

| Title | 塗布プロセスにより作製した高性能トップゲート型有 機薄膜トランジスタ |
|--------------|---------------------------------------|
| Author(s) | 高木, 謙一郎; 永瀬, 隆; 小林, 隆史 他 |
| Citation | 電気材料技術雑誌. 2015, 24(1), p. 16-23 |
| Version Type | VoR |
| URL | https://hdl.handle.net/11094/76095 |
| rights | |
| Note | |

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

塗布プロセスにより作製した 高性能トップゲート型有機薄膜トランジスタ

高木 謙一郎¹⁾, 永瀬 隆^{1),2)}, 小林 隆史^{1),2)}, 内藤 裕義^{1),2)}

1) 大阪府立大学大学院工学研究科 〒599-8531 堺市中区学園町1番1号

2) 大阪府立大学分子エレクトロニックデバイス研究所 〒599-8531 堺市中区学園町1番1号

High performance top-gate organic transistors fabricated by solution process

Kenichiro Takagi¹⁾, Takashi Nagase^{1),2)}, Takashi Kobayashi^{1),2)}, Hiroyoshi Naito^{1),2)}

1) Department of Physics and Electronics, Osaka Prefecture University, Sakai 599-8531, Japan

2) The Research Institute for Molecular Electronic Devices, Osaka Prefecture University, Sakai 599-8531, Japan

Electrical characteristics of solution-processed top-gate organic field-effect transistors based on different polycrystalline and amorphous organic semiconductors are systematically investigated to show that the field-effect transistors with top-gate configuration exhibit high performance electrical characteristics. The top-gate organic transistors based on typical polycrystalline polymer semiconductors exhibit high field-effect mobility irrespective of their side chain lengths and dielectric constants of gate dielectrics. This reveals that highly ordered structures are spontaneously formed at the surface of solution-processed polymer thin films, which serve as active channel of top-gate transistors. The top-gate organic transistors with different polycrystalline and amorphous organic semiconductors exhibit extremely high operational stability as compared with hydrogenated amorphous silicon thin film transistors. These results clearly show that organic field-effect transistors with top-gate configuration play an important role in the development of high-performance applications such as integrated circuits, backplane of displays, and radio-frequency identification tags using a solution process.

キーワード:トップゲート型有機電界効果トランジスタ、自己凝集構造、バイアスストレス、 poly(3-alkylthiophene) (P3AT)、poly[bis(4-phenyl)(2,4,6-trimethylphenyl)amine] (PTAA)、 2,7-dioctyl[1]benzothieno[3,2-b][1]benzothiophene (C₈-BTBT)

1. はじめに

これまで有機半導体を用いた電子デバイスは低 コスト、軽量性、フレキシブル性、堅牢性、材料 設計の自由度の高さなどの観点から注目を集めて きた。古くは複写機の感光体ドラムへの応用で大 きな成功を収め、近年では有機発光ダイオードの 実用化への動きが活発化し、今後市場の大幅な拡 大が予想される。一方、有機電界効果トランジス タ (Field-effect transistor : FET) は未だ実用化に至 っていない。有機 FET はアクティブ素子として各 種有機半導体デバイスの中でも特に重要であり、 例えばディスプレイ、RF-ID タグ、センサーなど



図1 (a) ボトムゲートおよび (b) トップゲート型 FET の素子構造。矢印は、電荷輸送領域 (チャネル)を表す。 Fig. 1 Structures of (a) bottom-gate and (b) top-gate FETs. The arrows represent carrier transport regions (channels).

