

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 25 年 6 月 26 日現在

機関番号：63903

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009 ~ 2012

課題番号：21360014

研究課題名（和文）

有機半導体のイレブンナイン超高純度化による 10% 効率有機薄膜太陽電池の開発

研究課題名（英文）

Development of 10% efficient organic solar cells by eleven-nines high purification of organic semiconductors

研究代表者

分子科学研究所・分子スケールナノサイエンスセンター・教授

平本 昌宏(HIRAMOTO MASAHIRO)

研究者番号：20208854

研究成果の概要（和文）:

有機半導体において、ドナー性、アクセプター性のドーパントを見だし、pn 制御技術確立した。ドーピングのみで、ショットキー接合、pn ホモ接合、 p^+ 、 n^+ 有機/金属オーミック接合、 n^+p^+ 有機/有機オーミック接合などの、一連の基本的接合、および、タンデムセルを、単独、共蒸着膜中に作り込む技術確立した。本研究によって、ドーピングのみによる全く新しい有機太陽電池のセル設計が可能になったため、効率の抜本的向上につながる。

研究成果の概要（英文）:

pn-control techniques by impurity doping both for single and co-deposited films consisting of two kinds of organic semiconductors were established. A series of fundamental junctions such as Schottky junctions, pn-homojunctions, p^+ , n^+ /metal ohmic junctions, n^+p^+ -ohmic homojunctions, and tandem cells were successfully fabricated in the co-deposited organic semiconductor films by impurity doping only. The present technique would offer the way for the fundamental improvement of efficiency of organic solar cells.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|---------|------------|-----------|------------|
| 2009 年度 | 6,500,000 | 1,950,000 | 8,450,000 |
| 2010 年度 | 2,500,000 | 750,000 | 3,250,000 |
| 2011 年度 | 2,500,000 | 750,000 | 3,250,000 |
| 2012 年度 | 2,500,000 | 750,000 | 3,250,000 |
| 年度 | | | |
| 総計 | 14,000,000 | 4,200,000 | 18,200,000 |

研究分野：有機薄膜太陽電池

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用物性・結晶工学

キーワード：太陽電池、有機半導体、超高純度化、pn 制御、ドーピング、接合形成

1. 研究開始当初の背景

(1) バルクヘテロ接合 (p-i-n 接合)

有機半導体では、p 型（ドナー性分子）と n 型有機半導体（アクセプター分子）の異種分子接触による電荷移動を利用して、励起子

（光によって生成した電子とホールが強く結びついた状態）を自由な電子とホールに分離して、光電流を発生している。ところが、励起子の移動できる距離が数 nm 以下と非常に短いため、単純な pn 接合では太陽光の捕集効率は極めて低い。p 型と n 型の有機半導

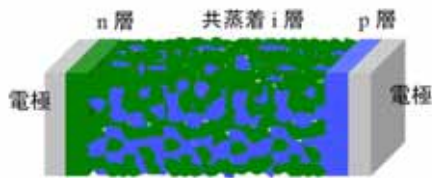


図1 p-i-nバルクヘテロ接合セルの模式図。共蒸着によってp型とn型の有機半導体を混合したi(intrinsic)層を、p層とn層でサンドイッチしている。

体を共蒸着等によって混合することで、膜全体にpn異種分子接触が存在するようにして光捕集効率を上げ、全体が活性層で、かつ、太陽光全てを吸収できる数百nmの厚い膜を作製するという、バルクヘテロ接合(p-i-n接合)という概念(図1)を代表研究者が発明し[M. Hiramoto, et al., p-i-n Like Behavior in Three-layered Organic Solar Cells Having a Co-deposited Interlayer of Pigments, J. Appl. Phys., 72, 3781 (1992).],現在の有機固体太陽電池の基本構造となっている。

