

平成 26 年 5 月 8 日現在

機関番号：16201

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23350101

研究課題名(和文) 特定結晶面を露出する二酸化チタンナノ結晶の創製と色素増感太陽電池特性評価

研究課題名(英文) Development of TiO₂ nanocrystals with specific crystal facet on surface for high performance dye-sensitized solar cells

研究代表者

馮旗(Feng, Qi)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：80274356

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,700,000円、(間接経費) 4,710,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は独自開発した新規合成法で特定の結晶面を露出するTiO₂ナノ粒子を合成し特定の結晶面における色素吸着特性と色素増感太陽電池特性との関係を解明し、表面制御による太陽電池性能向上を目的とし以下の内容に沿って研究を行う。層状チタン酸ナノシートからTiO₂ナノ粒子の合成、ナノ粒子の露出結晶面および粒子形状制御。結晶面と粒子形状を制御した高性能色素増感太陽電池用TiO₂ナノ粒子の開発。ナノ表面分析と光学特性評価によるTiO₂の特定結晶面における色素吸着反応、光電子移動反応挙動の解明。色素吸着特性(吸着量、吸着強度等)と色素増感太陽電池性能パラメーター(光電圧、光電流等)との相関関係の解明

研究成果の概要(英文)：In this study, we study the synthesis of TiO₂ nanocrystals with specific crystal facet on their surface by a novel soft chemical process, dye adsorption behavior on the specific crystal facet, relationship between the dye adsorption behavior and the performance of dye-sensitized solar cells (DSCs), and development of high performance DSCs by controlling the crystal facet of the TiO₂ nanocrystals. We focus on the three points as follows: (1) synthesis of TiO₂ nanocrystals with specific crystal facet on surface. Development of high performance DSCs using the TiO₂ nanocrystals with controllable facet. (2) Study on dye adsorption and photoelectrons transformation from dye to TiO₂ with specific facet by nanostructural and optical characterization. (3) Clarification of the relationship between dye adsorption parameters, adsorption density and constant, and cell performance parameters, short-circuit current density, open-circuit voltage, fill factor, and energy conversion efficiency.

研究分野：化学

科研費の分科・細目：無機工業材料

キーワード：色素増感 太陽電 二酸化チタン 結晶面制御 ナノ粒子 光触媒反応

1. 研究開始当初の背景

低コスト太陽電池の中では、色素増感型太陽電池が最も光電変換率(13%)が高く、最も実用化に近いと言われている。しかし、実用化するために15%以上の光電変換率が望まれ、更なる基礎的研究によるブレークスルーが不可欠である。色素増感太陽電池は、色素を吸着したTiO₂ナノ粒子多孔性膜電極、Pt対極および電解質溶液から構成される。TiO₂ナノ粒子の性質は太陽電池の性能を大きく影響するので、これまではTiO₂ナノ粒子の結晶構造、結晶性、粒子形状などについて様々な検討がなされてきた。その結果から、アナターゼ結晶構造を持つ高い結晶性、20 nm ぐらいのTiO₂ナノ粒子が色素増感太陽電池に適することが示唆されている。

一方、色素の吸着反応はTiO₂ナノ粒子の表面で起こるので、ナノ粒子の表面に露出する結晶面に大きく依存することが予想される。しかし、実際にはTiO₂の結晶面による増感特性の影響は殆ど研究されていない。その最大の理由は特定の結晶面が多く露出するナノ結晶の合成が極めて困難なためである。ゾル-ゲル法や水熱法などの従来法で合成したTiO₂ナノ結晶がほとんど球状結晶、あるいは球状に近い結晶形状を有するために、結晶表面に露出する結晶面は合成法によらず、異方性がなく、一定である。即ち、結晶面による色素吸着特性の差異が現れないので、TiO₂ナノ結晶特性の差異は、主に結晶性と比表面積に由来する。GraetzelらのグループはTiO₂結晶面と色素吸着との関係について理論計算を行い、アナターゼの(101)結晶面が色素の吸着面であると推定したが、実証されなかった。

