

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：13904  
 研究種目：基盤研究(B) (一般)  
 研究期間：2019～2021  
 課題番号：19H02810  
 研究課題名(和文) ナノ構造化銅酸化物光カソードの光・電気化学的構築と高効率水分解水素生成への展開

研究課題名(英文) Electrochemical construction of nanostructured copper oxide photocathodes for high performance water-splitting hydrogen gas generation

研究代表者  
 伊崎 昌伸 (IZAKI, MASANOBU)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30416325

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：1.5eV-p-CuOと2.1eV-p-Cu<sub>2</sub>Oから構成される光カソード(積層体・ナノ混合体)を、光・電気化学反応によって形成し、優れた光電変換機能を実現すると共に、積層体化効果を明確にした。電気化学製膜と大気酸化により形成したCuO/Cu<sub>2</sub>O積層体において両層が光電変換機能を有することを示したが、半導体品質の重要性が明らかとなった。また、Cu-酒石酸錯体水溶液系から電位スイッチングによりCuO、Cu<sub>2</sub>O単層ならびにそれらの積層体を形成し、Cu<sub>2</sub>O/CuO積層体において外部量子効率約90%の優れた光電変換機能を実現するとともに、内蔵電解ならびにキャリア輸送特性の重要性を明らかにした。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により銅酸化物積層体が広い波長範囲の光に対して光電変換機能を有し、高い外部量子効率を実現できること、低コストで拡張性の高い水溶液電気化学プロセスにより形成できることを明らかにした。バンドギャップの異なる複数のp型半導体含有することは、光カソードや太陽電池用光電変換層において高効率化のための重要な要件であり、従来とは異なるp型半導体層の直接接合型という新規な概念によりその有効性を実証したことは極めて重要である。本研究成果は高効率太陽電池ならびに高効率光電気化学水分解水素生成用光電極の高性能化に直結する成果であり、CO<sub>2</sub>フリー社会の実現に向けて社会的インパクトは非常に大きい。

研究成果の概要(英文)：The bilayer and nanostructured photocathodes composed of 1.5eV-p-CuO and 2.1eV-p-Cu<sub>2</sub>O have been fabricated by photoelectrochemical reaction, and the photovoltaic characteristics and the dominant factors have been clarified. Both the Cu<sub>2</sub>O and CuO layers in the CuO/Cu<sub>2</sub>O bilayer fabricated by electrodeposition followed by heating act as photovoltaic layers resulting in the expansion of the photovoltaic wavelength range. And, the single layers and bilayers of Cu<sub>2</sub>O and CuO have been fabricated by photoelectrochemical reactions in a Cu-tartrate complex aqueous solution designed based on thermodynamics. The Cu<sub>2</sub>O/CuO bilayer revealed external quantum efficiency of 56.8%, and the value enhanced to around 90% by heating under optimized condition. The semiconductor quality, band alignment, and carrier transportation phenomena of them strongly affected the photovoltaic characteristics, that is quantum efficiency.

研究分野：エネルギー関連化学

キーワード：銅酸化物 光電気化学 積層体 ナノ構造体 光電変換 光カソード

## 1. 研究開始当初の背景

気候変動枠組条約第 21 回締約国会議(COP21,2015)において採択された 2°C 目標を達成するための CO<sub>2</sub> の大規模削減に資する将来の二次エネルギーとして水素が期待され、その製造方法として水電解水素製造法が注目されているが、水素製造コストが高いことが課題である。その解決法として、再生可能エネルギーである太陽光を活用した光電気化学反応による水素製造(M. G. Walter, et al., *Chem. Rev.*, 110(2010),6446)が期待され、それを実現する高効率光カソード材料の研究開発と高効率化の学理の構築が緊急の課題となっている。光電気化学水分解水素生成過程は、①光吸収による電子-ホール対(エキシトン)生成、②エキシトン乖離による電子キャリア生成、③キャリアの水溶液界面への移動、のキャリア生成・輸送過程と④電子による水還元水素生成、からなる。申請者は、CuO/Cu<sub>2</sub>O 積層体光カソード(図 1)を考案し、光吸収波長領域の拡大により特性が向上することを実証した(特開 2017-54917)。これらの研究成果から、電子キャリアを有効に取り出す積層体構造ならびにナノ構造の導入により特性がさらに向上すると考えた。そして、レアメタルを含有せず世界的な元素戦略も不要な CuO-Cu<sub>2</sub>O 系において、高効率・高安定性、低コストプロセスを実現すれば、光電気化学水素製造を大きく前進させると考えた。CuO-Cu<sub>2</sub>O 光カソードの能力を発揮させるために、申請者独自の熱力学に立脚した電気化学製膜技術、酸化太陽電池の高効率化に関する知識・技術を駆使して、目的達成に挑む。

