

機関番号：13904

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14717

研究課題名（和文）規則化フォトニックナノワイヤZnO/Cu₂O太陽電池の電気化学形成と高効率化研究課題名（英文）Improvements and Electrochemical Preparation of Photonic Nanowire ZnO/Cu₂O photovoltaic device

研究代表者

Khoo Pei Loon (Khoo, Pei Loon)

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：60874922

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、太陽電池や光カソード用一価銅酸化物(Cu₂O)光活性層に注目し、光電効率を向上させるために、ナノ構造を導入する二つの手法を検討した。まず、垂直なCu₂O粒子を電気化学的に形成し、陽分極で粒界を優先的にエッチングし、直立したCu₂Oナノピラーの形成により、表面積が増加し、光電流が高まることが確認された。次に、自己組織化可能なアルミニウム酸化物(AAO)をテンプレートとして利用し、光活性層の成長可能性を探り、超微細孔径薄膜AAOの形成技術の確立に成功した。本研究の成果は、太陽光発電や水素還元光カソードの発展に貢献し、超低コスト大量生産可能な水溶液法に適したナノ構造技術を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では二つのナノ構造導入手法を開発した。自己組織化能力を持つアルミニウム酸化物(AAO)を用いたナノポア構造の形成技術により、光の吸収と変換効率を向上させた。電気化学的手法を用いて酸化銅の直立ナノピラーを形成し、陽分極による粒界のエッチングで表面積と光電流を増強した。本研究はナノテクノロジー分野での新しい材料設計と製造方法に貢献し次世代の光電変換デバイスの基盤となる。本研究は太陽光発電や水素還元光カソードの技術発展に寄与し低コストで大量生産可能な水溶液法に適したナノ構造技術を確立したことが挙げられ持続可能なエネルギー供給が可能となり、環境負荷の低減とエネルギーセキュリティの向上に貢献する。

研究成果の概要（英文）：This research focused on the oxide photoactive layers for solar cells and photocathodes, specifically cuprous oxide (Cu₂O), to improve photoelectric efficiency by introducing nanostructures using two approaches. First, vertical Cu₂O particles were electrochemically formed, and grain boundaries were preferentially etched by anodic polarization, leading to the formation of vertically aligned Cu₂O nanopillars. This increased the surface area and enhanced the photocurrent. Next, anodic aluminum oxide (AAO), capable of self-organization, was used as a template to grow the photoactive layer. This method successfully established the technology for forming ultra-fine pore diameter thin-film AAO.

The results of this research contribute to the development of solar power generation and hydrogen reduction photocathodes, particularly by establishing nanostructure technology suitable for ultra-low-cost mass production using aqueous solutions.

研究分野：光活性層ナノ構造酸化物薄膜

キーワード：光活性層 酸化物 太陽電池 光カソード 酸化銅 水溶液法 超低コスト 高効率化

1. 研究開始当初の背景

CO₂ 排出量の大幅削減を実現するためには、代表的再生可能エネルギーである太陽光エネルギーの有効利用が不可欠である。近年、Si 系太陽電池の普及が進んでいるが、2030 年の発電コスト目標 (7 円/kWh) を達成するためには、更なる低コスト超高効率太陽電池の開発が重要な課題となっている (NEDO 太陽光発電ロードマップ: PV2030+)。効率 40% を超える多接合太陽電池は実現されているが、レアメタルや単結晶材料を利用するため発電コストが高く、地球上での利用が実現していないことから、多接合型 Si 系太陽電池が期待されている。Cu₂O 太陽電池は、ワイドバンドギャップエネルギー (2.1 eV) から、Si 系多接合太陽電池のトップセルの代表的候補である。しかし、トップセルとなる Cu₂O 太陽電池の短絡電流密度が、多接合太陽電池全体の効率を規定することから、ワイドバンドギャップ太陽電池の短絡電流密度の増加ならびにその学理構築が多接合太陽電池の地球上での普及の課題となっている。そこで、本研究課題では、ワイドバンドギャップ Cu₂O 光活性層に新規な規則フォトニックナノワイヤ構造を導入し、短絡電流密度の増大を狙うと共に、その光電変換過程を明らかにする。

