

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 8日現在

機関番号：14401
 研究種目：若手研究(A)
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21686033
 研究課題名（和文）
 相互浸透型有機ナノ界面の創製と光電デバイス応用
 研究課題名（英文）
 Fabrication of Interpenetrating Organic Nano-Interface and Its Application for Photo-Electronic Device
 研究代表者
 藤井 彰彦 (FUJII AKIHIKO)
 大阪大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：80304020

研究成果の概要（和文）：

本研究では、高速で高効率な光誘起電荷移動に基づく光電変換プロセスを利用した次世代有機光電デバイスの開発を進めた。相互浸透界面をもつランダムかつ凝集的な有機/有機もしくは有機/無機相互浸透界面を基盤としたデバイス構造を作製した。特に有機薄膜中の励起子拡散長相当のナノ構造を制御した作製要素技術を確認し、その微細な相互浸透型の積層構造において、ドナー層、アクセプタ層内の微結晶化もしくは高配向化した構造となるための作製技術を開発し、光電変換効率の大幅な改善を行った。

研究成果の概要（英文）：

We have studied on the developments of next-generation organic photovoltaic devices based on photo-electronic processes of rapid and high-efficient photo-induced charge transfer. We have fabricated device structures based on random and condensed organic/organic or organic/inorganic interpenetrating interfaces. We have developed the fabrication technique, and realized to control the nano-structure, the size of which was comparable with an exciton diffusion length in organic solid films. We have also developed the fabrication technique of crystallization or molecular alignment in the interpenetrating bi-layer structures of donor and acceptor, resulting in the marked improvement of photovoltaic properties and photo-conversion efficiency.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
2010年度	6,100,000	1,830,000	7,930,000
2011年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	18,900,000	5,670,000	24,570,000

研究分野：有機エレクトロニクス

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子デバイス・電子機器

キーワード：導電性高分子、フラーレン、相互浸透界面、有機薄膜太陽電池、ドナー・アクセプタ型、光電変換素子、マイクロ相分離、金属酸化物半導体

1. 研究開始当初の背景

有機材料を用いた太陽電池の研究は、色素

増感型と有機薄膜型に大別され、いずれの研究も世界的に活発に行われている。有機薄膜太陽電池の従来の研究開発においては、導電性高分子とフラーレンを用いたバルクヘテロ型構造が主に検討されている。従来の主要な基礎研究手法としては、導電性高分子とフラーレンの単純な混合もしくは積層構造を形成し、変換効率が最大となるような最適混合比率やマイクロ相分離を誘発させるための熱処理条件などの最適条件を探りあてる、もしくは新規開発された材料の導入や既存の材料に化学修飾を施し、相溶性を改善するなど高効率を得ようとする検討がほとんどであり、現状でもほとんどのグループは未だに同様の研究に終始している。また、光電変換特性における高速、高感度の特性は光電デバイス応用として非常に期待されているが、その動作原理も不明な点が多い。

我々はフラーレンの発見当初から導電性高分子との相互作用に興味を持ち、導電性高分子-フラーレン複合体の研究を開始した。その結果、フラーレンと導電性高分子の間での超高速の光誘起電荷移動を見出し、高効率の光電デバイス応用の着想に至った。さらに、相互浸透型のヘテロ接合界面の提案を行った。

有機光電デバイスにおいて効率的な光電変換を得るためには、ドナー/アクセプタ界面面積が大きい上に、電荷輸送経路が確保されている必要があるが、従来技術では、200-300ナノメートルの薄膜中にドナー分子とアクセプタ分子のネットワーク形成において効率的な光誘起電荷分離と電荷輸送の両立が困難であった。

