

機関番号：57103

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360338

研究課題名(和文) 低温プラズマ表面ナノ構造制御による高感度可視光応答性を示す新規複合化光触媒の創製

研究課題名(英文) Development of highly visible-light-sensitive photocatalysts with surface nanostructure controlled by cold plasma

研究代表者

山田 憲二 (YAMADA KENJI)

北九州工業高等専門学校・物質化学工学科・特任教授

研究者番号：80101179

研究成果の概要(和文):(200字程度)

低温プラズマ表面ナノ構造制御により、以下に示すそれぞれ異なるメカニズムで可視光応答性を示す新規な複合化光触媒を創製した。窒素プラズマ処理により、窒素ドーピング層を表面に持つ酸化チタン・遷移金属ドーピング酸化チタンをそれぞれ調製し、バンドギャップの狭窄化を実現させた。有機銅化合物のプラズマCVDによりCu含有層を複合化させた酸化チタンを調製し、可視光励起電子がCuを還元することで多電子還元機能の発現を実現させた。窒素プラズマドーピング層を持つNbドーピング酸化チタン(n型半導体)とCuBi₂O₄(p型半導体)の複合化微粒子はそれぞれの半導体の可視光励起により励起電子がn型半導体からp型半導体に移動するZ-スキームを実現させた。

研究成果の概要(英文):

Highly visible-light-sensitive photocatalysts are developed with the formation of surface nanostructures controlled by plasma-surface interaction, as follows: (1) Nitrogen-doped surface layer are formed on surfaces of TiO₂ and transition metal-doped TiO₂, respectively. It becomes apparent that their band-gaps become narrow with the formation of the surface layer. (2) Cu-contained layer is formed on a surface of TiO₂ with plasma CVD using organometallic compound. Multi-electron-reactivity of the plasma CVD-treated TiO₂ can realize with the contained Cu reduced by visible-light-excited electrons. (3) Composite composed of Nb-doped TiO₂ as n-type semiconductor having nitrogen-doped surface layer and CuBi₂O₄ as p-type semiconductor shows Z-scheme mechanism in which visible-light-excited electron can be transferred from the n-type to the p-type semiconductor after each visible-light excitation in the semiconductors.

交付決定額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	8600,000	2,580,000	11,180,000

研究分野：プラズマ材料科学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：低温プラズマ、光触媒、可視光、ナノ構造、ドーピング

1. 研究開始当初の背景

400nm よりも短波長の紫外光は太陽光の6%

に過ぎず、可視光(<800nm)は50%に及ぶ。したがって光触媒作用の高感度化を狙って

紫外光だけでなく可視光でも光触媒作用を示す半導体光触媒の開発研究が活発に行われているが、未だに十分な能力を持った光触媒は開発されていない。半導体光触媒の高感度化を実現するためには、可視光域まで吸収できることが必要であり、したがってバンドギャップの狭窄化が必要である。しかしバンドギャップの狭窄化により、半導体の価電子帯準位が上昇（ネガティブシフト）及び伝導帯準位が低下（ポジティブシフト）し、酸化力及び還元力が低下する。この相反効果を解決することが高感度可視光応答性光触媒の開発に必要不可欠である。

2. 研究の目的

低温プラズマ表面ナノ構造制御により、以下のように、高感度可視光応答性を示す新規な複合化光触媒を創製する：(1)可視光吸収を示すバンドギャップ狭窄化させた異種半導体（光酸化系半導体及び光還元系半導体）を開発する。(2)光酸化系半導体表面に還元機能層を形成させ、光励起電子が光酸化系半導体の価電子帯から直接に還元機能層に移動することにより、光酸化系半導体で酸化反応、還元機能層で還元反応を起こすことが可能な複合化光触媒薄膜を開発する。(3)異種半導体間で光励起電子の移動をスムーズに起こさせるために、光酸化系半導体の伝導帯が光還元系半導体の価電子帯よりも高い位置にあり、かつ光酸化系半導体の酸化力が十分高くなるだけの価電子帯準位を有し、また光還元系半導体の還元力が十分高くなるだけの伝導帯準位を有する複合化光触媒微粒子を開発する。この場合光酸化系半導体の励起電子が光還元系半導体の価電子帯に移動して正孔と結合して両者が消失することにより、光酸化系半導体で酸化、光還元系半導体で還元を効率よく起こさせる。また2光子が必要となるが、励起に必要な可視光の光子数は紫外光と比較して十二分に存在しており、理論的にも高感度化の実現には全く問題はない。さらに、光触媒作用を起こす表面積を増大させて可視光応答性の高感度化を実現するために、異種半導体層複合化微粒子を開発する。

