

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K05310

研究課題名（和文）高分子有機トランジスタの高移動度・高安定動作実現における液晶性の重要性

研究課題名（英文）Importance of liquid crystallinity in realizing polymer-based organic field-effect transistors with high mobility and operational stability

研究代表者

坂本 謙二（SAKAMOTO, Kenji）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・高分子・バイオ材料研究センター・主席研究員

研究者番号：00222000

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：液晶性、ドナー・アクセプター（D-A）共重合体をキーワードに3つの高分子有機半導体を選択し、高分子有機トランジスタ（OFETs）の電界効果移動度と動作安定性の向上、素子間のばらつき低減を同時に達成できる材料設計指針として液晶性の付与の重要性を検証した。残念ながら、液晶性の重要性は認められなかったが、ゲート・バイアス印加時のチャンネル中の電荷キャリアの絶縁膜への電荷移動がOFETsの本質的な動作不安定性の起源の一つであることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

有機エレクトロニクスの駆動・信号処理を担う有機電界効果トランジスタ（OFET）の性能を表す重要な指標は電界効果移動度であり、その向上には目覚ましいものがあった。しかしながら、この単純な移動度競争を終わりにしてOFETの実用化に向け、動作安定性、素子間のばらつき低減を含めた総合的な材料・プロセス技術の開発をする時期に来ている。本研究では、薄膜トランジスタ構造に固有な動作不安定性の起源を明らかにし、高動作安定OFETを実現するための有機半導体と絶縁膜の新規材料設計および材料選択に関する指針を得た。

研究成果の概要（英文）：This study was planned to demonstrate the usefulness of liquid crystalline (LC) materials in realizing polymer-based organic field-effect transistors (OFETs) with high mobility, high operational stability, and small device-to-device variation. Three p-type semiconducting polymers were selected in terms of two key words: LC and donor-acceptor copolymer, and OFETs with active layers of these polymers were fabricated. Unfortunately, we could not confirm the advantage of using LC polymers as active layer materials. However, during the course of this study, it was found that the charge transfer of mobile holes in the channel to the gate dielectric is one of the intrinsic origins caused operational instability in OFETs. This charge transfer can be suppressed by increasing the highest occupied molecular orbital level mismatch between the active layer and gate dielectric. This knowledge provides a guideline to realize p-channel OFETs with high operational stability.

研究分野：有機エレクトロニクス

キーワード：有機電界効果トランジスタ 液晶性 高分子有機半導体 分子配向制御 動作安定性 電界効果移動度 素子間のばらつき ドナー・アクセプター共重合体

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

情報伝達技術、モノのインターネットの発展に伴って莫大な量のデータが収集・蓄積され、それらを解析利用することで様々なサービス、ビジネスが生まれ展開されている。ヘルスケア分野においては、生体情報を収集するため、違和感のないウェアラブル・デバイスの実現が必要不可欠である。また、製品管理などでは対象物の数が莫大となるため、低コスト化も重要である。これらの要求を満たすデバイス製造技術として、近年、プリントド・エレクトロニクスが注目され、その基盤技術の一つとして、大面積、低コスト、低温プロセス、フレキシブル等の特長をもつ有機エレクトロニクスが注目されている。