最近、われわれは層状チタン酸を剥離して得た層状チタン酸ナノシートを水熱条件下で反応させると、特定の結晶面、即ち(010)面を表面に多く露出するアナターゼ型TiO₂ナノ粒子の合成に成功した。これによって異なる結晶面における色素の吸着挙動や色素の吸着特性による色素増感太陽電池性能への影響を調べることが初めて実現した。(010)結晶面を多く持つナノ粒子は、各結晶面が均等に露出している球状粒より色素の飽和吸着量が4倍も高く、Graetzelらの理論計算の結果と異なる。また、色素の吸着結合強度(吸着定数)が結晶面や粒子形状にも大きく影響されることも明らかにした。さらに色素増感太陽電池特性評価結果から、色素吸着パラメーターと太陽電池の性能パラメーターとの相関関係を初めて見出した。すなわち、太陽電池の短絡光電流(J_{sc})は吸着定数(K_{ad})の増加に伴い、対数関数的に増加し、開路光電圧(V_{oc})は色素の吸着量(Q)の増加に伴い、直線的に増加する。さらに四角形ナノ粒子は極めて大きな吸着定数を示し、これまで最高の光電流(J_{sc} = 21mA/cm²)を達成できた。これらのことから、これまで検討されなかったTiO₂ナノ粒子の表面特性

を制御すれば、色素増感型太陽電池性能の更なる向上が期待できる。

2. 研究の目的

これまでに研究代表者らは、Lepidocrocite構造を有する層状チタン酸ナノシートを水熱反応させ(010)結晶面を多く露出するアナターゼ型TiO₂ナノ結晶合成に成功した。ナノシートからTiO₂への生成反応は、トポタクチック構造変換反応であるので、出発原料の層状チタン酸ナノシートの結晶構造を変えると、異なる結晶面を露出するTiO₂ナノ結晶を合成できると予想される。本研究期間中には、次の研究課題を中心に検討する。

三チタン酸や四チタン酸等を剥離処理してこれらのチタン酸ナノシートを作製し、ナノシートを水熱処理して、TiO₂ナノ結晶の結晶面と粒子形状を制御する合成方法を確立する。特定の結晶面を露出するTiO₂ナノ結晶の色素吸着挙動をLangmuir吸着等温式で解析し、吸着量、吸着定数等のパラメーターを求め、結晶面との関係を特定する。ナノ表面分析で表面の原子配列と色素吸着反応との関連性を調べ、吸着量、吸着定数と色素の吸着結合様式との関係を解明する。ダイナミック分光解析で色素から励起された光電子がTiO₂表面への移動過程を調べ、結晶面による色素吸着結合強度や吸着量の違いと光電子輸送効率との関係を解明する。色素増感太陽電池を作製し、特性評価を行い、結晶面、吸着量、吸着強度と太陽電池特性との関係を総合的に解析し、高性能色素増感電池用TiO₂ナノ結晶材料の合成条件を特定する。

3. 研究の方法

本研究は、独自で開発した水熱ソフト化学法を用い、特定結晶面を露出するTiO₂ナノ粒子の合成を行う。まず、層状チタン酸の結晶を有機アミン溶液で処理して、層状構造を層状チタン酸ナノシートに剥離させる。ナノシートは一層の厚みが約1 nmであり、層状チタン酸と同じ構造をもつ二次元結晶である。次に層状チタン酸ナノシート溶液を水熱処理して、層状チタン酸の構造をTiO₂構造へ変換させる。この構造変換反応はトポタクチック反応であり、生成するTiO₂の形状および露出結晶面はナノシートの形状および結晶構造の原子配列と強い相関関係を有する。すなわち、生成したシート状TiO₂の表面に露出する結晶面は、層状チタン酸ナノシートの結晶構造あるいは原子配列に依存する。これにより異なる結晶構造のチタン酸ナノシートから異なる結晶面を露出するナノシート状TiO₂が得られる。さらに、生成したナノシート状TiO₂は非常に薄いので、溶液中での溶解反応により、割れ目が発生し、小さい粒子となる。この溶解反応は、反応温度や溶液のpH等の条件に依存し、反応条件を制御すれば、生成するナノ粒子の形状を制御することができる。これまで、Lepidocrocite構造を有する

層状チタン酸ナノシートを水熱処理して(010)結晶面を多く露出するアナターゼ型TiO₂ナノ結晶合成に成功した。本研究では、その他の結晶構造を有する層状チタン酸ナノシートからTiO₂ナノ結晶合成を行い、その他の結晶面の制御について検討する。

