

令和 3 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03772

研究課題名(和文) 光触媒におけるバンドアラインメントの究明と半導体物理的設計指針の構築

研究課題名(英文) Elucidation of band alignment in photocatalysts to obtain design strategy based on semiconductor physics

研究代表者

杉山 正和 (Sugiyama, Masakazu)

東京大学・先端科学技術研究センター・教授

研究者番号：90323534

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,400,000円

研究成果の概要(和文)：半導体光触媒として単結晶基板を用い、電解液界面でのバンド曲がりや光起電力に、半導体表面の欠陥準位や電解液由来の化学種が与える影響を系統的に調査した。解析対象としたGaN, SrTiO₃, TiO₂はいずれも電解液との界面にショットキー接合的なバンドアラインメントを形成したが、半導体表面の結晶欠陥のみならず表面化学種が光励起キャリアの再結合中心となり光照射下でフェルミ準位をピンニングし、擬フェルミエネルギーが水素・酸素生成に必要な電位に達することを阻害する現象が顕著に観察された。また、水素生成助触媒として用いられるPtは仕事関数からの予想に反してGaNやSTOとオーム性接触していることが確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体光触媒の材料探索には、バンド端のエネルギーと水素・酸素発生電位との整合関係が高効率水分解の指標として主に考慮されてきた。本研究により、実際に水素・酸素発生の進行を司る光励起キャリアの擬フェルミエネルギーは、バンド端のエネルギーのみならず半導体/電解液界面での欠陥や半導体表面の化学種を介したキャリアの再結合により、とくに光強度が十分でない場合にピンニングされることが明らかになった。本研究で開発した開放電圧を幅広い光強度範囲で観察する手法により、このようなフェルミエネルギーのピンニングを定量化することが可能となり、高効率光触媒に必要な半導体の表面処理を最適化する指針が見出された。

研究成果の概要(英文)：Single crystal substrates were used as semiconductor photocatalysts to systematically investigate the effects of defect levels on the semiconductor surface and surface chemical species originating from the electrolyte on the band bending and photovoltage at the semiconductor/electrolyte interface. All of the GaN, SrTiO₃, and TiO₂ substrates formed a Schottky junction-like band alignment at the interface with an electrolyte, but not only the crystal defects on the semiconductor surface. In addition to the crystal defects on the surface of the semiconductor, surface chemical species also functioned as recombination centers for photoexcited carriers, pinning the Fermi level under light irradiation and preventing the quasi-Fermi level from reaching the potential required for hydrogen and oxygen production. In addition, Pt, which is used as a co-catalyst for hydrogen production, was found to be in ohmic contact with GaN and STO, contrary to expectations based on its work function.

研究分野：半導体のエネルギー応用

キーワード：光触媒 半導体物理 界面準位 バンドアラインメント 水分解 水素 光起電力

1. 研究開始当初の背景

太陽光から保存性・可搬性に優れた燃料を製造することは、再生可能エネルギーの大量導入により我々のエネルギーシステムを脱炭素化し、持続可能なものにするために不可欠な技術である。太陽光を利用して製造可能な燃料物質のうちでも、水素は水の電気分解で製造可能なことから現時点で唯一高効率・高選択性で製造可能なものであり、光触媒に関しても水分解水素製造には高効率・高耐久性が求められる。もちろん、その技術は究極的に水素製造を低コスト化できるものでなければならない。

本多・藤島効果の発見以来、太陽光のエネルギーを得て水を分解し水素を得る2つのシステム、光触媒と太陽電池+水の電気分解（以下、「PV水電解」と略す）の優劣が議論されてきた。永年にわたり、光触媒はコスト的には構成部品の多いPV水電解に対して優位な一方、太陽光から水の生成自由エネルギーへのエネルギー変換効率—しばしばSTH (solar to hydrogen) 効率と呼ばれる—ではPV水電解に大きく後れを取ってきた。PV水電解では、天日下のSTH効率は24.4%¹⁾、実験室系では30%²⁾が報告されている。しかし、2018年に、III-V族化合物半導体の多接合構造を用いた光触媒（より正確には光電極—詳細は後述）により19.3%のSTH効率³⁾が報告されるなど、両者の差は縮まったように見える。一方で、この光電極は太陽電池の最高効率を誇るが高コストな多接合太陽電池を、贅沢に大面積で光触媒に転用したものである。さらに雑に説明すれば、太陽電池の表面を触媒で覆って水に漬けたものである。こうなると、光触媒の利点である究極の低コストが見通しにくい。

