

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 26 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400315

研究課題名(和文) キャリア注入による高結晶性有機半導体薄膜の電子状態制御と機能開拓

研究課題名(英文) Electronic state control of highly-crystalline organic semiconductor thin films by carrier injection: toward developing novel electronic functions

研究代表者

田中 久暁 (Tanaka, Hisaaki)

名古屋大学・工学研究科・助教

研究者番号：50362273

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：有機半導体を用いた薄膜トランジスタ(TFT)において、注入キャリアの電子状態や輸送機構を電子スピン共鳴(ESR)法によりミクロに調べた。キャリア注入による導電性高分子の電子状態制御を実現するため、イオン液体絶縁膜を用いて高結晶性材料に高濃度注入を行った。高ドーピング状態では、電気伝導度はトラップの寄与により半導体的な挙動を示すものの、ESR測定からは高分子の結晶領域に金属相が発現することが明らかになった。また、チエノチオフェン系高移動度低分子材料のTFTでは、マクロな電荷輸送は結晶グレイン境界に律速されるものの、グレイン内では極低温(4 K)まで高いキャリア運動性が保たれることが明らかになった。

研究成果の概要(英文)：Electronic states and transport mechanisms of charge carriers in thin-film transistors (TFTs) of organic semiconductors have been investigated microscopically by using electron spin resonance spectroscopy. We designed a TFT structure with an ionic-liquid gate insulator, which enabled the high-density carrier injection, in order to control the electronic state of conducting polymers with high crystallinity. In highly-doped polymer films, we clearly demonstrated the formation of metallic state in crystalline regions, whereas the macroscopic conductivity showed semiconducting behavior at low temperatures due to the effect of traps. In the case of TFTs using thienothiophene-based small molecules as high-mobility semiconductors and solid gate insulators, presence of highly mobile carriers down to 4 K was demonstrated within the crystalline grain, whereas the macroscopic conductivity was limited by the carrier trapping at the grain boundaries.

研究分野：有機固体物性

キーワード：有機半導体 導電性高分子 有機薄膜トランジスタ キャリアドーピング 電子スピン共鳴

1. 研究開始当初の背景

近年、有機半導体材料を用いたエレクトロニクス(有機エレクトロニクス)が注目され、高性能素子の実現に向けて、有機半導体薄膜の電荷輸送機構や、キャリアの電子状態解明を目指す研究が世界的に展開されていた。特に、薄膜トランジスタ(TFT)構造を用いて材料中のキャリア濃度を可逆的にコントロールする技術は、有機半導体における新規な物性開発手法として注目されていた。実際に、無機材料においては、イオン液体を絶縁膜に用いることで界面に電気二重層を形成し、高濃度のキャリア蓄積に伴う絶縁体-金属転移や超伝導転移などの顕著な物性発現が報告されていた。この手法を用い、有機材料においても金属転移などの物性探索が精力的に行われたが、明瞭な相転移は観測されていなかった。この一因として、キャリア・トラップの寄与が指摘されていた。有機薄膜は本質的に多結晶(或いはアモルファス)であり、薄膜の構造乱れやグレイン(ドメイン)境界にトラップが形成され、電荷輸送に影響を与える。このことは、有機 TFT の性能(移動度)を低下させると共に、ドーピングされた有機薄膜の電子状態を電気伝導度などのマクロな物性測定から解明することを困難としてきた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上述したトラップの寄与を排除しつつ、有機半導体薄膜に注入されたキャリアの電子状態や輸送機構を解明することとした。そのため、本研究では以下の2つのアプローチを試みた。i) 結晶性が高い分子材料へのキャリア注入を行い、薄膜の結晶グレイン(ドメイン)内にトラップの影響のない本来の物性を発現させる。ii) グレイン境界等のトラップに影響されない微視的手法によりキャリアを観測し、グレイン内の電子状態を選択的かつマイクロに解明する。

i)の材料選択については、結晶性の高い高分子材料である PBTTT、また、チエノチオフェン骨格および長鎖アルキル基を有する高易動度低分子材料 C_{10} -DNNTの多結晶薄膜を主として用いた(図1)。また、ii)のマイクロなキャリア観測手法として、TFTデバイス中の電子スピンを高感度に検出できる電場誘起電子スピン共鳴(FI-ESR)法を用いた。ESR信号から求まる g 値や線幅、磁化率(スピン数)などのパラメータは、注入キャリアの電子状態やダイナミクス、キャリア近傍の局所分子配向などを直接読み解く手がかりを与える。

