

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：32660

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05498

研究課題名(和文) 極高感度光電子検出による有機半導体の伝導準位完全計測への挑戦

研究課題名(英文) Challenges for complete demonstration of charge carrier transport states in organic semiconductors based on ultra-high sensitivity photoelectron detection

研究代表者

中山 泰生 (Nakayama, Yasuo)

東京理科大学・理工学部先端化学科・講師

研究者番号：30451751

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 19,400,000円

研究成果の概要(和文)：軽量・フレキシブルな電子デバイスを実現する有機半導体において、デバイスを駆動する電荷が流れる伝導準位の詳細は、十分に理解されていない。本研究では、有機半導体の電子構造を精密に決定することを可能にする独自の電子構造計測手法を開発し、有機デバイス材料の伝導準位を完全に解明することを目的とした。本研究の結果、代表的なp型有機半導体であるペンタセン単結晶の価電子バンド分散の実測に世界で初めて成功し、内部の伝導電荷が粒子性・波動性の中間的な伝導特性を示すことを明らかにするなどの成果が得られた。

研究成果の概要(英文)：While organic electronic devices have undergone rapid paced progress, fundamental mechanisms of charge carrier transport is still under debate mainly because of insufficient knowledge on the electronic structures of organic semiconductor materials. This study has targeted at complete demonstration of the electronic states which contribute to the charge carrier transport in the organic semiconductor materials through development of original photoemission measurement techniques of high-precision and high-sensitivity. As a representative achievement, valence band dispersion of the single crystal pentacene, a proto-typical p-type organic semiconductor molecule, were experimentally figured out for the first time. Inter-molecular transfer integral and the effective mass of conductive holes were derived from the present results, which suggests an intermediate character of the charge carrier transport between inter-molecular hopping of localized particles and continuous propagation of waves.

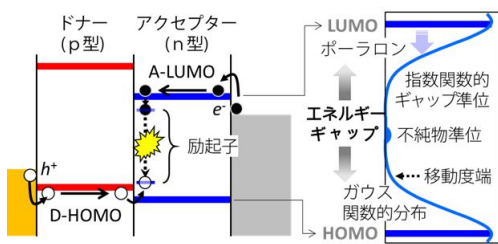
研究分野：材料化学

キーワード：半導体デバイス ギャップ内準位 有機半導体 光電子分光 光電子収量分光 電子バンド エピタキシャル成長 モデル界面

1. 研究開始当初の背景

(1) 有機ELディスプレイが爆発的に普及し、有機薄膜太陽電池や有機EL照明が実用化に迫るなど、有機半導体エレクトロニクスが長足の進歩を遂げる一方で、エレクトロニクス素子の機能の根源である有機半導体材料の電子構造に関する理解は、デバイス開発の急速な進展に遅れをとっている。

(2) 従来、有機デバイスの動作メカニズムは図1左に示したような簡略化されたエネルギーダイアグラムによって説明されてきた。有機材料の最高占有軌道(HOMO)および最低空軌道(LUMO)をそれぞれ正孔/電子の輸送準位と見なし、これら同士および電極のフェルミ準位とのエネルギー接続を最適化する「エネルギー準位接続モデル」を指針として、デバイス構造の設計がなされている。しかし、現実の有機半導体固体の伝導準位は、このダイアグラムに示されているような「線」ではなく、あるエネルギー幅をもった「帯」というべきであり、この分布幅や密度(図1右)が電荷輸送特性に無視できない影響を及ぼす。例えば、非晶質シリコンを凌ぐ高い電荷移動度を示す有機半導体の単結晶試料においては、HOMO準位がエネルギー分散した価電子バンドを形成することが理論的に予言されており、広い分散幅は大きい電荷移動度を得るための必要条件とみなされている。さらに、伝導に寄与する限界エネルギー(移動度端)から更にエネルギーギャップ内に指数関数的に裾をひく微少準位(ギャップ内準位)によるトラップ・リリース過程が電荷輸送特性に果たしている役割も指摘されている。加えて、残留不純物による「意図しないドーピング」というミステリーも存在する。