光触媒とPV水電解を対立する技術として捉えると、それぞれの本質を見失う恐れがある。PV水電解は、すでに大規模導入されている太陽電池を太陽光燃料製造に用途変更して電力系統に制約されない再エネ利用の圧倒的拡大を目指すための、今すぐに利用可能なエンジニアリングである。そのフロンティアは、太陽電池に対して遅れている水電解装置の低コスト化にある。一方、光触媒は基本的にPV水電解のエレメントを一体化した低コスト化ポテンシャルの高い技術であり、その応用は簡便な設備で安価に水素を製造する（誤解を恐れずに言えば、多少農業的な）太陽光水素ファームにあると考えられる。したがって、我々が目指すべき方向は、光触媒の低コスト化ポテンシャルを維持しつつ、太陽電池や水電解装置の高効率化技術を取り入れて光触媒のSTH効率を高めることである。

光電気化学による水分解水素製造は、光吸収材料に入射する光子のエネルギーを無駄なく電気化学ポテンシャルに変換し、そのポテンシャルを用いて水分解反応を電気化学的に進めるプロセスである。したがって、太陽電池と水電気分解のエネルギー効率の積が太陽光水素製造の最大限界効率となる。これを最も端的に実装したのが、PV水電解である。太陽電池が太陽光から電気化学ポテンシャル・電流を生成し、それを用いて水を分解するのが水電解装置であり、両者の間は電線で結ばれる。この電線を1本排除して太陽電池の片側に電極触媒を実装したもの、あるいは電線を2本排除して太陽電池の両側に電極触媒を実装したもの（少なくとも片側の触媒層は太陽光を透過するものでなければならない）が光電極である。光触媒として最高のSTH効率19.3%³⁾を達成しているのは、この光電極構造である。このように、太陽電池と光電極では、太陽光から電気化学ポテンシャルを生成する部分の構造は共通である。光吸収の強い半導体を光吸収層に用いて光から電子・正孔対を生成し、半導体のpn接合が形成するポテンシャル勾配により電子と正孔を空間的に分離して電気化学ポテンシャルを外部に取り出す。

一方で、粉末状光触媒は、金属酸化物等の安価かつ水中で安定に存在できる半導体の粉末に、電子・正孔対の生成・分離による電気化学ポテンシャルの機能を担わせている。しかし、粉末状の半導体にpn接合を形成し、電子・正孔の分離効率を高めるのは難しい。通常は、表面に実装した貴金属微粒子などの助触媒により電子・正孔の片方を選択的に電気化学反応させて、等価的に電子・正孔の分離を行う。しかも、半導体中に結晶欠陥が存在すると電子・正孔対が非発光再結合により熱を放出して消滅する。したがって、結晶欠陥は光-電気の変換効率を損ねる要因である。粉末状光触媒では結晶欠陥の密度が高くなりがちである。さらに、電解液との界面では非発光再結合が激しく、界面がバルクに対して多くなりやすい粉末状光触媒は不利である。このように、光-電気の変換効率を損ねる要因が満載されている粉末状光触媒に、太陽電池の仕組みをうまく取り入れて電気化学ポテンシャル生成の能力を高めることが、光触媒の高効率化とその後の社会実装に不可欠な研究開発の方向性である。

2. 研究の目的

本研究では、電解液と半導体を包含する拡張バンドアラインメントを主軸に、半導体物理のパラダイムで光触媒の高効率化指針を体系化することを目指す。開放電位の照射強度依存性や、フォトルミネッセンス強度からの擬フェルミレベル分裂幅の測定、インピーダンス解析等、半導体構造の解析手法を駆使して半導体光触媒系におけるバンドアラインメントの包括的解析手法を構築する。それを用いて、従来行われてきた表面被覆、助触媒修飾などの光触媒高効率化手法を、(1)光起電力の増大、(2)電気二重層電位のシフトによるバンド端エネルギーと酸化還元電極電位の整合関係制御、(3)半導体から溶液中分子への電荷移動抵抗の低減、という3つの原理で整理・解析し、高効率光触媒の本質的な要件を明確化する。本研究は解析の容易な単結晶系半導体光電極を研究対象とするが、得られた設計指針は粉末状を含む光触媒に広く適用可能である。

