

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24245034

研究課題名(和文)弱い摂動が誘発する有機半導体の電子機能：有機デバイス関連界面のミステリーの解明

研究課題名(英文)Electronic function of organic semiconductor mediated by weak perturbation:Elucidation of misterius properties of organic device interfaces

研究代表者

上野 信雄 (Ueno, Nobuo)

千葉大学・融合科学研究科(研究院)・特任研究員

研究者番号：40111413

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,000,000円

研究成果の概要(和文)：高感度・非破壊光電子分光装置の感度が世界最高に達し、有機半導体バンドギャップ中のこれまで測定できなかった電子準位の測定を可能にした。この結果、有機薄膜の界面およびバロク中のバンドギャップ状態の分布を定量的に測定できるようになり、有機薄膜中への不活性気体の進入による分子集合の僅かな乱れがギャップ状態の原因になることが分かった。これによって従来の界面エネルギー準位接続モデルを提案した。さらに電荷移動度に関連して単結晶中のバンド分散などを研究した。これらの研究を発展させ、DIPテンプレート膜を用いてC60薄膜の構造制御を実現し、C60トランジスタの電子トラップを減少させ電子移動度を大幅に改善した。

研究成果の概要(英文)：Ultrahigh-sensitivity ultraviolet photoelectron spectroscopy (UPS) was realized for radiation-sensitive organic materials and was used to investigate electronic states in band gap of organic semiconductors. The results show the striking effects for pentacene: exposure to inert gas (N₂ and Ar) produces gap states and pushes the Fermi level closer to the valence band. The results demonstrate that these gap states originate from small imperfections in the molecular packing structure, which impact on the energy level alignment in various organic devices. Electronic band dispersions in insulating picene single crystals were measured by UPS coupled with laser-induced photoconductivity. Based on these fundamental studies, we fabricated C60 transistors using structure-controlled C60 thin film on DIP template/SiO₂ gate insulator, and found that high electron mobility and high operational stability are achieved with the gap-states controlled C60 thin film transistors on the DIP/SiO₂ gate.

研究分野：有機薄膜物性、有機半導体電子論

キーワード：有機半導体 有機デバイス 界面 エネルギー準位接合 電荷移動度 光電子分光 電子状態 電子-振動結合

1. 研究開始当初の背景

1990年代以降の有機界面電子状態の研究で到達した金属/有機界面エネルギー準位接続モデルは、無機半導体分野で構築された「連続体を仮定した真空準位一致モデル」に界面電気二重層を導入した改良モデルであり、有機デバイスの研究者に広く受け入れられてきた。しかし、有機層のフェルミ準位が大きく変動する現象や、 C_{60} が n 型(電子伝導)、ペンタセンは p 型(ホール伝導)である等、伝導電荷が個々の分子によって決まっているように見えるミステリアスな現象が存在し、それらを補償する原因として、酸素や未知の不純物による電子準位(バンドギャップ中の不純物準位)によるものと考えられてきたが、これらの本質的原因はミステリーとも言われてきた。また無機半導体にはない「有機半導体の本質的な特徴」が依然として見えず、上記の界面エネルギー準位接続モデルの問題と共に、大きな課題として残されていた。

2. 研究の目的

超高感度非破壊 UPS によって、検出不可能であったバンドギャップ中の未知の電子状態の定量的研究を実現する。界面での分子配向(含分子変形)、分子集合構造の揺らぎとバンドギャップ準位、および、界面・電荷・電場の存在、気体分子の膜への拡散など、「弱い外的摂動」のバンドギャップ準位への寄与を解明して、有機/金属、有機/無機誘電体、有機/有機界面を統一した「界面エネルギー準位接続モデル」の構築と有機半導体の本質的な特徴を理解する事を主目的とした。

3. 研究の方法

未踏の超高感度・紫外光電子分光法(UPS)によって有機半導体結晶・薄膜・界面のバンドギャップに潜む未知の電子状態を非破壊で検出し、電極/有機界面での電荷注入、有機/有機ヘテロ界面でのエキシトンの電荷分離等、電導電荷の密度を支配する界面エネルギー準位接続の原因を解明する。また、電荷の移動度に関連して精密な UPS(構造制御試料の利用と高エネルギー分解能測定)によって、電子状態の構造・温度依存性、伝導ホールと分子振動(局在フォノン)との結合、準粒子としての性格を持つ伝導電荷の有効質量・エネルギー状態を測定する。具体的には以下の二点の実験技術革新を基盤として本研究を達成する。