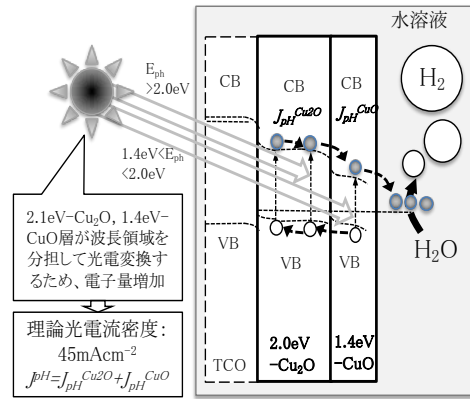


図1 CuO/Cu<sub>2</sub>O光カソードにおけるエネルギー状態と光電気化学水分解水素生成過程の模式図(RHE:0V)  
CB:伝導帯、VB:価電子帯、●:電子、○:正孔

## 2. 研究の目的

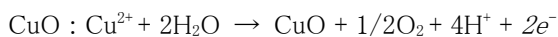
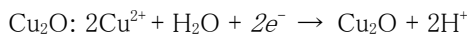
本研究では、CO<sub>2</sub> 排出量の大幅削減に資する太陽光活用水分解水素生成用高効率光カソードを実現するために、1.5eV-p-CuOと2.1eV-p-Cu<sub>2</sub>Oから構成される光カソード(積層体・ナノ混合体・超格子)ならびに熱力学に立脚した電気化学製膜法を考案・確立することによって、大きな光電流密度を実現すると共に、キャリア輸送特性との定量的解析から積層体化効果を解明し、高効率化の指針を明確にすることを目的とする。さらに、表面保護酸化層を電気化学的に選定し、光カソード安定性を向上させる。

## 3. 研究の方法

### 3-1. CuO・Cu<sub>2</sub>O 層形成用電気化学製膜法の設計と実証

銅-乳酸錯体水溶液から電気化学的に形成した Cu<sub>2</sub>O 層の大気加熱により作製した CuO/Cu<sub>2</sub>O 積層体の構造と光電変換機能に及ぼす加熱条件の影響を検討し、光電変換機能(外部量子効率)と構造・組織の関係について検討した。

そして、加熱を用いずに、CuO-Cu<sub>2</sub>O 積層体ならびにナノ構造体を形成するための水溶液系の検討を行った。電気化学的に CuO と Cu<sub>2</sub>O を作り分けるために、本研究では、熱力学的考察から、Cu 錯体領域の卑な電位側に Cu<sub>2</sub>O 領域が存在し、Cu 錯体領域の低 pH 側に CuO 領域が存在する Cu-酒石酸錯体系を選定した。Cu-酒石酸錯体水溶液からの電気化学的 Cu<sub>2</sub>O、CuO 析出反応は、Cu<sup>2+</sup>イオンを考えた場合には以下のように記述できる。



### 3-2. CuO-Cu<sub>2</sub>O 積層体・ナノ構造体光カソードの電気化学的構築とナノ構造体効果の解明

Cu<sub>2</sub>O ならびに CuO は共に p 型半導体であり、Cu-酒石酸錯体水溶液からの CuO 形成に必要なホール(h<sup>+</sup>)は多数キャリア、Cu<sub>2</sub>O 形成に必要な電子(e<sup>-</sup>)は少数キャリアである。3-1 に用いる基板は高伝導性ガラス基板であるが、積層体やナノ構造体形成においては CuO もしくは Cu<sub>2</sub>O が下地材料となり、少数キャリア制御が必要となると予想される。そこで、電気化学製膜時に、Cu<sub>2</sub>O のバンドギャップよりも大きなエネルギーを有する光を照射し、光電気化学反応による CuO-Cu<sub>2</sub>O 積層体ならびにナノ構造体形成について検討した。光源には超高压水銀灯を用い、基板側からと水溶液側から光を照射した。