本研究では特に、高分子薄膜に高濃度までキャリアを注入し、ポーラロン-バイポーロン転移や金属転移などの、高分子材料の顕著な電子状態制御の実現・観測を目指した。さらに、 C_{10} -DNNT薄膜においては、結晶グレイン内、及び、グレインをまたぐキャリア運動の詳細を ESR 信号の尖鋭化の解析から明

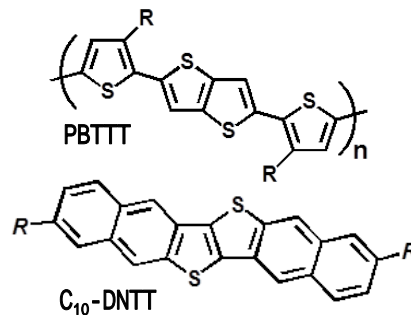


図1. PBTTT ($R=C_{16}H_{33}$)、および、 C_{10} -DNNT ($R=C_{10}H_{21}$)の化学構造

らかにし、多結晶薄膜における電荷輸送の律速要因や、グレイン内運動から予想される材料の潜在的な電荷輸送性能を明らかにすることを旨とした。

3. 研究の方法

本研究では、TFT構造を用いて高結晶性有機材料にキャリア注入を行い、注入キャリアの ESR 観測により、その電子状態や運動性などのマイクロ評価を行った。高分子材料への高濃度キャリア蓄積を可能とするために、電解質(イオン液体 [EMIM][TFSI])を絶縁膜とする TFT を作製し、ゲート電圧(V_g)印加により、連続かつ可逆的に薄膜内のキャリア濃度をコントロールした。一方、この手法では、高分子膜の内部にイオン液体のイオンが侵入し、バルク薄膜全体がドーピングされる電気化学ドーピングが起こることが指摘されている。本研究においても、光吸収測定により、バルク薄膜へのイオン侵入を伴う電気化学ドーピングが確認された。一方、 C_{10} -DNNT 薄膜の電荷輸送機構を明らかにする際には、 SiO_2 の固体絶縁膜を用いた TFT を作製し、絶縁膜界面におけるキャリアの振る舞いを ESR 法により明らかにした。

4. 研究成果

(1) イオン液体ゲート TFT による PBTTT の電子状態制御

PBTTT を半導体層、イオン液体を絶縁層に用いたトップゲート型 TFT を作製した。ITO 電極を用いたサンドイッチ型素子における光吸収測定の結果、負の V_g 印加に伴い PBTTT の $\pi-\pi^*$ 遷移が消失し、低エネルギーに正ポーラロンに帰属される吸収が現れる顕著なスペクトル変化が観測された。 $\pi-\pi^*$ 遷移は高電圧印加によりほぼ完全に消失し、イオン液体のイオンが薄膜全体に侵入する電気化学ドーピングが起きることが明らかになった。一方で、ドーピング後の逆電圧印加により吸収スペクトルは初期形状を回復するため、電気化学ドーピングは可逆的に起こることが示された。

Au 電極を用いて作製した TFT での電流-電圧特性測定、FI-ESR 測定を行った結果、負の V_g 印加により、出力電流、及び、注入キャリアの ESR 信号が明瞭に観測された。ESR 信号

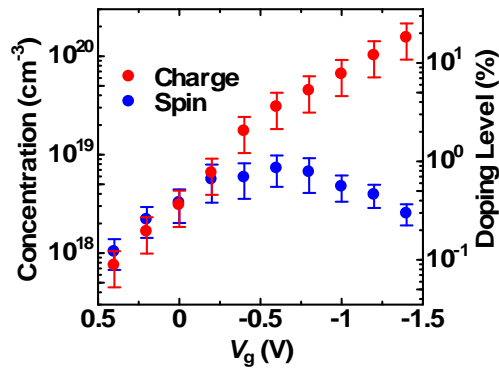


図2. PBTTT のイオン液体 TFT におけるスピン濃度と電荷濃度の V_g 依存性.

