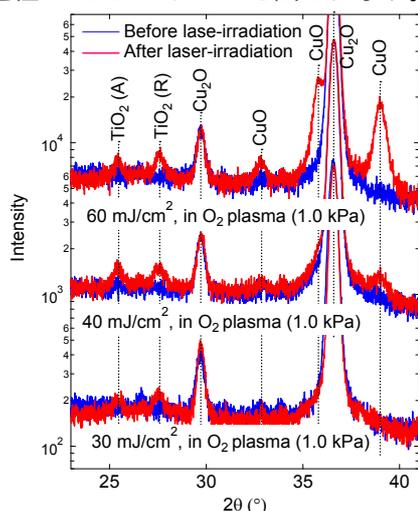


図4 TiO<sub>2</sub>/Cu<sub>2</sub>O光電極のXRDパターン (レーザーフルエンスの影響)

30-60 mJ/cm<sup>2</sup>の範囲内において、すべてルチル相とアナターゼ相に起因する回折ピークが観測された。ルチル相の回折ピーク強度は、レーザーフルエンスに大きく影響されずにほぼ一定であったが、アナターゼ相の回折ピーク強度は、40 mJ/cm<sup>2</sup>で最も大きかった。これは、図2の温度シミュレーションの結果

から、レーザー照射下の膜の温度が高くなるにつれて、活性酸素種の膜内部への拡散が促進され、結果として、膜に酸素が十分に供給され、アナターゼ相を生成しやすくなることを示しており、また、60 mJ/cm<sup>2</sup>になると、膜の温度は1200になるため、熱平衡的にはルチル相が安定相となるため、アナターゼ相の生成が減少したと考えられる。一方、Cu<sub>2</sub>Oが酸化して生成するCuOの回折ピークは、30 mJ/cm<sup>2</sup>ではほとんど観測されなかったが、60 mJ/cm<sup>2</sup>で顕著に観測された。これは、レーザー照射により、TiO<sub>2</sub>前駆体膜だけでなく、下地のCu<sub>2</sub>Oも高温になるため酸化が促進されたためである。

次に、詳細に結晶化機構を考察するため、2段階レーザー照射を試みた。大気中でレーザー照射して前駆体膜をルチル相にした後に、酸素プラズマ内(酸素圧:1.0 kPa)でレーザー照射して作製したTiO<sub>2</sub>/Cu<sub>2</sub>O光電極を図5に示す。レーザー照射条件は、大気中、

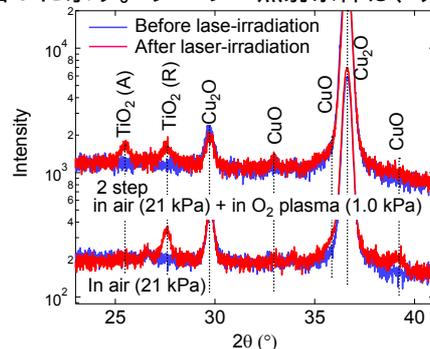


図5 TiO<sub>2</sub>/Cu<sub>2</sub>O光電極のXRDパターン (2段階レーザー照射プロセス)

酸素プラズマ中ともに40 mJ/cm<sup>2</sup>、9000ショット数(計18000ショット)とした。比較のため、大気中で40 mJ/cm<sup>2</sup>、18000ショットで一段階レーザー照射して作製したTiO<sub>2</sub>/Cu<sub>2</sub>O光電極のXRDパターンも併せて示す。大気中で一段階レーザー照射した場合、ルチル相のみが生成したが、2段階でレーザー照射した場合は、ルチル相の回折ピークとアナターゼ相の回折ピークが観測された。酸素プラズマ内でレーザー照射した時は、前駆体の有機成分は分解しており、また、TiO<sub>2</sub>のTi-Oの結合は、エキシマレーザーのエネルギーよりも大きいため、切断されず、光化学反応は起きない。そのため、アナターゼ相の生成には必ずしも光化学反応は必要でなく、レーザー照射による瞬間的な熱効果と酸素プラズマ内の活性酸素種のみで、アナターゼ相の生成することがわかった。アナターゼ相の生成に、酸素欠損量の低減が必要と考えると、レーザー照射による瞬間的な熱効果により活性酸素種がTiO<sub>2</sub>膜の内部に拡散し、酸素欠損部に酸素が補てんされ、アナターゼ相の生成を促したと考えられる。さらに、CuOの回折ピークを見ると、その回折強度は極めて小さく、Cu<sub>2</sub>Oの酸化が抑制されていることがわかった。これは有機チタンの前駆体膜がルチル相TiO<sub>2</sub>に結晶化したことによ