我々は独自の積層技術により共役ポリマー/フラーレン相互浸透界面を簡便に作製することに成功している。すなわち、相互浸透界面をサブミクロンサイズ以下で制御する技術を開発、導入することで、導電性高分子/フラーレン積層構造光電変換デバイスの飛躍的な性能の向上を実証してきた。この技術的基盤を元に、さらに陰極照射素子による積層素子の特性改善、相互浸透界面作製条件、基板加熱蒸着効果、ITO 微細加工効果、長波長領域の感度改善、酸化物半導体挿入効果、スプレー法及びアニール処理による大面積薄膜作製について検討し、有効性を明らかにしてきた。

共役ポリマー/フラーレン分子界面制御を検討することにより、単なる高効率化の模索ではなく、原理解明に基づく将来性の開拓を図ることができると考えられ、次世代有機光電デバイスへの展開につながるものと考えられる。

2. 研究の目的

有機光電デバイスでは、界面が多数存在し、

その形状、接合界面のエネルギー状態等は、組み合わせる異種分子の種類、固体中の配向状態、配列状態に依存する。また、導電性高分子/フラーレン接合界面のモルフォロジーに依存した物性について未だ不明な点がある。有機光電デバイスには、さらに異種の有機/有機界面、有機/無機半導体界面、有機/金属界面が存在することから、その界面物性を明らかにするとともに、電荷取出層の導入効果、有機/無機ハイブリッド層の導入効果、金属電極、基板形状などによる光電変換効率の改善について検討が必要である。

そこで、本研究では、共役ポリマー/フラーレン分子界面構造のサイズが励起子拡散長以下に相当するスケールとするための作製要素技術を確認し、その微細な界面構造において、ドナー層、アクセプタ層内の微結晶化もしくは高配向化した構造となるための作製技術を開発し、光電変換特性の大幅な改善を行うことを目的とした。さらに、有機/金属界面、電荷取出層の挿入、有機/無機ハイブリッド層の導入、金属電極、基板形状などの検討を行い、次世代有機光電デバイスの創製を図ることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究の具体的な研究方法を以下に示す。

平成 21 年度

- (1) 導電性高分子/フラーレン相互浸透界面の作製手法として、有機溶媒スピんキャスト法による自己組織的な3次元微細加工技術を用い、電気的測定、光学測定やXRD、TEM、SEM、AFMを用いた構造評価を行った。さらに導電性高分子/フラーレン相互浸透界面をもつ光電デバイスを試作し、その基礎特性とデバイスの効率評価を行った。
- (2) 有機/有機界面、有機/金属界面、基板形状の検討を行った。相互浸透型界面の凹凸形状のサイズが励起子拡散長(数十nm)以下に相当するスケールで作製するため、スピんキャスト法における混合溶媒の探索を検討した。
- (3) 相互浸透型の積層構造において、ドナー層、アクセプタ層内の結晶化もしくは高配向化させるため、熱処理、溶媒蒸気処理、及び両者を合わせた最適処理条件を検討した。
- (4) ドナー層、アクセプタ層と金属の界面における電荷取出し効率の改善、リーク電流の抑制を目的として、有機および無機半導体材料を用いた電荷取出し層、励起子ブロック層、リーク防止層、UV及び熱線遮断層の導入効果を検討した。

平成 22 年度

- (1) 導電性高分子／フラーレン相互浸透界面の作製手法として、有機溶媒スピんキャスト法による自己組織的な3次元微細加工技術を用い、活性層の有効膜厚となるように薄膜化を推進した。
- (2) ドナー層、アクセプタ層と金属の界面における電荷取出し効率の改善、リーク電流の抑制を目的として、金属酸化物半導体材料を用いた電荷取出し層、励起子ブロック層、リーク防止層、UV及び熱線遮断層の導入効果を検討した。
- (3) 電解析出法により電極表面に酸化亜鉛のナノピラー構造の室温作製を試み、ITO電極上に垂直配向でかつ高密度の成長を試みた。さらに有機薄膜活性層を積層した素子構造を作製し、その動作特性を評価した。
- (4) 貴金属類 (Au, Pd, Pt など) の電極材料使用を回避するため、トップ電極照射型の素子構造を設計し、ITOを有機薄膜活性層上に製膜する技術を確立し、作製した素子の動作特性を明らかにした。