合成した特定結晶面を露出するTiO₂ナノ結晶の色素吸着容量をバッチ平衡吸着法で測定する。窒素吸着BET法で比表面積を測定し、単位面積の色素吸着量を求める。色素の平衡濃度と吸着量からLangmuir吸着式等から飽和吸着容量や吸着定数を求める。さらに市販の球状TiO₂ナノ結晶と比較して、結晶面による色素吸着特性の違いを明らかにする。色素増感太陽電池特性について、合成した特定結晶面を露出するTiO₂ナノ結晶についてTiO₂多孔性電極を作製し、色素増感太陽電池を組み立て、太陽電池のI-V曲線を測定し、電池特性パラメーター(短絡光電流(J_{sc})、開路光電圧(V_{oc})、フィルファクター(FF))を求め、吸着測定した吸着パラメーターとの比較を行い、その相関関係を検証する。

出発原料の層状チタン酸ナノシートおよび各条件下で水熱合成したTiO₂ナノ結晶について、透過型電子顕微鏡(TEM)を用いて、TiO₂ナノ結晶の生成過程におけるナノ構造変化、形状変化を調べ、TiO₂ナノ結晶のナノ構造や形状と出発原料の層状チタン酸ナノシートのナノ構造や形状との関係を明らかにし、TiO₂ナノ結晶の生成反応メカニズムに関する知見を得る。さらに合成したTiO₂ナノ結晶の表面状態や原子配列をTEMと原子間力顕微鏡(AFM)を用いて解析し、露出結晶面や結晶面における原子配列を特定する。

ダイナミック分光システムを用いて、ポンプ-プローブ法および四光波混合法でTiO₂-色素ナノ複合体の光励起電子の寿命や緩和過程の測定などから色素増感光電反応における電子移動プロセスについて分析し、色素の吸着特性との関連性を解析する。懸濁溶液の時間分解分光について、蛍光中の高次光学効果に注目した測定等を検討する。

4. 研究成果

(1) 特定結晶面を有するTiO₂ナノ結晶の合成と生成反応メカニズムの解明

本研究では、Lepidocrocite構造を有する層状チタン酸、三チタン酸(H₂Ti₃O₇)および四チタン酸(H₂Ti₄O₉)を出発原料とし、TiO₂ナノ結晶の合成を行った。まず、これらの層状チタン酸を剥離し、各種層状チタン酸ナノシートを合成した。三チタン酸と四チタン酸の剥離はこれまで報告されていないので、その剥離方法を検討した。その結果、三チタン酸と四チタン酸を、まず、水酸化テトラメチルアモニウム溶液中で水熱処理して、層間にテトラメチルアモニウムイオンを挿入させる。この挿入反応は室温で起こりにくいため、水熱条件下で行った。三チタン酸と四チタン酸の最適処理温度は、それぞれ130と100

である。

テトラメチルアモニウムイオンを挿入した層状チタン酸を蒸留水中に分散させることにより、湿潤効果により大量な水分子が層間に挿入され、層状チタン酸が剥離され、層状チタン酸ナノシートが得られた。三チタン酸と四チタン酸ナノシートの作製は初めて成功した。剥離したH₂Ti₃O₇とH₂Ti₄O₉ナノシートを水熱処理して様々な粒子形状のTiO₂ナノ結晶を合成した。

図1には、H₂Ti₃O₇ナノシート溶液を水熱処理して合成したTiO₂ナノ結晶のFE-SEM写真である。水熱反応温度、溶液のpH等の条件を変えると、ロッド状、リーフ状、ひし形、六角形のアナターゼ型TiO₂ナノ結晶を合成できた。すなわち、反応条件を制御すれば、粒子形状を制御できる。

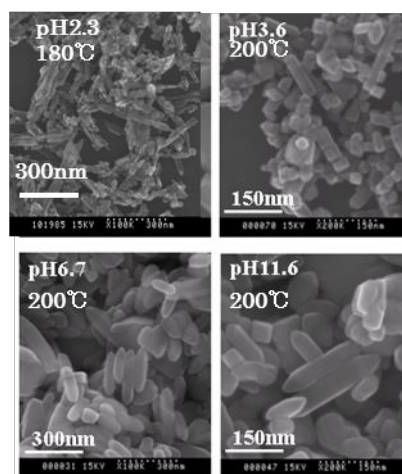


図1. 三チタン酸ナノシートから合成したアナターゼ型TiO₂ナノ結晶のFE-SEM写真

TEMによるナノ構造解析の結果からリーフ状、ひし形、六角形粒子は(010)結晶面を露出するが、ロッド状粒子は[11-1]方向に垂直する結晶面を露出することがわかった(図2)。