(2) 有機半導体の超高純度化

有機半導体もシリコンと同じ半導体であるので、その真の性質を発揮させるには、精製によって超高純度化する技術が欠かせない。代表研究者は、有機半導体を大きな単結晶の形で析出させれば、精製効率を格段に向上できることを見出し、セブennナイン(99.99999%, 7N)以上の純度であることを確認した。これまでの精製が不十分な有機半導体の場合は、セル膜厚が厚くなると内部抵抗の増大のために、曲線因子がすぐに減少し、100nm程度の厚さが限度で、太陽光の半分以上が透過して、吸収利用できなかつた。ところが、驚くべきことに、7N-C60を組み込んだ、p-i-n接合セルは、1ミクロンという、桁外れのセル膜厚でも曲線因子(FF)の値が低下せず、それに伴って、短絡光電流(Jsc)は増加し続け、Si系太陽電池に匹敵する20mA/cm²に近い値が得られ、変換効率はシングルセル世界最高値(当時)の5.3%が得られた。

2. 研究の目的

有機半導体をイレブennナインレベルまで超高純度化して有機薄膜太陽電池に組み込み、さらに、有機半導体のドーピングによるpn制御技術を開発応用することで、変換効率10%以上の有機薄膜太陽電池を実現することを目標とした。

3. 研究の方法

ドーピングは、共蒸着によって行った。単独有機半導体だけでなく、2種の有機半導体の共蒸着膜に対してドーピングすることも考え、蒸着装置内に3つの蒸着源と水晶振動

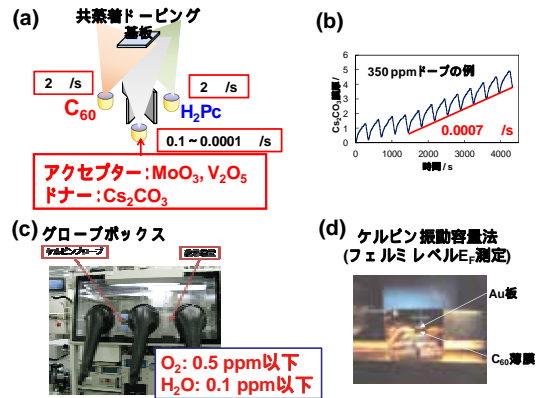


図2 (a) 共蒸着によるドーピングの概念図。(b) 極微量ドーピングのための膜厚計(QCM)出力例。ベースラインから0.0007 A/sと分かる。20 ppm(体積比)の極微量ドーピングまで可能。(c) 蒸着装置とケルビンプローブを内蔵したグローブボックス。(d) ケルビンプローブ。有機半導体薄膜サンプルと振動する金属板から成るコンデンサーを形成することで、サンプルのフェルミレベル(E_F)を決定する。

子膜厚計(QCM)を設置し、3種の材料の蒸着速度を独立にモニターできるように仕切り板を設けた(図2(a))。ドーピングは極微量で行う必要があるため、QCMからの出力をPCに取り込んでディスプレイに表示し、非常にゆっくりとした膜厚の変化をモニターした(図2(b))。膜厚出力の周期的変動があるが、ベースラインの変化から、図では、1秒あたり0.0007オングストロームの変化までとらえている。以上の工夫で、体積比20ppmまでの極微量ドーピングができる。

有機半導体薄膜には、酸素と水が不純物となる。そのため、1度でもサンプルを空気にさらすと、フェルミレベル(E_F)、セル特性が大きく影響を受け、再現性が非常に問題となる。そのため、蒸着装置とケルビンプローブ(図2(d))を、酸素0.5ppm以下、水0.1ppm以下に保ったグローブボックスに内蔵し(図2(c))、空気に全くさらさない条件で、E_F、光起電力特性を測定した。

4. 研究成果

(1) C₆₀のpn制御

まず、有機太陽電池の基幹材料であるC₆₀について、pn制御技術を確認した。酸化モリブデン(MoO₃)を共蒸着によってドーピングした。MoO₃蒸着膜のE_Fは6.69eVと非常に深く(図3右端)C₆₀の価電子帯(6.4eV)から十分電子を引き抜く能力を持ち、p型化できると予想できた(図3左端)。実際、ノンドーブC₆₀のE_Fはバンドギャップ中央より上に位置するが、MoO₃を3,300ppmドーピングすると、E_Fは大きくプラスシフトして価電子帯に近づき、5.88eVとなり、p型化した(図3左端)。