### 3-3. 高安定性銅酸化物光カソードの構築と高効率・高安定性水素生成の実現

水素生成電位( $E$ )は、 $E = 0 - 0.0591pH - 0.0295 \cdot \log p_{H_2}$  (水素電極基準) で表される。この電位は、 $pH$ によらず、 $Cu$ -水系電位- $pH$  図の金属  $Cu$  領域内に位置するので、 $CuO$ 、 $Cu_2O$  は金属  $Cu$  に還元されると予想され、光電流密度低下の要因となる。そこで、この電位において平衡相である  $ZnO$  を表面保護層として選定し、 $CuO$  の光電気化学安定性に及ぼす  $ZnO$  層被覆の影響について検討した。

## 4. 研究成果

### 4-1. $CuO \cdot Cu_2O$ 層形成用電気化学製膜法の設計と実証

図2に、銅-乳酸錯体水溶液から電気化学的に形成した  $Cu_2O$  層を 573K で 1h 大気酸化することによって形成した  $CuO/Cu_2O$  積層体の TEM 像とナノビーム回折図形、シンクروتロン X 線(SPring8)による局所発光スペクトル、外部量子効率を示す。外部量子効率は、FTO 基板上に電気化学的に  $n$ - $ZnO$  層ならびに  $Cu_2O$  層を形成した後、 $Au$  電極を蒸着法により形成した、FTO/ $n$ - $ZnO$ / $p$ - $Cu_2O$  もしくは  $p$ - $Cu_2O$ / $p$ - $CuO$ / $Au$  光電変換素子を用いて評価した。

$Cu_2O$  層の大気酸化により単斜晶構造を有する  $p$ - $CuO$  層が形成し、加熱温度の上昇に伴い厚さは増加した。573K 加熱により形成した厚さ 20nm- $CuO$  層は  $Cu_2O$  層上にヘテロエピタキシャル成長し、(200) $CuO$ //(200) $Cu_2O$  の方位関係を有していたが、673K 加熱により生成した厚さ 175nm- $p$ - $CuO$  層ではランダム方位を有する多結晶体に変化した。また、673K 加熱により形成した  $CuO/Cu_2O$  積層体では、 $CuO/Cu_2O$  界面、 $Cu_2O$  層バルクならびに  $Cu_2O/ZnO$  界面にナノポアの生成が確認された。このナノポアは、 $Cu_2O$  が  $CuO$  に熱酸化する過程で生成する空孔が集合・合体することによる。

シンクروتロン X 線を用いた局所フォトルミネッセンス測定において、製膜状態ならびに 573K 加熱した  $Cu_2O$  層は、バンドギャップエネルギーに相当する約 2eV のバンド端発光を示したが、673K 加熱により消失した。573K 加熱により生成した  $CuO$  層は、バンドギャップエネルギーに相当する約 1.5eV のバンド端発光を示したが、673K 加熱により消失した。これは、 $CuO$  への熱酸化過程で生成する空孔などの格子欠陥が局在準位を形成したためであり、バンド端発光が観測された 573K 加熱した  $Cu_2O$  ならびに  $CuO$  層は優れた半導体品質を有していた。

$Cu_2O$  単層素子は、バンドギャップエネルギーに相当する波長約 620nm から短波長側において光電変換機能を示し、波長 370nm において外部量子効率 94%を示した。573K 加熱により形成した  $CuO/Cu_2O$  積層体素子は、 $CuO$  のバンドギャップエネルギーに相当する波長約 900nm 以下で光電変換機能を示し、約 360nm で約 20%の最大外部量子効率を示した。しかし、673K 加熱により、光電変換機能が消失した。