平成 23 年度

- (1) 相互浸透型積層構造の膜厚を入射光侵入長に最適な100nm程度となるように薄膜化した活性層を作製するため、電極バッファー層の挿入効果とスピんキャスト法における混合溶媒の効果を検討した。
- (2) 電気化学的手法により電極表面のナノ形状化や種々の酸化物半導体のナノ構造の室温作製を試み、あらかじめ基板に種結晶を不着させることにより、高密度に垂直配向したナノロッド構造の作製を行った。また、電極界面における光の反射、散乱防止効果を明らかにした。電子素子における電気的特性を評価することにより、活性層で電荷分離により生成したキャリアの収集効率の変化を検討した。
- (3) 相補的に吸収波長領域が異なる活性層材料を用いて、相互浸透型素子をスタックさせるタンデム構造の作製を行った。

4. 研究成果

- (1) 相互浸透型ヘテロ接合の作製と基礎特性

C₆₀/導電性高分子相互浸透型ヘテロ接合の作製において、材料の選択としてC₆₀の電子移動度とのバランスを考える必要があるが、導電性高分子として正孔移動度の高い立体規則性のPAT6を用いた。作製方法としては、導電性高分子とC₆₀のヘテロ接合を、C₆₀の蒸着膜上に導電性高分子層を塗布で製膜

する、いわばドライとウェットを組み合わせたハイブリッドプロセスにより作製した。基本的な素子構造はITO/C₆₀/PAT6/Auとなっており、C₆₀薄膜は真空蒸着法、PAT6薄膜はスピんコート法で製膜し、C₆₀/PAT6ヘテロ接合とした。スピんコートの際用いる有機溶媒には、クロロホルムなど、C₆₀が難溶性もしくは不溶性のものを選択した。その積層構造上に真空下で金電極を蒸着することにより、光電変換素子となる。この素子の場合、ITO透明電極が陰極、金電極が陽極となっており、陰極照射型素子といえる。

C₆₀薄膜上にPAT6の溶液をスピんコートした場合、C₆₀薄膜表面は凹凸のある形状になりながら、上部に導電性高分子層が形成される。C₆₀とPAT6が入り組んだ界面を形成して界面面積を増大させることで、従来の有機ヘテロ接合型素子(ITO/PAT6/C₆₀/Au)に比べ、外部量子効率(EQE)やエネルギー変換効率などの光電変換特性が大きく改善された。このような効率改善はPAT6以外の導電性高分子でも確認された。

界面評価を助ける手段として、同様の条件でC₆₀薄膜をクロロホルムなどの有機溶媒でスピんキャスト処理を行い、その表面形状をAFM観察したところ、表面が未処理のC₆₀薄膜が非常に平滑な表面であるのに対し、クロロホルムでスピんキャスト処理したC₆₀薄膜表面には高低差100nm程度の凹凸が確認された。C₆₀薄膜の膜厚に対して光電変換素子の変換効率を比較した際、膜厚は150nm程度が最適となる実験結果が得られたことから、C₆₀/PAT6界面は相互に入り組んだ形状の界面を形成し、溶媒浸食されても孔欠陥(ピンホール)とならないために最低限の膜厚が必要と考えられる。