(1)UPS の超高感度化の方法とバンドギャップ準位の超高感度測定

超高感度・非破壊測定は、(i)不要なバックグラウンド信号を取り除くこと、および(ii)ノイズを低減減し、本質的に必要な信号のみを記録して、得られたスペクトルの純度を高めることによって実現される。本研究の開始前に、ペンタセンでは一般的な UPS 装置の感度に比較して実用感度 $\sim 10^4$ 倍を達成しているが、電気伝導に関係するバンドギャップ状態の検出に、さらに 10 倍程度の高感度

化を実現し $10^{17}\sim 10^{18}/\text{cm}^3\text{eV}$ の状態密度測定を実現することを目指した。

(2)有機半導体単結晶(絶縁物)の高分解能 UPS

光電子放出における試料の帯電は、生成されたホールのトラッピングによる。バンドギャップの大きな絶縁体でも電荷のトラッピングが無視できる場合には原理的には帯電をおこさない。帯電の克服は二つの方法で実現される。(i)第二の光による光伝導の利用、および(ii)良質の単結晶(トラップ密度が少ない)の利用である。前者はルブレン単結晶で成功し、後者については本研究の申請時期に、ピセン単結晶の UPS 測定の内、一部の単結晶において光伝導を利用せずに帯電の無いスペクトルが得られており、その確定も本研究で計画した。

(3)電子/格子結合の測定

尚、総合的に電気伝導機構を把握するため高配向・高秩序単分子膜を利用して HOMO ホールが関わる伝導ホール/振動結合、ポラロン結合エネルギーの研究も計画した。

4. 研究成果

(1)UPS の超高感度化によるバンドギャップ状態の研究

真空紫外光照射で容易に損傷を受けるペンタセン薄膜に対して Xe I ($h\nu = 8.437 \text{ eV}$) を励起光とし、 $10^{16} \text{ states eV}^{-1} \text{ cm}^{-3}$ 程度のバンドギャップ中の電子状態密度を非破壊で検出した。

バンドギャップ状態の原因：不活性ガス暴露効果

SiO_2 上のペンタセン(Pn)薄膜(膜厚 15nm)の 1 気圧 N_2 ガス(O_2 ガス・Ar ガス)暴露による最高占有準位(HOMO)からフェルミ準位領域の超高感度 UPS の結果と真空準位の変化を図 1(a)に、HOMO 領域の電子状態密度を対数軸で示した結果を図 1(b)に示した。尚、(a)の最上部には Au(111)単結晶表面上に成長させた

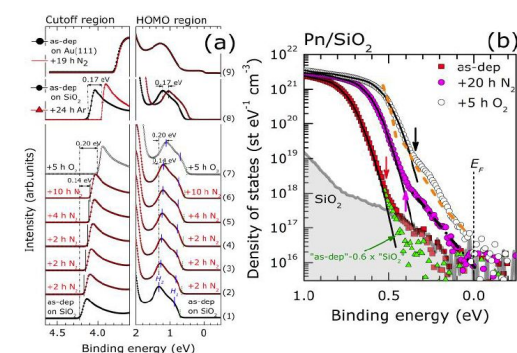


図 1 (a) SiO_2 上のペンタセン (Pn, 膜厚 15 nm) の XeI-UPS スペクトル(1), N_2 暴露後 (2)-(6), O_2 暴露後 (7), Ar 暴露結果 (8), Au(111)上の Pn の N_2 暴露結果。(b)UPS から得られた状態密度 (対数表示) : 蒸着直後(filled square symbols), N_2 暴露 (20 h, filled circles), O_2 暴露 (5 h, open circles)。黒い曲線はガウス分布を考慮した HOMO のフィット。その右に異なるエネルギー分布のギャップ状態が発生する。

