

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年5月23日現在

機関番号：32660

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K14102

研究課題名(和文) 分子双極子の強制配向を利用した有機半導体デバイスの内部電界エンジニアリング

研究課題名(英文) Engineering of the Orientation Polarization of Organic Semiconductor Molecules toward the Development of Revolutionary Organic Electronic Devices

研究代表者

中山 泰生 (Nakayama, Yasuo)

東京理科大学・理工学部工業化学科・講師

研究者番号：30451751

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：分子の多彩な形態は有機半導体材料に特有な自由度の一つであり、分子間相互の向き(配向)を制御する技術は、有機エレクトロニクスデバイスの飛躍的な発展につながる潜在的な可能性を有する。本研究では、有機半導体分子の配向制御技術を開発するとともに、材料の電子機能性が分子配向によってどのように変調されるかを明らかにすることを目的とした。その結果、極めて高秩序に配向を揃えたエピタキシャル分子薄膜において、高い電気伝導効率が期待できる波動的な非局在化キャリアの存在を実証するなどの成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

分子を秩序正しく整列させた結晶において実現する分子間に広がった波動的な電子状態は、有機半導体固体内部でのスムーズな電荷輸送を可能にすることが知られており、有機エレクトロニクスの弱点である低い電荷輸送効率を改善する一つの鍵になると期待されている。分子の向きを規則正しく整列させた結晶性の有機半導体薄膜を製造し、さらにこうした高秩序な分子配列が波動的で輸送効率の高い電荷の状態を生むことを実証した本研究の成果は、分子の向きと電子機能性を直接橋渡しするという学術的意義だけでなく、潜在的には将来の高効率な有機エレクトロニクス開発につながる社会的意義も有している。

研究成果の概要(英文)：The "shape" of a molecule is one freedom proper to organic semiconductor materials. Therefore, technologies for controlling the molecular orientation potentially lead to revolutionary developments in the organic electronic devices. In the present study, innovation of methodologies for controlling the orientation of the organic semiconductor molecules was attempted, and also impacts of the molecular orientation on the electronic functionalities of the organic semiconductors were elucidated. As a significant achievement of this project, the presence of delocalized wave-like charge carriers was successfully demonstrated in epitaxially grown crystalline thin films of highly well-ordered orientation of the organic semiconductor molecules.

研究分野：材料化学

キーワード：有機エレクトロニクス ヘテロエピタキシー 熱活性化遅延蛍光 分子間バンド分散 角度分解光電子分光法

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 無機材料を用いる従来の半導体エレクトロニクスと対比したとき、有機エレクトロニクスがもつ大きな可能性の1つは、構成要素となる有機半導体分子の多様性にある。有機デバイスに用いられる分子材料の多くは対称性の低い形態を示し、その結果として生じる電気双極子モーメントは各々の材料に付随する多彩な個性の一つと言える。電気双極子が有機デバイスの特性に及ぼす効果は、特に電極 - 有機界面において強く認識されており、現に界面での双極子配向(界面電気二重層)制御はデバイス設計の主要な技術要素の一つとなっている。

(2) 反面、界面電気二重層は厚さ数 nm の領域のみを問題にするものであり、100 nm にも及ぶ有機デバイスの残り大部分の領域には、この点ではほぼ手つかずのまま、大幅な最適化の余地が残されている。例えば、永久双極子を有する分子の蒸着膜において分子が自発的に配向し膜の厚み方向に数 10 mV/nm もの電位勾配を生じる巨大表面電位現象は、デバイス動作の素過程を大きく変化させることが知られている[引用文献]。こうした観点から、有機エレクトロニクス素子を構成する有機半導体分子薄膜内部における分子の配向を制御することが可能となれば、より材料の利用効率が良好で機能性に優れた有機デバイス開発が可能になると期待される。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、有機半導体固体内部の分子配向を制御することで、分子形態という有機半導体材料に特有の自由度を活用することを可能にする、革新的な有機エレクトロニクス開発の萌芽を育むことを目的とした。