MoO₃膜は透明、C₆₀膜は薄い黄色であるが、MoO₃とC₆₀の比率1:1の共蒸着膜は、可視、赤

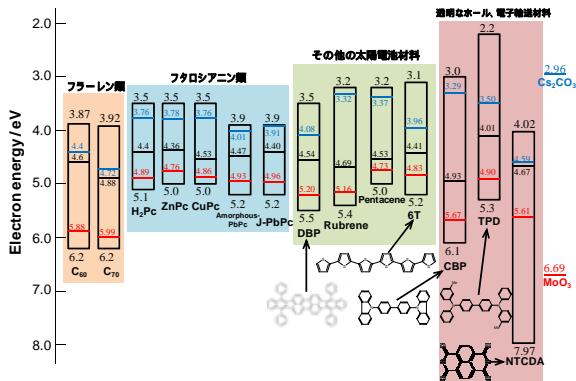


図3 種々の有機半導体に対して、pn制御を行った結果。黒線はノドープ、赤線はMoO₃ドープ、青線はCs₂CO₃をドープした場合のフェルミレベル(E_F)の位置を示す。ドープ濃度3,000 ppm。pn制御は原理的に全ての有機半導体に対して可能である。

外にかけて強く着色して茶色になり、電荷移動(CT)錯体が形成されていることが明らかになった(図4上)。図4中段にドープ機構を示す。基底状態でCT錯体(C₆₀⁺---MoO₃⁻)が形成される。室温の熱エネルギーでC₆₀上のプラス電荷は、MoO₃⁻イオンから解放され、価電子帯を自由に動けるようになり、E_Fがプラスシフトしp型化する。これは、シリコンに対するホウ素(B)ドープの機構のアナロジーとして考えることができる(図4下)。ただし、シリコンの場合、Bは格子の中に組み込まれており、SiとBの価数の違いによってドープメントとして働くが、C₆₀分子は1つ1つが独立しており、MoO₃は格子に取り込まれているわけではなく、C₆₀との間でダイレクトに酸化還元反応を起こすことでアクセプター性ドープメントとなっているところが異なる。

なお、逆に、炭酸セシウム(Cs₂CO₃)は、C₆₀をn型化できるドナー性ドープメントとして働く。この場合は、MoO₃の場合とは裏返しの機構となる(図4右)。

(2) 一般性

フラーレン類以外にも、フタロシアニン類、典型的有機太陽電池材料、電子、ホール輸送材料に対して、pn制御が可能である(図3)。この結果は、C₆₀がn型、H₂Pcがp型という、これまでの常識に関係なく、無機半導体と同様に、単一の有機半導体がドープングによってn型、p型のどちらにもなれることを明確に示している。図3の結果は、原理的には、すべての有機半導体に対してドープングによるpn制御が可能であることを意味する。

(3) 共蒸着膜へのドープング

有機太陽電池では、光誘起電子移動による光電流増感を、異種有機半導体の共蒸着膜中

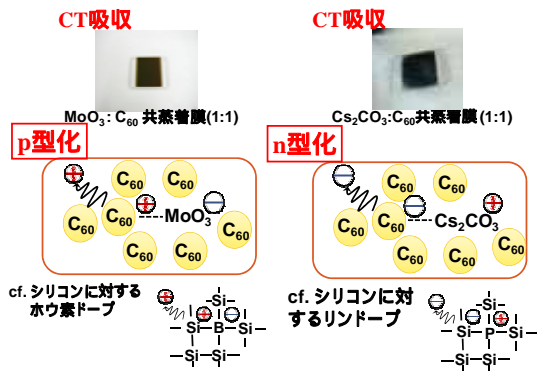


図4 MoO₃、および、Cs₂CO₃ドープングによる、p型化、n型化の機構。シリコンにおけるドープングと比較して示してある。各ドープメントとC₆₀を、比率1:1の非常に高濃度で共蒸着膜化すると、強いCT吸収によって着色する。

で起こすことが、実用レベルの光電流量を得るために必要不可欠である。そのため、実用レベルの光電流量を得るには、2つの有機半導体から成る共蒸着混合膜を、1つの半導体とみなしてドープングを行うことが必要になる。この方法をとれば、共蒸着膜は全バルクで励起子が分離するため、「励起子が分離しない」という有機太陽電池特有の問題がなくなり、無機太陽電池と同様の取り扱いができるようになる。