2. 研究の目的

本研究課題では、ナノ構造導入による光誘導・散乱による Cu₂O 光活性層の拡大により高短絡電流密度化・高効率化を達成すると共に、これらによる光電変換過程への寄与を明らかにする。短絡電流密度の増大するために、電気化学手法を用いて規則化フォトニックナノ構造 (Highly Ordered Photonic Nanostructure, 以下 HOPN) 太陽電池の形成技術を確認し、ナノ構造導入による光誘導・散乱による光吸収活性層の増大により高短絡電流密度化・高効率化を達成すると共に、これらによる光電変換過程への寄与を明らかにする。

HOPN 酸化物光活性層を電気化学的に形成するために、以下二つ新規なナノ構造制御技術の開発を考案した:

- ① 自己組織化陽極酸化薄膜アルミニウム(tf-AAO)規則化ナノ構造ナノテンプレート形成
- ② 電気化学で作られた酸化物半導体薄膜の高電圧陽極分極による粒界エッチングを行いナノ酸化物構造の構築

3. 研究の方法

3.1 ①薄膜 (AAO)規則化ナノ構造ナノテンプレート形成技術

新規な薄膜 AAO を形成する技術を確認するため、フッ素ドープ酸化錫/ガラス基板 (FTO/SLG) 上に真空熱蒸着 (ULVAC, VPC-260F) を用いて薄膜アルミニウムを形成し、薄膜 AAO 形成の基材として使用した。また、基板および表面粗さの影響を調べるため、<111>-シリコン金基板 (Au/Si) 上に RF スパッタ (ULVAC, RF-200) で薄膜アルミニウムを形成し基材として使用した。薄膜アルミニウムを形成する前に、基板はアセトンと純水でそれぞれ 5 min 超音波洗浄した後、UV/O₃ 洗浄を 10 分間行った。<111>-Au/Si 基板上のアルミニウム製膜のスパッタ条件として、アルゴンガス圧力は 0.5 Pa に固定し、ターゲットと基板との距離は 5 cm に設定、スパッタ電力は 50~100 W で製膜時間は 30 min とした。FTO/SLG 基板上のアルミニウムを真空蒸着製膜するレートは 0.1 nm/s に設定し、目標膜厚は 500 nm にした。製膜されたアルミニウム薄膜はアルゴン雰囲気中で 623 K で 1 時間加熱処理 (Advance Riko Inc., P610CP) を施した。

陽極酸化は本経費で導入した高電流電源装置 (Keithley, SMU 2640) を用い、電解液としてシュウ酸水溶液 0.3 M を使用した。陰極には白金板を使用し、液温は 4 °C、陽極酸化電圧は 10~40 V で行った。形成されたアルミニウム薄膜は XRD で評価し、表面粗さは AFM (Shimadzu, SPM9700) で評価した。薄膜 AAO の表面・断面形態は FESEM で観察した。

3.2 ②高電圧陽極分極による粒界エッチングを行いナノ酸化物構造の構築成技術

垂直三電極式セルを用いた水溶液電解析出法で Cu₂O 膜を形成。作用極は金基板 (Au<111>), 対極は白金板 (Pt), 参照電極は銀塩化銀電極 (Ag/AgCl, +0.198 V vs. NHE)。基板はアセトンと純水で超音波洗浄後、UV/O₃ 洗浄。電解液は 0.4 mol/L の酢酸銅(II)一水和物、3.0 mol/L の乳酸、水酸化ナトリウムを含む超純水。製膜範囲は 10 mm×10 mm にマスキング。印加電圧は -0.4 V vs. Ag/AgCl, 電気量は -3.0 C/cm², 浴温は 313 K。製膜後、陽極分極で Cu₂O 直立ナノピラーを形成。電解液は 0.002 mol/L ペルオキソ二流酸ナトリウム, 溶液の pH は 5~6, 浴温は 277 K。電圧は 5, 10, 15 V vs. Pt で、それぞれ 2, 3, 10 min。結晶構造は XRD, 表面は XPS で評価。光電気化学測定には光照射窓付 H 型セルを使用。電解浴は超純水, 0.5 mol/L 硫酸ナトリウム十水和物, 四ほう酸ナトリウム十水和物, pH 調整剤として水酸化カリウム。測定は PEC で行い、ソーラーシミュレータを用いた。