3. 研究の方法

(1)光酸化系半導体の調製

窒素ドーブ酸化チタン

アナターゼ酸化チタン微粒子を超音波照射下で1M-酢酸水溶液に30wt%分散させ、ポリエチレングリコールをTiO₂に対して40wt%を溶解させてペーストを調製した。このペーストをガラス基板上に塗布し、空气中673K、60minにて焼成し、TiO₂微粒子薄膜を調製した。マグネトロンプラズマ装置を用いて、カソード電極にTiO₂微粒子薄膜をセットし、ア

ルゴンプラズマ処理した後、窒素プラズマ処理を行った。いずれのプラズマ処理も、放電出力30~100W、放電時間5min、ガス圧5Paとした。

遷移金属ドーブ酸化チタン

Ti イソプロキシドに、Nb エトキシドを任意に定めた混合比となるようにアセチルアセトン (ACAC) にモル比でアルコキシド：ACAC=1:1 で添加し、混合して前駆体溶液を調製した。これを0.1M-ラウリルアミン塩酸塩 (LAHC) 水溶液にモル比でアルコキシド：LAHC=4:1 となるように添加し、反応溶液を313Kに保持して24時間攪拌した。引き続き反応溶液を353Kに上げ169時間反応させNbドーブTiO₂ゾルを得た。得られたNbドーブTiO₂ゾルを遠心分離機によって沈降させ、超音波ホモジナイザーを用いてこの沈降物をイソプロパノール中に分散させた。この沈降、再分散操作を3回繰り返した。その後1M-酢酸で同様の処理を行い、LAHCや未反応の前駆体を除去し、Nbドーブ酸化チタン微粒子を調製した。

Zrドーブ酸化チタン微粒子については、Nbエトキシドの代わりにZrブトキシドを用いて、Nbドーブ酸化チタン微粒子の場合と同様にして調製した。

窒素ドーブさせた遷移金属ドーブ酸化チタン

遷移金属 (Nb, Zr) ドーブTiO₂微粒子薄膜は、TiO₂微粒子薄膜と同様にして調製した。マグネトロンプラズマ装置を用いて、カソード電極に遷移金属ドーブTiO₂微粒子薄膜をセットし、アルゴンプラズマ処理を行った後、窒素プラズマ処理を行った。いずれのプラズマ処理も、放電出力100W、放電時間5min、ガス圧5Paで行った。

(2)光還元系半導体の調製

タンタル窒化物半導体

TiO₂微粒子表面にタンタル窒化物層を形成させるために、誘導結合型低温プラズマ装置を用いて、タンタルペンタエトキシド/窒素混合ガスによるプラズマCVD処理を行った。その後、窒素雰囲気にて423~523K、60minで熱処理を行った。

Cu-Bi 酸化物半導体

CuO微粒子とBi₂O₃微粒子を混合し、空气中で973K、24時間焼成を行い、p型半導体Cu_xBi_yO_z微粒子を調製した。ここで、混合モル比CuO/Bi₂O₃は25/75~100/0とした。

(3)多電子還元機能層を複合化させた光酸化系半導体薄膜の調製

銅含有層を複合化した酸化チタン薄膜

誘導結合型低温プラズマ装置を用いて、アセチルアセトナト銅の昇華ガスによりプラズマを発生させて、TiO₂薄膜上にプラズマ

CVD 層を形成させた。ここで放電出力 50W、放電時間 10～20min、ガス圧 25Pa とした。その後、空気中にて 473K、30min で熱処理を行った。