ペンタセン薄膜の結果を示す。これらの結果は N_2 暴露によってフェルミ準位が HOMO 側に移動すること、 O_2 暴露ではその効果が大きいこと、Ar 暴露でも同様な現象が観測されること、この時 HOMO からバンドギャップ中に電子状態のテイル(尾)が進入していることが分かる。またバンドギャップ中の状態密度が $10^{16} \text{states eV}^{-1} \text{cm}^{-3}$ まで測定されたことが分かる。これらの結果は、 N_2 や Ar 等のペンタセンに対して不活性な気体でも上記効果が顕著に観測され、Au(111)上のペンタセンでは観測されないことなどから、気体分子が膜のグレイン境界から膜中に進入し、分子パッキング構造の乱れを引き起こし、この構造不完全性がバンドギャップ中に電子準位を生じさせることが分かった。

バンドギャップ状態と準位接続： CuPc-on- F_{16} CuPc 有機ヘテロ界面

前節のようなバンドギャップ状態の役割を考慮した界面エネルギー準位接続モデルの考え方から CuPc-on- F_{16} CuPc 系を詳細に調べた。結果のまとめを図2に示した。特にCuPcのバンドギャップ状態 (HOMO-tail と LUMO-tail) の状態密度の大きさとそのエネルギー分布が準位接続を決定していることが分かる。

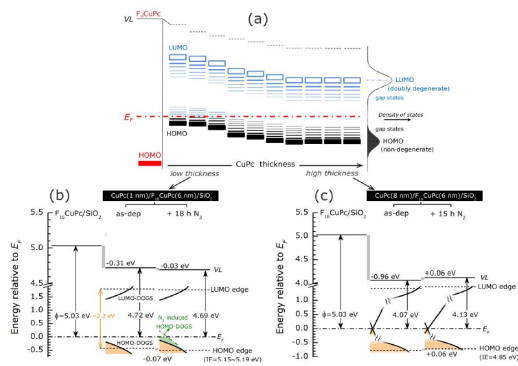


図2 CuPc-on- F_{16} CuPc 有機ヘテロ界面のエネルギー準位接続とその原因。

ギャップ状態制御のデバイスへの応用： C_{60} 薄膜トランジスタへの応用

Diindenoperylene(DIP) 薄膜の蒸着後のアニールによる表面平坦化: 温度 200K のITOと SiO_2 基板上に成長させたDIP膜と300Kに昇温アニール後のX線反射率測定とUPS測定を比較した結果、何れの基板上でもDIPの表面あらか(凹凸)がアニール前の50%減少する(膜表面が平坦化される)が、膜内部の構造は変化しないこと、表面層の分子がアニールによって結晶化することが分かった。この結果、膜表面の平坦化は表面分子が移動して結晶化に寄与するため生じている事が明らかとなった。これらによって、特に、デバイスの性能に直接的に寄与するバンドギャップ中の準位の原因と分子集合構造の乱れとの関係がDIPにおいても明確に示された。また、これを用いて次項で述べる様に有機薄膜の構造乱れの制御を可能とした。

DIP 膜のテンプレート効果を利用した高品質 C_{60} 膜成長:

上記研究を踏まえ、DIP- C_{60} ヘテロ構造について C_{60} 膜をDIP/ SiO_2 上に蒸着すると良質のDIP下層膜によるテンプレート効果によって、高い結晶化度の(111)配向 C_{60} 膜が得られることを見出した。図3に示した C_{60}/SiO_2 , DIP/ SiO_2 および $C_{60}/DIP/SiO_2$ のX線反射率(鏡面反射条件)測定の結果から、 SiO_2 上への直接膜成長に比べて、DIP薄膜(厚さ=4nm)上では C_{60} 薄膜は、高度に(111)配向して成長することが分かった。一方、微小角入射X線反射実験からコヒーレント結晶サイズがDIP上に成長させた C_{60} 膜では SiO_2 上に直接成長させた場合に比べ4倍に増大していることが分かった。これらの構造解析の結果、得られた膜構造を図4に示す。これらの膜のUPS結果を図5に示す。

C_{60} 薄膜トランジスタ性能の飛躍的改善:

以上の研究結果を利用して(111)配向 $C_{60}/DIP/SiO_2$ を用いて C_{60} トランジスタ(n型)を作製した結果、DIPテンプレートを用いない一般的な C_{60} トランジスタに比べて電子移