4. 研究成果

4.1 ①薄膜 (AAO)規則化ナノ構造ナノテンプレート形成技術

FTO 基板上的 Al 薄膜は、 $2\theta = 39^\circ$ で (111) 面の弱い回折ピークを示した。一方、Au/Si 基板上に形成された Al 薄膜は、スパッタリング電力にかかわらず、(111) 面に属する 38.5° の強いピークと (200) 面に属する 44.8° のピークが見られた。この結果から、Au/Si 基板上でスパッタリングされた Al 薄膜は、FTO/SLG 基板上的真空蒸着された Al 薄膜よりも結晶性が優れていることがわかる。また、623 K で加熱処理後、Au/Si 基板上的 Al 薄膜の一部は紫色に変色した。これは Al-Au 合金の形成 (パープルブレイグ) によるもので、ボイド形成や電気抵抗の増加が問題となることが確認された。加熱処理を行う前の薄膜は、それぞれの基板上で異なる性質を示した。

FTO 基板上的真空蒸着された Al 薄膜は、(111) 面の弱い回折ピークを示すだけであったが、

Au/Si 基板上に形成された Al 薄膜は、(111)面および(200)面の回折ピークを明確に示した。このことは、スパッタリングによる薄膜形成が結晶性に与える影響が大きいことを示している。加熱処理後の Al 薄膜の紫色の変色は、Al と Au の合金化が原因であり、これはボイドの形成や電気抵抗の増加を引き起こす問題として知られている。特に高温(623 K 以上)での加熱処理がこの合金化を促進し表面の変色を引き起こすことが明らかとなった。

Al/FTO/SLG 基板上 15~35 V で陽極酸化された薄膜 AAO はおよそそのポアの直径 d と間隔 D はの場合、(a) 15 V: 4 nm, 16 nm, (b) 20 V: 9 nm, 25 nm, (c) 25 V: 16 nm, 30 nm, (d) 30 V: 18 nm, 36 nm, (e) 35 V: 15 nm, 42 nm だった。陽極酸化電圧の上昇に伴う d と D の増加が見られたが、(A) では均一な AAO 形成ができなかった。これは真空蒸着した Al の粒子が粗い島状になること及びランダム配向している FTO 基板が表面粗さが大きい原因となることが考えられる。

一方、Fig. 1 は Al /Au /Si 基板上 10~40 V で陽極酸化された薄膜 AAO の表面、断面 FE-SEM 図及び外観写真を示す。およそそのポアの直径 d と間隔 D は(B) の場合、(a) 10 V: 23 nm, 54 nm, (c) 20 V: 35 nm, 94 nm, (e) 30 V: 44 nm, 142 nm, (d) 40 V: 59 nm, 164 nm だった。特に、40 V においてほぼ垂直な AAO が断面 (h) から観察でき、(A) より均一にで、Au 基板の露出も確認できた。また、シュウ酸水溶液を用いる場合、垂直な AAO は 35 V 以上の陽極酸化電圧が必要であることが分かった。