の g 値から、キャリアは PBTTT の π 電子に起因することが明らかになった。図 2 は、ESR 測定から求めたスピン濃度と、素子の充電電流測定から求めた電荷濃度の V_g 依存性の比較である。低ドーピング領域ではスピン濃度と電荷濃度がよく一致し、スピンと電荷を共に持つポラロンがキャリアとなっていることが分かる。このことは、光吸収スペクトルの変化とよく符合する。一方、ドーピング濃度を上げると、電荷濃度は単調増加を続けるのに対し、スピン濃度は飽和・減少を示し、スピンを持たないバイポラロン（ポラロン対）が生成されることが明らかになった。バイポラロンの形成は、光吸収スペクトルの変化からも示唆された。

ESR 信号の g 値の角度依存性から PBTTT の分子配向を調べた結果、電気化学ドーピングの状況下でも PBTTT の分子配向は低下しておらず、固体絶縁膜を用いた TFT と同様に、分子短軸が基板に垂直に向いた edge-on 的な配向が確認された。この結果は、高ドーピング下でも PBTTT の結晶性の低下が抑えられていることを示唆している。一方、ESR 線幅は、ドーピング濃度の増大に伴い顕著に異方性が変化した。キャリア濃度がユニットあたり十数%を超える高ドーピング膜では、 g 値と線幅が同位相の角度依存性を示し、伝導電子のスピン緩和である Elliott 機構が示唆された。そこで、ESR 信号から求めたスピン磁化率 (χ) の温度依存性 (χT - T プロット) を図 3 (a) に、同時に観測された ESR 線幅を図 3 (b) に示す (磁場は基板に垂直)。この図では、低ドーピング濃度 (PBTTT ユニット当たり 0.3%) と高ドーピング濃度 (26%) の結果を同一素子について比較している。その結果、ドーピング濃度により磁化率、及び ESR 線幅の温度依存性が明確に異なることが明らかになった。

低ドーピングの素子では、 χT - T プロットは室温近傍では一定値を示し、Curie 則 ($\chi \propto 1/T$) に従う孤立ポラロンの生成が確認された。ESR 線幅は、温度上昇とともに尖鋭化を示し、ポラロンの熱運動を反映した motional narrowing であると考えられる。低温では χT の値が減少するが、これは低温でスピンを持たないバイポラロンが安定化するための

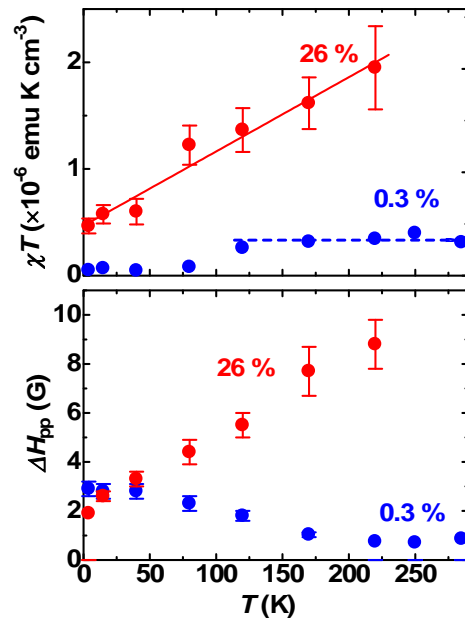


図3. PBTTT のイオン液体 TFT におけるスピン磁化率 (χT - T プロット) と ESR 線幅の温度依存性 (磁場は基板に垂直)。

と考えられる。一方、高ドーピング試料では、 χT 値が温度とともに線形的に増加しており、温度に依存しないパウリ磁化率の寄与が明らかになった。また、ESR 線幅は温度上昇とともに広幅化する。これは、伝導電子のフォノン散乱が高温で活発化しスピン-格子緩和時間が短くなること (Elliott 機構) からよく説明され、上述した ESR 信号の角度依存性とも符合する。