有機エレクトロニクスの駆動・信号処理を担う有機電界効果トランジスタ (OFET) の性能を表す最も重要な指標は電界効果移動度である。この30年間の高分子有機半導体の電界効果移動度の向上には目覚ましいものがあり、液晶性高分子有機半導体 poly[2,5-bis(3-alkylthiophen-2-yl)thieno[3,2-b]thiophene] (PBTTC-Cn) の出現によりアモルファスシリコンFETに匹敵する移動度 ($\approx 0.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) が報告されるようになった。更にドナー・アクセプター (D-A) 共重合体の分子設計指針に基づいて合成された高分子有機半導体の出現により $10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ を超える移動度が報告されるに至った。しかし、加熱した移動度競争の弊害として移動度の過大評価が問題となっている。また、高移動度OFETにおいて、動作安定性の報告例は少なく、素子間のばらつきも大きい。高分子OFETの実用化に向けて、単に高移動度化を目指すのではなく、高動作安定性、素子間のばらつき抑制を含めた総合的な材料・プロセス技術の開発が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、単純な電界効果移動度の競争を終わりにして、高分子 OFET の実用化に向けた、動作安定性、素子間のばらつき低減を含めた総合的な材料・プロセス技術開発の指針を獲得することである。溶液プロセス可能な高分子有機半導体は、電気伝導に寄与する π 共役骨格の高分子鎖と可溶性を付与するためのアルキル側鎖から構成されている。この分子構造は、ある温度範囲で液晶相を発現するための基本構造であり、分子量や側鎖構造を制御することにより液晶性を付与することができる。残念なことに、高分子有機半導体の材料開発において、積極的に液晶性を発現させようとする合成研究者は少ない。これは、移動度のチャンピオンデータを得るためには液晶性の発現は必要条件ではないからである。しかし、液晶状態における流動性と高分子鎖の自己組織化を利用して均一で高配向、高結晶性の有機半導体活性層を形成することは、高分子 OFET の高い動作安定性や素子間のばらつき低減において有効であり、総合的な実用化材料開発において液晶性に着眼することは非常に重要であると考えた。そこで、本研究では高分子有機半導体の総合的な材料・プロセス技術開発における液晶性の重要性を調べた。

3. 研究の方法

D-A 共重合体の分子構造は、高移動度を実現するのに有効な分子設計指針を与える。これは隣り合う高分子鎖のドナー部位とアクセプター部位の間に働く引力によって分子鎖間の π - π スタッキング距離を短くして高移動度を実現するという概念である。興味深いことに、D-A 共重合体の中には結晶性が低い或いは結晶秩序がほとんどないにもかかわらず $1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ を超える電界効果移動度を示すものが存在する。これが D-A 共重合体の移動度競争において液晶性の重要性が認識されてこなかった理由である。本研究では、高分子有機半導体の総合的な材料・プロセス開発における液晶性の重要性を調べるために、液晶 (LC) 性と D-A 共重合体をキーワードに、3つの p 型高分子有機半導体：PBTTC-C16, PCDTPT, PQTBTz-C12 に着目した。それらの分子構造を図1に示す。注目キーワードに関する特性を表1にまとめた。PBTTC-C16は液晶性を示すがD-A共重合体ではない。PCDTPTは液晶性を示さないD-A共重合体、PQTBTz-C12は液晶性D-A共重合体である。これらの高分子有機半導体の電界効果移動度は、OFETsの活性層をスピンコート、熱処理して形成した場合 $0.3 \sim 0.5 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 程度であることが知られている。これら3つの高分子有機半導体に対して、撥水性ナノグループ表面を用いて平均的に高分子鎖を一方方向に配向させたOFETsを作製して、電界効果移動度、素子間の特性のばらつき、動作安定性 (バイアス・ストレス (BS) 特性) を評価し、液晶性高分子材料の有用性を調べる。また、PQTBTz-C12は市販されていないため合成する。