有機デバイスのエネルギー準位図 → 有機材料の実際の準位分布

図1: 有機デバイスの簡略化されたエネルギーダイアグラムとエネルギー準位の詳細

(3) 光電子分光法は、固体の電子エネルギー分布を研究する実験手法であり、光電子のエネルギーを検出角ごとに分けて計測する手法である角度分解光電子分光法(ARPES)は、結晶材料の価電子バンド分散構造を実測する有力な手法である。しかし、有機半導体のような導電率の低い絶縁性材料の光電子分光測定にあたっては、電子放出に伴う試料帯電(チャージアップ)の問題があり、有機半導体単結晶のARPES計測は長らく成功例のない困難な課題であった。これに対し、研究代表者らは、ARPES測定時に試料へ可視レーザー

光を照射することによって試料帯電問題を回避する光アシスト角度分解光電子分光法(LA-ARPES)により、高移動度なp型有機半導体として知られるルブレン単結晶の価電子バンド分散計測に世界で初めて成功している[1]。一方で、一般の光電子分光法は検出感度が高くなく、ギャップ内準位の分布は専ら光学吸収や熱刺激電流法といった手法により研究されてきた。これらはppm以上の高い検出感度をもつ実験手法であるが、導かれる電子準位分布の絶対エネルギースケールが定まらないという問題がある。これに対し、近年、光電子分光法の高感度化によって有機半導体のギャップ内準位を計測することが可能となり[2]、研究代表者らも、低エネルギー励起光電子分析により有機デバイスの界面領域に潜むギャップ内伝導準位の検出に成功した[3]。このように、本研究開始当初において、有機デバイスを構成する有機半導体固体の伝導を支配する電子準位を実験的に計測する基盤技術がようやく整いつつあった。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、価電子バンド(HOMO)のような「真性」準位はもとより、エネルギーギャップ内の微少準位まで含めて、有機半導体デバイス内部の電荷輸送に關与する電子準位を完全計測することを目的とした。

(2) この目的の達成のため、高純度化した有機半導体単結晶試料に対してLA-ARPES法を適用することで、材料本来の「真性半導体」としての価電子バンド構造の実測を行った。さらに、こうした有機半導体単結晶試料を基板として用いることで、有機半導体デバイスの電子機能性の根源であるドナー・アクセプター界面(pn接合)をモデル化した有機半導体エピタキシャル接合を創製し、その界面結晶構造・電子構造評価を行った。加えて、エネルギーギャップ内に潜在する微小準位の分布を絶対エネルギースケールで計測するため、極高感度な光電子収量分光(PYS)装置の開発を行い、これを有機半導体および有機無機ハイブリッド単結晶材料へ適用することで、ギャップ内準位の実測を行った。

3. 研究の方法

(1) 価電子バンド構造の評価に用いた高純度化した有機半導体単結晶試料は、不活性気体の気流中において、材料分子の粉末を加熱によって昇華させ、低温部へ輸送して結晶化させる物理気相輸送法(PVT)によって得られる。本研究では、石英製の環状炉に、脱水・脱酸素フィルタによって高純度化した窒素を流し、そのなかで代表的なp型有機半導体であるペンタセン(図2)を昇華させ、単結晶試料を作製した。なお、PVT装置を窒素置換グローブボックスと連結し、大気との接触によって発生する酸化不純物の生成を抑制

した高純度ペンタセン単結晶の製造および物性評価も試みている。

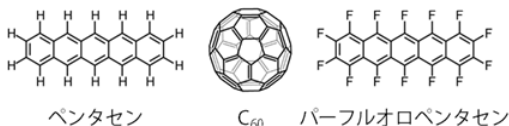


図2：本研究で用いた有機半導体分子の構造

(2) 有機半導体エピタキシャル接合試料は、上記(1)により製造したペンタセン単結晶表面上に、*n*型分子として知られるC₆₀あるいはパーフルオロペンタセン(PFP)を真空蒸着によって成膜して作製した。