(2) 有機半導体分子の配向制御を可能にする技術として、真空中での加熱により昇華した分子に対して外部電場を印加し、分子に特有の永久双極子モーメントを印加した電場の方向に整列させることが考えられる。この可能性を検討するために、本研究では、有機半導体分子に外部電場を印加することを可能にする新しい真空蒸着装置を試作した。併せて、有機半導体分子が予め秩序正しく配列した単結晶を基材とすることで、別の有機半導体分子を高秩序に配向させる「ヘテロエピタキシー」技術の確立と活用についても検討した。

(3) 分子の配向制御をエレクトロニクスに活用するための前提知識として、材料の電子機能性が分子配向によってどのように変調されるかを理解することが必要である。本研究では、ターゲット分子種の電子物性と、その分子自体あるいは周囲の分子の配向との関連を検討することを目的とした。前者としては、有機分子の非晶質薄膜中における電気双極子の平均配向の変化に伴う薄膜表面の電位変化の検証、および秩序正しく分子が整列した結晶性薄膜における価電子バンドのエネルギー分散の実測を行った。後者については、溶液中に分散した有機半導体分子の電子励起状態が溶媒の誘電率やその凍結によってどのように変化するかを検証することで、周囲の分子の双極子電場やその配向によってターゲット分子の電子機能性がどのように変調されるかを明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 有機半導体分子薄膜は、圧力 10^{-4} Pa 以下の超高真空環境下において材料となる有機半導体分子を加熱して昇華させ、対向するように設置された基板上に再固化させることで作製した。この際の分子の積層速度は水晶振動子マイクロバランスによって計測し、一定値となるように制御している。成膜された有機半導体分子薄膜の表面電位変化は、試料に負の電位を印加した状態で計測される紫外光電子スペクトルにおける低エネルギーカットオフの変化から見積もった。

(2) 有機半導体分子の発光特性は、トルエンあるいはアセトニトリルに溶解させた分子に対する定常フォトルミネッセンス(PL)測定および時間分解 PL 測定により評価した。なお、試料を液体窒素により冷却することで溶液を凝固させ、発光分子の周囲にある溶媒分子の配向を「凍結」することで、注目している有機半導体分子の電子機能性に対して周囲の分子の配向変化が及ぼす効果を検証している。

(3) 有機半導体固体において、分子間の相互配向が決定されるメカニズムを分子レベルで明らかにするために、分子間接合の構造をモデル化した理想系として、有機半導体分子単結晶表面上に異種分子を積層した高秩序界面を作製し、その界面構造を原子間力顕微鏡および表面 X 線回折手法により評価した。有機分子単結晶試料は、高純度化した窒素気流中での昇華・再結晶により製造し、その表面上に異種の有機半導体材料を真空蒸着法により成膜することで、試料を作製した。この際、基板となる有機結晶の温度を 125 K から 350 K の範囲で変化させることで、積層時における分子の表面拡散過程が形成される薄膜の構造に及ぼす効果を検証している。分子間接合部分の結晶構造は、大型放射光施設 SPring-8 において、高分解能の表面 X 線回折手法により精密に評価した。

(4) 高秩序に配向が揃った有機半導体薄膜から得られる電子機能性を実証することを目的に、

有機分子単結晶，およびその表面上に成膜した高秩序有機半導体薄膜の電子物性を，角度分解光電子分光法(ARPES)により検証した。一般に，有機分子単結晶は導電率が十分ではなく，外部光電効果に伴う電子放出は表面の不均一な帯電(チャージアップ)につながるため，ARPES測定は容易ではない。本研究では，ARPES測定中に補助光源として可視レーザー光を同時照射することで，半導体の光伝導を利用してチャージアップを回避している[引用文献]。有機単結晶およびその表面上の有機分子薄膜の結晶方位は，SPring-8における表面X線回折あるいはマイクロチャンネルプレートによって高感度化した低速電子回折によって決定した。