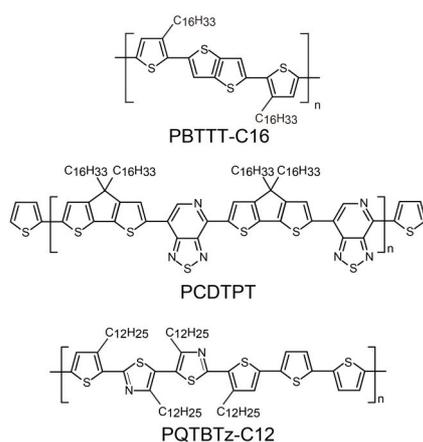


図1 本研究で用いた高分子有機半導体の分子構造

表1 液晶性と D-A 共重合体

| | LC | D-A |
|------------|----|-----|
| PBTTC-C16 | ○ | × |
| PCDTPT | × | ○ |
| PQTBTz-C12 | ○ | ○ |

4. 研究成果

液晶性を示す PQTBTz-C12 を合成するためには、分子量の制御が重要である。PQTBTz-C12 の精製過程で分子量が増大するという予期せぬ現象が起こったため、液晶性を示す PQTBTz-C12 を得るために予想外の時間を要した。そこで先行して、PBTtT-C16 と PCDTPT を活性層とする OFETs を作製し、それらの初期特性のばらつき、真空環境下での動作安定性 (BS 効果) を評価・比較し、電界効果移動度と動作安定性の相関、環境因子に由来しない動作安定性を律速する起源を明らかにした。また、最終年度に評価した、液晶性 PQTBTz-C12 を活性層とする OFETs の動作安定性の結果と、PBTtT-OFETs と PCDTPT-OFETs の結果とを合わせて、高分子有機半導体の総合的な材料・プロセス技術開発における液晶性の重要性に関する知見を得た。本研究では、曖昧性を極力排除して異なる高分子有機半導体を活性層とする OFETs の動作安定性を比較するため、デバイス構造を統一し、真空環境下、同じ測定条件で BS 効果を測定した。

(1) PBTtT-OFETs と PCDTPT-OFETs の比較 [1]

作製した OFETs のデバイス構造を図 2 に示す。高分子有機半導体の主鎖を平均的に一方に配向させる場合は、熱酸化膜 (≈ 100 nm 厚: ゲート絶縁膜) 付き n^+ -Si 基板表面をダイヤモンドラッピングフィルム (3M 668X) でスクラッチしてゲート絶縁膜表面にナノグループ構造を形成した。ゲート絶縁膜表面は活性層/ゲート絶縁膜界面における電荷トラップを避けるためとナノグループの配向能力を向上させるためにオクタデシルトリクロロシラン (ODTS) で処理した。PBTtT 活性層と PCDTPT 活性層はスピンコートにより形成され、膜厚はそれぞれ約 24 と 16 nm であった。活性層の結晶性と配向性を向上させるため、PBTtT 層を 150 (液晶相温度) で、PCDTPT 層を 200 でアニールした。ソース/ドレイン電極 (MoO_3/Au) は真空蒸着で形成され、チャネル長 (L) と幅 (W) が $L/W = 50/300 \mu\text{m}$ のトップコンタクト・ボトムゲート型 OFETs を作製した。素子特性のばらつきを評価するため、ナノグループを形成した基板には平行素子 (para-OFET) と垂直素子 (perp-OFET) をそれぞれ 30 素子、平滑な基板には等方素子 (iso-OFET) を PBTtT の場合 40 素子、PCDTPT の場合 60 素子を作製した。

はじめに、全ての OFETs の初期特性を飽和領域で評価した。図 3 に電界効果移動度のヒストグラム解析結果を示す。PBTtT-OFETs、PCDTPT-OFETs とともにナノグループ構造によって誘起された分子配向により移動度が増加した (PBTtT: $0.28(\text{iso})$ $0.51(\text{para})$ $\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, PCDTPT: $0.50(\text{iso})$ $1.9(\text{para})$ $\text{cm}^2\cdot\text{V}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)。移動度のばらつきは、perp-PBTtT-OFETs, iso-PCDTPT-OFETs で比較的大きかったが、それでもそれぞれ 10%, 6% 以下であった。それ以外の素子のばらつきは 4% 以下と非常に小さかった。

次に同一の BS 条件 (gate-source 間電圧 (V_{gs}) = -30 V, drain-source 間電圧 (V_{ds}) = -1 V) 同一の測定シーケンス (BS 印加時間が 0, 500, 5,000, 25,000 秒の時に線形領域の伝達特性を測定し、閾値電圧 (V_{th}^{lin}) と移動度 (μ^{lin}) を決定) で動作安定性を評価した。初期有効 BS 電圧 ($V_{gs} - V_{th0}^{lin}$) で規格化した閾値電圧シフト ($\Delta V_{th}^{lin} = V_{th}^{lin} - V_{th0}^{lin}$) と移動度の変化 (μ^{lin}/μ_0^{lin}) を図 4 に示す。通常、BS 印加によって移動度と閾値電圧の両方が変化するが、PBTtT-OFETs と PCDTPT-OFETs の場合、移動度の変化は起こらず閾値電圧のみが負側にシフトした。この場合、単に閾値電圧シフト量を比較するだけで動作安定性を議論できる。まず、平行素子、垂直素子、等方素子同士で PBTtT-OFETs と PCDTPT-OFETs の閾値電圧シフトの時間変化を比較すると、PBTtT-OFETs の方が、閾値電圧シフト量が小さく、動作安定性が高いことがわかる。これは移動度の関係と逆である (PCDTPT-OFETs の移動度の方が高い)。また、ゲート絶縁膜表面にナノグループ構造を形成すると、移動度の増強・低下にかかわらず動作安定性が低下していることがわかる。以上の結果から、移動度と動作安定性の間には正の相関がないことがわかる。また、ナノグループ構造は動作安定性の阻害要因になっていることがわかる。これらの結果は、高移動度の追求だけでは高い動作安定性を実現できないことを明確に示しており、新規高分子有機半導体の分子設計や分子配向制御法の開発において動作安定性についても同時に考慮する必要性があることを示している。