銅含有層を複合化した酸化タングステン薄膜

誘導結合型低温プラズマ装置を用いて、アセチルアセトナト銅の昇華ガスによりプラズマを発生させて、WO₃ 薄膜上にプラズマ CVD 層を形成させた。ここで放電出力 25～100W、放電時間 20min、ガス圧 10Pa とした。

(4) 光酸化系半導体/光還元系半導体複合化光触媒微粒子の調製

酸化タングステン微粒子/銅ピスマス酸化物微粒子からなる複合化光触媒

n 型半導体と p 型半導体を複合化させて、2 光子励起の Z スキームにより高感度な可視光応答性光触媒微粒子を開発するために、酸化タングステン微粒子と銅ピスマス酸化物 (Cu₂Bi₂O₇) 微粒子を混合粉碎して複合化光触媒微粒子を調製した。

Nb・窒素コドープ酸化チタン微粒子/銅ピスマス酸化物微粒子からなる複合化光触媒

誘導結合型低温プラズマ装置を用いて、8mol%Nb ドープ酸化チタン微粒子の低温プラズマ処理を行った。アルゴンガス圧 15Pa、放電出力 100W、放電時間 30min にてアルゴンプラズマ処理を行って後、窒素ガス圧 15Pa、放電出力 100W、放電時間 60～90min にて窒素プラズマ処理を行い、Nb・窒素コドープ酸化チタン微粒子を調製した。

Nb・窒素コドープ酸化チタン微粒子と CuBi₂O₄ 微粒子を混合粉碎して複合化光触媒微粒子を調製した。

(5) 光触媒特性の評価

試料を光照射用円筒ガラス容器 (容積: 110mL) に挿入し、パッキングと蓋により密封した。円筒ガラス容器内にマイクロシリンジを用いてイソプロパノールを注入した後、イソプロパノールガス濃度が一定となるように暗所内に保持した。続いて可視光照射装置を用いて、可視光 (波長: 420～750nm) 照射を行い、所定時間毎に分解ガスであるアセトンと CO₂ の濃度変化をガスクロマトグラフにより測定した。CO₂ の濃度は空気中の N₂ に対する組成比として評価した。

4. 研究成果

< 研究の主な成果 >

(1) 光酸化系半導体の開発

窒素ドープ酸化チタン

TiO₂ 薄膜の窒素プラズマ処理後、拡散反射 UV-Vis スペクトルにおいて 400～500nm 付近で可視光吸収を示し、可視光吸光度は放電出力と共に増加した。

窒素プラズマ処理後、N_{1s}XPS スペクトルにおいて 396eV 付近に N_{1s} ピークが現れ、放電出力と共にピーク強度は増加し、窒素ドーピングが顕著となった。しかし Ti_{2p}XPS スペクトルにおいて、Ti_{2p3/2} ピークの低結合エネルギー側にショルダーが現れたことより、放電出力と共に酸素欠陥の形成が顕著となることが分かる。表面元素組成比 N/Ti 及び N/O は放電出力と共に増加し、窒素ドーピング過程で TiO₂ の酸素が窒素に置換されると考えられる。

窒素プラズマ処理 TiO₂ 薄膜の可視光触媒特性は放電出力 30W で最大を示した。また 100W の窒素プラズマ処理 TiO₂ 薄膜を空気中 473K、60min 熱処理を行うことにより、酸素欠陥は消失し、窒素ドーピング量は減少するが、可視光応答性は増加した。これらの結果より、酸素欠陥がなく、窒素ドーピング量の最適化により可視光応答性が増加することが明らかになった。

Nb ドープ酸化チタン

合成した Nb ドープ (ドーピング率: Ti に対して 2～8mol%) TiO₂ 微粒子の X 線回折曲線より、Nb ドープ TiO₂ 微粒子は 723K 焼成前後共にアナターゼ型結晶構造を示した。(101) ピークの半値幅から、シェラー式により求めた微粒子の結晶子サイズは焼成により増加するが、Nb 含有率と共に減少した。したがってアナターゼ結晶格子内に Nb が原子状に分散していることが考えられる。Nb ドープ TiO₂ 微粒子の拡散反射 UV-Vis スペクトルにおいて、焼成前では顕著な可視光吸収を示したが、焼成後では可視光吸収は大きく減少したものの、依然として残存した。焼成前では可視光吸収を示す不純物が残存しているが、焼成後では不純物が除去され、本来の Nb ドーピングにより可視光吸収を示したと考えられる。