これらの結果は、PBTTT への高濃度キャリア注入により、バイポラロン形成を経て金属転移が起こることをマイクロに示している [発表論文 4]。金属相は edge-on 配向領域に生じており、高分子の高結晶化はキャリア注入による電子状態制御の実現に適したアプローチだといえる。最近、英国ケンブリッジ大のグループとの共同により、PBTTT に対して F4-TCNQ を用いて化学ドーピングを施すことで、金属転移が起こることを見出している [発表論文 3]。一方で、イオン液体 TFT の出力電流から得られる電気伝導度の温度依存性は、金属-絶縁体転移の臨界的な挙動を示すものの、金属に特有な、温度降下に伴う伝導度の上昇は見られず、キャリア・トラップ等の寄与が無視できないことを示している [発表論文 5, 7]。従って、有機半導体の物性開発を企図した基礎研究において、注入キャリアの電子状態をマイクロに判別できる電場誘起 ESR 法は極めて有効だといえる。

(2) チエノチオフェン系低分子材料 C₁₀-DNNT の TFT における電荷輸送機構の解明

チオフェン環が融合したチエノチオフェン骨格を持つ 共役系低分子材料は、分子間相互作用が強く、高い結晶性を示すことから、有機半導体分子の設計上注目される。C₈-BTBT や DNNT はその代表例であり、多結晶薄膜に

においても $1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ を超える高易動度を実現すると共に、ホール効果測定から、バンド的な伝導性も報告されている。しかし極低温では、多結晶薄膜のグレイン境界におけるキャリア・トラップにより出力電流は観測できなくなる。一方、我々はこれまでに、FI-ESR 法を用いることで、 C_8 -BTBT の TFT を用いて極低温 (4 K) におけるキャリア観測に成功している。[引用文献 1] その結果、4 K においても結晶グレイン内ではキャリアが運動していることを ESR 線幅の尖鋭化から明らかにした。本研究では、より拡張した 共役骨格、及び、長鎖アルキル置換基をもつ C_{10} -DNNT (図 1) を用いて TFT を作製し、キャリアの FI-ESR 観測を極低温まで行った。

SiO_2 絶縁膜上に形成した TFT は良好な p 型特性を示し、室温での飽和領域易動度は最大で $3.5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ の高い値を示した。興味深いことに、本研究で用いたデバイスは 4 K の極低温においても高 V_g 印加により明瞭な出力電流が観測された。この結果は、低温で電流が観測できない C_8 -BTBT やアルキル鎖のない DNNT の TFT とは対照的であり、 C_{10} -DNNT 薄膜の高い伝導性を示している。出力電流の温度依存性から求めた易動度の活性化エネルギーは 9.4 meV であり、DNNT の TFT で報告された値 (55 meV ; [引用文献 2]) に比べて顕著に小さかった。

図 4(a) は、4 K における FI-ESR 信号の印加磁場方向依存性である。 π 電子の g テンソルの異方性を反映し、磁場 (H) が基板に垂直 ($\theta = 0^\circ$) の時には一本、平行 ($\theta = 90^\circ$) の時には 2 本に分裂した信号が明瞭に観測される。これは、斜方対照的な g 主値を持つ分子が基板法線方向に一軸的に配向した場合に特徴的な形状である。この時、基板面内における信号の分裂は、蒸着膜において面内でランダムに配向した結晶グレインの g 値 (共鳴磁場) の違いに起因し、2 次元多結晶パターンの典型的な特徴である。

C_{10} -DNNT の孤立分子の DFT 計算の結果、 g テンソルの主値は $g_x = 2.00346$, $g_y = 2.00597$, $g_z = 2.00246$ となり、最も大きな g_y の主軸は分子の長軸にほぼ平行となっている (x , 及び z 軸は、それぞれ分子短軸、及び π 軌道方