また、界面形状はスピんコート時に用いられる溶媒に強く依存し、適切な溶媒、もしくは混合溶媒においては適切な混合比を見出すことにより、高い光電変換効率が得られる。また、光電変換特性はスピんコート条件にも大きく依存する。PAT6溶液を基板上に滴下してから、スピんを始めるまでの時間間隔を設けた場合、PAT6とC₆₀の相互浸透界面の形状は、その時間に大きく依存し、また光電変換特性も変化した。クロロホルムを用いてPAT6をスピんコートした場合、短絡光電流(I_{sc})及び開放電圧(V_{oc})の値がいずれもスピんの開始までの時間が長くなるに従って値が減少するのに対し、テトラヒドロフラン(THF)を用いると、I_{sc}及びV_{oc}はクロロホルムを用いた結果よりも低い場合が多いものの、スピん開始までの時間が2-5秒とすることで、最大値をとる。THFはクロロホルムに比べ、C₆₀の溶解性がさらに低くなるため、C₆₀薄膜自体に浸透するのに比較的時間がかかると考えられる。それ故最適な界面を形成

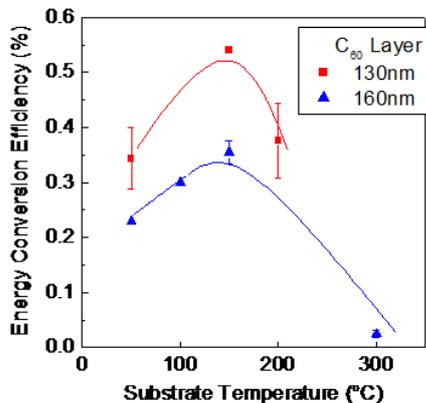
するためのスピン開始までの時間が異なる。

相互浸透界面においては、ナノサイズの界面凹凸が重要であり、その凸部の高さ、もしくは凹部の深さは孔欠陥を作らない程度に大きい程界面面積を大きくすると考えられ、横方向のサイズは C_{60} 及びPAT6の光励起により生成される励起子の拡散長に近づく程電荷分離の効率が向上すると考えられる。また、界面モルフォロジーが光の波長オーダーよりも小さいため、界面での光の反射による吸収損失も抑制されると考えられる。更に、スピンコートされたPAT6表面の形状は平滑である程電極との接触抵抗が低減でき、光電変換の高効率化につながることも明らかにした。

(2) 基板加熱蒸着効果

有機薄膜太陽電池で用いられる導電性高分子やフラーレン、特に立体規則性のPAT6や C_{60} はそれぞれ正孔移動度、電子移動度が有機物質の中では非常に高い材料としても知られており、有機トランジスタの研究開発にも用いられる。有機太陽電池においては、内部抵抗の低減化を図ることで、曲線因子 (curve fill-factor: FF) が向上すると考えられており、高いエネルギー変換効率につながるといえる。

PAT6は実効共役長が比較的長く、薄膜状態においても平面的なコンフォメーションをとり、チオフェンの5員環平面が積み重なるように高分子主鎖が配列する、 π スタッキング構造を自己組織的に形成する。一方の C_{60} は、その薄膜作製において液相成長や気相成長の際に、成長条件を制御することで結晶構造を形成することが知られている。このような分子薄膜の結晶構造や、高分子の π スタッキング構造は、電子移動度や正孔移動度に大きく影響するため、有機薄膜太陽電池のエネルギー変換効率などの特性にも影響すると考えられる。



C_{60} 薄膜蒸着時の基板加熱温度とエネルギー変換効率の関係

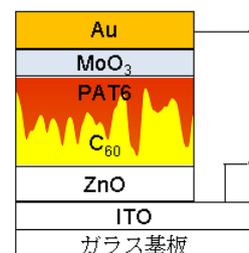
ITO/ C_{60} /PAT6/Au 構造の相互浸透型ヘテロ接合素子の作製において、 C_{60} の真空蒸着時の基板温度を制御すると C_{60} 薄膜の結晶性が向上した。室温蒸着時に見られなかった100nm程度の結晶粒径の微結晶が150°Cの基板加熱蒸着時にはAFM観察によって確認された。

