

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	<a href="https://hdl.handle.net/11094/76095">https://hdl.handle.net/11094/76095</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

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

Osaka University

## 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<sup>1)</sup>, 永瀬 隆<sup>1),2)</sup>, 小林 隆史<sup>1),2)</sup>, 内藤 裕義<sup>1),2)</sup>

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 Takagi<sup>1)</sup>, Takashi Nagase<sup>1),2)</sup>, Takashi Kobayashi<sup>1),2)</sup>, Hiroyoshi Naito<sup>1),2)</sup>

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 (C<sub>8</sub>-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

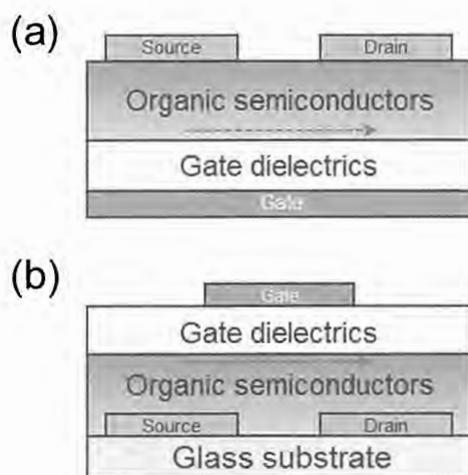


図1 (a) ボトムゲートおよび (b) トップゲート型 FET の素子構造。矢印は、電荷輸送領域 (チャンネル) を表す。

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<sup>1)</sup>に迫る移動度が達成されつつあり<sup>2),3)</sup>、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<sup>4)</sup>。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<sup>5)-9)</sup>。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<sup>10)-12)</sup>。しかし、その高移動度化の起源は明らかではない。

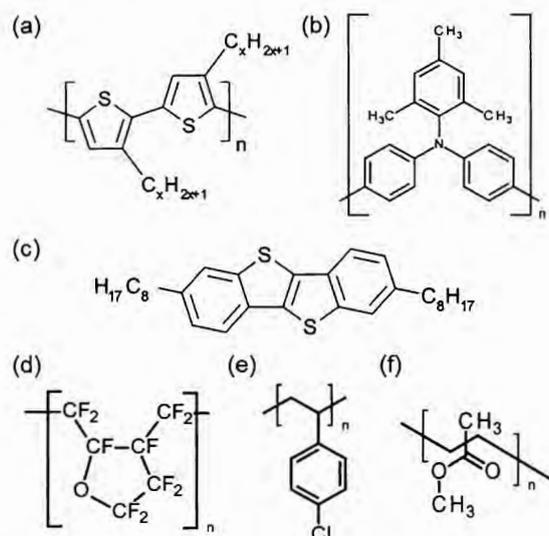


図2 本研究で用いた (a) P3AT、(b) PTAA、(c) C<sub>8</sub>-BTBT、(d) CYTOP、(e) PCS、(f) PMMA の化学構造

Fig. 2 Chemical structures of the materials used in this study. (a) P3HT, (b) PTAA, (c) C<sub>8</sub>-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 C<sub>8</sub>-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。