以上のことから、 $Cu_2O$  層の大気中 573K 加熱により形成した  $CuO/Cu_2O$  積層体では、 $Cu_2O$  ならびに  $CuO$  層共に光電変換層として機能したが、 $CuO$  形成に伴って導入されるナノポアなどの欠陥が光電変換機能を消失させることが明らかとなった。(M. Izaki, et al., *ACS Applied Energy Materials*, 2(2019), 4833-4840, 他)

そこで、加熱を伴わない電気化学反応のみによって  $CuO/Cu_2O$  積層体を形成するための溶液系の検討を行った。熱力学に立脚して考案した  $Cu$ -酒石酸錯体溶液系から、バンドギャップエネルギー 1.5eV の単斜晶系  $CuO$  ならびにバンドギャップエネルギー 2.1eV の立方晶系  $Cu_2O$  層を、加熱処理なしに単一水溶液系から陽分極ならびに陰分極により直接作製し、標準的なフラットバンド電位を有することを示した。また、熱力学を活用した溶解化学種に関する考察から、 $Cu$ -酒石酸錯体水溶液からの  $Cu_2O$  ならびに  $CuO$  の反応機構を示した。(M. Izaki, et al., *Journal of The Electrochemical Society*, 168(2021), 112510.)

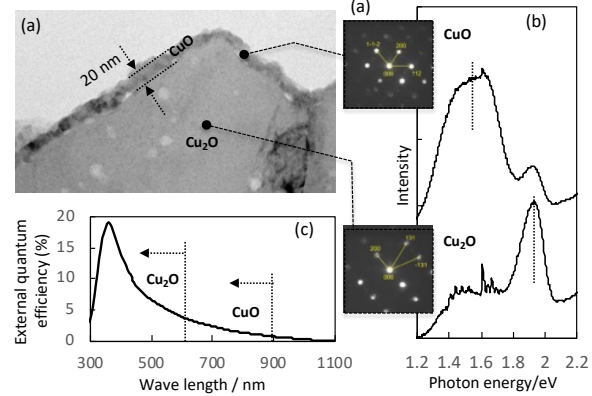


図2 電気化学的に形成した $Cu_2O$ 層の大気加熱により形成した  $CuO/Cu_2O$ 積層体の高分解能TEM像とナノビーム回折図形(a)、室温局所フォトルミネッセンススペクトル(b)、光電変換機能(c)



#### 4-2. CuO-Cu<sub>2</sub>O 積層体・ナノ構造体光カソードの電気化学的構築とナノ構造体効果の解明

図3に、光電気化学電位スイッチングによるCuO/Cu<sub>2</sub>OならびにCu<sub>2</sub>O/CuO積層体形成におけるクロノアンペロメトリーと表面・断面組織を示す。Cu<sub>2</sub>OならびにCuOの形成電位は、Ag/AgCl基準で-0.4Vならびに0.4Vとし、陽分極ならびに陰分極における電気量は等しい。基板には、F:SnO<sub>2</sub>被覆ガラス基板(FTO)を用い、電気化学的にn-ZnO層を形成した。光照射を行わない場合もCuO/Cu<sub>2</sub>O積層体は形成できたが、CuO層上には孤立したCu<sub>2</sub>O粒子が分散析出し、均一層は得られなかった。これは、Cu-酒石酸錯体水溶液からのCuO層の電気化学的

形成に必要なホール(h<sup>+</sup>)はCu<sub>2</sub>O半導体の多数キャリアであるが、Cu<sub>2</sub>O層の形成に必要な電子(e<sup>-</sup>)はCuO半導体の少数キャリアとなる。そこで、電気化学製膜中にCuOのバンドギャップエネルギーよりも大きな光エネルギーを有する光を照射し、少数キャリアの増加を図った。その結果、CuO/Cu<sub>2</sub>OならびにCu<sub>2</sub>O/CuO積層体形成の、いずれにおいても、電位スイッチングにตอบสนองして電流値もスイッチングしており、Cu<sub>2</sub>OならびにCuO層からなる積層体が形成することができた。(M. Izaki, et al., ACS OMEGA, 5(2020), 683-691)