基板加熱条件を考慮して作製されたITO/ C_{60} /PAT6/Au構造の相互浸透型ヘテロ接合素子を比較すると、エネルギー変換効率が基板加熱温度に依存し、 C_{60} の膜厚が130nm、160nmいずれの場合も150°Cあたりが最適な加熱温度となった。 C_{60} 薄膜中の電子移動度 (電界効果移動度) は、室温で C_{60} 薄膜を作製した場合に $0.01\text{cm}^2/\text{Vs}$ であるのに対し、基板加熱温度150°Cで作製した場合には $0.36\text{cm}^2/\text{Vs}$ となり、エネルギー変換効率との関連性が示された。それ故、太陽電池特性を検討する上でも、結晶性とキャリア移動度は非常に重要である。

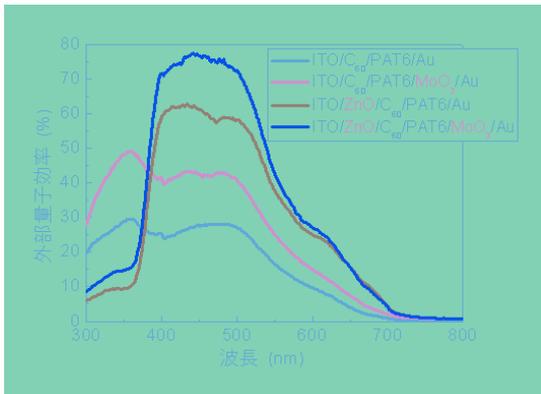
(3) 酸化物半導体層挿入効果

光電変換特性を向上させるためには、有機薄膜層だけでなく、電極材料や電極構成についての改善も重要である。ITOと同様n型酸化物半導体として知られるZnOがあるが、ZnO膜は可視光に対して透明であり、ITO膜上に高周波マグネトロンスパッタ法などで2層構造とすることができる。相互浸透型光電変換素子の基本構造のITOと C_{60} 層の間にZnO層を挿入した構成 (ITO/ZnO/ C_{60} /PAT6/Au) について検討した。

ITO/ZnO/ C_{60} /PAT6/Auの素子では、ZnO層の膜厚に依存して光電変換特性は変化し、膜厚50nm程度が最適な膜厚ということが明らかになった。EQEの値は最高で75%に達しており、ZnO層を挿入することによる効果が見出された。また、電流-電圧測定から、AM1.5の擬似太陽光照射下において、 I_{sc} が $5.8\text{mA}/\text{cm}^2$ 、 V_{oc} が0.42V、FFが0.41で、エネルギー変換効率は1.0%となった。



ZnO層、 MoO_3 層を導入した相互浸透型素子の素子構造



ZnO 層、MoO₃ 層を導入した相互浸透型素子の光電変換素子の EQE スペクトル

ZnO の仕事関数は、C₆₀ の LUMO と一致しており、ZnO 層が挿入された場合、C₆₀ 層からの電子の取り出し効率が上がると考えられる。また、その他に ZnO 層挿入の効果としては、導電性高分子をスピコートする際に発生する可能性のある C₆₀ 層中の孔欠陥に対して導通の防止、ITO 中の In の拡散の防止にもなり、素子の安定性の向上にもつながると考えられる。また一連の光電変換素子の電極はすべて ITO と金であるため、アルミニウムやカルシウム、リチウムなどを用いた場合に比べ、酸化による素子劣化の可能性が小さく、素子の安定性の面でも有効であると考えられる。

MoO₃ についても同様の効果を見出した。MoO₃ の最適な膜厚は 6nm 程度であることを明らかにし、ITO/ZnO/C₆₀/PAT6/MoO₃/Au 構造の素子を作製することで、MoO₃ 層や ZnO 層の導入により EQE、短絡光電流、開放電圧、FF といった太陽電池の評価パラメータが改善された。

(4) 酸化物半導体ナノ構造層挿入効果

界面形状と光電変換特性の関連性は C₆₀/導電性高分子界面だけでなく、金属や前述の酸化物半導体界面についても同様と考えられ、効率の改善につながると考えられる。ITO 電極上に ZnO のナノ構造体を形成することによって有機薄膜との界面を相互浸透型とした場合の光電変換特性について調べた。