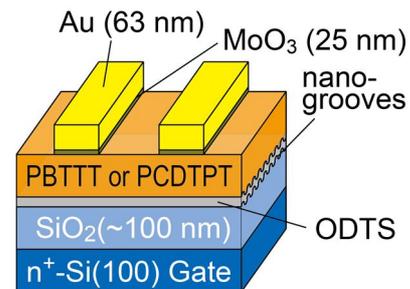


図 2 作製した OFET の構造

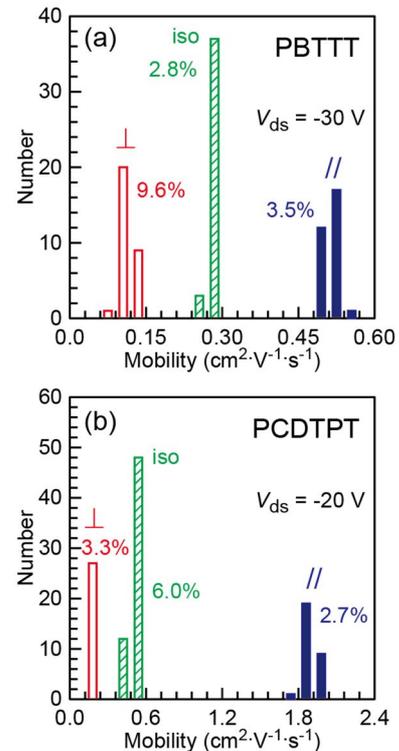


図 3 (a) PBTtT- (b) PCDTPT-OFETs の移動度分布 [1,2]

高い動作安定性を示す新規高分子有機半導体の分子設計指針を得る観点から、環境因子によらない OFET の動作不安定性の起源を明らかにすることは重要である。 ΔV_{th}^{lin} を引き起こす起源を明らかにするため、Grünewald らの方法[3]を用いて界面トラップ状態密度 (DOS) 解析を行った。25,000 秒の BS 印加による 6 つの OFETs の $|\Delta V_{th}^{lin}|$, $|\Delta V_{FB}|$, $|\Delta V_{th}^{lin} - \Delta V_{FB}|$ を図 5 にプロットした。ここで、 V_{FB} はフラットバンド電圧で、チャンネル電流のオン電圧 (V_{on}) に等しいと仮定している[4]。 $|\Delta V_{th}^{lin} - \Delta V_{FB}|$ が界面トラップ DOS の変化に由来する閾値電圧シフトに対応している。 $|\Delta V_{th}^{lin} - \Delta V_{FB}|$ の大きさは、PBTTT-OFETs と PCDTPT-OFETs で同程度であった。それに対して、PCDTPT-OFETs の $|\Delta V_{FB}|$ は PBTTT-OFETs の $|\Delta V_{FB}|$ より 2 倍以上大きかった。すなわち、PBTTT-OFETs と PCDTPT-OFETs の動作安定性の差は、BS 印加による界面 DOS の変化によるものではなく、 V_{FB} の変化における差が原因であることがわかった。