り、膜の密度が向上し、Cu<sub>2</sub>O 層まで活性酸素種の拡散が抑えられたためと考えられる。この結果より、レーザーの照射段階毎に、雰囲気調整することで、限りなく下地のCu<sub>2</sub>O の特性を変化させることなく、結晶性の良好な TiO<sub>2</sub> を複合化させることが可能であることがわかったが、一方で、酸素プラズマ内のみでレーザー照射した場合は、大気中のみでレーザー照射した場合と同程度の強度のCuO 回折ピークが観測された(図3~5)にも関わらず、2段階(大気中+酸素プラズマ)にすることでCuO 回折ピークが観測されなくなる理由については不明瞭な点も多く、今後検討していく必要がある。

以上から、光誘起結晶化法と酸素プラズマ法を融合することで、TiO<sub>2</sub> 膜内の酸素量を制御でき、更にレーザーの照射段階毎に、雰囲気調整する多段階プロセスにすることで、限りなく下地のCu<sub>2</sub>O の特性を変化させることなく、結晶性の良好な TiO<sub>2</sub> を複合化させることが可能であることを明らかにした。

#### 4(3) まとめ

光誘起結晶化法と酸素プラズマ法の融合プロセスである酸素ラジカルアシスト光誘起結晶化法は、レーザー照射によって起こる光化学反応および熱効果と、原子状酸素等の活性酸素種の高い酸化力との相乗効果によって、膜内の酸素量の制御に有効であり、結晶性の良好な金属酸化物を低温で作製できる可能性が示された。従って、本プロセスは、熱耐性の小さい光電極材料に、結晶性の良好な金属酸化物を複合させることで、光電極の更なる高機能化の可能性を示した。

### 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 8 件)

1. Masami Nishikawa, Soichiro Yuto, Tomohiko Nakajima, Tetsuo Tsuchiya, Nobuo Saito, "Effect of lattice distortion on photocatalytic performance of TiO<sub>2</sub>." *Catalysis Letters*, 147, 292-300 (2016) DOI: 10.1007/s10562-016-1928-x, 査読有
2. Masami Nishikawa, Soichiro Yuto, Takahiro Hasegawa, Wataru Shiroishi, Hou Honghao, Yukihiro Nakabayashi, Yoshio Nosaka, Nobuo Saito, "Compositing effects of CuBi<sub>2</sub>O<sub>4</sub> on visible-light responsive photocatalysts." *Materials Science in Semiconductor Processing*, 57, 12-17 (2016) DOI:10.1016/j.mssp.2016.09.013, 査読有
3. Takuya Kataoka, Liyin Wang, Kouhei Kobayashi, Masami Nishikawa, Motohiro Tagaya, "Incorporation of terbium ion into mesoporous silica particles." *Japanese Journal of Applied Physics*, 55, 115503/1-5, (2016)