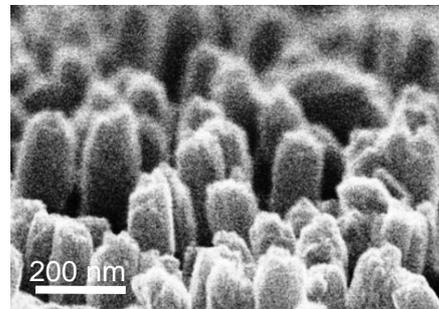
ZnO のナノ構造体の作製は、ITO ガラス基板上に電解析出法により 100°C 以下の低温プロセスで行うことができ、ITO 電極平面に対し垂直にナノスケールの突起形状が自己組織的に成長する。すなわち、適切な条件で調製された電解液中の Zn 化合物の電気化学反応によって、ITO 表面は凹凸形状の ZnO ナノ構造体で被覆された。典型的なナノ構造のサイズとしては、幅 100nm 以下、高さが 200nm 程度であり、基板に垂直方向に c 軸をもつ結晶が成長した。このような凹凸形状の ZnO 上に有機薄膜を形成し、さらに ITO の対向電極

を形成することで光電変換デバイスを作製できる。

この ZnO ナノ構造体上に C₆₀/PAT6 の相互浸透型ヘテロ接合構造を作製し、素子とした。ZnO 層の製膜条件によっては、指向性のあるナノ構造体とはならず、単なる凹凸形状で ITO を被覆する場合もあるが、ZnO 層の導入により Isc、Voc の増大が見られた。さらに、突起状のナノロッド形状に成長した ZnO 層を用いた場合は、さらに Isc、Voc の増大が見られ、エネルギー変換効率が 1.31% に向上した。

可視光は ZnO 層を透過し、有機層で吸収されるため、C₆₀/PAT6 の相互浸透界面で効率的に電荷分離をし、発生した電荷のうち電子は、エネルギー的な障壁なく ZnO 層に効率的に収集される。ZnO はナノ構造体となっており、有機層との界面面積が大きいため、電子の収集効率が良いといえる。また、ZnO は c 軸方向に高い電子移動度を示すため、ZnO 層中の電子は効率的に輸送されるものと考えられる。すなわち、ZnO のナノ構造体層には発生電荷の取り出し効率を改善する効果があると考えられる。

従来の電子デバイスでは、表面や界面の平滑性を重要視するケースが多いが、入射光に対して窓電極となる ITO や透明なバッファ層となる ZnO を利用する光電変換素子や太陽電池の場合では、むしろ凹凸のある表面・界面形状が適切な場合もあるといえる。



ZnO ナノ構造体の表面 SEM 像

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 22 件)

1. 藤井彰彦、尾崎雅則「低分子塗布型有機薄膜太陽電池の研究開発」月刊ディスプレイ 17 (2011) 51-55. (査読無)
2. T. Hori, H. Moritou, N. Fukuoka, J. Sakamoto, A. Fujii and M. Ozaki, "Photovoltaic Properties in Interpenetrating Heterojunction Organic Solar Cells Utilizing MoO₃ and ZnO Charge Transport Buffer Layers", Materials 3 (2010) 4915-4921. (査読有)