結論としては、RTE-Al/FTO/SLG 上では表面粗さと不規則性が大きいため、不規則な AAO が形成され、基板の損傷が発生しやすくなったことから、薄膜 AAO の陽極酸化には表面の平滑性と均一性が重要であることが示された。673 K での熱処理は Al-Au の合金化を引き起こし、373 K での熱処理は合金化なしにピークのわずかな変化が見られ、これは Al 層の緩和と結晶性の向上に寄与している可能性があることが示唆された。陽極酸化電圧の増加に伴うポアサイズと直径の増加は、Al の蒸着方法や基板の種類に関わらず従来の AAO 形成と一致し、RF スパッタリングによる導電性<111>-Au/Si 基板上の Al 薄膜から高度に垂直で均一かつ透明度の高い AAO 層の形成が特に 30 V および 40 V で成功した。この研究は電気化学的方法によるナノ構造テンプレートの作製に貢献し、光誘導およびフォトニック結晶への応用に新たな道を開くことが期待される。これらの結果の一部は 2022 年電気化学秋季大会 (ECSJ Fall Meeting, 2022) 及び国際会議 The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9) で発表した。

4.2 ②高電圧陽極分極による粒界エッチングを行いナノ酸化物構造の構築技術

本研究では、まずヘテロエピタキシャル成長を利用することで<111>Au 基板上に直立 Cu_2O を形成する。これにより直立界面を有する Cu_2O 薄膜を獲得することができる。それから pH 操作及び高電圧陽極分極を用いて熱力学的に予想されたルートを進ませることで、表面エネルギーの高い粒界を優先的にエッチングし、 Cu_2O 直立ナノピラーを形成することができる。Fig. 2 からは陽極分極時間を長くしてもエッチングは膜全体で行われ、粒界に沿って進行し、直立ナノピラーが形成する様子が観察された。また、陽極分極時間が長くなるにつれ、ピラー全体が細くなり、特にピラー上部のエッチン

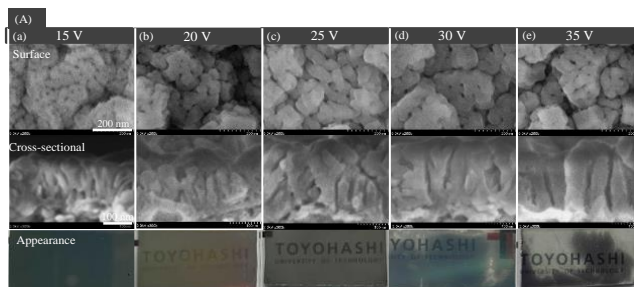


Fig. 1 (A) The surface FE-SEM images of the thin-film AAO fabricated on FTO/SLG anodized at 20 V, (a), 25 V (b), 30 V (d), and 35 V (e), and their respective cross-sectional surfaces.

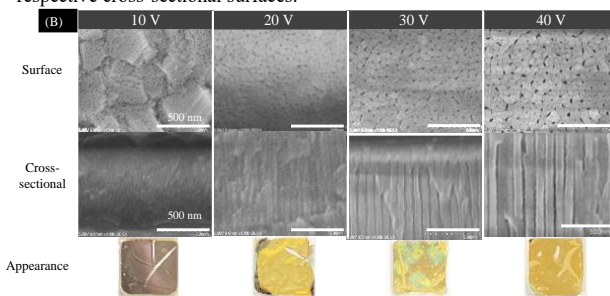


Fig. 1 (B) The surface FE-SEM images of the thin-film AAO fabricated on FTO/SLG anodized at 20 V, (a), 25 V (b), 30 V (d), and 35 V (e), and their respective cross-sectional surfaces.

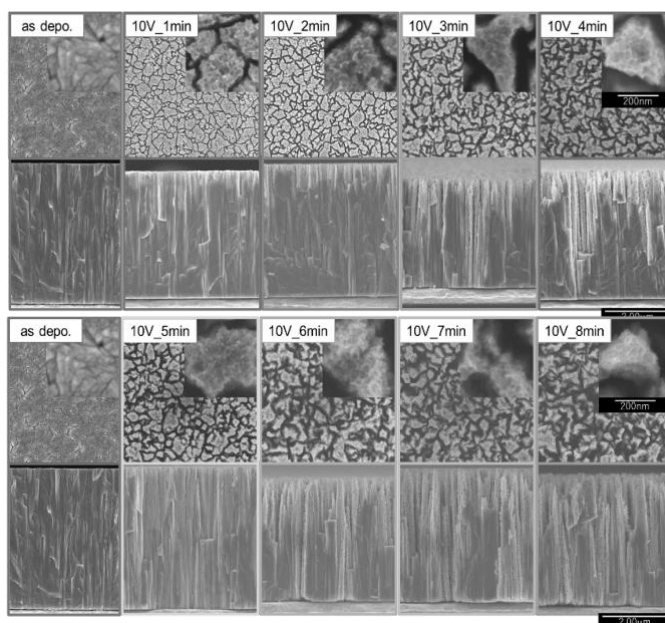
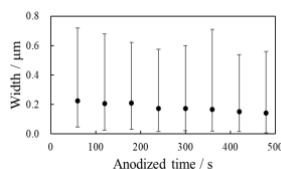