には必須のデバイスである。新規材料の開発や作 製プロセスの改善などにより、理論的に予測され る移動度¹⁾に迫る移動度が達成されつつあり^{2),3)}、 目覚しい進展を遂げている。一方で、依然として 歩留まりの向上、性能ばらつきの低減などの課題 があり、また、実用化に向けて弊害になっている 最も大きな要因として、有機 FET の動作安定性の 問題がある⁴⁾。このような背景から、より簡便な 作製プロセスにより、高移動度かつ高安定な有機 FET を実現することが強く求められている。

これまでに我々は、有機 FET のデバイス構造と して一般的に用いられるボトムゲート構造[図 1(a)]ではなく、トップゲート構造[図 1(b)]を採 用し、より簡便な作製プロセスにより高性能な塗 布型有機 FET の作製が可能であることを報告し た⁵⁾⁻⁹⁾。トップゲート構造では、ボトムゲート構 造で高移動度化のために必要とされる低い表面エ ネルギーを有する(塗布型有機半導体の製膜性が 良好でない)基板を用いる必要がなく、半導体の 製膜がより容易であり、作製プロセス上の利点が ある。我々以外からも高移動度を有するトップゲ ート有機 FET が報告されている¹⁰⁾⁻¹²⁾。しかし、そ の高移動度化の起源は明らかではない。



図 2 本研究で用いた (a) P3AT、(b) PTAA、 (c) C₈-BTBT、(d) CYTOP、(e) PCS、 (d) PMMA の化学構造 Fig. 2 Chemical structures of the materials used in this study. (a) P3HT, (b) PTAA, (c) C₈-BTBT, (d) CYTOP, (e) PCS, (f) PMMA.

本研究ではこれらトップゲート型有機 FET の 高移動度の起源を探り、トップゲート構造を用い ることが高性能化に向けて本質的に有効であるこ とを実証することを目的とした。典型的な高分子 半導体である poly (3-alkylthiophene) (P3AT) を用 いたトップゲート FET において、FET 特性に対す るアルキル側鎖長およびゲート絶縁層の誘電率の 影響を調べることにより、高移動度化の起源を明 らかにした。また、近年注目を集めている[1] benzothieno [3,2-b] [1] benzothiophene (BTBT) 骨格 の両端に octyl 基を有する可溶性低分子半導体 Cs-BTBT や、典型的なアモルファス高分子半導体 である poly [bis (4-phenyl) (2,4,6-trimethylphenyl) amine] (PTAA) を用いたトップゲート FET も作製 し、ゲートバイアスストレス (長時間駆動) に対 する安定性の評価を行った。これら様々な有機半 導体材料を用いたトップゲート FET において高 移動度が得られ、現在液晶ディスプレイのバック プレーンに用いられている水素化アモルファスシ リコン薄膜トランジスタ (a-Si:H TFT) を上回る 極めて高い動作安定性を達成できることが分かっ た。

電気材料技術雑誌 第24巻第1号 J. Soc. Elect. Mat. Eng. Vol.24, No.1 2015



図3 (a) CYTOP 層を有するトップゲート P3AT FET の伝達特性, (b) P3HT FET の出力特性 Fig. 3 (a) Transfer characteristics of top-gate P3AT FETs with CYTOP gate dielectrics, (b) Output characteristics of the P3HT FET.

2. 実験方法

半導体はアルキル側鎖長の異なる P3AT として Poly (3-butylthiophene) (P3BT)、 Poly (3-hexyl thiophene) (P3HT)、 Poly (3-octylthiophene) (P3OT)、 Poly (3-decylthiophene) (P3DT) の4種類を用いた [図 2(a)]。P3BT、P3HT、P3OT、P3DT の重量平均 分子量はそれぞれ 53000、72000、83000、82000、 P3BT、P3HT、P3OT のレジオレギュラリティ (側 鎖位置規則性) はそれぞれ 85%、91%、91%とほ ぼ同程度の値を持つものを選定した (P3DT のレ ジオレギュラリティは製造業者のデータシートに 記載されておらず不明)。また、アモルファス有機



図4 トップゲート P3HT および PTAA FET の 移動度とゲート絶縁層比誘電率の関係 Fig. 4 Plot of field-effect mobilities of top-gate P3AT and PTAA FETs vs dielectric constant of gate dielectrics.