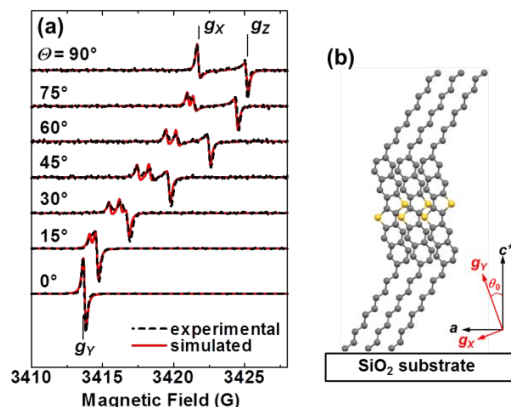


図 4. (a) C_{10} -DNNT の FI-ESR 信号の角度依存性 (4 K)、及び (b) 界面分子配向の模式図。

向にほぼ対応)。一方、実験では最も大きな g 値は基板法線方向 ($\theta = 0^\circ$) で観測されるため、界面において分子が基板に垂直に立つ end-on 配向が実現していることがわかった (図 4(b))。この結果は、薄膜の X 線構造解析の結果とも符合する。なお、中間角度では、3 本に分裂した特徴的な信号が観測された。これは g_y 主軸が基板法線から有限角度 (θ_0) 傾いていることに起因しており、 C_8 -BTBT の TFT でも観測されている [1]。

観測された ESR 信号は、4 K においても顕著に尖鋭化しており、極低温においてもキャリア運動が予想される (motional narrowing)。図 5 に、面直 (a)、及び面内 (b) に磁場を印加した際の、ESR 信号の温度依存性を示す。(a) では、4 K から温度を上昇させると共に ESR 線幅が尖鋭化を示す様子が見られる。一軸配向 (end-on 配向) した多結晶薄膜の場合、面直方向で一本観測される ESR 信号の尖鋭化は、配向ドメイン (グレイン) 内のキャリア運動を反映する [2]。このキャリア運動の活性化エネルギーを ESR 線幅の温度依存性から評価した結果、 1.4 meV という極めて小さな値が得られた。このことは、高結晶性のドメイン内で極めて高いキャリア運動性を実現していることを示している。なお、図 5(a) では、 $T > 50 \text{ K}$ で線幅の顕著な広幅化が見られるが、これはスピン-格子緩和に由来するものである。

図 5(b) から、面内方向では、低温で分裂していた信号が、温度上昇とともに 1 本に融合する振る舞いが観測された。これは、配向の異なる微結晶グレイン (ドメイン) 間をキャリアがホッピングするために、 g 値の異方性が平均化されるために起こる。同様の振る舞いはアルキル基のない DNNT や PBTTT でも報告されている [2]。融合した線幅の温度依存性から、グレイン (ドメイン) 間ホッピングの活性化エネルギーは $13\text{--}14 \text{ meV}$ と求めた。この値はアルキル基のない DNNT の値 (45 meV [2]) に比べて顕著に小さい。さらに、この値は易動度の活性化エネルギー (9.4 meV) と近く、巨視的な電荷輸送はグレイン境界におけるトラッピングにより律速されていることが明らかになった。

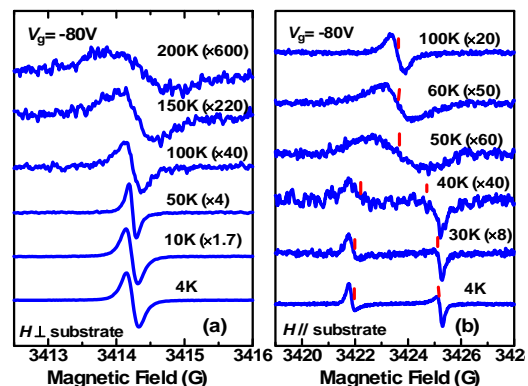


図 5. C_{10} -DNNT の電場誘起 ESR 信号の温度依存性. (a) 面直 ($\theta = 0^\circ$)、(b) 面内 ($\theta = 90^\circ$)。