4. 研究成果

(1) 永久双極子を有する有機半導体分子を外部電場によって強制的に配向させるための真空蒸着装置を製作した。蒸着装置の基本構成は，蒸着物質を収納した坩堝と，薄膜を積層する基板との間に，2枚の互いに絶縁された金属メッシュ対を配置するもので，坩堝側のメッシュに電圧を印加することでメッシュ間に電場を発生させ，ここを通過する蒸着分子の双極子配向を整列させること意図したものである。予備実験では，メッシュに蒸着分子が付着(再固化)して目詰まりする問題がみられたため，新たに製作した装置では坩堝を加熱するためのフィラメントによってメッシュも同時に加熱されるような設計とした。その結果，十分な膜厚まで分子の蒸着を行ってもメッシュの目詰まりが生じないことを確認した。図1に，製作した分子蒸着装置を用いて比較的大きい永久双極子を有するアミノ酸分子である α -システイン分子を基板上に積層した際の仕事関数(表面電位)の膜厚依存性を示す。分子薄膜の膜厚増加に伴う仕事関数変化が，メッシュ間に印加する電圧に応じて変化していることを示唆する結果が得られているが，実験で得られた電位変調の挙動は予想していた向きとは逆であり，電場中での単純な分子回転では説明できない現象が生じている可能性がある。しかし，新しく製作した装置では，高電圧を印加したメッシュと加熱用のフィラメントの間で絶縁破壊が起こる問題が生じ，安定した蒸着実験を継続的に行うことが困難であったため，再現性の取得には至っていない。今後，メッシュ電極の加熱と加熱用フィラメントの十分な絶縁とを両立できるように蒸着装置を改良し，電場の向き・強度と表面電位との対応関係を明確にすることが課題である。

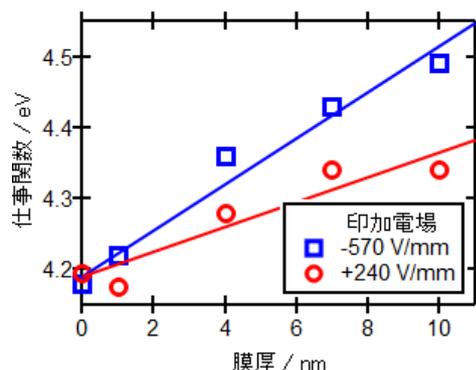


図1:蒸着中に外部電場を印加した α -システイン分子膜の表面電位の膜厚依存性

(2) 有機半導体分子が示す電子機能性が，周囲の極性分子が形成する環境によって変化する様子を，直接的に明らかにすることに成功した。この研究は，主に研究分担者である産業技術総合研究所の細貝博士と共同で実施したもので，熱活性化遅延蛍光(TADF)を発する高効率な有機EL材料として知られるカルバゾールベンゾニトリル(CzBN)誘導体分子の発光特性が，展開溶媒の極性(比誘電率)や溶液の凝固によって変化する様子を，追跡したものである。その結果，特に極性の大きい溶媒中において，TADF分子の発光効率が周囲の溶媒分子の配向によって大きく変化することが明らかになった[雑誌論文]。現実の有機ELデバイスの内部においては，CzBNのような発光分子はホストとなる有機半導体分子のなかに分散して存在していることを考慮すると，今回の研究結果は発光分子の周囲におけるホスト分子の配向がデバイスの特性を左右する要因となることを示唆しており，素子形成段階における分子レベルでの配向制御が有機半導体デバイスの特性向上に重要となることを示している。

(3) 有機半導体分子の固体膜の構造が決定されるメカニズムを分子レベルで明らかにするために，有機分子単結晶表面上に異種分子を積層した高秩序な分子間ヘテロ界面を形成し，その結晶構造を，SPring-8を利用した高分解能表面X線回折法により明らかにした。対象分子としては，分子単結晶「基板」としてはいずれも代表的なp型有機半導体として知られるペンタセンおよびルブレンを用い，積層する分子材料としてはn型有機半導体の代表であるC₆₀，あるいはペンタセン分子の水素原子を全てフッ素原子で置換することでn型化した分子であるパーフルオロペンタセン(PFP)を用いた(図2)。ペンタセン上にC₆₀を積層した高秩序界面では，面内の平均結晶子サイズが100 nmを超える非常に結晶性のよいエピタキシャルなC₆₀分子薄膜が得られることを明らかにし[雑誌論文]，さらに結晶子サイズが成膜温度に比例して増大することから，この結晶性界面の構造がペンタセン表面上におけるC₆₀分子の拡散過程によって規定されていることが示された[雑誌論文]。また，積層分子をPFPにした場合でもエピタキシャルな結晶性薄膜が形成されるが，PFP分子の整列する方位がC₆₀分子を成膜した場合と共通していること