高分子半導体 PTAA [図 2(b)] および可溶性低分子 半導体 C₈-BTBT [図 2(c)] を用いた。これらの半導 体材料を無水クロロベンゼンに溶解させ、窒素雰 囲気下でスピンコート法により製膜した。ゲート 絶縁材料としては、CYTOP[™] (CTL-809M, 旭硝 子)、 poly (4-chlorostyrene) (PCS)、 poly (methyl methacrylate) (PMMA) を用い [図 2(d)-(f)]、スピン コート法により半導体層上部に製膜した。溶媒は CYTOP にはフッ素系溶媒である CT-SOLV180 (旭 硝子)、PCS および PMMA には酢酸ブチルを用い た。いずれも今回用いた半導体に対して直交溶媒 であり、半導体層を溶解させない(ただし、P3DT および Cg-BTBT は酢酸ブチルに溶解してしまい、 PCS、PMMA を有する FET を作製することはでき なかった)。製膜した CYTOP、PCS、PMMA 層の 膜厚はいずれもおよそ 500 nm であり、比誘電率 はそれぞれ2.1、3.2、3.9 である。基板にはガラス を用い、UV/O3処理により表面エネルギーを高め、 半導体溶液の塗れ性を向上させた。測定は全て窒 素置換したグローブボックス(露点:-80°C)内で 行った。

3. 実験結果および検討

図 3 に CYTOP 層を有するトップゲート P3AT FET の伝達特性、出力特性を示す(出力特性に関 しては P3HT の特性のみ示している)。いずれも典 型的な p 型の動作を示した。10⁵を超える高い on/off 比が得られ、ゲート電圧の掃引方向の違い により生じるヒステリシスも無視できるほどに小 さく安定した動作を示した。P3BT、P3HT、P3OT、 P3DTの移動度はそれぞれ(1.1±0.1)×10⁻²、(3.9± $0.2) \times 10^{-2}$, $(1.4 \pm 0.0) \times 10^{-2}$, $(9.0 \pm 0.7) \times 10^{-3}$ cm²V⁻¹s⁻¹であり、アルキル側鎖長にほとんど依存 せず高い移動度を示すことがわかった。これはボ トムゲート構造による P3AT の報告と大きく異な る。自己組織化単分子膜で表面エネルギーを制御 していない Si/SiO2 基板などの上に作製したボト ムゲート FET において、P3AT のアルキル側鎖が 長くなるにつれて移動度は著しく低下する 13)-16) (実際に今回用いた材料でボトムゲート FET を 作製し、同様の結果を確認した)。これは電荷輸送 能を持たないアルキル側鎖が輸送を妨げているた めである13)-16)。移動度がアルキル鎖長に依存しな い結果は FET のチャネル領域において、P3AT の 正孔輸送がアルキル側鎖に阻害されない高秩序構 造を形成していることを示している。

トップゲート FET のチャネル領域における P3ATの秩序構造について詳細に検討するために、 より誘電率の高い PCS、 PMMA を有するトップゲ ート P3AT FET および PTAA FET の特性評価を行 った。図4にこれらの移動度をゲート絶縁層の比 誘電率に対してプロットしたものを示す。PTAA FET の移動度は誘電率の増大に伴い大きく低下し た。これは高分子ゲート絶縁層におけるランダム に配向したダイポールモーメントにより、チャネ ル領域にエネルギー乱れが生じ、局在準位の分布 幅が広がることに起因する(ダイポールディスオ ーダー)¹⁷⁾。このダイポールディスオーダーの影 響は誘電率が高いほど顕著である。一方、P3AT FET は誘電率の高い PMMA の場合でも 10⁻² cm²V⁻¹s⁻¹を超える高い移動度を示した (図 4)。 P3AT FET がダイポールディスオーダーの影響を 受けず高移動度を示すのは、以下に述べるように



図5 トップゲート FET のチャネル領域に おける P3AT の配向 Fig. 5 Orientation of P3AT at the active channel of top-gate FETs.