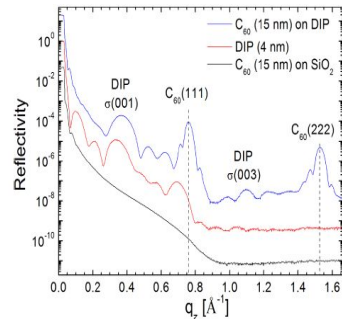


図3 C_{60}/SiO_2 , DIP/ SiO_2 および $C_{60}/DIP/SiO_2$ のX線反射率(鏡面反射)。

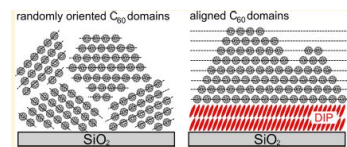


図4 X線反射・回折実験の結果:(左図) SiO_2 上の C_{60} 膜の構造、(右図) DIPのテンプレート効果により高度に(111)配向成長した C_{60} 膜の模式図。

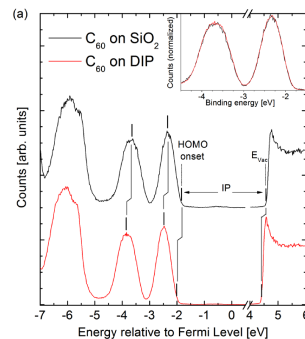


図5 C_{60}/SiO_2 および $C_{60}/DIP/SiO_2$ の C_{60} 価電子帯上部のUPS。両スペクトル形状は一致する(挿入図)が、DIPテンプレート上の C_{60} 膜ではHOMOはフェルミレベルから遠ざかりバンドギャップ準位の減少を示す。図中、IPはイオン化エネルギー。

動度が 10 倍以上に増加すること, さらに大気中での連続動作安定性が 40 倍も改善されることが分かった。

(2) 絶縁物単結晶の LEED と角度分解 UPS : バンド分散測定

レーザー光伝導の条件を詳細に検討することによりピセン単結晶の LEED 測定に成功し, その場で結晶の方位を決めて, 光伝導-角度分解 UPS によってピセンのバンド分散を測定することに成功した(図 6 参照)。この研究の過程で 10 個の単結晶を測定したが, そのうち 2 個の単結晶では光伝導を利用しなくても光電子放出によって試料が帯電しな

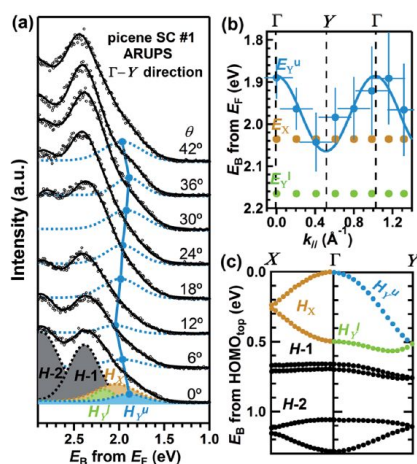


図 6 (a)光伝導を利用して帯電を克服して測定したピセン単結晶の角度分解光電子スペクトルの光電子放出角(θ)依存性(Γ - \square 方向)。(b) Γ - \square 方向の HOMO 分散。(c)計算によるバンド分散。

いことが分かった。

(3) 電子/格子結合の測定

電子/格子相互作用のうち HOMO ホールと分子振動の結合は有機固体の電荷移動に重要な影響を与える。本研究において, 高分解能 UPS 測定による主たるイオン化された分子の主たる振動エネルギーとその UPS 強度の測定から, 理論計算の助けを借りなくとも Reorganization energy, 小ポラロンの結合エネルギーを十分な精度で得られることが分かった。

(4) まとめ

本研究から, 有機半導体と無機半導体との根本的違いの原因として, 以下のことが明白となった。有機半導体の諸性質は, (1) 個々の分子は軽元素から構成される(大きな振動エネルギー), (2) 結晶(固体)は大きな多原子分子の集合体(非常に小さい格子振動エネルギー)である, (3) 分子間相互作用が非常に弱い, (4) 分子構造の対称性が極めて弱い, ことによっている, と結論された。この結果, 大きなエネルギーのフォノン(分子振動)と小さなエネルギーのフォノン(分子全体が寄与する格子振動)による階層的ポラロンの電気伝導への影響を研究する必要があること。本研究の主たる課題であった弱相互作用界面のエネルギー準位接続の奇妙な