Fig. 2. Surface and cross-sectional FE-SEM images of the as-deposited, anodic polarized at 10 V for 1~8 min. Shown on the left is the approximated width of the nanopillars according to the anodized time.



グが進行しており、平均粒径は約 $0.22\ \mu\text{m}$ から約 $0.14\ \mu\text{m}$ へと細くなっていた。しかし、膜厚はどの条件においても $3.6\sim 4.0\ \mu\text{m}$ 程度であり、陽分極時間の変化による膜厚への影響は小さいことが分かった。製膜しただけの試料は $\text{Cu}_2\text{O}(111)$ および $\text{Au}(111)$ に由来するピークが、それぞれ $36.6, 38.2^\circ$ に確認でき、 $\langle 111 \rangle$ に優先配向した Cu_2O 薄膜が形成されていると分かる。これは、 $\text{Au}(111)$ と $\text{Cu}_2\text{O}(111)$ との格子不整合が $\sim 4.7\%$ と低いため、ヘテロエピタキシャル成長によるものだと考えられる⁴。また、陽分極をおこなっても XRD プロファイルは変化しなかった。陽分極中に関して、どの条件においても膜表面で気体が発生しており、印加電圧が大きいくほど多くの気体が発生した。その上、 Au 基板露出までの時間は短かった。また、印加電圧が大きくなるに伴い電流密度は大きくなっていった。電極間の電位に関して、電位-pH 図によると、どの条件においても酸素発生電位 ($0.78\ \text{eV vs. NHE} : \text{pH } 6$) を大きく上回っていることから、発生していた気体は酸素が妥当と考えられる。このことから、酸素発生により膜表面の pH が低下し、表面エネルギーの高い粒界を優先して、 Cu_2O は最安定化学種である Cu^{2+} となり水溶液に溶出しており、これらの反応が粒界に沿って基板まで進行したことでナノピラーの形成に至ったと考えられる。また、膜表面に残存した酸素と反応したことで CuO が形成され、XPS 測定において CuO のピークが検出されたのではないかと考えられる。

いずれの試料においても、 $\text{Cu}_2\text{O}(111)$ と $\text{Au}(111)$ のピークがそれぞれ 36.6 度および 38.2 度で確認され、他のピークは確認できなかった。このことから、陽分極の時間を変化させても、直立した Cu_2O が形成されていると考えられる。陽分極を行った試料はいずれの条件においても、製膜のみの試料より強度比が低下していた。また、陽分極時間が長いほど、強度比は低下する傾向が見られた。この結果から、陽分極により Cu_2O はエッチングされ、陽分極時間を長くすることでエッチングが進行し、 Cu_2O の体積が減少していると言える。