チャネル領域 (つまり、P3AT 薄膜表面) において、 P3AT が edge-on 配向によりラメラ構造を形成する ことに起因すると考えられる。

アモルファス有機高分子である PTAA を用いた FET においては、正孔が輸送される領域は PTAA/ ゲート絶縁層界面直下に形成されるため、ダイポ ールディスオーダーの影響を強く受ける。それに 対して、P3AT は塗布製膜時に、気液界面の低い 表面エネルギーによりアルキル側鎖が自発的に薄 膜表面方向へ配向しながら自己凝集し、その結果 edge-on ラメラ構造が形成されていると考えられ る (図 5)。この場合、正孔輸送を担う P3AT のπ骨 格はアルキル側鎖によってゲート絶縁層から離れ た位置に存在する。ダイポールディスオーダーの 影響はクーロン相互作用であるため、エネルギー 乱れは距離によって低減される。実際、数値計算 によりチャネル領域と絶縁体ダイポールの距離が 離れるほど、局在準位の分布幅の広がりが抑制さ れることが明らかにされている¹⁸⁾。ゲート絶縁体 として PMMA を想定した場合、状態密度分布の 広がりは絶縁層界面から 0.5~1 nm 離れると無視 できるほど小さくなる¹⁸⁾。P3BT、P3HT、P3OT、 P3DT のアルキル側鎖の長さはそれぞれ 0.6、0.8、 1.0、1.1 nm 程度であり^{19),20)}、この数値計算の結果 と矛盾しない。



図 6 CYTOP ゲート絶縁層を有するトップゲート (a) P3HT (b) PTAA (c) C₈-BTBT FET の ゲートバイアスストレス印加前後の特性 Fig. 6 Transfer characteristics of top-gate (a) P3HT, (b) PTAA, and (c) C₈-BTBT FET with CYTOP gate dielectric before and after prolonged gate bias stress

一般に塗布型有機半導体はアルキル鎖などの側 鎖を有するため、多くの材料でこのような気液界 面を利用した自己凝集構造を形成し得ると考えら れる。実際、我々は P3HT に加えて poly [(9,9'dioctylfluorenyl-2,7-diyl)-(2,2'-bithiophene-5,5'-diyl)]: F8T2 でも薄膜表面で高移動度を有する高秩序構 造が形成されることを報告している ^{21),22)}。また、 後で示すように可溶性低分子半導体である C₈-BTBT を用いたトップゲート FET においても 3.6 cm²V⁻¹s⁻¹と高い移動度が得られている。これら の結果は、トップゲート構造を用いることで、多 くの塗布型有機半導体において高移動度化が期待 できることを示唆している。

先に述べたように、有機 FET の実用化に向けて、 動作安定性の向上が大きな課題である⁴⁾。トップ ゲート FET の長時間の駆動に対する安定性を調べ るため、ゲートバイアスストレスに対する動作安 定性の評価を行った。バイアスストレスに対する 動作不安定性の原因については現時点で十分に明 らかにされていないが、水分子などの不純物によ りチャネル領域に欠陥が生じ、深い局在準位が形 成されることが主な原因として考えられている⁴⁾。 その局在準位は価電子帯から 0.4 eV 程度離れたエ ネルギー位置に形成されるとする報告がある²³⁾。 深い局在準位に捕獲された正孔はゲート電界を遮 蔽し、実効的に印加されるゲート電圧は減少し、 ドレイン電流が低下する。

バイアスストレスに対する特性の変化は閾値電 圧の変化量により評価した。バイアスストレスの 条件はゲート電圧を-60 V、ドレイン電圧を 0 V と し、印加時間を 10³ 秒とした。図 6(a) に CYTOP 層を有するトップゲート P3HT FET のゲートバイ アスストレス印加前後の伝達特性を示す。10³ 秒 のゲートバイアスストレス印加後においても伝達 特性はほとんど変化せず、非常に安定な動作を示 した。10³ 秒のバイアスストレス印加後の閾値電 圧の変化量は 0.5 V 以内であった。現在液晶テレ ビのバックプレーンに用いられている a-Si:H TFT を上回る非常に高い安定性である^{24),25)}。P3AT 薄 膜表面において局在準位密度が低く、極めて高秩 序な構造が形成されていることが分かる。