性質の原因は, 弱い外的摂動によって容易に集合構造の不完全性が生じ, 連続エネルギー分布を持つ電子状態がバンドギャップ中に出現することにある, と結論された。このギャップ中の状態は HOMO, LUMO 波動関数の空間分布の違いや分子(そして結晶構造)の低い対称性を反映してエネルギー分布がギャップ中心に対して非対象となり, フェルミ準位のギャップ中心からの移動が生じる。このフェルミ準位の移動は有機分子性固体に固有の特徴であり, 有機半導体が関わる弱相互作用界面におけるエネルギー準位接続を支配すると結論された。加えて上記の(1)-(4)の特徴は, 様々なミステリアスな現象の要因と考えられる。

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 28 件)

J.-P. Yang, Q.-J. Sun, K. Yonezawa, A. Hinderhofer, F. Bussolotti, X. Gao, N. Ueno, S.-D. Wang, and S. Kera, Interface optimization using diindenoperylene for C60 thin film transistors with high electron mobility and high stability, *Org. Electronics*, 査読有, 15, 2749-2755 (2014).

DOI:10.1016/j.orgel.2014.07.010

J.-P. Yang, Y.-Q. Li, S. Duhr, J. Tang, S. Kera, and N. Ueno, Molecular structure-dependent charge injection and doping efficiencies of organic semiconductors: Impact of side chain substitution, *Adv. Mater. Interfaces*, 査読有, 1300128-1-7 (2014). DOI: 10.1002/admi.201300128

K. Yonezawa, A. Hinderhofer, T. Hosokai, K. Kato, R. Makino, F. Schreiber, N. Ueno, and S. Kera, Structural defects control the energy level alignment at organic-organic interfaces, *Adv. Mater. Interfaces*, 査読有, 1400004-1-5 (2014). DOI: 10.1002/admi.201400004

J.-Q. Zhong, X. Qin, J.-L. Zhang, S. Kera, N. Ueno, A. T. S. Wee, J. Yang, and W. Chen, Energy level realignment in weakly interacting donor-acceptor binary molecular networks, *ACS Nano*, 査読有, 8, 1699-1707 (2014). DOI: 10.1021/nn406050e

F. Bussolotti, J.-P. Yang, A. Hinderhofer, Y.-L. Huang, W. Chen, S. Kera, A. T. S. Wee, and N. Ueno, Origin of the energy level alignment at organic/organic interfaces: The role of structural defects, *Phys. Rev. B*, 査読有, 89, 115319-1-7 (2014). DOI: 10.1103/PhysRevB.89.115319

A. Hinderhofer, A. Gerlach, K. Broch, T. Hosokai, K. Yonezawa, K. Kato, S. Kera, N. Ueno, and F. Schreiber, Geometric and electronic structure of templated C60 on diindenoperylene thin films, *J. Phys. Chem. C*, 査読有, 117, 1053-1058 (2013). DOI: 10.1021/jp3106056

G. Heimel, S. Duhm, I. Salzmann, A. Gerlach, A. Strozecka, J. Niederhausen, C. Bürker, T. Hosokai, I. Fernandez-Torrente, G. Schulze, S. Winkler, A. Wilke, R. Schlesinger, J. Frisch, B. Bröker, A. Vollmer, B. Detlefs, J. Pflaum, S. Kera, K. J. Franke, N. Ueno, J. I. Pascual, F. Schreiber, and N. Koch, Charged and metallic molecular monolayers through surface-induced aromatic stabilisation, *Nature Chem.*, 査読有, 5, 187-194(2013). DOI:10.1038/nchem.1572

F. Bussolotti, S. Kera, K. Kudo, A. Kahn, and N. Ueno, Gap states in pentacene thin film induced by inert gas exposure, *Phys. Rev. Lett.*, 査読有, 110, 267602-1-5 (2013). DOI:10.1103/PhysRevLett.110.267602