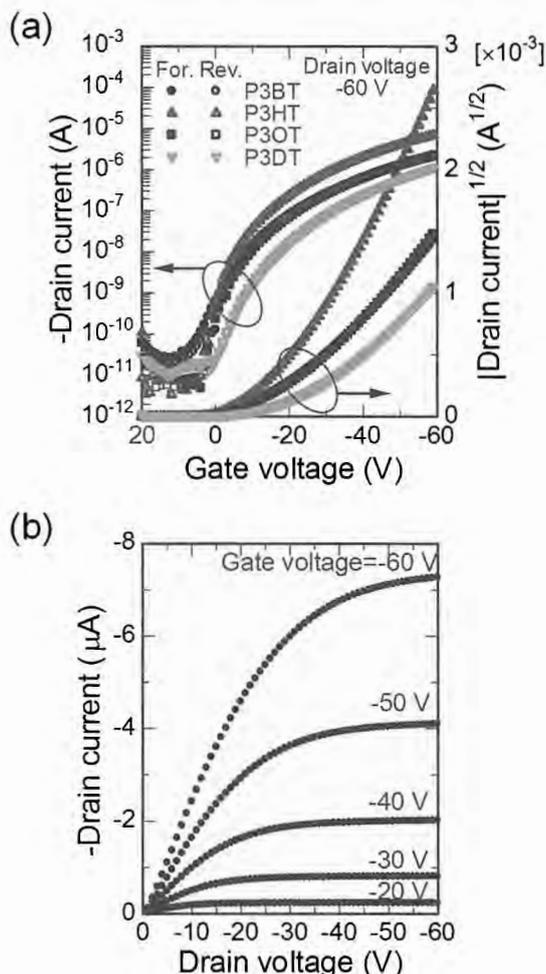


図3 (a) CYTOP層を有するトップゲートP3AT FETの伝達特性, (b) P3HT FETの出力特性  
 Fig. 3 (a) Transfer characteristics of top-gate P3AT FETs with CYTOP gate dielectrics, (b) Output characteristics of the P3HT FET.

## 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-hexylthiophene) (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

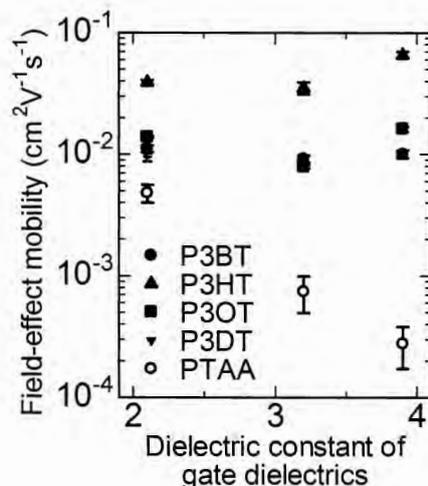


図4 トップゲートP3HTおよびPTAA FETの移動度とゲート絶縁層比誘電率の関係  
 Fig. 4 Plot of field-effect mobilities of top-gate P3AT and PTAA FETs vs dielectric constant of gate dielectrics.

高分子半導体 PTAA [図2(b)] および可溶性低分子半導体 C<sub>8</sub>-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 C<sub>8</sub>-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/O<sub>3</sub> 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。 $10^5$ 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 $(1.1 \pm 0.1) \times 10^{-2}$ 、 $(3.9 \pm 0.2) \times 10^{-2}$ 、 $(1.4 \pm 0.0) \times 10^{-2}$ 、 $(9.0 \pm 0.7) \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 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/SiO<sub>2</sub>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<sup>13)-16)</sup>(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<sup>13)-16)</sup>。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)<sup>17)</sup>。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 $10^2 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 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

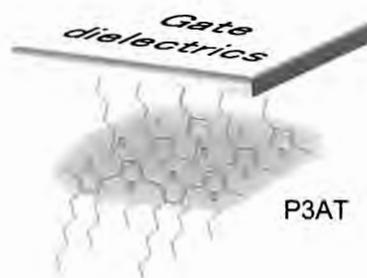


図5 トップゲートFETのチャネル領域におけるP3ATの配向

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 $\pi$ 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<sup>18)</sup>。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<sup>18)</sup>。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<sup>19),20)</sup>、この数値計算の結果と矛盾しない。