図5に、フタロシアニン(H₂Pc)とフラーレン(C₆₀)共蒸着膜(H₂Pc:C₆₀)へのドープングによるpn制御の例を示す。共蒸着膜のフェルミレベル(E_F)は、C₆₀とH₂Pcのバンドギャップのオーバーラップした、C₆₀の伝導帯(CB)とH₂Pcの価電子帯(VB)の間、すなわち「共蒸着膜のバンドギャップ」の中で動く。すなわち、ドナー性ドープメント(Cs₂CO₃)、アクセプター性ドープメント(V₂O₅)のドープングによって、E_Fはそれぞれ、4.19 eVまでマイナスシフトしてC₆₀の伝導帯下端に近づき、4.91 eVまでプラスシフトしてH₂Pcの価電子帯上端に近づいた。

この共蒸着膜のpn制御技術を応用することで、n型、p型ショットキー接合、pnホモ

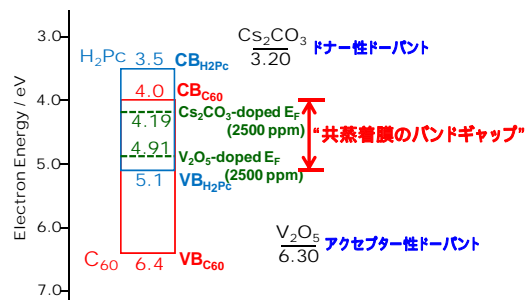


図5 H₂Pc:C₆₀共蒸着膜へのドープングによるpn制御。フェルミレベル(E_F)は、「共蒸着膜のバンドギャップ」の中で動く。

接合、 p^+ 、 n^+ 有機/金属オーミック接合(+は高濃度ドーピングを意味)、 p^+in^+ ホモ接合、 n^+p^+ 有機/有機オーミック接合などの一連の基本接合を、共蒸着膜中に作り込むことができる。

(4) ドーピングのみによるタンデムセル
共蒸着膜へのドーピング技術によって、ドーピングのみによってタンデムセルを作製することができる。ここでは、 C_{60} :6T(sexithiophene)共蒸着膜の例を示す。図6(a)に、セル構造を示す。まず、シングルセルは、絶縁層(i 層)として働くノンドーピング層を p^+ 、 n^+ 層でサンドイッチした p^+in^+ 構造を持つ。タンデムセルは、シングルセルを2つ連結した構造で、2つのセルの連結部分は、 n^+p^+ ハイドープオーミック接合となっている。

図6(b)に、シングルセル(青色)とタンデムセル(赤色)の特性を示す。シングルセルの開放端電圧(V_{oc})0.85 V がタンデム化によって1.69 V とほぼ2倍となり、ハイドープ n^+p^+ 層がセル連結に有効であることが分かる。また、このセルは、 C_{60} と6Tの混合層であるため、共蒸着膜バルク全体で励起子解離が起こり、実用的な大きさの光電流量が得られ、これまでに研究例が全くないタイプのセルにもかかわらず、2.4%という比較的良好な効率が得られている。この結果は、2つの有機半導体から成る共蒸着混合膜を、1つの半導体とみなせば、無機太陽電池と同様に、ドー

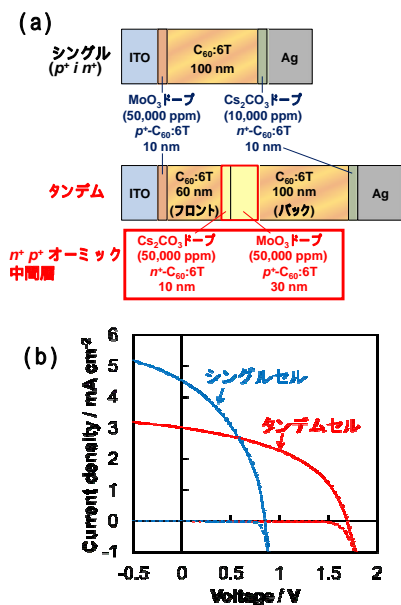


図6 (a) ドーピングのみで C_{60} :6T共蒸着膜中に作り込んだタンデムセルの構造。各ユニットセルは p^+in^+ 構造を持ち、 n^+p^+ ハイドープ接合で連結されている。(b) シングルセル(青色)とタンデムセル(赤色)の特性。シングルセル性能は、 J_{sc} : 4.5 mA cm⁻², V_{oc} : 0.85 V, FF: 0.41, 効率: 1.6%。タンデムセル性能は、 J_{sc} : 3.0 mA cm⁻², V_{oc} : 1.69 V, FF: 0.47, 効率: 2.4%。