(3) 有機無機ハイブリッド半導体単結晶材料としては、いわゆるペロブスカイト太陽電池材料として注目されている三八ロゲン化メチルアンモニウム鉛の単結晶試料を、溶液からの化学合成・再結晶により作製した。

(4) 試料の表面近傍における化学組成(不純物濃度)は、シンクロトロン放射光を用いたX線光電子分光法(XPS)により評価した。この際、励起X線のエネルギーを変化させて測定することで、0.5 - 4 nmの範囲で検出深さを变化させて評価した。

(5) ペンタセン単結晶試料の表面結晶方位は微小角入射X線回折法(GIXD)により決定した。また、有機半導体エピタキシャル接合の界面構造解析は、GIXDの他にX線反射率法(XRR)および原子間力顕微鏡(AFM)を用いて行った。

(6) ペンタセン単結晶試料およびエピタキシャル接合試料の価電子バンド分散構造はLA-ARPES法により評価した。

(7) レーザー励起の高輝度白色紫外光源を窒素置換型の二重分光器により分光することで、可視から波長180 nm以下の深紫外領域までの広いエネルギー範囲で高強度かつ高精度の励起光が得られる「低迷光極紫外分光照射システム」を導入し、これを試料からの光電子放出に伴って生じる1 fA以下の電流を高感度検出できる微小電流計と複合した高感度PYS計測システムを構築した。さらに、これを利用してペンタセン単結晶試料および三八ロゲン化メチルアンモニウム鉛単結晶試料のギャップ内準位評価を行った。

4. 研究成果

(1) 低エネルギー励起 LA-ARPES 法により、ペンタセン単結晶の価電子バンド分散の実測に成功し、温度変化に伴うエネルギー分散幅の変化を追跡することにも成功した[雑誌論文]。ペンタセン単結晶の価電子バンド構造は、研究代表者自身も本研究開始以前にLA-ARPES法による実測を試みていたが、成功していなかった[4]。この原因として、通常

のLA-ARPES法の検出深度は試料最表面から1 nm以下の浅い領域に限定されるため、酸化不純物や表面再構成の存在により材料本来の電子構造が乱されている可能性が疑われる。そこで、本研究では、低エネルギー励起光を用いることで光電子の検出深度をペンタセン分子層より深い2 nm以深まで拡張し、図3に示すように、ペンタセン単結晶の価電子バンド分散の実測に世界で初めて成功した。さらに、実験的に得られた価電子バンドの分散構造より、隣接分子間の移動積分 *t* および正孔有効質量 *m*^{*} という、電気伝導特性を支配する二つの物理量を決定し、そこから理論的に導かれる電荷移動度の値を、これまでに報告されているデバイス特性と比較することで、ペンタセン単結晶内部の伝導メカニズムが、「粒子」的なホッピング伝導と「波動」的なバンド伝導の中間的な性質をもつことを明らかにした。また、試料温度を室温から-150 程度まで冷却し、分子振動を抑制すると、*t* は約20%増大、*m*^{*} は約20%軽くなることが明らかになった。以上の結果は、有機デバイスの電荷輸送メカニズムを示す研究成果として、「科学新聞」の1面(平成29年3月31日付)に掲載されるなど、対外的にも注目された。