- DOI:10.7567/JJAP.55.105503, 査読有
4. Shusaku Shoji, Ge Yin, Masami Nishikawa, Daiki Atarashi, Etsuo Sakai, Masahiro Miyuchi, "Photocatalytic reduction of CO<sub>2</sub> by Cu<sub>x</sub>O nanocluster loaded SrTiO<sub>3</sub> nanorod thin film." *Chemical Physics Letters*, 658, 309-314, (2016) DOI:10.1016/j.cplett.2016.06.062, 査読有
  5. Masami Nishikawa, Masayuki Fukuda, Yukihiro Nakabayashi, Nobuo Saito, Nobuhiro Ogawa, Tomohiko Nakajima, Kentaro Shinoda, Tetsuo Tsuchiya, Yoshio Nosaka, "A method to give chemically stabilities of photoelectrodes for water splitting: compositing of a highly crystalized TiO<sub>2</sub> layer on a chemically unstable Cu<sub>2</sub>O photocathode using laser-induced crystallization process." *Applied Surface Science*, 363, 173-180, (2016) DOI:10.1016/j.apsusc.2015.12.002, 査読有
  6. Motohiro Tagaya, Kouhei Kobayashi, Masami Nishikawa, "Additive effect of phosphoric acid on phosphorus-containing mesoporous silica film formation." *Materials Letters*, 164, 651-654, (2016) DOI:10.1016/j.matlet.2015.11.070, 査読有
  7. Yukihiro Nakabayashi, Masami Nishikawa, Yoshio Nosaka, "Fabrication of bismuth copper vanadate electrodes through feasible chemical solution method for visible light-induced water oxidation," *Journal of Applied Electrochemistry*, 46, 9-16, (2015) DOI:10.1007/s10800-015-0890-4, 査読有
  8. Masami Nishikawa, Lee Hua Tan, Yukihiro Nakabayashi, Takahiro Hasegawa, Wataru Shiroishi, Seiichi Kawahara, Nobuo Saito, Atsuko Nosaka, Yoshio Nosaka, "Visible light responsive vanadium-substituted hydroxyapatite photocatalysts." *Journal of Photochemistry and Photobiology, A: Chemistry*, 311, 30-34, (2015) DOI:10.1016/j.jphotochem.2015.06.005, 査読有

〔学会発表〕(計 20 件)

1. 西川雅美、由藤宗一郎、野坂芳雄、齊藤信雄「TiO<sub>2</sub> 格子歪と光触媒活性の関係」2016年光化学討論会、2016年9月7日(東京大学)
2. 西川雅美、由藤宗一郎、中島智彦、土屋