Nb ドープ TiO₂ 微粒子のフラットバンド電位を測定した。電解液として 0.1M-四ホウ酸ナトリウム、作用極として Nb ドープ TiO₂ 微粒子電極、参照電極として Ag/AgCl、対極として Pt 電極として、電位と等価直列容量の関係性を求め、Mott-Schottky プロットよりフラットバンド電位を評価した。フラットバンド電位は Nb ドーピング率に伴って減少し、ドーピング率 8% で 0.2V 程度ポジティブシフトすることが明らかになった。

Zr ドープ酸化チタン

5mol%Zr ドープ TiO₂ 微粒子の拡散反射 UV-Vis スペクトルから、Zr ドーピングにより、バンドギャップが拡大することが分かった。Zr ドーピングより、フラットバンド電位は 0.15V 程度ネガティブシフトし、従って伝導帯準位はネガティブシフトすることが明らかになった。

遷移金属ドープ酸化チタンの窒素ドープ

ング

8mol%Nb ドープTiO₂ 微粒子及び5mol%Zr ドープTiO₂ 微粒子の窒素ドーピングにより、両者共に顕著な可視光吸収を示した。フラットバンド電位は窒素ドーピングにより殆ど変化しなかったことより、窒素ドーピングにより価電子帯のネガティブシフトが起こることが考えられる。

(2)光還元系半導体の開発

タンタル窒化物半導体

タンタルペンタエトキシド/窒素混合ガスのプラズマCVD処理を行ったTiO₂微粒子は可視光吸収を示したが、423~523K熱処理で可視光吸収はさらに顕著となった。プラズマCVD層は元素Ta、O、N、Cから構成されており、Ta-N結合が認められ、タンタル窒化物様構造が形成している。423~523K熱処理後では、Ta-N結合が消失して新たにTi-O結合が現れることより、タンタル酸化物様構造となり、同時にTiO₂への炭素ドーピングが進行することが分かる。炭素ドーピングは423K熱処理で顕著となるが、523K熱処理では炭素が脱離する傾向を示した。熱処理前のプラズマCVD処理TiO₂微粒子は可視光によりイソプロパノールを分解し、可視光応答性を示した。この可視光応答性は、423~523K熱処理でより顕著となった。

光触媒作用を示さないSiO₂微粒子表面に、同様のプラズマCVD層を形成させ、これを373Kで熱処理しても非晶状態のままであったが、可視光応答性を示した。しかし423K熱処理では、可視光応答性が消失した。したがって423~523K熱処理したプラズマCVD処理TiO₂微粒子の可視光応答性の発現は、プラズマCVD層ではなく、TiO₂への炭素ドーピングに起因するといえる。また373K熱処理CVD層は可視光応答性が発現したことより、複合化光触媒の光還元系半導体として機能すると考えられる。

Cu-Bi 酸化物半導体

Cu_xBi_yO_zのXRD解析により、p型半導体(CuO/Bi₂O₃=50/50)ではCuBi₂O₄結晶構造が形成している。p型半導体(CuO/Bi₂O₃=95/5)では、Bi₂O₃結晶構造は認められず、CuBi₂O₄とCuOとの結晶構造が形成している。Cu_xBi_yO_zの拡散反射UV-Visスペクトルによれば、波長460nm以上の吸光度はCuO含有率の増加に伴って増加する傾向を示した。CuBi₂O₄の価電子帯準位、伝導帯準位はそれぞれ+1V(vs. NHE)、-0.5V(vs. NHE)であり、バンドギャップは1.5eVであるが、CuO混合率が50mol%を超えるCu_xBi_yO_zでは吸収端はCuBi₂O₄よりも長波長側に位置しているため、バンドギャップは更に狭容化しており、複合化光触媒の光還元系半導体として機能すると考えられる。