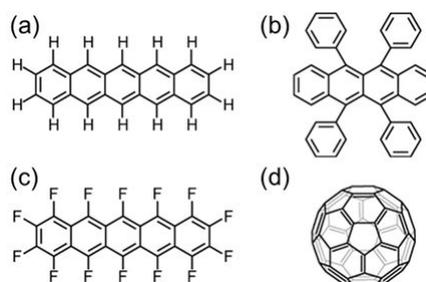


図2:本研究で用いた(a)ペンタセン，(b)ルブレン，(c)PFP，(d)C₆₀の分子構造

から、こうした界面での分子間の相互配向が下地の分子が整列している方向に強く依存していることが明らかになった[雑誌論文]。一方、下地分子をルブレンに変更してC₆₀分子を積層した場合でもエピタキシャルな結晶性薄膜が形成されるが、C₆₀の平均結晶子サイズの温度依存性はペンタセン単結晶上よりも急峻となることが明らかになった[雑誌論文]。これは、接触している相手の分子の種類に依存してC₆₀分子の拡散過程が変化することを直接示唆する結果である。今後、分子固体における接合構造の形成メカニズムをより詳細に明らかにするために、分子の特性(形状・電荷配置など)と接合構造との対応関係を系統的に検討していくことが課題である。

(4) ペンタセン単結晶上に高秩序に積層した PFP のエピタキシャル結晶薄膜に対し、ARPES による電子構造計測を実施し、分子配向が高秩序に整った有機半導体薄膜の電子機能性の検討を行った。その結果、図3に示すように、PFP 結晶薄膜において荷電キャリアが波動的な非局在化した状態となり得ることを示す根拠となる価電子バンドのエネルギー分散を実証することに成功した[雑誌論文]。研究代表者らは、同様の実験手法により、ペンタセン単結晶そのものについても、価電子バンドのエネルギー分散構造を実測することに成功しており、電荷が非局在化する

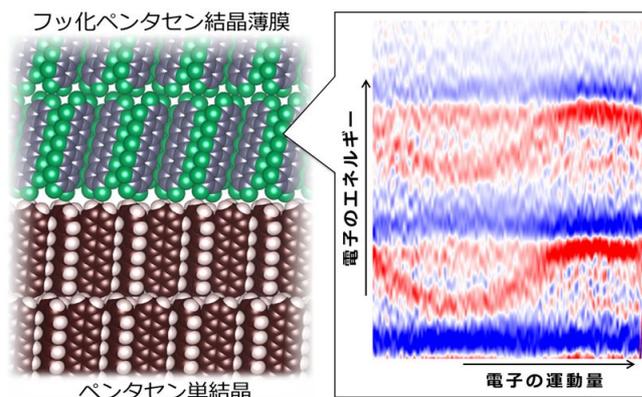


図3:ペンタセン単結晶上に積層した PFP 薄膜の結晶構造の模式図(左)と ARPES から得られた価電子バンド分散(右)

している[雑誌論文]。すなわち、本研究の結果は、p 型のペンタセン単結晶上に配向を揃えて秩序正しく n 型の PFP 分子を整列させることで、電子も正孔も非局在化して高い移動度を示す、高機能な有機半導体 pn 接合を構築できることを意味しており、米国化学会発行の The Journal of Physical Chemistry Letters 誌(IF: 8.709)において「Supplementary Cover」として採り上げられるなど、高い注目を集めている。こうした界面の両側における電荷の非局在化が、他の有機半導体分子材料でも実現するか検証を重ねていくことが今後の課題である。このために、より広ギャップの有機半導体結晶の ARPES 測定を可能にする補助光源として紫外レーザーを導入した研究に着手しており、高移動度を示す p 型材料として注目されているチエノチオフェン系分子結晶の価電子バンド分散の兆候をとらえるなど、成果が得られ始めている。