活性層材料の違いによる ΔV_{FB} の差は、チャンネル中の電荷キャリア (本研究では正孔) の絶縁膜への移動 (図 6) によって定性的に理解できる。2 つの電荷移動パスが考えられる。一つは ODTS 最高占有分子軌道 (HOMO) への電荷移動、もう一つは SiO_2 /ODTS 界面状態へのトンネリングである。高分子有機半導体と ODTS の HOMO レベルの差が電荷移動のエネルギー障壁、あるいはトンネリング障壁として働く。したがって、高分子有機半導体と ODTS の HOMO レベルの差が大きいほど絶縁膜への電荷移動が阻害されるため $|\Delta V_{FB}|$ は小さくなる。すなわち動作安定性が高くなる。ODTS、PBTTT、PCDTPT のイオン化ポテンシャル (IP) の文献値 (それぞれ、9.2 [5], 4.8 [6], 5.2 eV [7]) から、HOMO レベルの差は、PBTTT の場合 4.4 eV、PCDTPT の場合 4.0 eV となり、PBTTT-OFETs の動作安定性が PCDTPT-OFETs より高いことを説明できる。これまで、チャンネルからゲート絶縁膜への電荷移動によって OFETs の動作安定性が決定されるという報告が 2 報 [8,9] があるが、いずれの場合もゲート絶縁膜 (表面) が有機高分子膜であり、絶縁膜と有機半導体の HOMO レベルの差は比較的小さく 3.5 eV 以下であった。本研究で作製した OFETs における HOMO レベルの差は 4.0 eV 以上と大きい。同様の電荷移動が起こることは、ODTS 処理された SiO_2 ゲート絶縁膜を有する P3HT-OFETs に対する光励起電荷移動実験の報告 [10] によって支持される。この電荷移動は薄膜トランジスタ構造を有する OFETs において常に起こる可能性があることから、OFETs の本質的な動作不安定性の起源の一つである。

次に液晶性と動作安定性の関係について述べる。PBTTT 活性層は液晶相を経由して形成されていることから、結晶性のラメラ構造が基板法線方向に完全配向した膜が膜厚方向全体にわたって形成されている [11]。一方、PCDTPT は液晶相を示さないため、活性層を 200 でアニールしても基板法線方向に完全配向した結晶性のラメラ構造が全膜厚方向にわたって形成されることはない。異なる膜厚の PCDTPT 膜に対する面外 X 線回折の測定結果から、基板近傍に形成された完全配向結晶性ラメラ層の膜厚は 9-10 nm 程度であると見積もられた [1]。また、基板近傍のラメラ構造の結晶性は PBTTT 膜と PCDTPT 膜で大きな差がないことがわかった [1]。OFETs において、電荷キャリアが流れる領域は、ゲート絶縁膜界面近傍数 nm であることを考慮すると、チャンネル領域の PCDTPT 膜の結晶性は PBTTT 膜と同程度であるとみなすことができる。このことは、PBTTT-OFETs と PCDTPT-OFETs の界面トラップ DOS の変化に由来する閾値電圧シフトが同程度であることと整合性が良い。以上のことから、PBTTT-OFETs の高い動作安定性は PBTTT の液晶性に由来するものではなく、PBTTT の IP が PCDTPT の IP より小さいこと (ODTS に対してより大きな HOMO レベル差) によるものであると結論した。

(2) PQTBTz-OFETs の動作安定性

本研究で合成した PQTBTz-C12 (数平均分子量 24,000、多分散度 2.9) は、145 から 194 の間で液晶相を示した。これを活性層 (180 でアニール) とする iso-PQTBTz-OFET アレイ (60 素子)

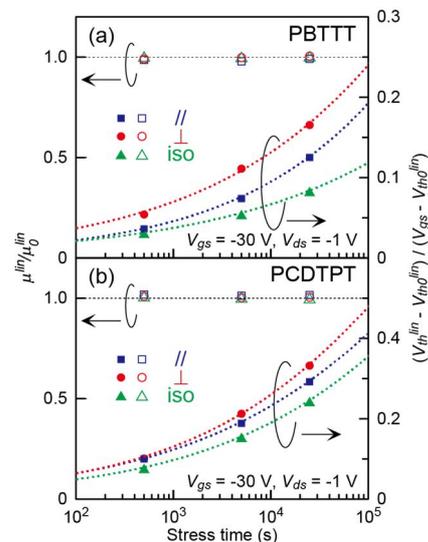


図 4 BS 効果 : (a) PBTTT-, (b) PCDTPT-OFETs [1,2]