S. Kera, S. Hosomi, K. Sato, H. Fukagawa, S. Nagamatsu, Y. Sakamoto, T. Suzuki, H. Huang, W. Chen, A. T. S. Wee, V. Coropceanu, and N. Ueno, Experimental reorganization energies of pentacene and perfluoropentacene: Effects of perfluorination, *J. Phys. Chem. C*, 査読有, 117, 22428-22437 (2013). DOI: 10.1021/jp4032089

W. -N. Han, H. Yoshida, N. Ueno, and S. Kera, Electron affinity of pentacene thin film studied by radiation-damage free inverse photoemission spectroscopy, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, 103, 123303-1-5 (2013). DOI: 10.1063/1.4821445

S. Duhm, C. Buerker, J. Niederhausen, I. Salzmann, T. Hosokai, J. Duvernay, S. Kera, F. Schreiber, N. Koch, N. Ueno, and A. Gerlach, Pentacene on Ag(111): Correlation of bonding distance with intermolecular interaction and order, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 査読有, 5, 9377-9381 (2013). DOI: 10.1021/am402778u

A. Hinderhofer, T. Hosokai, K. Yonezawa, A. Gerlach, K. Broch, C. Frank, K. Kato, J. Novák, S. Kera, N. Ueno, and F. Schreibe, Post-growth surface smoothing of thin films of diindenoperylene, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, 101, 033307-1-4 (2012). DOI: 10.1063/1.4737168

F. Bussolotti, S.

Kera, and N. Ueno, Potassium doping of single crystalline pentacene thin film, *Phys. Rev. B*, 査読有, 86, 155120-1-9 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevB.86.155120

Q. Xin, S. Duhm, F. Bussolotti, K. Akaike, Y. Kubozono, H. Aoki, T. Kosugi, S. Kera, and N. Ueno, Accessing surface Brillouin zone and band structure of picene single crystals, *Phys. Rev. Lett.*, 査読有, 108, 226401-1-5 (2012). DOI: 10.1103/PhysRevLett.108.226401

Y.-L. Huang, Y. Lu, T.-C. Niu, H. Huang, S. Kera, N. Ueno, A. T. S. Wee, and W. Chen, Reversible single-molecule switching in an ordered monolayer molecular dipole array, *Small*, 査読有, 8, 1423-1428 (2012). DOI:10.1002/smll.201101967

〔学会発表〕(計 90 件)

F. Bussolotti, J.-P. Yang, K. Yonezawa, A. Hinderhofer, S. Kera and N. Ueno (Invited), "Origin and role of gap states as a universal feature of molecular solids", 578th Wilhelm and Else Heraeus (WEH)-Seminar on "Charge-Transfer Effects in Organic Heterostructures: Fundamentals and Applications", Dec. 9-12, 2014, Bad Honnef, Germany

N. Ueno (Invited), "On the nature of organic semiconductors: Improving the mobility and stability of organic devices", The 8th Energy, Materials, and Nanotechnology (EMN) Fall Meeting 2014, Nov. 22-25, 2014, Orlando, FL, USA

N. Ueno (Invited), "Organic photoelectron spectroscopy: 40 years to the nature of organic semiconductor crystals", Japanese-Swedish-German Workshop, ASOMEA-VII, June 8-11, 2014, Lund, Sweden.

N. Ueno (Invited), "Band-gap states related to the nature of organic semiconductors controls the energy level alignment", Asian Pacific Conference on Chemistry of Materials (APCCOM2013):Theme: Advanced materials for energy generation, saving and storage, 3-6 Dec. 2013, City University of Hong Kong, Hong Kong.

上野信雄(基調講演),「有機半導体の普遍的本性」,放射光表面科学研究部会「放射光で見るソフトな界面/表面」,真空・表面科学合同講演会:2013.11.26-28,つくば国際会議場

N. Ueno (Invited), "The nature of organic semiconductors: Universal origin of their peculiar electronic

properties”, The Kyoto JSAP-MRS joint meeting, Sept. 16-20, 2013, Kyoto, Japan

上野信雄(招待講演), 「有機半導体の本性を探る:電子状態と電気伝導のリンク」, 秋季応物講演会・企画シンポジウム「有機半導体材料・デバイスの解析に役立つ分光技術」, 9月16-20日, 2013, 同志社大学/京都.