<引用文献>

- 野口裕, 中山泰生, 石井久夫, 「極性分子の配向分極現象と有機薄膜素子の界面特性」, 真空, Vol. 58, No. 3, 2015, pp. 109-116.
 Shin-ichi Machida, Yasuo Nakayama, 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.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計17件)

- Takuya Hosokai, Hajime Nakanotani, Shuhei Santou, Hiroki Noda, Yasuo Nakayama, Chihaya Adachi, “TADF activation by solvent freezing: the role of nonradiative triplet decay and spin-orbit coupling in carbazole benzonitrile derivatives”, Synthetic Metals, Vol. 252, 2019, pp. 62-68. DOI: 10.1016/j.synthmet.2019.04.005 (査読有)
 Soichiro Yamanaka, Ko Tonami, Masaki Iwashita, Koki Yoshida, Riku Takeuchi, Shin-ichiro Ideta, Kiyohisa Tanaka, Kazuhiko Mase, Koji Yamada, Hiroyuki Yoshida, Yasuo Nakayama, “High sensitivity detection of the frontier electronic states of CH₃NH₃PbI₃ single crystals by low energy excitation”, Applied Physics Express, Vol. 12, No. 5, 2019, pp. 051009-1~5. DOI: 10.7567/1882-0786/ab0d43 (査読有)
Yasuo Nakayama, Ryohei Tsuruta, Naoki Moriya, Masataka Hikasa, Matthias Meissner, Takuma Yamaguchi, Yuta Mizuno, Toshiyasu Suzuki, Tomoyuki Koganezawa, Takuya Hosokai, Takahiro Ueba, Satoshi Kera, “Widely Dispersed Intermolecular Valence Bands of Epitaxially Grown Perfluoropentacene on Pentacene Single Crystals”, The Journal of Physical Chemistry Letters, Vol. 10, No. 6, 2019, pp. 1312-1318. (DOI: 10.1021/acs.jpcllett.8b03866) [Supplementary Cover Article] (査読有)
 Ryohei Tsuruta, Takuya Hosokai, Soichiro Yamanaka, Koki Yoshida, Yuta Mizuno, Tomoyuki Koganezawa, Yasuo Nakayama, “Evolution of crystallinity at a well-defined molecular interface of epitaxial C₆₀ on the single crystal rubrene”, Journal of Physics: Condensed Matter, Vol. 31, No. 15,

2019, pp. 154001-1~6. DOI: 10.1088/1361-648X/aafde0 (査読有)

Yasuo Nakayama, Masataka Hikasa, Naoki Moriya, Matthias Meissner, Takuma Yamaguchi, Koki Yoshida, Mimi Murata, Kazuhiko Mase, Takahiro Ueba, Satoshi Kera, “Anisotropic valence band dispersion of single crystal pentacene as measured by angle-resolved ultraviolet photoelectron spectroscopy”, *Journal of Materials Research*, Vol. 33, No. 20, 2018, pp. 3362-3370. DOI: 10.1557/jmr.2018.315 [Invited paper] (査読有)

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*, Vol. 123, No. 16, 2018, pp. 165501-1~6. DOI: 10.1063/1.5023871 (査読有)

Yasuo Nakayama, Ryohei Tsuruta, Alexander Hinderhofer, Yuta Mizuno, Katharina Broch, Alexander Gerlach, Tomoyuki Koganezawa, Takuya Hosokai, Frank Schreiber, “Temperature dependent epitaxial growth of C60 overlayers on single crystal pentacene”, *Advanced Materials Interfaces*, Vol. 5, No. 12, 2018, pp. 1800084-1~6. DOI: 10.1002/admi.201800084 (査読有)

Takuya Hosokai, Hiroki Noda, Hajime Nakanotani, Takanori Nawata, Yasuo Nakayama, Hiroyuki Matsuzaki, Chihaya Adachi, “Solvent-dependent investigation of carbazole benzonitrile derivatives: Does the ${}^3\text{LE}^{-1}\text{CT}$ energy gap facilitate TADF?”, *Journal of Photonics for Energy*, Vol. 8, No. 3, 2018, pp.032102-1~9. DOI: 10.1117/1.JPE.8.032102 (査読有)