同様にH₂Ti₄O₉ナノシートからTiO₂ナノ結晶の合成について検討した。TiO₂ナノ結晶のナノ構造解析の結果からロッド状ルチル型TiO₂ナノ粒子、多角形ブルーカイト型TiO₂ナノ粒子、四角形、リーフ状、多角形アナターゼ型TiO₂ナノ粒子は、反応温度と溶液のpH制御によって合成した。リーフ状粒子は(010)結晶面を露出するが、四角形粒子は[11-1]方向に垂直する結晶面を露出することがわかった。

さらに透過型電子顕微鏡を用いて、TiO₂ナノ結晶の生成過程におけるナノ構造変化、形状変化を調べ、TiO₂ナノ結晶のナノ構造や形状と出発原料の層状チタン酸ナノシートのナノ構造や形状と相関関係を解明した。層状チタン酸ナノシートからTiO₂ナノ結晶への生成反応においては、水熱条件下で層状チタン酸ナノシートはまず、ナノシートの形状を保持してアナターゼ型TiO₂構造へ変化し、ナ

ノシート状アナターゼ型 TiO_2 粒子が生成する。ナノシート状アナターゼ型 TiO_2 粒子が溶解反応で割れて小さい粒子になる。割れ方は反応温度や pH に依存する。これらの反応条件を制御すれば、粒子形状を制御できる。

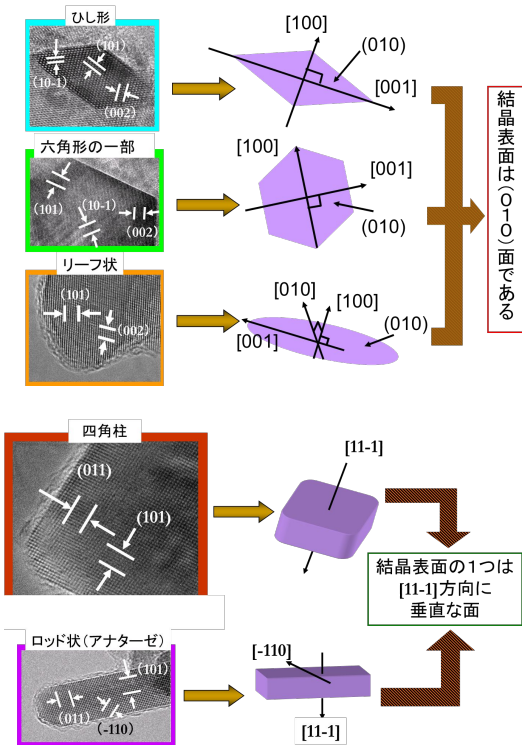


図 2、 $\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$ ナノシートから合成したアナターゼ型 TiO_2 ナノ結晶の TEM 写真と露出する結晶面

このように合成したアナターゼ型 TiO_2 粒子の露出結晶面は出発原料の層状チタン酸ナノシートの構造に依存する。Lepidocrocite 構造を有する層状チタン酸から (010) 結晶面を有するアナターゼ型 TiO_2 粒子を生成する。一方、階段状構造を有する三チタン酸 ($\text{H}_2\text{Ti}_3\text{O}_7$) および四チタン酸 ($\text{H}_2\text{Ti}_4\text{O}_9$) から [11-1] 方向に垂直する結晶面を露出するアナターゼ型 TiO_2 粒子を合成できる。すなわち、層状チタン酸ナノシートの構造で生成したアナターゼ型 TiO_2 粒子の結晶面を制御できることを明らかにした。

(2) 特定結晶面を有する TiO_2 ナノ結晶の色素吸着特性と光触媒特性および太陽電池特性との相関性の解明

合成した特定結晶面を有するアナターゼ型 TiO_2 粒子の光触媒活性、色素吸着特性、色素増感太陽電池特性評価を行った。[111] 方向に垂直する結晶面を露出する四角形粒子、(010) 結晶面を露出する四角形粒子および市販の特定結晶面ない P25 粒子について光触媒特性評価を行った。(010) 結晶面を露出する四角形粒子はもっとも高い光触媒活性を示し、次は [111] 方向に垂直する結晶面を露出する四角形粒子、特定結晶面ない市販の P25 がもっとも低い光触媒活性を示すことをわ