ピングのみによって内蔵電界を設計し、予想通りのセルを作製できることを明確に示している。

図7に、このタンデムセルの実スケールのエネルギー図を示す。伝導帯(CB)と価電子帯(VB)が二重になっているのは、 C_{60} と6Tの混合になっているためである。太陽光照射下、フロントセルとバックセルそれぞれの i 層で、異種有機半導体間の増感によって光電流が発生する。 n^+p^+ 接合は空乏層が13 nmと非常に薄いため、オーミックトンネル接合を形成し、フロントセルとバックセルで生成した電子とホールがここで互いに消滅し、その結果として、開放端電圧が2倍となる。

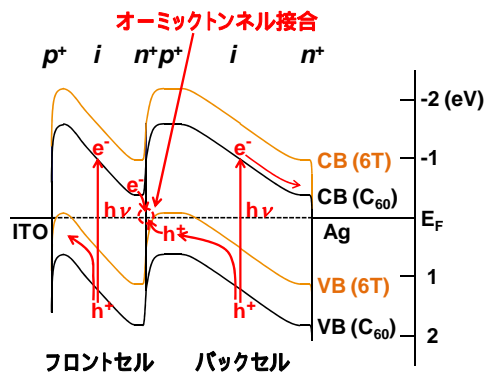


図7 実寸で描いたタンデムセルのエネルギーバンド図。

(5) 今後の展望

有機半導体において、ドナー性、アクセプター性のドーパントを見だし、pn制御技術を確認した。ドーピングのみで、一連の基本的接合を、単独、共蒸着膜中に作り込む技術を確認し、タンデムセルで効率2.4%を得た。

本研究において、ドーピングのみによる全く新しい有機太陽電池のセル設計が可能になったため、今後、効率の抜本的向上につながる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計12件)

Norihiro Ishiyama, Masayuki Kubo, Toshihiko Kaji, and Masahiro Hiramoto, "Tandem Organic Solar Cells Formed in Co-deposited Films by Doping" *Org. Electron.*, **14**, 1793 (2013). (査読あり) DOI: 10.1016/j.orgel.2013.04.003

Norihiro Ishiyama, Tadashi Yoshioka, Toshihiko Kaji, and Masahiro Hiramoto, "Tuning of Barrier Parameters of n -type Schottky Junction in Photovoltaic Co-deposited Films by Doping", *Appl. Phys. Express*, **6**, 012301 (2013). (査読あり) DOI: 10.7567/APEX.6.012301

Yusuke Shinmura, Masayuki Kubo, Toshihiko Kaji, and Masahiro Hiramoto, "Improved Photovoltaic Characteristics by MoO₃-doping to Thick Hole Transporting Films", Jpn. J. Appl. Phys., 52, 04CR12 (2013). (査読あり) DOI: 10.7567/JJAP.52.04CR12

Kazuya Yokoyama, Toshihiko Kaji, and Masahiro Hiramoto, "Double Co-deposited Layered Organic Photovoltaic Cells with Sensitivity Through the Visible to Near-Infrared", Jpn. J. Appl. Phys., 52, 04CR06 (2013). (査読あり) DOI: 10.7567/JJAP.52.04CR06

Norihiro Ishiyama, Masayuki Kubo, Toshihiko Kaji, and Masahiro Hiramoto, "Tandem Photovoltaic Cells Formed in Single Fullerene Films by Impurity Doping", Appl. Phys. Lett., 101, 233303 (2012). (査読あり) DOI: 10.1063/1.4769455

Masayuki Kubo, Yusuke Shinmura, Norihiro Ishiyama, Toshihiko Kaji, and Masahiro Hiramoto, "Invertible Organic Photovoltaic Cells with Heavily-doped Organic/Metal Ohmic Contacts", Appl. Phys. Express, 5, 092302 (2012). (査読あり) DOI: 10.1143/APEX.5.092302