(3)多電子還元機能層を複合化させた光酸化系半導体薄膜の開発

銅含有層を複合化した酸化チタン薄膜

TiO₂薄膜表面のXPSスペクトル解析により、薄膜上に形成させたプラズマCVD層はCu、C、Oから構成されており、熱処理によりCVD層におけるC含有率が減少し、Cu含有率が増加する。熱処理前後のC_{1s}スペクトルにおいて、282eV付近に明瞭なピークは認められず、TiO₂への炭素ドーピングが殆ど起こらないといえる。

プラズマCVDにより調製した銅含有層複合化TiO₂薄膜は可視光吸収を示し、熱処理で顕著となる。銅含有層形成後の吸収端は500nm付近にあることから、光励起により酸化チタンの価電子帯からプラズマCVD層のCu()への界面電子移動が起こること、可視光吸収が発現する可能性が考えられる。

この複合化TiO₂薄膜は、可視光によりイソプロパノールをCO₂まで分解できる可視光応答性が発現し、熱処理によりさらに顕著となることから、光励起による界面電子移動メカニズムの発現が支持される。

銅含有層を複合化した酸化タンゲステン薄膜

プラズマCVDにより調製した銅含有層形成WO₃薄膜は可視光吸収を示し、可視光応答性を示す。TiO₂薄膜と同様に、光励起によりWO₃の価電子帯から銅含有層のCu()への界面電子移動が起こり、可視光応答性が発現すると考えられる。

(4)光酸化系半導体/光還元系半導体複合化光触媒微粒子の開発

酸化タンゲステン微粒子/銅ビスマス酸化物微粒子からなる複合化光触媒

n型半導体(光酸化系半導体)WO₃とp型半導体(光還元系半導体)Cu_xBi_yO_zを重量混合比で2:1として調製した複合化光触媒の吸収端は800~900nm付近に存在し、吸収端の長波長シフトはp型半導体に起因する。図1に示すように、いずれの複合化光触媒においても、可視光照射時間に伴ってイソプロパノールの分解ガスであるCO₂濃度が増加し、可視光応答性を示した。

p型半導体単独、n型半導体単独では、可視光応答性が発現しなかったため、複合化光触媒はZスキームが作動していることが明らかである。WO₃の価電子帯準位、伝導帯準位はそれぞれ+3V(vs. NHE)、+0.3V(vs. NHE)であり、CuBi₂O₄の価電子帯準位、伝導帯準位はそれぞれ+1V(vs. NHE)、-0.5V(vs. NHE)であり、酸化作用を示すWO₃の伝導帯準位は還元作用を示すCuBi₂O₄の価電子帯準位よりも0.7Vと十分にネガティブ側にあるため、可視光照射によりWO₃の伝導帯準位に励起された電子はCuBi₂O₄の価電子帯に移動して、価電

子帯に生成した正孔と結合して消失する。これより WO_3 の伝導帯に残存した正孔は酸化作用を行い、一方 CuBi_2O_4 の伝導帯に残存した電子は還元作用を行うことにより、可視光応答性が発現すると考えられる。また複合化光触媒 $\text{WO}_3/\text{Cu}_x\text{Bi}_y\text{O}_z$ 及び WO_3/CuO においても可視光応答性が発現したことから、 $\text{Cu}_x\text{Bi}_y\text{O}_z$ 及び CuO の価電子帯準位は WO_3 の伝導帯準位よりもポジティブ側に位置していることが推測される。

CuO は CuBi_2O_4 よりも長波長光を吸収し、バンドギャップは 1.2eV と狭窄化している。しかし複合化光触媒 WO_3/CuO は $\text{WO}_3/\text{CuBi}_2\text{O}_4$ と比較して可視光応答性は低下した。この要因として $\text{WO}_3/\text{CuBi}_2\text{O}_4$ では、(a) WO_3 と CuBi_2O_4 の光励起の量子収率がより近い値となっている、(b) WO_3 の伝導帯準位と CuBi_2O_4 の価電子帯準位の差が 0.7V と十分あり、 WO_3 で励起された電子が CuBi_2O_4 に移動する効率は極めて高い、(c) CuBi_2O_4 で光励起された電子の還元力を大きい、の三つが考えられる。