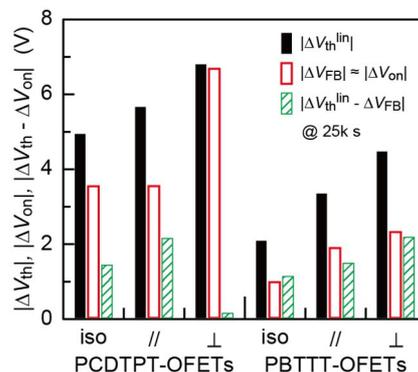


図 5 25,000 秒の BS 印加後の $|\Delta V_{th}^{lin}|$, $|\Delta V_{FB}|$, $|\Delta V_{th}^{lin} - \Delta V_{FB}|$ [1]

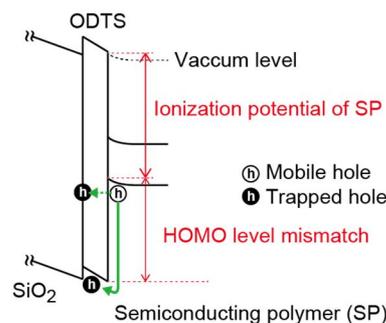


図 6 チャンネルからゲート絶縁膜への電荷 (正孔) 移動

を作製し、初期特性を飽和領域で評価した。OFET の素子構造は、ソース/ドレイン電極の金の膜厚が 40 nm であることを除いて図 2 と同じである。平均電界効果移動度は $0.16 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ で、そのばらつきは 4% 以下であった。PCDTPT-, PBTTT-OFETs の場合と同じ BS 条件 ($V_{gs} = -30 \text{ V}$, $V_{ds} = -1 \text{ V}$)、真空環境下で iso-PQBTz-OFET の動作安定性を評価した。比較するため、3 つの iso-OFETs の規格化閾値電圧シフトと規格化移動度の BS 時間依存性を図 7 に示す。PCDTPT-, PBTTT-OFETs の場合、25,000 秒の BS 印加による移動度の変化は観測されなかったが、iso-PQBTz-OFET では移動度の低下が観測された。iso-PQBTz-OFET 規格化閾値電圧シフトの BS 時間依存性は iso-PCDTPT-OFETs と同程度であり、iso-PBTTT-OFET より大きかった。PQBTz-C12 の IP は 5.2 eV であると報告[12]されているので、規格化閾値電圧シフトが iso-PCDTPT-OFETs と同程度であることは、チャネル中の電荷キャリア（正孔）がゲート絶縁膜へ電荷移動していることによって理解できる。移動度の低下はオン・ドレイン電流の減少を引き起こす。移動度の変化も考慮すると、動作安定性は PBTTT-OFETs > PCDTPT-OFETs > PQBTz-OFETs の順で安定であると結論できる。また、素子間のばらつきに関しても、3 つの高分子有機半導体で大きな差はないことがわかった。

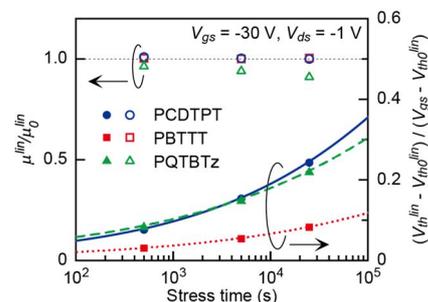


図 7 iso-PCDTPT-, iso-PBTTT-, iso-PQBTz-OFETs の BS 効果の比較

結論として、PBTTT-C16 と PQBTz-C12 は液晶性を示すが、動作安定性の序列は液晶性と無関係であった。また、素子間のばらつきに関しても 3 つの高分子有機半導体の OFETs 間で大きな差はなかった。以上の結果から、本研究開始時に考えていた「高分子有機半導体の総合的な材料・プロセス技術開発における液晶性の重要性」は認められなかった。しかし、本研究の過程で、ゲート・バイアス印加時のチャネル中の電荷キャリアの絶縁膜への電荷移動が OFETs の本質的な動作不安定性の起源の一つであることを明らかにした。活性層と絶縁膜(の表面層)の HOMO レベルの差を大きくすれば、この電荷移動を抑制することができる。この知見は高動作安定 OFETs を実現するための、有機半導体と絶縁膜の新規材料の設計および材料選択に関する指針を与える。OFETs の本質的な動作不安定性の起源を明らかにしたことは、本研究の重要な成果である。