F. Bussolotti, S. Kera, K. Kudo, A. Kahn and N. Ueno, “Gap states in pentacene produced by inert-gas exposure:Direct detection by ultrahigh-sensitivity UPS”, The 7th international workshop on “Electronic Structure and Processes at Molecular-Based Interfaces” (ESPMI-VII), April 28-May 2, 2013, Weizmann Institute of Science, Rehovoth, Israel.

上野信雄(特別後援), 「有機半導体の本性と電子状態」, 第26回日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム@名古屋大学: 2013.1.13

N. Ueno (Invited), “UPS on electrical conductivity of organic solids:Correlating electronic states and electrical property”, Int. Conf. on Science and Technology of Synthetic Metals 2012 (ICSM-2012), July 8-13, 2012 Atlanta,USA.

〔図書〕(計13件)

N. Ueno, “Fundamental Aspects and the Nature of Organic Semiconductor” in “Electronic Processes in Organic Electronics: Bridging Nanostructure, Electronic States and Device Properties” (Springer Series in Materials Science Vol. 209), Editors: H. Ishii, K. Kudo, T. Nakayama, and N. Ueno (Springer, 2015), Chap.1, pp.3-9.

Y. Nakayama, S. Duhm, Q. Xin, S. Kera, H. Ishii, and N. Ueno, “Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy (UPS) I: Band Dispersion Measurements of “Insulating” Organic Single Crystals” in “Electronic Processes in Organic Electronics: Bridging Nanostructure, Electronic States and Device Properties” (Springer Series in Materials Science Vol. 209), Editors: H. Ishii, K. Kudo, T. Nakayama, and N. Ueno (Springer, 2015), Chap.2, pp.11-26.

S. Kera, H. Yamane, and N. Ueno, “Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy (UPS) II: Electron-Phonon Coupling and Hopping Mobility” in “Electronic Processes in Organic Electronics: Bridging Nanostructure, Electronic States and Device

Properties” (Springer Series in Materials Science Vol. 209), Editors: H. Ishii, K. Kudo, T. Nakayama, and N. Ueno (Springer, 2015), Chap.3, pp.27-49.

N. Ueno, T. Sueyoshi, F. Bussolotti, and S. Kera, “Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy (UPS) III: Direct Study of “Invisible” Band Gap States by Ultrahigh-Sensitivity UPS” in “Electronic Processes in Organic Electronics: Bridging Nanostructure, Electronic States and Device Properties” (Springer Series in Materials Science Vol. 209), Editors: H. Ishii, K. Kudo, T. Nakayama, and N. Ueno (Springer, 2015), Chap.4, pp.51-67.

N. Ueno, N. Koch and A. T. S. Wee, “Introduction to the Molecule-Metal Interface” in “The Molecule-Metal Interface”, Eds. N. Koch, N. Ueno, and A. T. S. Wee (Wiley-VCH, 2013), Chap. 1, pp.1-14.

N. Ueno, S. Kera and K. Kanai, “Fundamental Electronic Structure of Organic Solids and Their Interfaces by Photoemission Spectroscopy and Related Methods” in “The Molecule-Metal Interface”, Eds. N. Koch, N. Ueno, and A. T. S. Wee (Wiley-VCH, 2013), Chap. 7, pp.175-217.

N. Ueno, “Energy Level Alignment at Semiconductive Polymer Interfaces: Correlating Electronic Energy Levels and Electrical Conductivity” in “Semiconducting Polymer Composites”, Chap. 3, pp.65-106, Ed. X. Yang, (Wiley-VCH, 2012).

N. Ueno, “Electronic Structure of Molecular Solids: Bridge to the Electrical Conduction” in “Physics of Organic Semiconductors”, Eds. R. Holmes, W. Brueeting, and C. Adachi, Chap.3, pp.65-89 (Wiley-VCH, 2012).

〔その他〕

ホームページ等

<http://ulab-www.tf.chiba-u.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

上野 信雄 (UENO Nobuo)

千葉大学・大学院融合科学研究科・特任
研究員

研究者番号: 40111413

(2)研究分担者

解良 聡 (KERA Satoshi)

分子科学研究所・教授

研究者番号: 10334202