Fig.3 に、各試料の 5 秒ごとに AM1.5 G 照射のオン/オフを繰り返して測定した PEC 結果 (a)~(i) 及び陽分極時間に対する $0.2\ \text{V vs. RHE}$ における電流密度を表す関係図を示す (j)。光の照射に応じて電流密度が増加したことから、 Au 基板の上に形成した Cu_2O 薄膜は、平坦膜でも直立ナノピラー膜でも p 型半導体としての応答を示し、光カソードとして機能することが確認された。Fig.16 では、どの条件においても $0.2\ \text{V vs. RHE}$ の時に大きな電流密度の値を示した。平坦膜に比べ、直立ナノピラー膜は電流密度が向上していることが分かった。特に、陽分極時間が $1\sim 3\ \text{min}$ における電流密度は $-2.6\sim -2.9\ \text{mA/cm}^2$ と、他の条件より大きな電流密度の値を示した。この値は、過去に報告されている $0.40\ \text{V vs. RHE}$ 電位における酸化銅ベースの光電陰極について報告された最高値 $3.15\ \text{mA/cm}^2$ に迫るものである⁷。これにより、直立ナノピラー形成が光電気化学特性の向上に非常に有効であることが分かる。一方で、陽分極時間が $4\ \text{min}$ 以上になると、電流密度は減少する傾向にあり、 $8\ \text{min}$ では平坦膜に比べて小さくなった。この傾向については、直立ナノピラーの形成により表面積が大幅に拡大し、より吸光度が向上し、光の閉じ込め効果が向上することが起因していると考えられる。これにより、同一の有効面積に対し、平坦膜に比べてより多くの光を電気エネルギーに変換できたと考えられる。しかし、陽分極時間が長くなるにつれて直立ナノピラーの体積が減少し、組織の破壊が起きていることが分かっている。光カソードの原理について考えると、光触媒は光子を捕捉し、光子エネルギーを一時的に電子に伝達し、それを触媒の伝導帯に励起し、正に荷電した粒子として振る舞う価電子帯に正孔を残す。結果として生じる電子と正孔のペアは光触媒の表面で化学反応を引き起こし、正孔は水を酸化して酸素ガスと陽子 (H^+ イオン) を形成し、負に帯電した電子はこれらの陽子を還元して水素ガスを形成する⁸。したがって、光触媒が

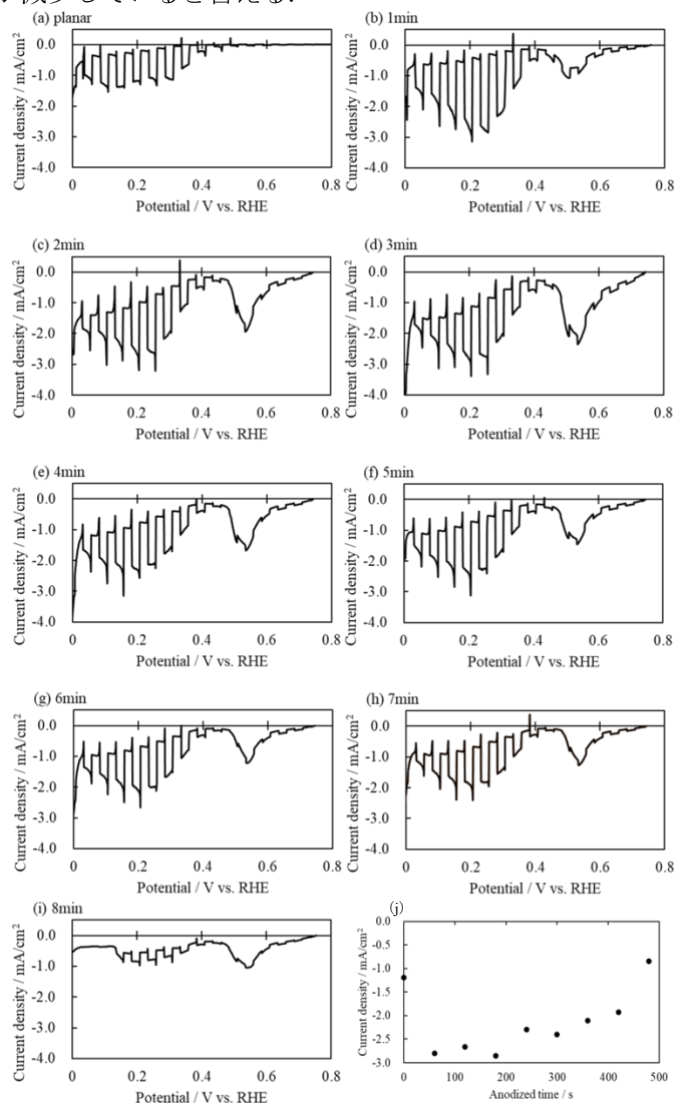


Fig. 3. Photoelectrochemical measurements of as-deposited, (a) and anodically polarized from 1 min to 8 min, (b)~(i).