これらの実験から、C₁₀-DNTT においては、DNTT に比べて薄膜のグレイン内、及びグレイン間のキャリア運動性が共に向上していることが明らかになった。これは、アルキル鎖の付加により、ファスナー効果に起因する高い分子間相互作用が実現したこと、及び、キャリア伝導を担う DNTT 部位が絶縁膜界面から物理的に遠ざかり、界面における乱れの効果が低減したことに起因すると考えられる。他方、同様なアルキル基を持つ C₈-BTBT では、グレイン内の運動性は 4 K においても観測されているが、グレイン間ホッピングは小さく、4 K においては TFT の出力電流も観測されない。このことは、共役がより拡張した DNTT 骨格を用いることで、グレイン間の伝導パスが形成され、グレイン間ホッピングが活性化されることを示している。

上記の結果から、FI-ESR 法はグレイン内、およびグレイン間のキャリアダイナミクスを区別しつつ、有機 TFT 中のキャリアの伝導機構をミクロに明らかにできる強力な手法であることがわかる。また、結晶グレイン内では顕著なキャリアの運動性が実現しており、TFT 素子の性能向上には分子の結晶性の向上が重要であることが明らかになった。

<引用文献>

H. Tanaka, M. Kozuka, S. Watanabe, H. Ito, Y. Shimoi, K. Takimiya, S. Kuroda, "Observation of field-induced charge carriers in high-mobility organic transistors of a thienothiophene-based small molecule: Electron spin resonance measurements", *Phys. Rev. B* **84**, (2011) 081306 (R).

H. Matsui, D. Kumaki, E. Takahashi, K. Takimiya, S. Tokito, T. Hasegawa, "Correlation between interdomain carrier hopping and apparent mobility in polycrystalline organic transistors as investigated by electron spin resonance", *Phys. Rev. B* **85**, (2012) 035308.

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 10 件)

S. Schott, E. McNellis, C. Nielsen, H.-Y. Chen, S. Watanabe, H. Tanaka, I. McCulloch, K. Takimiya, J. Sinova, and H. Sirringhaus "Tuning the effective spin-orbit coupling in molecular semiconductors", *Nat. Commun.* **8**, 15200 (2017) 査読有
DOI:10.1038/ncomms15200

T. Sakanoue, J. Li, H. Tanaka, R. Ito, S. Ono, S. Kuroda, T. Takenobu, "High

Current Injection into Dynamic p-n Homojunction in Polymer Light-Emitting Electrochemical Cells", *Adv. Mater.* **29**, (2017) 1606392-1-7. 査読有

DOI: 10.1002/adma.201606392

K. Kang, S. Watanabe, K. Broch, A. Sepe, A. Brown, I. Nasrallah, M. Nikolka, Z. Fei, M. Heeney, D. Matsumoto, K. Marumoto, H. Tanaka, S. Kuroda, and H. Sirringhaus, "Two-Dimensional Coherent Charge Transport in Highly Ordered Conducting Polymers Doped by Solid State Diffusion", *Nat. Mater.* **15**, (2016) 896-902. 査読有
DOI:10.1038/nmat4634

H. Tanaka, S. Nishio, H. Ito, and S. Kuroda, "Microscopic signature of insulator-to-metal transition in highly-doped semicrystalline conducting polymers in ionic-liquid-gated transistors", *Appl. Phys. Lett.* **107**, (2015) 243302-1-5. 査読有

DOI: 10.1063/1.4938137.

H. Ito, T. Harada, H. Tanaka, S. Kuroda, "Critical regime for the insulator-metal transition in highly-ordered conjugated polymers gated with ionic liquid". *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, (2015) 03DC08-1-5. 査読有
DOI: 10.7567/JJAP.55.03DC08

H. Tanaka, E. Sawada, K. Azuma, and S. Kuroda, "Direct probing of gate-bias stress effect in organic transistors by electron spin resonance spectroscopy", *Appl. Phys. Express* **8**, (2015) 051603-1-4. 査読有
DOI: 10.7567/APEX.8.051603

T. Harada, H. Ito, Y. Ando, S. Watanabe, H. Tanaka and S. Kuroda, "Signature of the insulator-metal transition of a semicrystalline conjugated polymer in ionic-liquid-gated transistors", *Appl. Phys. Express* **8**, (2015) 021601-1-4. 査読有