3. 研究の方法

結晶品位に優れ電解液中でも安定な n 型 GaN 単結晶を例に、半導体/電解液界面におけるバンドアラインメントの解析手法を構築する。暗状態および光照射下でのバンドアラインメントを、電解液中の参照電極電位を基準に、以下の2手法を用いて解析する。光源としては、半導体における光子吸収量と吸収領域を正確に定義するため、半導体のバンドギャップよりも大きなエネルギーの He-Cd レーザを用いる。解析対象とする n 型 GaN エピタキシャル結晶は、組成やドーピングの異なるヘテロ構造を含めて申請者の有する結晶成長装置群で高品位に作製する。

- ・ **Mott-Schottky 解析**：電解液に接した半導体内部に形成される空乏層の静電容量 C を外部バイアス V の関数として測定し、フラットバンド時のフェルミエネルギー (FBP) を得て、そこからバンド端のエネルギーを求める。
- ・ **開放電位解析**：各状態での半導体のフェルミエネルギーを開放電位 (OCP) として測定する。光照射強度に対する OCP の依存性を観察することで、FBP の値および半導体/電解液界面に存在するバンドギャップ内準位のエネルギーおよび状態密度を求めることができる。本手法は、光照射下でも半導体にダメージを与えずに測定できる。ND フィルタを用いて光照射強度を8桁変化させることで、半導体/電解液界面に存在するバンド内準位が OCP を決定する弱励起領域と、半導体バルクにおけるキャリアの蓄積がバンド曲がり低減して OCP を変化させる強励起領域の両方を連続的に観察する (図1)。本手法は太陽電池分野では suns-V_{oc} 法と呼ばれ、電極等の直列抵抗の効果を除去して、半導体のダイオード係数 (光励起キャリアがすべて発光再結合すれば $n=1$, すべて非発光再結合すれば $n=2$) を求めるために用いられる。本研究は、この手法を半導体/電解液が成すヘテロ接合の解析に拡張するものである。

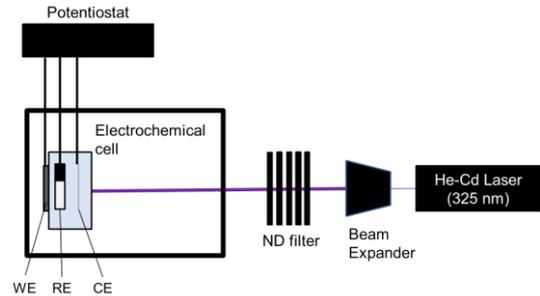


図1 半導体光電極に生じる光電圧 (OCP) の光照射強度に対する依存性を観察する実験系

さらに、GaN 表面にプラズマを照射したり、酸化ニッケル等の助触媒を導入した際のバンドアラインメントの変化を観察し、表面状態が界面準位に与える影響を考察する。また、これに対応して、表面の原子構造・電子状態の量子化学計算を行い、実験結果と比較検討する。

上記の溶液系の解析と比較するため、真空中に接する GaN のバンドアラインメント、そこに水蒸気が吸着する効果を、SPring-8 において放射光による光電子分光を用いて解析する。光照射強度や水蒸気分圧による影響を系統的に調査する。

以上のような解析を、n 型 GaN だけでなく、単結晶基板が入手可能な TiO₂, STO に拡張する。

4. 研究成果

(1) GaN 単結晶光アノードにおける光起電力とフェルミ準位のピニング

GaN 単結晶光アノードを検証材料として、表面準位や溶液中のレドックス剤が OCP に与える影響を精査した。サファイア基板上に結晶成長した単結晶 GaN について光誘起 OCP の光強度依存性を解析した結果、強励起領域では OCP が光強度の対数に比例する関係が明確に観察された (図2)。これは、結晶性の良い太陽電池の開放電圧に関してよく観察される現象で、光励起キャリアが半導体中の空乏層を狭窄してバンド曲がり減少させることに対応していると考えられる。すなわち、高結晶品位の半導体光電極では、太陽電池と同様の光起電力生成が行われていることが強く示唆された。OCP の光励起強度 (対数) に対する傾きからはショットキーダイオードの理想係数 n が得られ、強励起下では $n \sim 1$ が得られた。これは、光励起キャリアの空乏層における非発光再結合は限定的であることを示唆している。