かった (図 3)。すなわち、光触媒活性は結晶面に依存することを明らかにした。

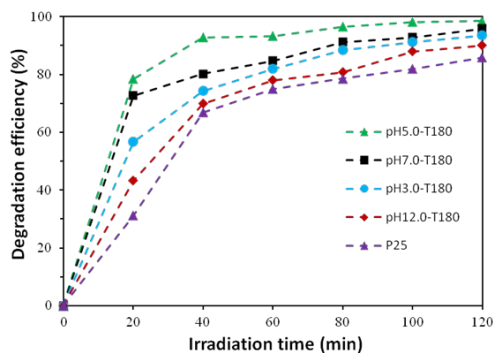


図 3、異なる結晶面を有する TiO_2 粒子の光触媒活性。(010) 結晶面試料 (pH5.0-T180, pH7.0-T180) [11-1] 方向に垂直する結晶面を露出する試料 (pH3.0-T180)、特性結晶面ない市販試料 (P25)

色素増感太陽電池用 N719 色素吸着特性を調べた。色素吸着等温線から色素吸着定数 (吸着の強さ) と吸着密度を求めた (図 4)。色素吸着定数は、P25 < [11-1] 結晶面 < (010) 結晶面 の順で増大する。

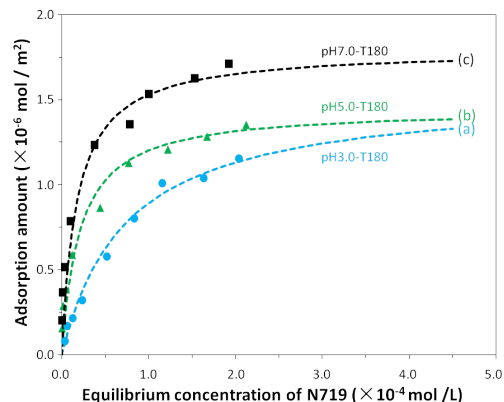


図 4、異なる結晶面を有する TiO_2 粒子の色素吸着等温線。(010) 結晶面試料 (pH5.0-T180, pH7.0-T180) [11-1] 方向に垂直する結晶面を露出する試料 (pH3.0-T180)

さらに色素増感太陽電池を作製し、電池特性評価を行い、比較した。短絡電流は、P25 < [11-1] 結晶面 < (010) 結晶面 の順で増大し、色素の吸着定数の増大傾向と一致する。すなわち、色素を強く吸着する結晶面は高い光電流を得られ、高いエネルギー変換率を達成できることを明らかにした。この結果から太陽電池特性は TiO_2 の結晶面に強く影響されることを実証した。

さらにダイナミック分光システムを用いて、 TiO_2 ナノ粒子および TiO_2 - 色素ナノ複合体の光学的解析を行った。蛍光寿命測定法で TiO_2 - 色素ナノ複合体の光励起電子の寿命や色素- TiO_2 間の電子移動過程の測定から、色素増感光電反応における励起された色素から TiO_2 ナノ粒子への電子移動プロセスについての測定を行った。(010) 結晶面を露出する TiO_2 ナノ粒子への電子移動が市販の P25 ナノ粒子

より速い結果を得ている。すなわち、強く吸着した色素から TiO₂ への光電子移動速度が速く、光電効率が高い。その結果は、太陽電池測定結果と一致した。

以上の結果から、本研究は、従来の合成方法で困難な TiO₂ ナノ結晶の結晶面制御を実現できた。これまで検討されなかった TiO₂ 結晶面の特性を利用することで、色素増感太陽電池の特性を最大限に引き出すことが可能であることを示唆された。色素の吸着特性と太陽電池特性との関係解明は、色素増感太陽電池の最適化・特性の改善に不可欠である。この関係を明確にすることにより、簡単な色素の吸着実験で求めた吸着パラメーターから TiO₂ ナノ粒子の太陽電池特性を予測できる。太陽電池作製の煩雑な作業を簡略できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計9件)

Puhong Wen, Sitao Yang, Yoshie Ishikawa, Hiroshi Itoh, and Qi Feng, Visible light sensitization effect of polyaminobenzoate adsorbed on TiO₂ nanocrystal surface. Applied Surface Science, 査読有, Vol. 257, pp. 2126-2133 (2011).