他の半導体材料におけるトップゲート構造によ る高性能化の有効性を検討するために、可溶性低 分子半導体 C₈-BTBT、アモルファス高分子半導体 PTAA を用いたトップゲート FET の動作安定性の 評価を行った。図 6(b)、(c)に CYTOP 層を有する トップゲート PTAA および C₈-BTBT FET のバイア スストレス印加前後の伝達特性を示す。バイアス ストレスの条件は P3AT の場合と同様にゲート電 圧を-60 V、ドレイン電圧を 0 V とした。移動度の 値が著しく異なる (PTAA が 4.6 × 10⁻³ cm²V⁻¹s⁻¹、 C₈.BTBT が 3.6 cm²V⁻¹s⁻¹) にも関わらず、いずれ の場合もバイアスストレス印加前後で伝達特性は ほとんど変化せず安定に動作した。閾値電圧変化 はいずれも 0.5 V 前後であり、P3AT の場合と同様 極めて高い安定性を示した。

図7にこれらのFETの移動度に対して、ゲート バイアスストレスによる閾値電圧の変化量を示し た。閾値電圧変化は、比較のためにバイアススト レス時のゲート電圧値で規格化した。図7には図 6の結果に加えて、PCS、PMMA層を有するトッ プゲート FET のデータも示している。また、 octadecyltrichlorosilane (OTS)で表面修飾した SiO₂ ゲート絶縁層を有するボトムゲート FET の結果、 および同様の材料を用いたボトムゲート FET の 文献のデータも示した²⁶⁾。図7から明らかなよう に、いずれの半導体においてもトップゲート型有 機 FET はボトムゲート型に比べて高い安定性を 持つことが分かる。また、動作安定性と移動度の 間に明確な関係がないことが分かる。

図7においてトップゲートFETでは高分子のゲ ート絶縁層、ボトムゲートFETでは主にSiO2層 が用いられているという違いがある。高分子ゲー ト絶縁層は比較的表面エネルギーが低く(CYTOP、 PCS、PMMAの水接触角はそれぞれ111°、91°、 74°)、特にCYTOP層上部に半導体を均一に塗布 製膜するのは極めて困難である。ボトムゲート構 造では一般に高い塗れ性と高移動度は両立しない ³⁰⁾。一方、トップゲート型FETでは、表面エネル ギーを高め、半導体溶液の塗れ性が高い基板を用 いても非常に高い移動度、動作安定性を得ること ができた。このように、トップゲート構造を用い ることで、ボトムゲート構造ではトレードオフの 関係にあった移動度と塗れ性を容易に両立させる ことができる。これらの結果は、より簡便な作製







プロセスにより高性能な有機 FET を作製するこ とが可能であることを示している。特に C₈.BTBT を用いたトップゲート FET において、a-Si:H TFT を超える高い移動度($3.6 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)、安定性を達 成した結果は、ディスプレイなど高速動作を必要 とする応用に向けて意義深い。

4. まとめ

近年報告されているトップゲート塗布型有機 FETの高移動度の起源について検討し、一般に用 いられているボトムゲート構造ではなく、トップ ゲート構造を用いることが本質的に高性能化に有 効であることを実証することを目的とした。典型 的な有機高分子半導体である P3AT を用いたトッ プゲート FET の特性を評価した。移動度は P3AT のアルキル側鎖長およびゲート絶縁層の誘電率に 依存せず、高い値を示した。これにより、トップ ゲート FET のチャネル領域である P3AT 薄膜表面 において、FET の電荷輸送に有利な edge-on ラメ ラ構造が自発的に形成されていることが分かった。 また、これらの FET の長時間の駆動に対する動作

電気材料技術雑誌 第24巻第1号

J. Soc. Elect. Mat. Eng. Vol.24, No.1 2 0 1 5

安定性を評価したところ、現在液晶テレビのバッ クプレーンに用いられている a-Si:H TFT を上回る 極めて高い安定性を示した。可溶性低分子半導体 C&BTBT やアモルファス高分子半導体である PTAA においても高移動度かつゲートバイアスス トレスに対して高い安定性が得られた。また、い ずれの半導体においてもボトムゲート FET に比 べてトップゲート FET の方が高い安定性を示し た。これらの結果は、多くの塗布型有機 FET にお いて、トップゲート構造を採用することで、簡便 な作製プロセスにより高移動度、高安定性を達成 することができることを示唆している。