一方、光強度が小さい領域の OCP の振る舞いは、半導体光電極が接する電解液の種類に大きく依存していた。同じ pH でも H₂SO₄ 電解液では光強度の全領域において OCP と光強度 (対数) の間に線形性が成り立っているが、HCl 電解液では光強度が小さい領域で OCP が 0.6 にピニングされた (図2)。中性～アルカリ性の電解液では、光強度が小さい領域で OCP が 0.55 にピニングされた。これらの傾向は、GaN と電解液の界面に存在する化学種が、光強度が小さい領域で

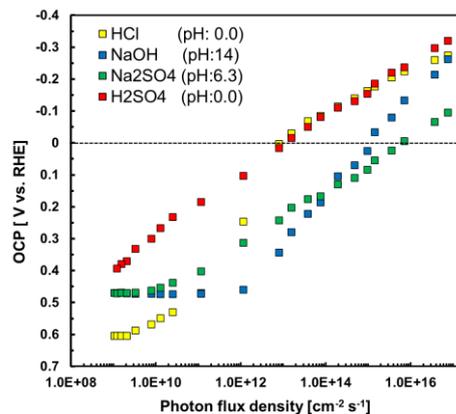


図2 GaN 単結晶光アノードに生じる光電圧 (OCP) の光照射強度に対する依存性。

の OCP のピンングを支配していることを示唆する。半導体/金属のショットキー接合では、異種材料界面の各種欠陥がフェルミ準位のピンングを起こすが、今回解析した半導体/電解液の界面では、GaN 表面を覆う化学種（接する電解液の種類や pH により変化する）が固体中の欠陥に加えてキャリアの再結合中心として機能し、フェルミ準位のピンングを起こすものと考えられる。

Mott-Schottky 解析の過程で得られる、半導体/電解液界面静電容量の印加電位依存性から半導体側に存在する結晶欠陥由来の界面準位を見積もった。その結果、界面準位の 10^{12} cm^{-2} 未満であり、実験で観察された強いフェルミ準位のピンングを起こすには小さすぎる値であった。このことから、半導体/電解液の界面で GaN 表面を覆う化学種がキャリアの再結合中心として機能していることが強く示唆された。

一方、結晶性の悪い GaN を模擬するために、上述の単結晶 GaN 表面に Ar プラズマ照射し、結晶欠陥を導入した GaN 光電極に対しても同様な解析を行った。その結果、プラズマ未照射の GaN とは明確に異なる OCP の光強度依存性が観察された。弱励起条件での OCP が GaN 結晶の窒素欠陥に起因すると思われるバンド間準位にピンングされており、光強度を 6 桁程度変化させても OCP はほとんど変化しなかった。最大光強度で照射した際の OCP の値は、プラズマ未照射の GaN に比べて 0.6 eV 程度正側にシフトしており、プラズマ照射に起因する表面の欠陥および酸化層の生成により半導体電極/電解液界面の電気二重層の電位差が変化したものと考えられる。

これらの結果から、半導体光電極において、光起電力の生成を阻害するキャリアの界面再結合は、半導体表面に存在する結晶欠陥だけでなく、電解液に由来して半導体表面を被覆している化学種によって誘引されることが明らかになった。すなわち、光起電力を増大するためには、電解液との界面で結晶欠陥の少ない高品位な半導体結晶を得ることはもちろんだが、電解液の制御や適切な表面修飾により半導体表面を被覆する化学種をも最適化する必要があるといえる。