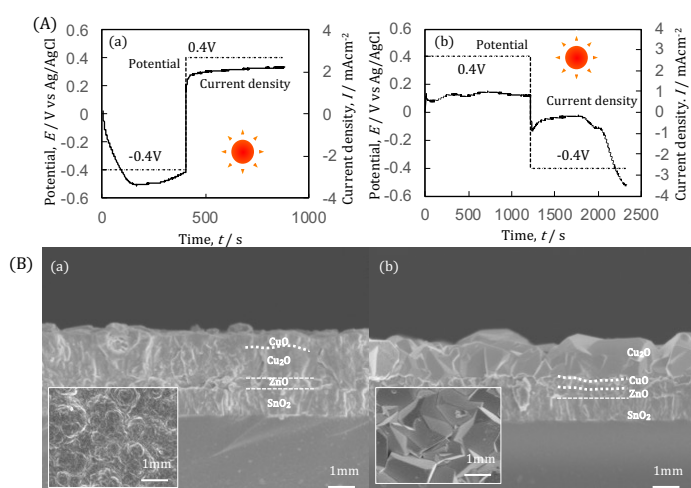


図3 CuO/Cu<sub>2</sub>O(a)ならびにCu<sub>2</sub>O/CuO積層体(b)形成におけるクロノアンペロメトリー(A)ならびに表面・断面FE-SEM像(b)

図4に、光電気化学的に形成したCu<sub>2</sub>O/CuO積層体光電変換素子の断面像とAM1.5(1sun)照射下で測定した外部量子効率を示す。素子構造は、FTO/ZnO/Cu<sub>2</sub>O/CuO/Auくし形電極である。製膜した状態において、CuO半導体のバンドギャップエネルギーに相当する波長900nm以下において光電変換機能を示し、波長510nmにおいて外部量子効率56.8%を示し、電気化学製膜と加熱により形成したCuO/Cu<sub>2</sub>O光電変換素子に対して、外部量子効率の著しい向上が実現できた。Cu<sub>2</sub>O層ならびにCuO単層の外部量子効率曲線の形状などからCu<sub>2</sub>O層ならびにCuO層両層が光電変換層として機能していること、光電変換機能の向上のためにはキャリア輸送特性と関係するCu<sub>2</sub>O/CuO界面に形成される内蔵電解の制御が重要であると考えられた。また、大気中ならびに真空中423K加熱により、外部量子効率が約90%まで向上することを示し、この増加が加熱による歪みなどの欠陥の減少によるキャリア拡散長の増加によることを示した。(M. Izaki, et al., ACS OMEGA, 6(2021), 27587-27597)

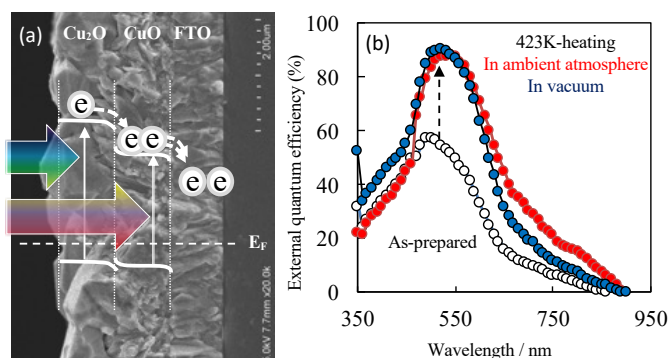


図4 Cu<sub>2</sub>O/CuO積層体の断面組織(a)と外部量子効率(b)

加熱により形成したCuO/Cu<sub>2</sub>O光電変換素子に対して、外部量子効率の著しい向上が実現できた。Cu<sub>2</sub>O層ならびにCuO単層の外部量子効率曲線の形状などからCu<sub>2</sub>O層ならびにCuO層両層が光電変換層として機能していること、光電変換機能の向上のためにはキャリア輸送特性と関係するCu<sub>2</sub>O/CuO界面に形成される内蔵電解の制御が重要であると考えられた。また、大気中ならびに真空中423K加熱により、外部量子効率が約90%まで向上することを示し、この増加が加熱による歪みなどの欠陥の減少によるキャリア拡散長の増加によることを示した。(M. Izaki, et al., ACS OMEGA, 6(2021), 27587-27597)