謝辞

本研究の一部は、総合科学技術会議により制度 設計された最先端研究開発支援プログラムにより、 日本学術振興会を通して助成された。また、科学 研究費補助金 基盤研究(B) (23360140) および新 学術領域研究「元素ブロック高分子材料の創出」 (24102011) の助成を受けた。

参考文献

- J. E. Northrup, Appl. Phys. Lett. 99 (2011) 062111.
- H. Minemawari, T. Yamada, H. Matsui, J. Tsutsumi, S. Haas, R. Chiba, R. Kumai, and T. Hasegawa, Nature 475 (2011) 364.
- Y. Yuan, G. Giri, A. L. Ayzner, A. P. Zoombelt, S. C. B. Mannsfeld, J. Chen, D. Nordlund, M. F. Toney, J. Huang, and Z. Bao, Nat. Commun. 5 (2014) 3005.
- 4) H. Sirringhaus, Adv. Mater. 21 (2009) 3859.
- T. Endo, T. Nagase, T. Kobayashi, K. Takimiya, M. Ikeda, and H. Naito, Appl. Phys. Express 3 (2010) 121601.
- K. Takagi, T. Nagase, T. Kobayashi, and H. Naito, Org. Electron. 15 (2014) 372.
- K. Takagi, T. Nagase, T. Kobayashi, T. Kushida, and H. Naito, Jpn. J. Appl. Phys. 54 (2015) 011601.

- 高木謙一郎,永瀬隆,小林隆史,内藤裕義,ス マートプロセス学会誌, Vol. 2, No. 5 (2013) 251.
- K. Takagi, T. Nagase, T. Kobayashi, and H. Naito, Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014) 050305.
- H. Yan, Z. Chen, Y. Zheng, C. E. Newman, J. Quin, F. Dolz, M. Kastler, and A. Facchetti, Nature, 457 (2009) 679.
- T. Sakanoue and H. Sirringhaus, Nature Mater. 9 (2010) 736.
- D. K. Hwang, C. Fuentes-Hernandez, J. Kim, W. J. Potscavage, S. -J. Kim, and B. Kippelen, Adv. Mater. 23 (2011) 1293.
- K. Kaneto, W. Y. Lim, W. Takashima, T. Endo, and M. Rikukawa, Jpn. J. Appl. Phys. 39 (2000) L872.
- 14) Y. D. Park, D. H. Kim, Y. Jang, J. H. Cho, M. Hwang, H.S. Lee, J.A. Lim, and K. Cho, Org. Electron. 7 (2006) 514.
- A. Babel and S.A. Jenekhe, Synth. Met. 148 (2005) 169.
- Z. Bao, Y. Feng, A. Dodabalapur, V. R. Raju, and A. J. Lovinger, Chem. Mater. 9 (1997) 1299.
- J. Veres, S. D. Ogier, S. W. Leeming, D. C. Cupertino, and S. M. Khaffaf, Adv. Funct. Mater. 13 (2003) 199.
- 18) T. Richards, M. Bird, and H. Sirringhaus, J. Chem. Phys. **128** (2008) 234905.
- K. Tashiro, M. Kobayashi, T. Kawai, and K. Yoshino, Polymer 38 (1997) 2867.
- T. J. Prosa, M. J. Winokur, J. Moulton, P. Smith, and A. J. Heeger, Macromolecules 25 (1992) 4364.
- T. Kushida, T. Nagase, H. Naito, Appl. Phys. Lett. 98 (2011) 063304.
- 22) T. Kushida, T. Nagase, and H. Naito, MRS Proc.1360 (2011) mrss11-1360-0010-12.
- K. P. Pernstich, D. Oberhoff, C. Goldmann, and B. Batlogg, Appl. Phys. Lett. 89 (2006) 213509.
- 24) F. R. Libsch and J. Kanicki, Appl. Phys. Lett. 62 (1993) 1286.