(2)半導体の種類による光起電力とフェルミ準位のピンングの変化

光アノードとしてヘテロエピタキシャル成長による GaN に加えて、単結晶基板である TiO_2 および SrTiO_3 についても光誘起 OCP の振る舞いを観察し、相互比較した(図 3)。STO では、光強度がごく弱い領域以外は一貫して $n=1.1$ が得られており、本材料は欠陥が少ない高品位な結晶であることがわかる。一方、 TiO_2 では、光強度が弱い領域では OCP が溶液のレドックス電位もしくは電極表面近傍の欠陥準位にピンングされ、ついで $n=2$ の領域が現れ、さらに大きな光強度下では $n=1.1$ 程度で傾きが安定した。このように、照射光強度の増大につれて、OCP のピンング、非発光再結合が主体の $n=2$ 、発光再結合が主体の $n=1$ の順に遷移する現象は、半導体と金属のショットキー接合によくみられるものであり、光励起キャリアによってピンングの起源である準位やバンドギャップ中心付近の非発光再結合中心が占有されてキャリアの再結合中心として働かなくなることによるものである。以上のように、単結晶基板を用いた STO、 TiO_2 光アノードは典型的な半導体接合の性質を備えていることが明確になった。一方で、GaN は光強度 3 桁以上にわたり OCP がピンングされており、光起電力を得にくい材料であることがわかった。また、ピンングが解けた後の光強度増大に伴う OCP の急激な変化は、ダイオード係数 n としては 2 を遥かに超えるものであり、欠陥準位あるいは電解液のレドックス電位による OCP のピンングに関連することが明らかになった

(3)半導体光電極表面への助触媒導入効果

半導体光触媒では、水素生成の助触媒として Pt 微粒子を粒子表面に修飾している。光照射下で、半導体から Pt に光励起電子が移動して、Pt と電解液の界面で H^+ に伝達されて水素を発生する現象は広く観察されている。しかし、本研究の解析対象としている n 型 GaN や STO と金属 Pt の仕事関数を考えると、半導体と金属はショットキー接合を形成して接合界面の半導体領域に空乏層が生じると考えられる。すなわち、n 型 GaN や STO 中で光励起された電子は空乏層のポテンシャル障壁に妨げられて Pt に移動することができない。この矛盾を解明するため、単結晶の n 型 GaN や STO 基板表面に膜厚 1 nm 相当の Pt を真空蒸着し、水素発生助触媒のモデルとした。

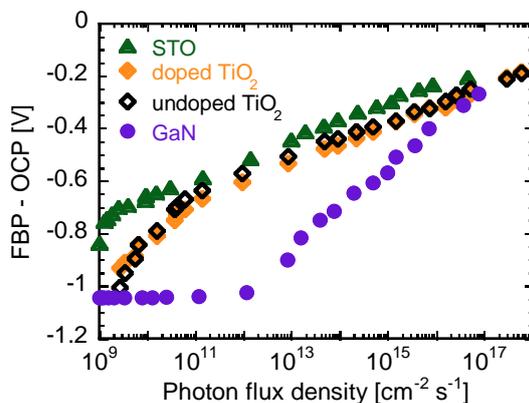


図 3 各種半導体光アノードにおける、光照射下でのフェルミ準位 (OCP) とフラットバンドポテンシャル (FBP) の差分。縦軸の値が負になるほど、電解液との界面での半導体のバンド曲がり大きい。

実際に蒸着された Pt は粒子状であった。基板にコンタクトした電極を開放電位（およびその近傍）にした際、光照射下で水素と酸素が同時に発生することが観察された。これは、粒子状光触媒による光分解反応に相当する。Pt と n 型半導体（GaN および STO）界面のバンドアラインメントを解析する目的で、半導体表面に Pt のくし形電極（Pt 厚さ 9 nm）を、シャドーマスクを介した蒸着により形成した（図 4 (a)）。これにより、半導体バルクの電位と表面 Pt の電位を独立に計測することが可能となった。これにより、光触媒として動作中の Pt/半導体構造において Pt と半導体間の電流-電圧特性を世界で初めて計測することに成功した。

STO 表面で酸素発生のみが起こる水素雰囲気での実験に比べて、Ar 雰囲気中では特に 0.3 V より負側で光アノード（酸素発生）電流が低下しているように見える（図 4 (b)）。これは Pt 表面で光カソード電流が発生してアノード電流を打ち消しているためである。前述の通り、Pt と STO の間にはショットキー障壁が存在して、光カソード電流を妨げると考えられる。そこで、Pt の電位を測定して STO の電位と比較したところ、0.3 V より負側では両者が一致しており（図 4 (c)）Pt と STO はオーム性接触していることが示唆された。GaN 光アノードでも、同様な現象が観察された。

仕事関数から予想されるショットキー障壁が消滅する理由として、GaN の場合は、Pt 表面で生じる原子状の水素が GaN 表面近傍にバンドギャップ内準位を形成することが示唆された。STO の場合のメカニズムは解析中である。

<引用文献>

- 1) A. Nakamura *et al.*, *Appl. Phys. Express*, **8**, 107101 (2015).
- 2) J. Jia *et al.*, *Nature Comm.* **7**, 13237 (2016).
- 3) Wen-Hui Cheng *et al.*, *ACS Energy Lett.*, **3**, 1795 (2018).