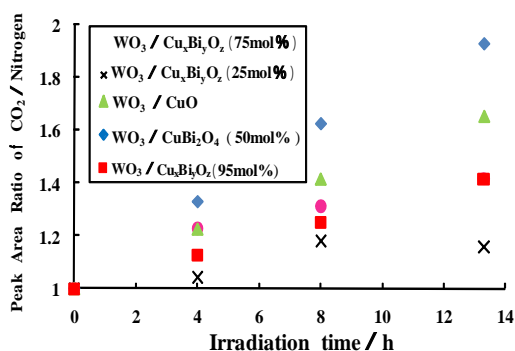


図1 $\text{WO}_3/\text{Cu}_x\text{Bi}_y\text{O}_z$ 複合化光触媒微粒子上におけるガスクロマトグラムのピーク面積比 CO_2/N_2 の可視光照射時間依存性。

Nb・窒素コドープ酸化チタン微粒子/銅ビスマス酸化物微粒子からなる複合化光触媒

図2に示すように、Nb・窒素コドープ酸化チタン微粒子単独では、可視光吸収を示すが、可視光応答性は発現しなかった。しかしNb・窒素コドープ酸化チタン（光酸化系半導体）微粒子と CuBi_2O_4 （光還元系半導体）微粒子を重量比 1:2 で混合した複合化微粒子は可視光応答性が発現した。したがって複合化微粒子において、Z スキームが発現し、Nb・窒素コドープ酸化チタン微粒子で酸化作用、 CuBi_2O_4 微粒子で還元作用が生起すると考えられる。

タンタル窒化物表面層を持つ Nb・窒素コドープ酸化チタン微粒子

Nb・窒素コドープ酸化チタンと CuBi_2O_4 との組合せで Z スキームが発現することが明らかになったので、Nb・窒素コドープ酸化チ

ン（光酸化系半導体）微粒子表面に、タンタルペンタエトキシド/窒素混合ガスによるプラズマ CVD により、タンタル窒化物様構造含有（光還元系半導体）層を形成させることにより、Z-スキーム複合化光触媒微粒子の新規開発の見通しが得られると考えられる。

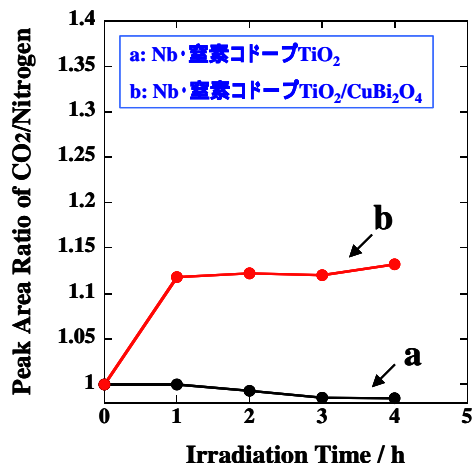


図2 Nb・窒素コドープ TiO_2 微粒子及び Nb・窒素コドープ $\text{TiO}_2/\text{CuBi}_2\text{O}_4$ 複合化微粒子におけるガスクロマトグラムのピーク面積比 CO_2/N_2 の可視光照射時間依存性。

< 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト >

(1) 低温プラズマ表面ナノ構造制御により、可視光応答性を示す新規複合化光触媒を創製できる独創的手法を明らかにできた。

(2) 酸化物半導体の低温プラズマ表面ナノ構造制御により、以下のように、多様な可視光応答性光触媒の開発が可能となる独創的な知見が得られた： 酸化チタン・遷移金属ドープ酸化チタン表面層へのプラズマ窒素ドープにより、価電子帯準位のネガティブシフトが実現できる。有機銅化合物ガスのプラズマ CVD により、酸化チタン・酸化タンゲステン表面に還元機能を有する銅含有層を形成でき、それぞれ可視光応答性が実現できる。有機タンタル化合物/窒素混合ガスのプラズマ CVD により、可視光応答性を示すタンタル窒化物層を形成できる。Nb・窒素コドープ酸化チタンにこのプラズマ CVD 層を形成することにより、Z-スキーム型光触媒を調製できる可能性を明らかにした。

< 今後の展望 >

低温プラズマ表面ナノ構造制御により、高感度可視光応答性を示す新規複合化光触媒を創製することが可能な独創的アプローチを開発することができたので、このアプローチに基づいて更なる可視光応答性の向上を

目指した取組みが必要である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

山田憲二、橋爪隆生、山本和弥、園田達彦、谷口 学、異種半導体からなる複合化光触媒の可視光応答化に関する研究、北九州工業高等専門学校研究報告、査読無、44 巻、2010、71-75.