Yusuke Shinmura, Masayuki Kubo, Norihiro Ishiyama, Toshihiko Kaji, and Masahiro Hiramoto, "*pn*-Control and *pn*-Homojunction Formation of Metal-free Phthalocyanine by Doping", AIP Advances, 2, 032145 (2012). (査読あり) DOI: 10.1063/1.4747814

Toshihiko Kaji, Minlu Zhang, Satoru Nakao, Kai Iketaki, Kazuya Yokoyama, Ching W. Tang, and Masahiro Hiramoto, "Co-evaporant Induced Crystalline Donor:Acceptor Blends in Organic Solar Cells", Adv. Mater., 23, 3320 (2011). (査読あり) DOI: 10.1002/adma.20111305

Norihiro Ishiyama, Masayuki Kubo, Toshihiko Kaji, and Masahiro Hiramoto, "Doping-based Control of the Energetic Structure of Photovoltaic Co-deposited Films", Appl. Phys. Lett., 99, 133301 (2011). (査読あり) DOI: 10.1063/1.3643045

Masayuki Kubo, Toshihiko Kaji, and Masahiro Hiramoto, "*pn*-Homojunction Formation in Single Fullerene Films", AIP Advances, 1, 032177 (2011). (査読あり) DOI: 10.1063/1.3647994

Masayuki Kubo, Kai Iketaki, Toshihiko Kaji, and Masahiro Hiramoto, "Conduction Type Control of Fullerene Films From *n*- to *p*-Type by Molybdenum Oxide Doping", Appl. Phys. Lett., 98, 073311 (2011). (査読あり)

DOI: 10.1063/1.3556312

Masahiro Hiramoto, Keitaro Kitada, Kai Iketaki, Toshihiko Kaji, "Near Infrared Light Driven Organic p-i-n Solar Cells Incorporating Phthalocyanine J-aggregate", Appl. Phys. Lett., 98, 023302 (2011). (査読あり) DOI: 10.1063/1.3534804

〔学会発表〕(計 34 件)

久保雅之、嘉治寿彦、平本昌宏、「共蒸着膜におけるドーピング技術と相分離/結晶化技術の結合」、分子研/CREST-JST、第60回応用物理学会春季学術講演会、神奈川工科大学 (2013/3/27-30)、27p-G18-9 2013/3/27。

M. Hiramoto, "Bandgap Science for Organic Thin-Film Solar Cells", 7th International Conference on Molecular Electronics and Bioelectronics, M&BE7, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan, March 18 2013.

Masahiro Hiramoto, "Photovoltaic Energy Development-Bandgap Science for Organic Thin-film Solar Cells", Chimie Paristech IMS 3rd Joint Symposium: "Frontier in Molecular Science based on Photo and Material", Feb. 12-13th, 2013, IMS, Okazaki, Japan.

Masahiro Hiramoto, "Bandgap Science for Organic Thin-Film Solar Cells", International Workshop on Flexible & Printable Electronics (IWFPE) 2012, Muju Resort, Jeollabuk-do, Korea, Nov. 14-16, 2012.

Masahiro Hiramoto, "Recent Progress on Organic Thin-Film Solar Cells", AM-FPD 12 [The 19th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices TFT Technologies and FPD Materials -], July 4-6, 2012, Ryukoku Univ. Avanti Kyoto Hall, Kyoto, Japan.

嘉治寿彦、Minlu Zhang、中尾 聡、池滝 何、横山和也、Ching Tang、平本昌宏、「共蒸着分子誘起結晶化による有機薄膜太陽電池の短絡電流向上」応用物理学会第59回春季年会 15a-F10-1、早稲田大学 (2012/3/15-18)、2012/3/15 (講演奨励賞受賞記念講演)。

M. Hiramoto, "Photovoltaic Energy Development -Organic Thin-film Solar Cells-", Chimie Paristech IMS 2nd Joint Symposium: "Frontier in Molecular Science based on Photo and Material", 2011/11/7. Chimie Paristech, Paris, France.