CuO/Cu<sub>2</sub>OならびにCu<sub>2</sub>O/CuO積層体の光カソード特性は、外部バイアス(RHE0V)が付加された状態における溶液界面ならびにCuO-Cu<sub>2</sub>O積層体のバンド接続が大きく影響すると考えられた。また、光電気化学電位スイッチングのサイクル数を増加させることによって、CuOならびにCu<sub>2</sub>O粒子径が約15nmまで微細化し、CuO-Cu<sub>2</sub>Oナノ混合体を形成することができた。

#### 4-3. 高安定性銅酸化物光カソードの構築と高効率・高安定性水素生成の実現

表面起伏の非常に大きいCuO層をCu-アンモニア錯体水溶液から電気化学的に形成し、高周波マグネトロンスパッタリング法ならびに硝酸亜鉛水溶液中での光電気化学反応によりZnO層を被覆した。

CuO 層ならびに ZnO/CuO 積層体の光カソード特性を、硫酸ナトリウム水溶液中、AM1.5(1sun)照射下、RHE0V の条件で電流応答を検討した。スパッタリング法により形成した ZnO 層は、表面起伏の大きい CuO 結晶粒の表面部分には堆積していたが、基板付近の深部には堆積しておらず、CuO 表面が露出していた。一方、光電気化学反応により形成した ZnO 層はほぼ CuO 粒子全体を被覆していた。CuO 層を RHE0V に保持した場合、初期には光電流は検出できるが、光照射の on/off に対する応答はすぐに消失した。これは、RHE0V は、Cu-水系の電位-pH 図における金属 Cu の安定領域内に位置することから、CuO が金属 Cu に還元されたことによる。一方、ZnO/CuO 積層体は、初期に約  $8.4\text{mAcm}^{-2}$  の光電流密度を示し、光照射 on/off に対しても持続的に応答を示した。光電流安定性は、約 85%であり、高い安定性を示した。

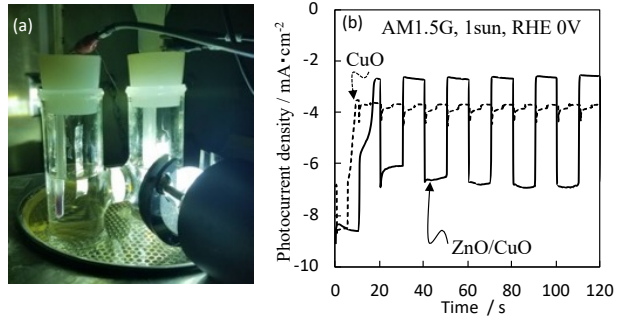


図5 光カソード評価用セル(a)ならびにCuO, ZnO/CuO光カソード光電流曲線 (b, AM1.5, 1sun, RHE0V, 298K)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