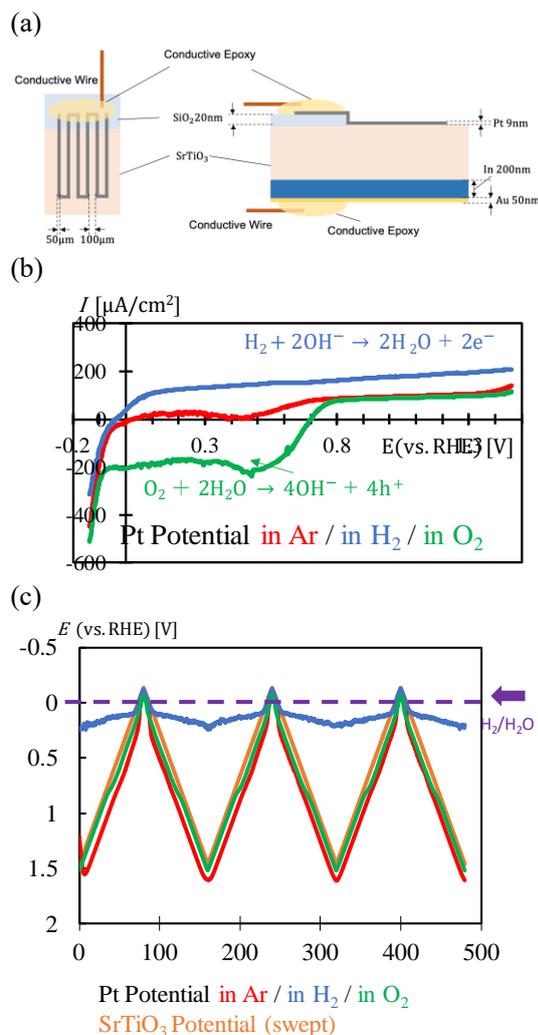


図 4 Pt 助触媒（電極）をくし形にパターンニングして表面につけた STO 光アノード(a)の光照射下での電流電圧（STO の電位）特性(b). アノード電位を掃引した際に表面 Pt の電位も同時測定し、比較した(c). NaOH 電解液に Ar, H₂, O₂ をバブリングして、電解液への溶存ガスを制御している。

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 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sato Masahiro, Imazeki Yuki, Fujii Katsushi, Nakano Yoshiaki, Sugiyama Masakazu	4. 巻 150
2. 論文標題 First-principles modeling of GaN(0001)/water interface: Effect of surface charging	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Journal of Chemical Physics	6. 最初と最後の頁 154703 ~ 154703
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5086321	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 Sato Masahiro, Imazeki Yuki, Takeda Takahito, Kobayashi Masaki, Yamamoto Susumu, Matsuda Iwao, Yoshinobu Jun, Nakano Yoshiaki, Sugiyama Masakazu	4. 巻 124
2. 論文標題 Atomistic-Level Description of GaN/Water Interface by a Combined Spectroscopic and First-Principles Computational Approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 12466 ~ 12475
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c02192	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 Imazeki Yuki, Sato Masahiro, Takeda Takahito, Kobayashi Masaki, Yamamoto Susumu, Matsuda Iwao, Yoshinobu Jun, Sugiyama Masakazu, Nakano Yoshiaki	4. 巻 125
2. 論文標題 Band Bending of n-GaN under Ambient H ₂ O Vapor Studied by X-ray Photoelectron Spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 9011 ~ 9019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.0c11174	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 Minegishi Tsutomu, Shizumi Soraya, Ciftci Oguz, Endo Tatsuro, Imazeki Yuki, Pihosh Yuriy, Sugiyama Masakazu	4. 巻 in press
2. 論文標題 In Situ Photoluminescence Analysis of GaN Photoanode during Water Oxidation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Journal of Physical Chemistry C	6. 最初と最後の頁 in press
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.jpcc.1c02005	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15件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 7件）