Hiroyuki Nakamura, Shinichirou Ishii, Kenji Yamada, Shigenori Matsushima, Masao Arai, and Kenkichi Kobayashi, First-principles energy band calculation for CaBi_2O_4 with monoclinic structure, Materials Chemistry and Physics, 査読有, 121, 2010, 385-389.

Kenji Yamada, Hirokazu Yamane, Shigenori Matsushima, Hiroyuki Nakamura, Kayo Ohira, Mai Kouya, and Kiyoshi Kumada, Effect of thermal treatment on photocatalytic activity of N-doped TiO_2 particles under visible light, Thin Solid Films, 査読有, 516, 2008, 7482-7487.

Kenji Yamada, Hirokazu Yamane, Shigenori Matsushima, Hiroyuki Nakamura, Tatsuhiko Sonoda, Satoshi Miura, and Kiyoshi Kumada, Photocatalytic activity of TiO_2 thin films doped with nitrogen using a cathodic magnetron plasma treatment, Thin Solid Films, 査読有, 516, 2008, 7560-7564.

Shigenori Matsushima, Kenji Yamada, Hiroyuki Nakamura, Masao Arai, and Kenkichi Kobayashi, First-principles energy band calculation of Bi_2CuO_4 with antiferromagnetic structure, Journal of the Ceramic Society of Japan, 査読有, 116, 2008, 589-592.

〔学会発表〕(計 6 件)

Kenji Yamada, Development of P-type Semiconductor Electrode in N/P Tandem-Type Dye-sensitized Solar Cell, 18th International Conference on Photochemical Conversion and Storage of Solar Energy, 2010年7月27日, Korea University, Korea

Kenji Yamada, Plasma CVD Treatment for Titanium Dioxides to Approach The High Performance of Photocatalysts by Visible Light Irradiation, IEEE Region 10 Conference 2010, 2010年11月, 福岡国際会議場.

Kenji Yamada, Transition Metal Doped Titanium Dioxide Synthesized by Microwave Irradiation, 2010

International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, 2010年12月, Hawai ' i Convention Center, USA.

Kenji Yamada, Effect of Plasma CVD Treatment of TiO_2 Particles on Its Photocatalytic Activity under Visible Light, International Symposium on Plasma Chemistry, 2009年7月30日, Ruhr-University Bochum, Germany.

Kenji Yamada, Plasma Treatment of Semiconductor Electrode for the Improvement of Dye-sensitized Solar Cell, International Symposium on Plasma Chemistry, 2009年7月30日, Ruhr-University Bochum, Germany.

Kenji Yamada, Relations between anode structure composed of plasma treated TiO_2 particles and light-to-electric energy conversion efficiency in dye-sensitized solar cell, Eleventh International Conference on Plasma Surface Engineering, 2008年9月16日, Garmisch-Partenkirchen, Germany.

〔図書〕(計 1 件)

Kenji Yamada, Hiroyuki Nakamura, and Shigenori Matsushima, Nova Science Publishers, Inc., Handbook of Photocatalysts: Preparation, Structure and Applications (Chapter 6: Photocatalytic Activity of Plasma-Surface-Modified TiO_2 Films and Particles under Visible Light), 2010, 239-275.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 憲二 (YAMADA KENJI)
北九州工業高等専門学校・物質化学工学科・特任教授
研究者番号：80101179

(2) 研究分担者

松嶋 茂憲 (MATSUSHIM SHIGENORI)
北九州工業高等専門学校・物質化学工学科・教授
研究者番号：80229476

中村 裕之 (NAKAMURA HIROYUKI)
北九州工業高等専門学校・総合科学科・教授
研究者番号：70172434