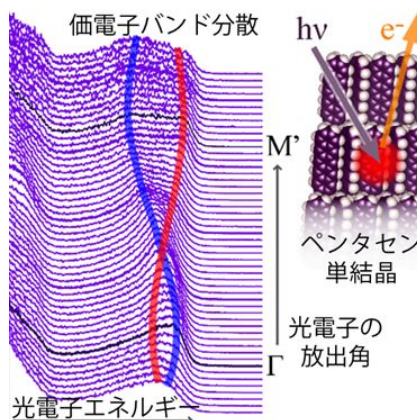


図3：本研究で得られたペンタセン単結晶のLA-ARPESスペクトルと、測定の概念図

(2) ペンタセン単結晶試料に対するXPS測定により、従来の試料調製法によって表面に生成する酸化不純物の量が2%程度であることを特定した[雑誌論文]。表面の酸化不純物は、試料表面に粘着テープを貼り付け、これを真空内で引き剥がす表面劈開操作によって除去できることを明らかにしたが[雑誌論文]、こうした機械的操作によって試料結晶に割れが発生し、精密な価電子バンド評価の妨げとなることが懸念される。そこで、作製した有機半導体単結晶での酸化不純物の発生を抑制するため、PVT装置に直結された窒素置換グローブボックスを用いることで、大気に触れさせることなくペンタセン単結晶試料を調製し、XPS評価を行ったところ、実際に酸化物生成を抑制できることを確認した(図4)。また、こうして調製したペン

タセン単結晶の価電子バンド分散測定にも成功している[依頼論文投稿中]。

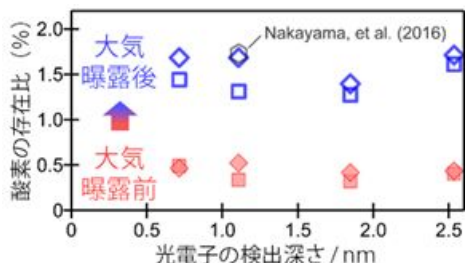


図4：ペンタセン単結晶に対する大気曝露の前後における酸化不純物存在量の検出深さ依存性（投稿中の依頼論文より抜粋）

(3) ペンタセン単結晶の表面上にn型分子である C_{60} を積層した有機半導体pn接合モデル界面において、 C_{60} 分子がペンタセン単結晶に結晶方位を揃えてエピタキシャル成長し、界面における C_{60} 結晶グレインの平均サイズは、 C_{60} をペンタセン多結晶薄膜上に成長させた場合より1桁大きく、100 nm以上となることを、GIXD, XRR, およびAFMにより明らかにした[雑誌論文 -]。さらに、成膜温度を変化させることによって、 C_{60} 結晶グレインの平均サイズは絶対温度に概ね比例して増大し、個々のグレインに着目すると、1マイクロンに達する大きさの単結晶グレインが次発形成されることも明らかになった[雑誌論文]。この結果は、有機分子間のエピタキシャル接合における結晶性が、アインシュタインの拡散方程式により記述される分子拡散長によって制約されていることを示すもので、良好な有機半導体pn接合を設計するための指針となるものである。なお、これらの研究は、チュービンゲン大学(ドイツ)などとの国際共同研究として実施した。一方、ペンタセン単結晶上に積層するn型分子として、ペンタセンの誘導体であるPFPを用いた場合にも、 C_{60} を積層した場合と同様に、エピタキシャル成長が起こることも示した[雑誌論文]。興味深いことに、 C_{60} とPFPとは分子形状も結晶構造も全く異なるにもかかわらず、分子間の最近接方位をペンタセン単結晶の共通の軸方位に整合することが本研究により明らかとなった(図5)。現在、このように形成されたエピタキシャル試料に対して、LA-ARPESによる界面価電子バンド分散の実測にも着手している[論文投稿準備中]。

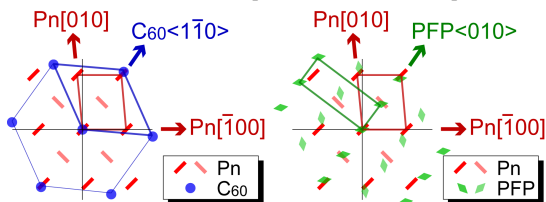


図5：ペンタセン単結晶上の C_{60} (左)およびPFP(右)被覆層のエピタキシャル方位関係

(4) レーザー励起の高輝度白色紫外光源および窒素置換型の二重分光器よりなる低迷

光極紫外分光照射システムを導入し、これを1 fA以下の電流を高感度検出できる微小電流計と複合することで、高感度PYS計測システムを構築した。開発した装置の動作性能を検証するため、研究代表者らの過去の研究[5]により価電子帯上端領域からの光電子放出が詳細に検討されているペンタセン単結晶のPYS測定を実施し、従来装置と比べて高いSN比で電子検出が可能であることを確認した(図6)。現在、更なる高感度化のため、電子増倍管による単電子検出機構の導入を進めている。