- 哲男、齊藤信雄「TiO<sub>2</sub>光触媒活性への格子歪効果」第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016年9月13日(新潟朱鷺メッセ)
3. 瀬川龍生、西川雅美、中島智彦、土屋哲男、齊藤信雄「光MODによるCu<sub>2</sub>O光電極のTiO<sub>2</sub>複合化への雰囲気効果」第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016年9月13日(新潟朱鷺メッセ)
  4. 白石亘、西川雅美、野坂芳雄、齊藤信雄「Fe担持IrドーピングTiO<sub>2</sub>の光触媒反応機構」第23回シンポジウム「光触媒反応の最近の展開」2016年12月2日(東京理科大学)
  5. Hideto Furuno, Keisuke Mori, Masami Nishikawa, Kazunori Sato, Nobuo Saito "Photocatalytic CO<sub>2</sub> reduction on particulate metal-ion-doped CeO<sub>2</sub> and GaN." Post-symposium of ICC16: Environmental Catalysis, 2016年7月9-11日(中国)
  6. Hou Honghao, Masami Nishikawa, Kazunori Sato, Nobuo Saito "Photocatalytic activities for overall water splitting and lead ion removal on inhomogeneous Sm-doped CeO<sub>2</sub>." Post-symposium of ICC16: Environmental Catalysis, 2016年7月9-11日(中国)
  7. Takahiro Inoue, Masami Nishikawa, Nobuo Saito "Effects of surface acid treatment on Mg-doped GaN for photocatalytic overall water splitting." Pacsurf 2016, Pacific Rim Symposium on Surfaces, Coatings and Interfaces, 2016年12月11-15日(米国)
  8. Hideto Furuno, Masami Nishikawa, Kazunori Sato, Nobuo Saito "Photocatalytic CO<sub>2</sub> reduction on particulate metal-ion-doped CeO<sub>2</sub>." Pacsurf 2016, Pacific Rim Symposium on Surfaces, Coatings and Interfaces, 2016年12月11-15日(米国)
  9. 御船俊哉、齊藤信雄、西川雅美「可視光吸収Pb<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>O<sub>7</sub>光触媒による水分解反応」H28年度日本金属学会・日本鉄鋼協会北陸信越支部連合講演会、2016年12月3日(金沢大学)
  10. 渡部克基、齊藤信雄、西川雅美「水分解反応の光触媒活性に及ぼすSmドーピング酸化セリウムの表面ナノ分散型構造」H28年度日本金属学会・日本鉄鋼協会北陸信越支部連合講演会、2016年12月3日(金沢大学)
  11. 後藤匠、齊藤信雄、西川雅美、新田敦己「TiO<sub>2</sub>を含有した結晶化ガラスの光触媒特性評価」H28年度日本金属学会・日本鉄鋼協会北陸信越支部連合講演会、2016年12月3日(金沢大学)
  12. 候鴻浩、齊藤信雄、西川雅美、関根洋「Sm doped CeO<sub>2</sub>光触媒のドーパント分散状態に対する水全分解活性」H28年度日本金属学会・日本鉄鋼協会北陸信越支部連合講演会、2016年12月3日(金沢大学)
  13. 園田明、齊藤信雄、西川雅美「水分解反応に対するMgドーピングGa<sub>2</sub>N光触媒のMgドーピング量」H28年度日本金属学会・日本鉄鋼協会北陸信越支部連合講演会、2016年12月3日(金沢大学)
  14. 西川雅美、福田真之、野坂芳雄、中島智彦、土屋哲男、齊藤信雄「TiO<sub>2</sub>を複合化したCu<sub>2</sub>O光電極の水還元反応の安定性評価」第63回応用物理学会春季学術講演会、2016年3月19-22日(東京工業大学)
  15. 西川雅美、福田真之、中林志達、小川展弘、中島智彦、篠田健太郎、土屋哲男、野坂芳雄「TiO<sub>2</sub>を複合化したH<sub>2</sub>O還元用光電極の反応安定特性の評価」第34回光がかかわる触媒化学シンポジウム、2015年6月19日(東京工業大学)
  16. 由藤宗一郎、西川雅美、野坂芳雄、齊藤信雄「TiO<sub>2</sub>光触媒活性への格子歪の影響」第22回シンポジウム「光触媒反応の最近の展開」2015年12月4日(東京理科大学)
  17. 白石亘、西川雅美、野坂芳雄、齊藤信雄「Fe担持/金属ドーピングTiO<sub>2</sub>光触媒の可視光活性に有効な電荷移動経路の解析」第22回シンポジウム「光触媒反応の最近の展開」2015年12月4日(東京理科大学)
  18. 西川雅美、白石亘、野坂芳雄「ESRによるTiO<sub>2</sub>系光触媒反応解析」第54回電子スピンスイェンス学会年会、2015年11月2-4日(新潟朱鷺メッセ)
  19. 渡部克基、西川雅美、齊藤信雄「サマリウムをドーピングした酸化セリウム光触媒による水分解反応」H27年度電気化学会北陸支部秋季大会・表面技術協会関東支部講演会、2015年10月20日(長岡)
  20. 森圭介、和田真矢、西川雅美、齊藤信雄「水分解反応に対するpn接合型窒化ガリウム粒子の光触媒活性」H27年度電気化学会北陸支部秋季大会・表面技術協会関東支部講演会、2015年10月20日(長岡)
- 〔図書〕(計2件)
1. 西川雅美、野坂芳雄「光触媒の高効率化に向けて～反応機構解明からのアプローチ」空気清浄、日本空気清浄協会、53、166-174、(2015)
  2. 西川雅美「可視光応答型ハイドロキシアパタイト系光触媒」OPTRONICS、オプトロニクス社、12、136-139、(2015)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

西川 雅美 (NISHIKAWA MASAMI)

長岡技術科学大学・工学研究科・助教

研究者番号：20622393