Lifang Zhao, Hongshe Wang, Yan Wang, Jianyin Miao, Qi Feng, Synthesis of Layered Hydroxide Zinc m-Aminobenzoate Compounds and Their Exfoliation Reactions. Chinese Journal of Chemistry, 査読有, Vol. 29, pp. 1837-1845 (2011).

Edakkattuparambil S. Shibu, Akinari Sonoda, Zhuoqi Tao, Qi Feng, Akihiro Furube, Sadahiro Masuo, Li Wang, Naoto Tamai, Mitsuru Ishikawa, Vasudevanpillai Biju, Photofabrication of Fullerene-Shelled Quantum Dots Hybrid Nanoparticles for Solar Energy Harvesting. ACS Nano, 査読有, Vol. 6, pp. 1601-1608 (2012).

Puhong Wen, Mei Xue, Yoshie Ishikawa, Hiroshi Itoh, Qi Feng, Relationships Between Cell Parameters of Dye-sensitized Solar Cells and Dye-adsorption Parameters, ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 4, pp. 1928-1934 (2012).

Noriaki Tsurumachia, Hiroki Okamoto, Kenta Ishii, Hironobu Kohkami, Shunsuke Nakanishi, Tomohiko Ishii, Naoshi Takahashi, Chunsheng Doua, Puhong Wen, Qi Feng, Formation of aggregates in nanohybrid material of dye molecules-titanate nanosheets, Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 査読有, Vol. 243 pp. 1- 6 (2012).

Hongmei Pan, Xingang Kong, Puhong Wen,

Tomonori Kitayama, Qi Feng, Nanostructural evolution from nanosheets to one-dimensional nanoparticles for manganese oxide, Materials Research Bulletin, 査読有, Vol. 47, pp. 2428-2436 (2012).

Yaohua Xu, Keichi Kominami, Yoshie Ishikawa, and Qi Feng, Layered hydroxide nickel benzoates: Hydrothermal synthesis, structure characterization, and exfoliation reaction, Journal of Colloid and Interface Science, 査読有, Vol. 386, pp. 107-113 (2012).

Morihiko Hamada, Norifumi Takenokoshi, Keiji Motozaki, Qi Feng, Norio Murase, Shin-ichi Wakida, Shunsuke Nakanishi, Vasudevanpillai Biju, In situ Photochemical Surface Passivation of CdSe/ZnS Quantum Dots for Quantitative Light Emission and Enhanced Photocurrent Response in Solar Cells, The Journal of Physical Chemistry Part C, 査読有, Vol. 118, pp. 2178-2186 (2014)

Galhenage A. Sewvandi, Zhuoqi Tao, Takafumi Kusunose, Yasuhiro Tanaka, Shunsuke Nakanishi, and Qi Feng, Modification of TiO₂ Electrode with Organic Silane Interposed Layer for High-Performance of Dye-Sensitized Solar Cells, ACS Applied Materials & Interfaces, 査読有, in press. Doi:10.1021/am500666e

[学会発表](計41件)

Qi Feng, Puhong Wen, Yong Fan, Yoshie Ishikawa, Shunsuke Nakanishi, Relationships between dye-adsorption parameters and the cell parameters for dye-sensitized solar cells. 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21) (2011, 11, 29)

Yong Fan, Yasushi Ikeuchi, Changdong Chen, Zhuoqi Tao, Qi Feng, Hydrothermal Soft Chemical Synthesis of TiO₂ Nanocrystals exposing a specific lattice plane on the surface and their application to dye-sensitized solar cells. 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21) (2011, 11, 29)

Zhuoqi Tao, Sitao Yang, Changdong Chen, Yong Fan, Qi Feng, Improvement of DSC performance by modification of TiO₂ electrode with silane monomolecular layer. 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21) (2011, 11, 29)

Changdong Chen, Sitao Yang, Yong Fan, Zhuoqi Tao, Qi Feng, Impedance analysis of TiO₂ electrode for dye-sensitized solar

cell. 21st International Photovoltaic Science and Engineering Conference (PVSEC-21) (2011, 11, 29)