- 25) N. -B. Choi, D. -W. Kim, H. -S. Seo, C. -D. Kim,
 H. Kang, M. -J. Kim, and I. -J. Chung, Jpn. J.
 Appl. Phys. 46 (2007) 1333.
- 26) 文献のデータの詳細は以下の通り。 1,1,1,3,3,3-Hexamethyldisilazane (HMDS) で表 面処理した SiO₂ゲート絶縁層を有するボトム ゲート PTAA FET^{27} , poly(methyl silsesquioxane) (PMSQ) 絶縁層を有するボト ムゲート P3HT FET²⁸⁾、OTS で表面処理した SiO₂を有するボトムゲート P3HT FET²⁸⁾、 (tridecafluoro-1,1,2,2-tetrahydrooctyl)trichlorosila ne (FTS) で表面処理したボトムゲート C₈-BTBT FET²⁹⁾の4つである(図7中に文献 の番号を示している)。本研究のデータは全て 窒素雰囲気下で測定した結果であり、文献27 は大気下、文献 28 は窒素下、文献 29 は真空 下で測定した結果である。また、文献29は単 結晶 C8-BTBT の FET の結果である。バイア スストレス印加時間に関しては、C8-BTBTの 結果以外は文献のデータも含めて全て 1000 s である(トップゲート型 Cs-BTBT FET は

10000 s、ボトムゲート型は 43200 s²⁹⁾ である)。 なお、文献 27 において、PTAA FET の移動度 は記載されていないため、SiO₂ と同程度の誘 電率を持つ(したがって同程度の移動度を持 つと考えられる) PMMA 層を有するトップゲ ート FET の値を用いた。

- 27) A. Sharma, S. G. J. Mathijssen, M. Kemerink, D. M. de Leeuw, and P. A. Bobbert, Appl. Phys. Lett. 95 (2009) 253305.
- T. Nagase, T. Hamada, K. Tomatsu, S. Yamazaki,
 T. Kobayashi, S. Murakami, K. Matsukawa, and
 H. Naito, Adv. Mater. 22 (2010) 4706.
- 29) Y. Li, C. Liu, A. Kumatani, P. Darmawan, T. Minari, and K. Tsukagoshi, AIP Advances 1 (2011) 022149.
- 30) S. Yamazaki, T. Hamada, T. Nagase, S. Tokai, M. Yoshikawa, T. Kobayashi, Y. Michiwaki, S. Watase, M. Watanabe, K. Matsukawa, and H. Naito, Appl. Phys. Express 3 (2010) 091602.

(2015年6月1日受理)



高木 謙一郎

2011 年 3 月大阪府立大学工学部電子 物理工学科卒業。2013 年 4 月大阪府 立大学大学院工学研究科電子・数物系 専攻博士後期課程に入学。塗布型有機 半導体の電子物性に関する研究に従

事。The 25th International Conference on Amorphous and Nano-crystalline Semiconductors Best Poster Award 受賞。



永瀬 隆

2000 年大阪府立大学大学院工学研究 科電気・情報系専攻博士後期課程修了。 博士(工学)。同年、独立行政法人情 報通信研究機構関西先端研究センタ ー(現未来 ICT 研究所)特別研究員・

専攻研究員。2006年より大阪府立大学大学院工学研究 科助教。2014年より大阪府立大学大学院工学研究科准 教授。分子エレクトロニクスおよび有機半導体デバイ スに関する研究に従事。



著者略歴

小林 隆史

2001 年上智大学大学院理工学研究科 物理学専攻博士後期課程修了。博士(理 学)。同年より理化学研究所基礎科学特 別研究員。有機材料の超高速分光およ び非線形分光に従事。2004 年より大阪

府立大学大学院工学研究科助手。2013年より大阪府立大 学大学院工学研究科准教授。高分子材料を中心とした有 機材料の光電物性に関する研究に従事。



内藤 裕義

1984 年大阪府立大学大学院工学研究 科電子工学専攻博士課程を修了。同年 より大阪府立大学工学部助手。2000 年より大阪府立大学大学院工学研究 科教授。専門はソフトマテリアルの光

物性、電子物性を中心とした有機エレクトロニクス。 日本液晶学会論文賞、電気材料技術懇談会最優秀論文 賞、株式会社半導体理工学研究センター第 7 回共同研 究賞、有機 EL 討論会第 3 回業績賞、JJAP/APEX editorial contribution award 等受賞。