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*, Vol. 57, No.3S2, 2018, pp. 03EE02-1~4. DOI: 10.7567/JJAP.57.03EE02 (査読有)

中山泰生, 鶴田諒平, 水野裕太, 戸上雄太, 松山慎吾, 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*, Vol. 38, No. 7, 2017, pp. 324-329. DOI: 10.1380/jssj.38.324 (査読有)

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*, Vol. 8, No. 6, 2017, pp. 1259-1264. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.7b00082 (査読有)

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*, Vol. 648, No. 1, 2017, pp. 216-222. DOI: 10.1080/15421406.2017.1302001 (査読有)

Ryohei Tsuruta, Yuta Mizuno, Takuya Hosokai, Tomoyuki Koganezawa, Hisao Ishii, Yasuo Nakayama, “Crystallinity of the epitaxial heterojunction of C₆₀ on single crystal pentacene”, *Journal of Crystal Growth*, Vol. 468, 2017, pp. 770-773. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2016.10.031 (査読有)

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*, Vol. 37, No. 9, 2016, pp. 429-434. DOI: 10.1380/jssj.37.429 (査読有)

他, 査読無し論文 3 件

[学会発表] (計 6 0 件)

Yasuo Nakayama, “Structural and electronic characterization of well-defined molecular interfaces”, *The 9th Workshop on Advanced Spectroscopy of Organic Materials for Electronic Applications (ASOMEA9)*; Schluchsee (Germany), 2018. (国際学会招待講演)

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 (Thin Films 2018)*; Shenzhen (China), 2018. (国際学会招待講演)

Yasuo Nakayama, Yuta Mizuno, Soichiro Yamanaka, Tomoya Sato, Ryohei Tsuruta, Yuki Uragami, Masayuki Yamamoto, Keiichirou Yonezawa, Kei Hayakawa, Ludmila Cojocaru, Satoshi Kera, Nobuo Ueno, Satoshi Uchida, Hisao Ishii, Kazuhiko Mase, “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 (ASOMEA8)*; Okazaki (Japan), 2016. (国際学会招待講演)

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, Jurgen P. Rabe, Norbert Koch, Hisao Ishii, Frank Schreiber, Nobuo Ueno, “Heteroepitaxial Organic pn-junction: C₆₀ on the pentacene single crystal”, *EMN (Energy Materials Nanotechnology) Organic Electronics and Photonics Meeting*; San Sebastian (Spain), 2016. (国際学会招待講演)

他，国際学会招待講演 1 件，国内研究会依頼講演 1 件，国際学会一般講演 23 件，国内学会一般講演 35 件（確定している今後の講演予定含む）

〔その他〕

研究成果に関するプレスリリース <https://www.tus.ac.jp/today/20190325001.pdf>
<https://www.tus.ac.jp/today/201703130001.pdf>
研究代表者が主宰する研究室のホームページ <https://www.rs.tus.ac.jp/oml/index.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：細貝 拓也

ローマ字氏名：(HOSOKAI, Takuya)

所属研究機関名：国立研究開発法人産業技術総合研究所

部局名：計量標準総合センター

職名：主任研究員

研究者番号（8 桁）：90613513

(2)研究協力者

研究協力者氏名：鶴田 諒平，日笠 正隆，山中 宗一郎，吉田 弘毅，岩下 政揮，山頭 周平，
砺波 鴻，森 敏彰，今井 健人，縄田 尚矩，高橋 加奈，竹内 陸

ローマ字氏名：TSURUTA, Ryohei; HIKASA, Masataka; YAMANAKA, Soichiro; YOSHIDA, Koki;
IWASHITA, Masaki; SANTOU, Shuhei; TONAMI, Ko; MORI, Toshiaki; IMAI,
Kento; NAWATA, Takanori; TAKAHASHI, Kana; TAKEUCHI, Riku

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。