DOI:10.7567/APEX.8.021601

Y. Kinoshita, H. Tanaka, Y. Shimoi, K. Takimiya, and S. Kuroda, "Low-temperature carrier dynamics in high-mobility organic transistors of alkylated dinaphtho-thienothiophene as investigated by electron spin resonance", *Appl. Phys. Lett.* **105**, (2014) 033301-1-5. 査読有
DOI: 10.1063/1.4890962

他 2 件

[学会発表](計 20 件)

田中久暁、若松綾人、竹延大志、下位幸弘、黒田新一、「DPP系共役高分子を用いた有機トランジスタにおけるキャリアのESR観測(II)」、日本物理学会第72回年次大会、18pB21-10、大阪大学豊中キャンパス、大阪、2017年3月18日

田中久暁、近藤正弘、若松綾人、黒田新一、「ドナ-アクセプタ型高分子を用いた高移動度有機トランジスタにおけるキャリアのESR観測」、第55回電子スピンスイエンズ学会年会(SEST2016)3B8、大阪市立大学杉本キャンパス、大阪、2016年11月12日

H. Tanaka, S. Nishio, H. Ito and S. Kuroda, "Microscopic Signature of Insulator-to-Metal Transition in Ionic-Liquid-Gated Transistors of Semicrystalline Conducting Polymer", International Conference on the Science and Technology of Synthetic Metals 2016 (ICSM2016), Guangzhou, China, June 26- July 1. (Poster)

田中久暁、近藤正弘、若松綾人、黒田新一、「DPP系共役高分子を用いた有機トランジスタにおけるキャリアのESR観測」、日本物理学会第71回年次大会、21aBB-5、東北学院大学、宮城、2016年3月21日

田中久暁、「キャリア注入による結晶性共役高分子の絶縁体-金属転移とそのESR観測」、科研費基盤研究(S)成果報告会・研究会「フラストレーション系物質の科学：協奏と競合の世界」、トヨタ産業技術記念館、名古屋、2016年2月18日

田中久暁、中村悠基、下位幸弘、黒田新一「ポリフルオレン系共役高分子を用いたイオン液体トランジスタにおける両極性キャリアのESR観測」第54回電子スピンスイエンズ学会(SEST2015)朱鷺メッセ、新潟、2015年11月4日

田中久暁、小西弘記、西尾聡志、黒田新一、下位幸弘、瀧宮和男「イオンゲルトランジスタを用いた高移動度有機半導体分子へのキャリア注入とESR」、日本物理学会第2015年秋季大会、16pAF-5、関西大学千里山キャンパス、大阪、2015年9月16日

田中久暁、「ESR法による結晶性共役高分子の高ドーピング状態における金属相の観測」、日本物理学会第70回年次大会(2015年)領域7、領域8合同シンポジウム「分子性固体におけるキャリアドーピングの新展開」、22pAS-5、早稲田大学早稲田キャンパス、東京、2015年3月22日(招待講演)

田中久暁、西尾聡志、中村悠基、黒田新一、「イオン液体トランジスタを用いた導電性高分子への高濃度キャリア注入とESR」、日本物理学会第70回年次大会

(2015年)21pAC-2、早稲田大学早稲田キャンパス、東京、2015年3月21日

H. Tanaka, S. Watanabe, and S. Kuroda, "ESR Signature of Metallic State in Semicrystalline conjugated Polymers Doped with Fluoroalkylsilane Molecules", Joint conference of APES2014, IES, SEST2014 (APES-IES-SEST2014), Nara, Japan, November 12-16, 2014. (Poster)

H. Tanaka, S. Watanabe, and S. Kuroda, "Microscopic Signature of Metallic State in Highly-Doped Semicrystalline Conducting Polymers", 5th international meeting on spin in organic semiconductors (SpinOS), Himeji, Japan, October 13-17, 2014. (Poster)

H. Tanaka and S. Kuroda, "Microscopic Signature of Metallic State in Highly-Doped Semicrystalline Conducting Polymers", KJF International Conference on Organic Materials for Electronics and Photonics (KJF-ICOMEPE 2014), Tsukuba, Japan, September 21-24, 2014. (Invited)

他、国内学会5件、国際学会3件

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中久暁(TANAKA, Hisaaki)

名古屋大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 50362273