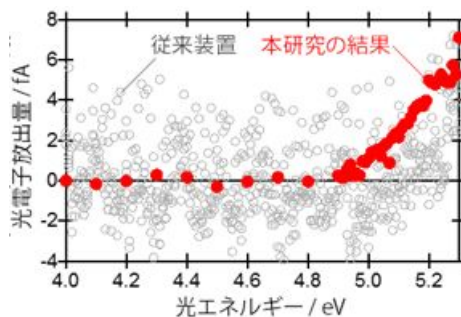


図6：従来装置(灰色)および本研究で開発した高感度装置(赤)によって計測したペンタセン単結晶のPYSスペクトル

(5) 開発した高感度PYS装置を用い、有機無機ペロブスカイト太陽電池材料として注目される三八ロゲン化メチルアンモニウム鉛($CH_3NH_3PbX_3$)の単結晶試料のギャップ内準位の検出を試みた。 $CH_3NH_3PbX_3$ のなかでも $X=I$ である三ヨウ化メチルアンモニウム鉛(MAPI)は特に有望な太陽電池材料として知られ、その電子構造についての研究は数多くなされている。研究代表者らも、デバイスに用いられるMAPI薄膜の電子構造が、デバイス劣化要因となる高温あるいは水蒸気への曝露によってどのように変化するかを明らかにする成果を挙げてきている[雑誌論文]。一方で、その単結晶材料の電子構造を調べた研究は少なく、材料本来の電子構造については不明な点が多く残されている。本研究では、MAPI単結晶の電子構造、とくにエネルギーギャップ内に存在する微小準位の分布を、高感度PYSによって計測した。溶液から成長させたMAPI単結晶に対する高感度PYS測定の結果、MAPIの価電子帯上端からの光電子放出に帰属されるイオン化閾値は5.6 eV程度に観測されたが、それより遙かに低いエネルギーの紫外光を照射した際にも僅かな光電子放出が確認された。このことは、MAPI単結晶試料の価電子帯上端より浅いバンドギャップ領域に微小な電子準位が分布していることを意味している。一方、この試料を真空中で破断して清浄な劈開面を露出した上で同様のPYS測定を行うと、価電子帯上端由来のイオン化閾値は5.8 eVに増大し、それより低エネルギー領域からの微小な光電子放出は検出限界以下まで減少することが明らかになった。エネルギーギャップ内から

の微小な光電子放出の起源は明確ではないが, MAPI 単結晶表面に存在する不純物が誘起するバンドの曲がりによって引き下げられた伝導帯に捕捉された電子であることが示唆され, これを実証するための追実験を現在進めている。

<引用文献>

S. Machida, et al., Highest occupied molecular orbital band dispersion of rubrene single crystals as observed by angle-resolved ultraviolet photoelectron spectroscopy, *Physical Review Letters*, Vol.104, No.15, 2010, pp. 156401-1 - 4.

T. Sueyoshi, et al., Low-density band-gap states in pentacene thin films probed with ultrahigh-sensitivity ultraviolet photoelectron spectroscopy, *Applied Physics Letters*, Vol.95, No.18, 2009, pp. 183303-1 - 3.

Y. Nakayama, et al., Complete demonstration of the valence electronic structure inside a practical organic solar cell probed by low energy photoemission, *Advanced Energy Materials*, Vol.4, No.7, 2014, pp. 1301354-1 - 9.

中山泰生, 他, ペンタセン単結晶の価電子帯領域の電子構造, *Photon Factory Activity Report B*, Vol.30, 2013, 136.

Y. Nakayama, et al., Determination of the highest occupied molecular orbital energy of pentacene single crystals by ultraviolet photoelectron and photoelectron yield spectroscopies, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.53, No.1S, 2014, pp. 01AD03-1 - 4.