1. 発表者名 Hiroaki Maruyama, Katsushi Fujii, Yoshiaki Nakano, Masakazu Sugiyama
2. 発表標題 Impact of surface morphology of Al(Ga)N interlayer for polarization-engineered water splitting photocathode
3. 学会等名 IWN 2018, Nov. 11-16, Kanazawa, Japan, OD13-7 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masahiro Sato, Yuki Imazeki, Katsushi Fujii, Yoshiaki Nakano, Masakazu Sugiyama
2. 発表標題 The Effect of Illumination on the Geometric Structure of Water Molecules on GaN(0001) Surface
3. 学会等名 MRS 2018 Fall Meeting, Nov. 25-30, 2018, Boston, USA, CM03.09. (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masakazu Sugiyama
2. 発表標題 Efficiency enhancement and energy-system application of semiconductor photovoltaic structures: from power generation to solar-fuel production
3. 学会等名 The 2019 Nankai International Symposium on Solar Energy Conversion (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今関 裕貴、ナーンブラパーワット スパワン、佐藤 正寛、藤井 克司、嶺岸 耕、杉山 正和、中野 義昭
2. 発表標題 n-GaN光電極/電解液界面バンドアライメントに及ぼす溶存酸素の影響
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Supawan Ngamprapawat, Yuki Imazeki, Tsutomu Minegishi, Katsushi Fujii, Masakazu Sugiyama
2. 発表標題 Material-dependent Photoresponse of quasi-Fermi Level in Single-crystalline Photoanodes
3. 学会等名 第80回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 M. Sugiyama
2. 発表標題 Efficiency enhancement of semiconductor photovoltaic structures from power generaon to solar-fuel production
3. 学会等名 IUMRS-ICA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuki Imazeki, Supawan Ngamprapawat, Masahiro Sato, Katsushi Fujii, Tsutomu Minegishi, Masakazu Sugiyama, Yoshiaki Nakano
2. 発表標題 Effect of Dissolved O ₂ on Band Alignment at n-GaN/NaOH Interface
3. 学会等名 MRS fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Supawan Ngamprapawat, Yuki Imazeki, Tsutomu Minegishi, Masahiro Sato, Katsushi Fujii, Masakazu Sugiyama
2. 発表標題 Comparison of Light-Intensity-Dependent Open-Circuit Potential among TiO ₂ , SrTiO ₃ and GaN Single-Crystalline Photoanodes
3. 学会等名 MRS fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masahiro Sato, Yuki Imazeki, Takahito Takeda, Masaki Kobayashi, Susumu Yamamoto, Iwao Matsuda, Jun Yoshinobu, Yoshiaki Nakano and Masakazu Sugiyama
2. 発表標題 A Combined Spectroscopic and First-Principles Approach for the Atomistic-Level Description of Semiconductor/Electrolyte Interface
3. 学会等名 MRS fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 沈昊哉、今関裕貴、スパワナーンプラパーワット、佐藤正寛、藤井克司、嶺岸耕、中野義昭、杉山正和
2. 発表標題 光電気化学的水分解におけるSrTiO ₃ の面方位依存性
3. 学会等名 第67回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 嶺岸 耕、沈 昊哉、Ciftci Oguz、今関 裕貴、杉山 正和
2. 発表標題 GaN薄膜光電極の水分解反応中その場フォトルミネッセンス
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沈 昊哉、今関 裕貴、佐藤 正寛、藤井 克司、嶺岸 耕、中野 義昭、杉山 正和
2. 発表標題 Pt担持したSrTiO ₃ (100)面の光電気化学特性
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 嶺岸耕、沈昊哉、CIFTCI Oguz、今関裕貴、杉山正和
2. 発表標題 GaN電極における光電気化学反応中のフォトルミネッセンス
3. 学会等名 第126回触媒討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 沈 昊哉、遠藤 達朗、嶺岸 耕、杉山 正和
2. 発表標題 Pt楕形電極を形成したSrTiO ₃ モデル光触媒における水分解反応
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠藤 達朗、沈 昊哉、嶺岸 耕、杉山 正和
2. 発表標題 Pt楕型電極を水素生成サイトとするGaNモデル光触媒の解析
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021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
研究 分担者	佐藤 正寛 (Sato Masahiro) (40805769)	東京大学・先端科学技術研究センター・助教 (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	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	藤井 克司 (Fujii Katsushi) (80444016)	国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・ 研究員 (82401)	

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