Changdong Chen and Qi Feng, Synthesis of Anatase-type TiO₂ Nanoparticles for Dye Sensitized Solar Cells by Microwave Hydrothermal Method, 4th Chiang Mai University-Kagawa University Joint Symposium 2012 (2012, 9, 19)

Changdong Chen, Qi Feng, Performance of Dye-Sensitized Solar Cell Fabricated with {010}-Faceted Anatase TiO₂ Nanoparticles, Japan-India Bilateral Seminar on Supramolecular Nanomaterials for Energy Innovation (2012, 10, 15)

G.A. Sewvandi, Changdong Chen and Qi Feng, Dye Sensitized Solar Cells Based on an Alkyl- Functionalized Carbazole dye, Japan-India Bilateral Seminar on Supramolecular Nanomaterials for Energy Innovation (2012, 10, 15)

Mitsuhiro Okada, Qi Feng, Synthesis of TiO₂ Nanoparticles from H₂Ti₄O₉ Nanosheets and Characterization for Dye-Sensitized Solar Cells, Japan-India Bilateral Seminar on Supramolecular Nanomaterials for Energy Innovation (2012, 10, 15)

Qi Feng, Zhouqi Tao, Changdong Chen, Yong Fan, Shunsuke Nakanishi, Design of TiO₂ electrode surface with organic silane monomolecular layer for high performance DSCs. The 22th Photovoltaic Science and Engineering Conference (2012, 11, 7)

Changdong Chen, Yong Fan, Shunsuke Nakanishi, Qi Feng, DSCs Performance of (010)-Faceted Anatase TiO₂ Nanocrystals Synthesized from Layered Titanate Nanosheets, The 22th Photovoltaic Science and Engineering Conference (2012, 11, 6)

Changdong CHEN and Qi FENG, Synthesis of (010)-Faceted Anatase TiO₂ Nanoparticles by Microwave Hydrothermal Method for Dye Sensitized Solar Cells, The 2nd Joint Workshop of Advanced Materials Science and Engineering between Kagawa University and Hanbat National University (2013, 1, 7)

G.A. Sewvandi and Qi Feng, Effect of TiO₂ Film Thickness on Photovoltaic Performance of Dye Sensitized Solar Cells (DSSCs) Based on Organic Dyes, The 2nd Joint Workshop of Advanced Materials Science and Engineering between Kagawa University and Hanbat National University (2013, 1, 7)

Mitsuhiro Okada, Qi Feng, Synthesis of TiO₂ Nanoparticles from H₂Ti₄O₉ Nanosheets and Characterization of Dye-Sensitized Solar Cell Performance, The 2nd Joint Workshop of Advanced Materials Science and Engineering between Kagawa University and

Hanbat National University (2013, 1, 7, Takamatsu, Japan)

Q. Feng, P. Wen, M. Okada, S. Nakanishi, H. Itoh, Design of TiO₂ Nanocrystal Surface for High Performance Dye-Sensitized Solar Cells, IUPAC 44th World Chemistry Congress, (2013, 8, 11)

G.A. Sewvandi and Qi Feng, Effect of Organic Dye Adsorption Parameters on the Photovoltaic Performance of Dye Sensitized Solar Cells, The 23th Photovoltaic Science and Engineering Conference (2013, 10, 29)

G.A. Sewvandi and Qi Feng, Adsorption Isotherms and Photovoltaic Performance of Dye Sensitized Solar Cells (DSSCs) based on Organic Dye, The 3rd Joint Workshop of Advanced Materials Science and Engineering between Kagawa University and Hanbat National University (2014, 1, 6)

Changdong Chen, Qi Feng, Synthesis and characterization of {010}-faceted anatase nanoparticles for high performance dye-sensitized solar cell, The 3rd Joint Workshop of Advanced Materials Science and Engineering between Kagawa University and Hanbat National University (2014, 1, 6)
その他、24件

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)
取得状況(計0件)

6. 研究組織

(1)研究代表者

馮 旗 (FENG Qi)
香川大学・工学部・教授
研究者番号：80274356

(2)研究分担者

中西 俊介 (NAKANISHI Shunsuke)
香川大学・工学部・教授
研究者番号：30155767

石川 善恵 (ISHIKAW Yoshie)
香川大学・工学部・助教
研究者番号：20509129