参考文献

- [1] K. Sakamoto et al., Adv. Mater. Technol. **9**, 2301503 (2024). [発表論文 1]
- [2] K. Bulgarevich, K. Sakamoto et al., Adv. Funct. Mater. **29**, 1905365 (2019).
- [3] M. Grünewald et al., Phys. Status Solidi **100**, K139 (1980); K. Weber et al., Phys. Status Solidi B **110**, 133 (1982); W. L. Kalb and B. Batlogg, Phys. Rev. B **81**, 035327 (2010); W. L. Kalb et al., Phys. Rev. B **76**, 184112 (2007).
- [4] H. F. Iqbal et al., Nat. Commun. **12**, 2352 (2021).
- [5] C. Boullas et al., Phys. Rev. Lett. **76**, 4797 (1996).
- [6] J.-M. Zhuo et al., Adv. Mater. **21**, 4747 (2009); L.-H. Zhao et al., Appl. Phys. Lett. **101**, 053304 (2012); Y. Yamashita et al., Nature **572**, 634 (2019).
- [7] L. Ying et al., J. Am. Chem. Soc. **133**, 18538 (2011).
- [8] J. Kim et al., Adv. Mater. **26**, 7241 (2014).
- [9] B. Lee et al., Phys. Rev. B **82**, 085302 (2010).
- [10] H. Lee et al., BACS Appl. Mater. Interfaces **13**, 16722 (2021).
- [11] S. Himmelberger et al., Adv. Funct. Mater. **23**, 2091 (2013).
- [12] D.H. Kim et al., J. AM. CHEM. SOC. **131**, 6124 (2009).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Kenji Sakamoto, Kirill Bulgarevich, Takeshi Yasuda, Takeo Minari, Masayuki, Takeuchi | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Origin of Intrinsic Operational Instability in Organic Field Effect Transistors with Aligned High Mobility Donor-Acceptor Copolymer Active Layers | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 Advanced Materials Technologies | 6. 最初と最後の頁 2301503 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/admt.202301503 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 Bulgarevich Kirill, Sakamoto Kenji, Yasuda Takeshi, Minari Takeo, Takeuchi Masayuki | 4. 巻 6 |
| 2. 論文標題 Operational Stability Enhancement of Polymeric Organic Field Effect Transistors by Amorphous Perfluoropolymers Chemically Anchored to Gate Dielectric Surfaces | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Advanced Electronic Materials | 6. 最初と最後の頁 2000161 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1002/aelm.202000161 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 坂本 謙二, ブルガレビッチ キリル, 安田 剛, 三成 剛生, 竹内 正之 |
| 2. 発表標題 真空環境下における高分子有機電界効果トランジスタの動作不安定性の起源 |
| 3. 学会等名 第71回応用物理学会春季学術講演会 |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 坂本謙二、ブルガレビッチ キリル、安田 剛、三成剛生、竹内正之 |
| 2. 発表標題 疎水性ナノグループ・ゲート絶縁膜表面が高分子有機電界効果トランジスタの移動度と動作安定性に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名 2021年日本液晶学会討論会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 坂本謙二、ブルガレビッチ キリル、安田 剛、三成剛生、竹内正之 |
| 2. 発表標題 液晶性高分子有機電界効果トランジスタのバイアス・ストレス特性 |
| 3. 学会等名 2020年日本液晶学会オンライン研究発表会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 坂本謙二 |
| 2. 発表標題 高撥水性ナノグループ・ゲート絶縁膜表面を有する高分子有機電界効果トランジスタの移動度増強と動作安定性 |
| 3. 学会等名 第69回高分子討論会（招待講演） |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|---|
| NIMS Researchers Directory Service SAMURAI https://samurai.nims.go.jp/profiles/sakamoto_kenji |
|---|

| | | |
|---------------------------|-----------------------|----|
| 6. 研究組織 | | |
| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|