|   |                             |
|---|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Izaki Masanobu, Fukazawa Kazuma, Sato Kenta, Khoo Pei Loon, Kobayashi Masakazu, Takeuchi Akihisa, Uesugi Kentaro  | 4. 巻<br>2                   |
| 2. 論文標題<br>Defect Structure and Photovoltaic Characteristics of Internally Stacked CuO/Cu <sub>2</sub> O Photoactive Layer Prepared by Electrodeposition and Heating                        | 5. 発行年<br>2019年             |
| 3. 雑誌名<br>ACS Applied Energy Materials  | 6. 最初と最後の頁<br>4833 ~ 4840   |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1021/acsaem.9b00514  | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |
| 1. 著者名<br>Izaki Masanobu, Koyama Takayuki, Khoo Pei Loon, Shinagawa Tsutomu   | 4. 巻<br>5                   |
| 2. 論文標題<br>Light-Irradiated Electrochemical Direct Construction of Cu <sub>2</sub> O/CuO Bilayers by Switching Cathodic/Anodic Polarization in Copper(II)-Tartrate Complex Aqueous Solution | 5. 発行年<br>2019年             |
| 3. 雑誌名<br>ACS Omega   | 6. 最初と最後の頁<br>683 ~ 691     |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1021/acsomega.9b03308  | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |
| 1. 著者名<br>Izaki Masanobu  | 4. 巻<br>84                  |
| 2. 論文標題<br>Thermodynamic Design of the Solution Electrochemical Process for Fabricating Smart Oxide and Compound Layers   | 5. 発行年<br>2020年             |
| 3. 雑誌名<br>Journal of the Japan Institute of Metals and Materials  | 6. 最初と最後の頁<br>177 ~ 189     |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.2320/jinstmet.J2020001   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |
| 1. 著者名<br>Izaki Masanobu, Abe Suzuka, Nakakita Kota, Khoo Pei Loon  | 4. 巻<br>6                   |
| 2. 論文標題<br>Photoelectrochemically Fabricated and Heated Cu <sub>2</sub> O/CuO Bilayers with Enhanced Photovoltaic Characteristics   | 5. 発行年<br>2021年             |
| 3. 雑誌名<br>ACS Omega   | 6. 最初と最後の頁<br>27587 ~ 27597 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1021/acsomega.1c05163  | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Khoo P L, Satou K, Izaki M   | 4. 巻<br>920                   |
| 2. 論文標題<br>The Electronic States of Copper Oxides Photoactive Layers Prepared by Electrodeposition followed by Annealing | 5. 発行年<br>2020年               |
| 3. 雑誌名<br>IOP Conference Series: Materials Science and Engineering   | 6. 最初と最後の頁<br>012028 ~ 012028 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1088/1757-899X/920/1/012028   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

|  |                               |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名<br>Izaki Masanobu, Khoo Pei Loon, Shinagawa Tsutomu   | 4. 巻<br>168                   |
| 2. 論文標題<br>Review-Solution Electrochemical Process for Fabricating Metal Oxides and the Thermodynamic Design | 5. 発行年<br>2021年               |
| 3. 雑誌名<br>Journal of The Electrochemical Society   | 6. 最初と最後の頁<br>112510 ~ 112510 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1149/1945-7111/ac371a   | 査読の有無<br>有                    |
| オープンアクセス<br>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<br>-                     |

[学会発表] 計17件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 11件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Pei Loon Khoo, Takayuki Koyama, Masanobu izaki  |
| 2. 発表標題<br>Potentially controlled electrochemical deposition of single and stacked copper(I) oxide and copper(II) oxide photoactive layers |
| 3. 学会等名<br>第16回次世代の太陽光発電システムシンポジウム (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Pei Loon Khoo, Takayuki Koyama, Masanobu izaki,  |
| 2. 発表標題<br>Electrochemically prepared copper(I) oxide/copper(II) oxide photoactive multilayers from a single solution by potential control, |
| 3. 学会等名<br>E-MRS 2019 Fall Meeting (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Pei Loon Khoo, Kenta Sato, Masanobu Izaki,   |
| 2. 発表標題<br>EQE, XPS and the electronic states of copper oxides photoactive layers prepared by electrodeposition-annealing |
| 3. 学会等名<br>6th International Conference of Global Network for Innovative Technology (国際学会)                                |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>阿部紗佳、笹野順司、横山誠二、伊崎昌伸                   |
| 2. 発表標題<br>CuO/Cu <sub>2</sub> O積層型光活性層の光電気化学的形成 |
| 3. 学会等名<br>電気化学会第87会大会                           |
| 4. 発表年<br>2020年                                  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>R. Yokoyama, P. L. Khoo, and M. Izaki  |
| 2. 発表標題<br>Photoelectrochemical properties and energy state of electrochemically constructed CuO/Cu <sub>2</sub> O bilayered photocathode |
| 3. 学会等名<br>30th Meeting of MRS-J (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>S. Yamamoto, P. L. Khoo, and M. Izaki   |
| 2. 発表標題<br>Photoelectrochemical characteristics of multi-structured CuO-Cu <sub>2</sub> O photocathode prepared by electrochemical potential switching |
| 3. 学会等名<br>30th Meeting of MRS-J (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2020年  |