無ければ反応を起こすことができない。本実験における光触媒は Cu_2O であるが、ナノピラーの体積が減少しているため、光触媒が減少した結果として、陽分極が 4 min 以上になると電流密度が減少し、8 min では平坦膜に比べて小さくなったと考えられる。

本研究では、銅イオン乳酸錯体水溶液を用いて $\langle 111 \rangle \text{Au}$ 基板上に Cu_2O 薄膜を形成し、それに対し陽分極を行うことで、 Cu_2O 直立ナノピラーを形成した。形成したナノピラーの構造、ならびに光電気化学特性を調査し、以下のことが分かった。銅イオン乳酸錯体水溶液を用いて $\langle 111 \rangle \text{Au}$ 基板上に製膜することで、 $\langle 111 \rangle$ に優先配向した直立 Cu_2O 薄膜を獲得することができる。これはヘテロエピタキシャル成長によるものである。また、この薄膜に対し陽分極を行うことでエッチングされ、 Cu_2O 直立ナノピラーが形成される。エッチングはエネルギーの高い粒界が優先された。また、 $\langle 111 \rangle$ に優先配向していることから、側面では $\{100\}$ 、表面では $\{111\}$ が露出していると考えられる。極性面である $\{100\}$ が優先的にエッチングされたことで、ピラー形成に至ったと考えられる。印加電圧を大きくすることで、エッチングのちからは大きくなり、Au 基板露出までの時間は減少する。陽分極時間を大きくすることで、よりエッチングを進行させることができ、ナノピラーの体積減少につながる。直立ナノピラーの形成により光の反射率は低下したこと、この構造による光の閉じ込め効果が確認できた。エッチングの進行に関し、酸素発生により膜表面の pH が低下し、 Cu_2O は最安定化学種である Cu^{2+} となり水溶液中に溶出し、これらの反応が粒界に沿って基板まで進行したと考えられる。各試料の 5 s ごとに AM1.5 G 光照射 on/off を繰り返して測定することで PEC を測定した。光の照射に応じて電流密度が増加したこと、Au 基板上に形成した Cu_2O 薄膜は、平坦膜でも、直立ナノピラー膜でも p 型半導体としての応答を示し、光カソードとして機能することが確認された。陽分極時間に対する 0.2 V vs. NHE における電流密度の大きさの関係より、陽分極を行うことで、光カソードとしての性能が向上することが分かった。これは直立ナノピラー形成により、 Cu_2O 膜の表面積が大幅に拡大したこと、これに起因すると考えられる。しかし、陽分極時間が長くなるにつれナノピラー組織が破壊されるため、長時間エッチングを行うと PEC 特性が低下した。本研究では陽分極時間が 3 min が最も電流密度が高く、光カソードとして最適であると言える。

本研究により、陽分極を用いて Cu_2O 薄膜の構造制御をすることができ、直立ナノピラーを形成することができた。この構造により、より多くの光を閉じ込めることができ、光電変換効率の向上が期待でき、実際、PEC 測定による性能の向上は確認できた。これに最適な保護層や触媒の形成により、光電流密度のさらなる増加が可能であり、光カソードとしてさらに優れた性能を示すと予測される。以上より、 Cu_2O 直立ナノピラーをもちいることで、 Cu_2O を用いた積層体のさらなる光電気化学特性の向上や、水の電気分解による水素生成用の光カソードへの利用が期待できる。これらの結果の一部は、国内学会日本金属学会第 2 回「結晶性材料の結晶配向評価および結晶方位解析技術研究会」及び国際招待講演 4th International Conference on Material Science & Technology にて口頭発表した。4.1 及び 4.2 の成果は継続論文投稿中である。