3. T. Hori, V. Kittichungchit, H. Moritou, H. Kubo, A. Fujii and M. Ozaki, "Solvent Vapor Treatment Effects of Poly(3-hexylthiophene) Thin Film and its Application for Interpenetrating Heterojunction Organic Solar Cells", *Materials* 3 (2010) 4939-4949. (査読有)
4. H. Moritou, T. Hori, M. Ojima, N. Fukuoka, H. Kubo, A. Fujii, X. Ju, W. Feng and M. Ozaki, "Fabrication of ZnO Nanopillars and Their Application to Organic Photovoltaic Cells Based on Conducting Polymer and Fullerene", *Jpn. J. Appl. Phys.* 49 (2010) 128003. (査読有)
5. 藤井彰彦、尾崎雅則「有機薄膜太陽電池の最近の進展」*応用物理* 79 (2010) 413-416. (査読有)
6. T. Hori, T. Shibata, V. Kittichungchit, H. Moritou, J. Sakai, H. Kubo, A. Fujii and M. Ozaki, "MoO₃ Buffer Layer Effect on Photovoltaic Properties of Interpenetrating Heterojunction Type Organic Solar Cells", *Thin Solid Films* 518 (2009) 522-525. (査読有)

他 16 件

[学会発表] (計 62 件)

1. 仙波彰敏、堀哲郎、久保等、藤井彰彦、尾崎雅則「X線光電子分光法による相互浸透型有機薄膜太陽電池の活性層の深さ方向観察」平成 23 年電気関係学会関西支部連合大会 (2011/10/29) 兵庫県立大学姫路書写キャンパス
2. 藤井彰彦「相互浸透プロセスによる光誘起電荷分離ナノ界面の作製と有機薄膜太陽電池への応用」高分子同友会勉強会 (2011/2/8) 高分子同友会会議室
3. 藤井彰彦「相互浸透プロセスによる電荷分離界面の作製と有機薄膜太陽電池応用」産技研技術セミナー 有機薄膜太陽電池の現状と今後の応用展開 (2011/2/4) たかつガーデン
4. 藤井彰彦「ドナー／アクセプタ相互浸透型積層構造の作製と太陽電池応用」高分子学会第 5 回超分子研究会講座 (2010/10/26) 上智大学
5. A. Fujii, T. Hori, H. Moritou, N. Fukuoka, J. Sakamoto and M. Ozaki, "Organic Thin-Film Solar Cells Based on Donor-Acceptor Interpenetrating Nano-Interface", 4th Asian Physics Symposium (APS 2010) (2010/10/12) Bandung Institute of Technology, Bandung, Indonesia
6. 藤井彰彦「ドナー／アクセプタ相互浸透型積層構造の作製と光電変換特性」日本学術振興会情報科学用有機材料第 142 委

員会有機光エレクトロニクス部会 第 41 回研究会 (2010/9/3) 京都大学宇治キャンパス

7. 藤井彰彦「導電性高分子/C₆₀ 接合界面における光誘起電荷移動と有機薄膜太陽電池応用」第 2 回有機半導体の基礎科学と有機太陽電池への応用に関する研究会 (2009/10/23) 自然科学研究機構岡崎コンファレンスセンター
8. 藤井彰彦、堀 哲郎、森藤弘樹、福岡直輝、尾崎雅則「有機ナノ界面における光誘起電荷移動と有機薄膜太陽電池の研究開発」大阪大学ナノ理工学人材育成産学コンソーシアム第 2 回ナノ理工学情報交流会 (2009/10/9) 大阪大学

他 54 件

[図書] (計 3 件)

1. 藤井彰彦、シーエムシー出版、「有機電子デバイスのための導電性高分子の物性と評価」、2012 年、167-171.
2. 藤井彰彦、シーエムシー出版、「最新フオトニクスポリマー材料と応用技術」、2011 年、221-227.
3. 藤井彰彦、尾崎雅則、シーエムシー出版、「プリンテッドエレクトロニクス技術最前線」、2010 年、253-258.

[産業財産権]

○出願状況 (計 4 件)

1. 名称：光電変換素子及び太陽電池
 発明者：清水 洋、尾崎雅則、藤井彰彦、堀哲郎、増田哲也
 権利者：産業技術総合研究所、大阪大学
 種類：特願
 番号：2011-75391
 出願年月日：平成 23 年 3 月 30 日
 国内外の別：国内

他 3 件

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 彰彦 (FUJII AKIHIKO)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：80304020