|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>K. Nakakita, P. L. Khoo, and M. Izak   |
| 2. 発表標題<br>Improved photoactivity for electrochemically prepared and heated fan-shaped CuO photocathode |
| 3. 学会等名<br>30th Meeting of MRS-J (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>M. Izaki   |
| 2. 発表標題<br>Photovoltaic oxide layers and the devices prepared by solution chemical processing |
| 3. 学会等名<br>30th Meeting of MRS-J (招待講演) (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>M. Izaki   |
| 2. 発表標題<br>Electrochemical preparation of oxide semiconductors and the application to energy conversion |
| 3. 学会等名<br>MiNT-SRC International Seminar (招待講演) (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2020年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>横山遼河、Pei Loon Khoo、伊崎昌伸                     |
| 2. 発表標題<br>光電気化学的に形成したCuO/Cu <sub>2</sub> O積層体の光カソード特性 |
| 3. 学会等名<br>第68回応用物理学会春季学術講演会                           |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>山本禎一、Pei Loon Khoo、伊崎昌伸                                   |
| 2. 発表標題<br>光電気化学電位スイッチングによるCuO-Cu <sub>2</sub> Oナノ混合体光活性層の形成と光カソード特性 |
| 3. 学会等名<br>第68回応用物理学会春季学術講演会   |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>中北幸太、Pei Loon Khoo、伊崎昌伸 |
| 2. 発表標題<br>電気化学的に形成したCuO層の光カソード特性  |
| 3. 学会等名<br>電気化学会第88回大会             |
| 4. 発表年<br>2021年                    |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>R. Yokoyama, P. L. Khoo, M. Izaki  |
| 2. 発表標題<br>Photocathode properties of photo electrochemically constructed CuO/Cu <sub>2</sub> O bi-layers |
| 3. 学会等名<br>Interfinish 2020 (国際学会)  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>K. Nakakita, K. P. Loon, M. Izaki   |
| 2. 発表標題<br>Structure and photocathode characteristics of electrodeposited and annealed p-CuO films |
| 3. 学会等名<br>Interfinish 2020 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>S. Yamamoto, P. K. Loon, M. Izaki   |
| 2. 発表標題<br>Photocathode characteristics of CuO-Cu <sub>2</sub> O nanostructure photoactive layers prepared by photo electrochemical -potential switching |
| 3. 学会等名<br>Interfinish 2020 (国際学会)   |
| 4. 発表年<br>2021年  |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>伊崎昌伸                       |
| 2. 発表標題<br>めっき技術を用いたものづくりー鋼から電力・水素までー |
| 3. 学会等名<br>電気鍍金研究会総会 (招待講演)           |
| 4. 発表年<br>2022年                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>伊崎昌伸                                     |
| 2. 発表標題<br>低コスト・高効率太陽電池・水由来水素製造用インタースタック積層型酸化物光電変換層 |
| 3. 学会等名<br>JST新技術説明会 (招待講演)                         |
| 4. 発表年<br>2022年                                     |

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

|                               |                 |               |
|-------------------------------|-----------------|---------------|
| 産業財産権の名称<br>光活性層及びその製造方法      | 発明者<br>伊崎昌伸、他4名 | 権利者<br>同左     |
| 産業財産権の種類、番号<br>特許、2019-189642 | 出願年<br>2019年    | 国内・外国の別<br>国内 |

〔取得〕 計0件

〔その他〕

CuO/Cu<sub>2</sub>O積層体光電変換層に関する研究について、国際共同研究を実施  
 M. Marina, N. NisharRazali, M. zamzuri, A. Rosie Nani, F. Mohamad, M. Izaki  
 Construction of internally stacked Cu<sub>2</sub>O:CuO layers in Cu<sub>2</sub>O/CuO/Gr/ZnO heterojunctions for solar cells applications  
 J. Phys. Conf. Ser., 2051(2021)012069, DOI: 10.1088/1742-6596/2051/1/012069

6. 研究組織

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関                    |                                      |  |
|---------|----------------------------|--------------------------------------|--|
| マレーシア   | Universiti Malaysia Perlis | Universiti Tunn Hussein Onn Malaysia |  |