本研究を進行中、当初想定しなかったところとして、HOPN を電気化学的に形成するために、ヘテロ界面を必要としない n- $\text{Cu}_2\text{O}/\text{p-Cu}_2\text{O}$ ホモ接合の形成が有利と分かったため、Al-0.01 mol/L を添加した銅イオン乳酸錯体水溶液から n 型 Al: Cu_2O の電気化学形成に成功し、ACS Appl. Energy Mater. へ責任著者として投稿した (ACS Appl. Energy Mater. 2024, 7, 9, 3677–3687)。光電変換効率は p-n 接合より衰えているが、黄色及び緑色エキシトンのキャリア輸送が優れていて、課題であるバッファ層を解決すれば、Si トップセルに適する超低コスト HOPN Cu_2O 太陽電池への実現に近づけると期待される。

<引用文献>

- [1] Masuda, H., & Fukuda, K., *Science*, **1995**, 268(5216), 1466-1468.
- [2] Sophie Peulon and Daniel Lincot, *Advanced Materials*, **1996**, 8(2), 166-170
- [3] Izaki, M. and Omi, T. *Applied Physics Letters*, **1996**, 68(17), 2439-2440
- [4] Izaki, M., *et al.*, *Thin Solid Films*, **2012**, 520, 1779-1783
- [5] 品川 勉, *表面技術*, **2016**, 67(4)
- [6] Khoo, P.L. *et al.*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., **2020**, 920 012028
- [7] Yang Yang · Di Xu · Qingyong Wu · and Peng Diao, *Scientific Reports*, **2016**, 6, 35158
- [8] Johan Hofkens · and Maarten B. J. Roeffaers, *Nature*, **2016**, 530, 36-37

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hashimoto Yui, Mohammad Zain Mohd Zamzuri, Muraoka Naoki, Inaba Rieru, Mohamad Fariza, Khoo Pei Loon, Izaki Masanobu	4. 巻 7
2. 論文標題 Al:Cu₂ n-Type Semiconductors Electrochemical Fabrication of Heterojunction and Homojunction Photovoltaic Devices	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ACS Applied Energy Materials	6. 最初と最後の頁 3677 ~ 3687
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1021/acsaem.4c00019	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

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 2件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 P.L. Khoo, T. Nakamura, and M. Izaki
2. 発表標題 Electrochemical Preparation of Thin Film Anodic Aluminium Oxide Nanotemplate on <111>-Au/Si Substrate
3. 学会等名 2022年電気化学秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 P.L. Khoo, T. Nakamura, and M. Izaki
2. 発表標題 Preparation of Thin-film Anodic Aluminium Oxide on <111>-Au/Si Conductive Substrate
3. 学会等名 第32回日本MRS年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 P.L. Khoo, T. Nakamura, M. Kobayashi and M. Izaki
2. 発表標題 One-step Anodization of Vertical Thin Film AAO Nano-template on <111>-Au Substrate
3. 学会等名 The 1st KOSEN Research International Symposium (KRIS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 P.L. Khoo, T. Nakamura, and M. Izaki
2. 発表標題 Orientation-Controlled Thin Film Anodized Aluminium Oxide from Thin Smooth Al Layer on <111>-Au/Si Substrate
3. 学会等名 The 9th International Symposium on Surface Science (ISSS-9) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 P.L. Khoo, Kono Mizuki, Masakazu Kobayashi, and Masanobu Izaki.
2. 発表標題 Electrochemically-prepared Nano-pillar Cuprous Oxide Photoactive Layer
3. 学会等名 4th International Conference on Materials Science & Nanotechnology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Pei Loon Khoo, Mizuki Kono, Shoichi Sato, Masakazu Kobayashi, and Masanobu Izaki
2. 発表標題 Nanostructure Oxides Prepared Electrochemically Using <111>-oriented Heteroepitaxial Thin Films
3. 学会等名 日本金属学会 第2回「結晶性材料の結晶配向評価および結晶方位解析技術研究会」
4. 発表年 2023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

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 Tun Hussein Onn Malaysia	