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計16件)

Soichiro Yamanaka, Kei Hayakawa, Ludmila Cojocaru, Ryohei Tsuruta, Tomoya Sato, Kazuhiko Mase, Satoshi Uchida, Yasuo Nakayama, Electronic structures and chemical states of methylammonium lead triiodide thin films and impacts of annealing and moisture exposure, *Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol.123, No.16, 2018, pp. 165501-1 - 6, DOI: 10.1063/1.5023871

Yasuo Nakayama, Ryohei Tsuruta, Alexander Hinderhofer, Yuta Mizuno, Katharina Broch, Alexander Gerlach, Tomoyuki Koganezawa, Takuya Hosokai, Frank Schreiber, Temperature

dependent epitaxial growth of C_{60} overlayers on single crystal pentacene, *Advanced Materials Interfaces*, 査読有, in press, DOI: 10.1002/admi.201800084

Yasuo Nakayama, Toshiaki Mori, Ryohei Tsuruta, Soichiro Yamanaka, Koki Yoshida, Kento Imai, Tomoyuki Koganezawa, Takuya Hosokai, Surface Crystallographic Structures of Cellulose Nanofiber Films and Overlayers of Pentacene, *Japanese Journal of Applied Physics*, 査読有, Vol.57, No.3S2, 2018, pp. 03EE02-1 - 4, DOI: 10.7567/JJAP.57.03EE02

中山泰生, 鶴田諒平, 水野裕太, 戸上雄太, 松山禎吾, 小金澤智之, 細貝拓也, ペンタセン単結晶表面上におけるパーフルオロペンタセンのエピタキシャル成長, *表面科学*, 査読有, Vol.38, No.7, 2017, pp. 324 - 329, DOI: 10.1380/jsssj.38.324

Yasuo Nakayama, Yuta Mizuno, Masataka Hikasa, Masayuki Yamamoto, Masaharu Matsunami, Shinichiro Ideta, Kiyohisa Tanaka, Hisao Ishii, Nobuo Ueno, Single crystal pentacene valence band dispersion and its temperature dependence, *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 査読有, Vol.8, No.6, 2017, pp. 1259 - 1264, DOI: 10.1021/acs.jpcllett.7b00082

Yuta Mizuno, Masayuki Yamamoto, Hiroumi Kinjo, Kazuhiko Mase, Hisao Ishii, Koji K. Okudaira, Hiroyuki Yoshida, Yasuo Nakayama, Effects of the Ambient Exposure on the Electronic States of the Clean Surface of the Pentacene Single Crystal, *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 査読有, Vol.648, No.1, 2017, pp. 216 - 222, DOI: 10.1080/15421406.2017.1302001

Meng-Kai Lin, Yasuo Nakayama, Ying-Jie Zhuang, Chin-Yung Wang, Tun-Wen Pi, Sebastian Metz, Theodoros A. Papadopoulos, T. -C. Chiang, Hisao Ishii, S.-J. Tang, Control of the dipole layer of polar organic molecules on metal surfaces via different charge-transfer channels, *Physical Review B*, 査読有, Vol.95, No.8, 2017, pp. 085425-1 - 9, DOI: 10.1103/PhysRevB.95.085425

Ryohei Tsuruta, Yuta Mizuno, Takuya Hosokai, Tomoyuki Koganezawa, Hisao Ishii, Yasuo Nakayama, Crystallinity of the epitaxial heterojunction of C_{60} on single crystal pentacene, *Journal of Crystal Growth*, 査読有, Vol.468, 2017, pp. 770 - 773, DOI:

10.1016/j.jcrysgro.2016.10.031
鶴田諒平, 水野裕太, 細貝拓也, 小金澤智之, 石井久夫, 中山泰生, 微小角入射 X 線回折によるペンタセン単結晶上 C₆₀ エピタキシャル被覆層の構造決定, 表面科学, 査読有, Vol.37, No.9, 2016, pp. 429 - 434, DOI: 10.1380/jssj.37.429
Yasuo Nakayama, Yuta Mizuno, Takuya Hosokai, Tomoyuki Koganezawa, Ryohei Tsuruta, Alexander Hinderhofer, Alexander Gerlach, Katharina Broch, Valentina Belova, Heiko Frank, Masayuki Yamamoto, Jens Niederhausen, Hendrik Glowatzki, Jürgen P. Rabe, Norbert Koch, Hisao Ishii, Frank Schreiber, Nobuo Ueno, Epitaxial growth of an organic p-n heterojunction: C₆₀ on single crystal pentacene, ACS Applied Materials & Interfaces, Vol.8, No.21, 2016, pp. 1259 - 1264, DOI: 10.1021/acsami.6b02744
Yasuo Nakayama, Yuki Uragami, Masayuki Yamamoto, Keiichirou Yonezawa, Kazuhiko Mase, Satoshi Kera, Hisao Ishii, Nobuo Ueno, Photoconductivity-assisted high-resolution C1s photoemission measurements on insulating pentacene single crystal, Journal of Physics: Condensed Matter, 査読有, Vol.28, No.9, 2016, pp. 094001-1 - 8, DOI: 10.1088/0953-8984/28/9/094001

他, 査読なし論文 5 件

〔学会発表〕(計 5 7 件)

Ryohei Tsuruta, Tomoyuki Koganezawa, Takuya Hosokai, Yasuo Nakayama, Well-crystallized epitaxial thin films of molecular semiconductors on organic semiconductor single crystals, The 9th International Conference on Technological Advances of Thin Films & Surface Coatings; Shenzhen, China, 2018/7/19 【招待講演(講演予定)】
Yasuo Nakayama, (以下 14 名), Functional Organic and Organic-Inorganic-Hybrid Materials Studied by Excitation Energy Dependence of the X-ray Photoelectron Spectroscopy, The 8th Workshop on Advanced Spectroscopy of Organic Materials for Electronic Applications; Okazaki, Japan, 2016/11/23 【招待講演】
Yasuo Nakayama, (以下 17 名), Heteroepitaxial Organic pn-junction: C₆₀ on the pentacene single crystal, EMN Organic Electronics and Photonics Meeting; San Sebastian, Spain,

2016/9/11 【招待講演】

Yasuo Nakayama, (以下 11 名), Core and valence electronic structures of pentacene single crystal, The 3rd Workshop on Physics in Organic Optoelectronics; Okazaki, Japan, 2015/12/10 【招待講演】

Yasuo Nakayama, (以下 6 名), Electronic Structures of Fundamental and Practical Organic Semiconductor Materials, 2015 International Symposium for Advanced Materials Research; Sun-Moon Lake, Taiwan, 2015/8/19 【招待講演】

Yasuo Nakayama, Electronic structures of the pentacene single crystal studied with synchrotron radiation photoemission, 2015 Japan-Taiwan International Symposium on Spectroscopy and Surface Science; Chiba, Japan, 2015/6/1 【招待講演】
中山泰生, (以下 8 名) 「高感度光電子分析による有機光機能性デバイスの電子準位計測」第 64 回高分子討論会, 東北大学, 2015/9/17 【招待講演】

他, 国内研究会依頼講演 2 件, 国際学会口頭講演 5 件, 国際学会ポスター講演 15 件, 国内学会口頭講演 16 件, 国内学会ポスター講演 12 件

〔図書〕(計 0 件)
該当なし

〔産業財産権〕
該当なし

〔その他〕
ホームページ等
<http://www.rs.tus.ac.jp/oml/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中山 泰生 (NAKAYAMA, Yasuo)
東京理科大学・理工学部・講師
研究者番号: 30451751

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし

(4) 研究協力者

鶴田 諒平 (TSURUTA, Ryohei)
日笠 正隆 (HIKASA, Masataka)
山中 宗一郎 (YAMANAKA, Soichiro)
吉田 弘毅 (YOSHIDA, Koki)
森 敏彰 (MORI, Toshiaki)
水野 裕太 (MIZUNO, Yuta)