T. Kaji, Co-evaporant induced crystallization of donor:acceptor blends

in organic solar cells”, “BIT's 1st Annual World Congress of Nano-S&T”, Oct. 4, 2011, 大連、中国。

平本昌宏、「実用化・市場投入ステージに入った有機薄膜太陽電池」、2011年秋季第72回応用物理学会、特定テーマ「有機太陽電池」（有機分子・バイオエレクトロニクス分科内総合講演）1p-L-1,山形大学小白川キャンパス、2011/9/1。

平本昌宏、嘉治寿彦、「有機太陽電池のためのバンドギャップサイエンス」、2011年秋季第72回応用物理学会シンポジウム「太陽電池技術の最新の動向」、29p-M-6、山形大学小白川キャンパス、2011/8/29。

Masahiro Hiramoto, “Organic p-i-n Solar Cells Incorporating Seven-Nine Fullerene”, 2nd Global COE International Symposium Electronic Devices Innovation, EDIS2009, “Global Workshop on Organic Thin-Film Solar Cell”, 2009/12/7, Osaka Japan.

Kai Iketaki, Toshihiko Kaji, Satoru Nakao, Masahiro Hiramoto, “Nanostructure of the Codeposited i-Layer of ZnPc:C60 p-i-n Solar Cells”, MRS Conference, Boston, USA, 2009/12/1-4.

Toshihiko Kaji, Kai Iketaki, Masahiro Hiramoto, “Atmospheric Effect on the Photovoltaic Properties of Very High Purity Organic Solar Cells”, MRS Conference, Boston, USA, 2009/12/1-4.

〔図書〕(計3件)

平本昌宏、応用物理、有機太陽電池のためのバンドギャップサイエンス、第82巻6号、2013、pp.480-486

平本昌宏、化学同人、炭素物質を共蒸着層に用いる太陽電池の特性、「炭素学 基礎物性から応用展開まで」第14章5.2節、2011、pp.460-470

平本昌宏、培風館、太陽電池の基礎と応用（日本学術振興会 次世代の太陽光発電システム 第175委員会監修、小長井 誠、山口真史、近藤道雄 編著）第8.4章 低分子有機薄膜太陽電池の研究開発の現状と今後の動向、2010、pp. 304-311

〔産業財産権〕

出願状況（計1件）

名称：有機混合膜の共蒸着液体を用いた結晶化法

発明者：嘉治寿彦、平本昌宏

権利者：自然科学研究機構

種類番号：特願 2011-088465

出願年月日：H23.4.13

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

http://groups.ims.ac.jp/organization/hiiramoto_g/

報道関連

日経産業新聞、2013年5月22日、同一材料で異なる性質、有機太陽電池 低コスト化技術（分子研）

科学新聞「有機半導体でp型、n型を自在制御 分子研が太陽電池試作」2012/9/21

中日新聞「塗る太陽電池」夢近づく 岡崎・分子研、実用化技術を開発 有機物操作で発電効率アップ」2012/9/14

科学新聞「1種類の有機半導体で太陽電池 平本・分子研教授ら作製に成功 フラーレンC60にpnホモ接合形成」2011/10/28

科学新聞「有機半導体薄膜作製ドーピング濃度制御 分子研、100万分の1技術確立」2011/9/30

日刊工業新聞「分子科研 フラーレンをp型化 有機太陽電池の効率向上」2011/3/15

科学新聞「目に見えない光を有効利用 有機太陽電池の基礎技術 平本・分子研教授らの研究グループ開発」2011/2/18

日経産業新聞「有機太陽電池 変換効率3割向上、分子研、近赤外光も電気に」2011/2/15

アウトリーチ活動

平本昌宏、第14回自然科学研究機構シンポジウム「分子が拓くグリーン未来」学術総合センター(一橋講堂)一般市民聴衆500人程度、25年3月20日、講演「有機薄膜太陽電池太陽電池の現状と将来」とポスター展示

平本昌宏、分子研市民公開講座、岡崎コンファレンスセンター、200人、24年2月3日、エネルギー問題、太陽電池、有機薄膜太陽電池の一般向け講演

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平本 昌宏(HIRAMOTO MASAHIRO)

分子科学研究所・分子スケールナノサイエンスセンター・教授

研究者番号：20208854

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

嘉治 寿彦(KAJI TOSHIHIKO)

分子科学研究所・分子スケールナノサイエンスセンター・助教

研究者番号：90463794