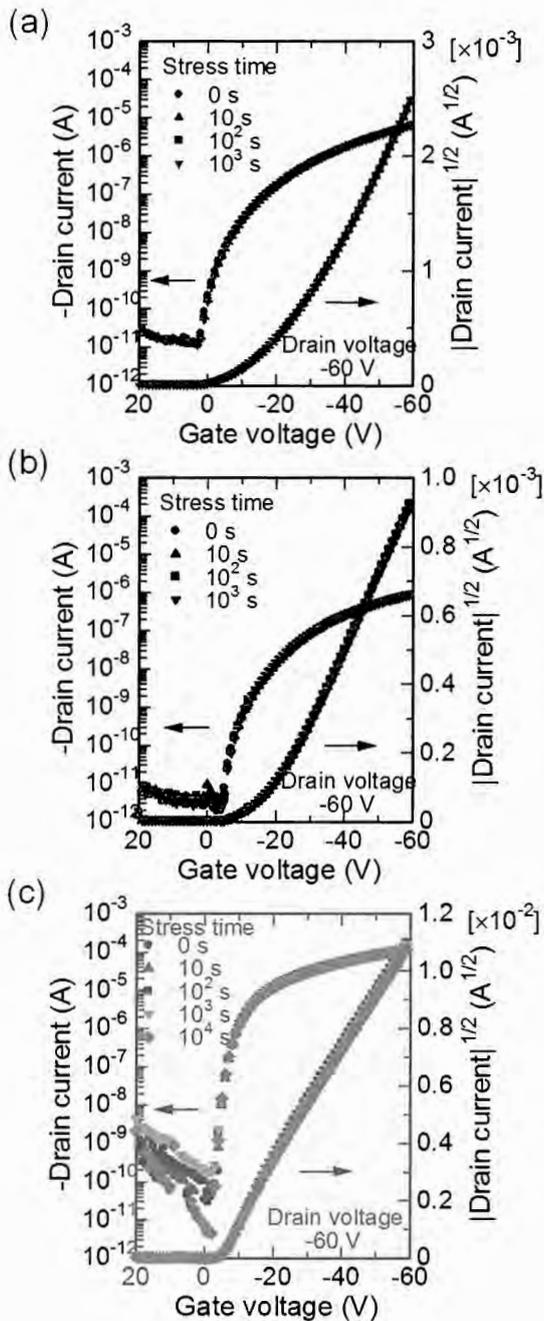


図6 CYTOP ゲート絶縁層を有するトップゲート (a) P3HT (b) PTAA (c) C<sub>8</sub>-BTBT FET のゲートバイアスストレス印加前後の特性  
 Fig. 6 Transfer characteristics of top-gate (a) P3HT, (b) PTAA, and (c) C<sub>8</sub>-BTBT FET with CYTOP gate dielectric before and after prolonged gate bias stress

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<sup>21),22)</sup>。また、後で示すように可溶性低分子半導体である C<sub>8</sub>-BTBT を用いたトップゲート FET においても 3.6 cm<sup>2</sup>V<sup>-1</sup>s<sup>-1</sup> 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<sup>4)</sup>。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ン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<sup>4)</sup>。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<sup>23)</sup>。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 10<sup>3</sup> 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。10<sup>3</sup> 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。10<sup>3</sup> 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<sup>24),25)</sup>。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 C<sub>8</sub>-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 C<sub>8</sub>-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  $4.6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 、C<sub>8</sub>-BTBT が  $3.6 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) 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 SiO<sub>2</sub> 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<sup>26)</sup>。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 SiO<sub>2</sub> 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 surface energy 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<sup>30)</sup>。一方、トップゲート型 FET では、surface energy 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

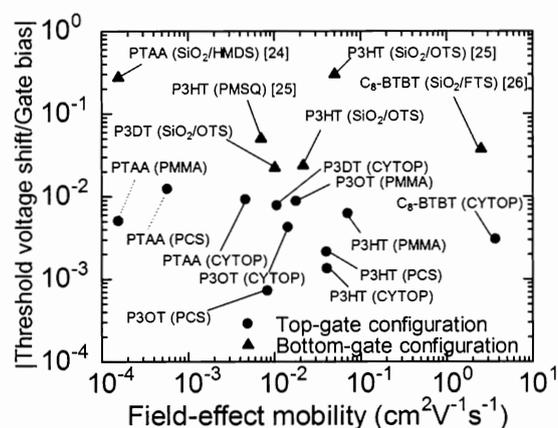


図 7 トップゲートおよびボトムゲート型塗布型有機 FET における移動度とバイアスストレスに対する閾値電圧変化の関係。本研究のトップゲート FET の結果に加えて、本研究で得られたボトムゲート型 FET のデータおよび文献のデータを示した<sup>26)</sup>。

Fig. 7 Plot of threshold voltage shifts vs field-effect mobility. The data of bottom-gate FETs obtained from this work and those in literature are plotted as well as those of top-gate FETs obtained from this work<sup>26)</sup>.

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 C<sub>8</sub>-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

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<sub>8</sub>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

- 1) J. E. Northrup, *Appl. Phys. Lett.* **99** (2011) 062111.
- 2) H. Minemawari, T. Yamada, H. Matsui, J. Tsutsumi, S. Haas, R. Chiba, R. Kumai, and T. Hasegawa, *Nature* **475** (2011) 364.
- 3) 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.
- 5) T. Endo, T. Nagase, T. Kobayashi, K. Takimiya, M. Ikeda, and H. Naito, *Appl. Phys. Express* **3** (2010) 121601.
- 6) K. Takagi, T. Nagase, T. Kobayashi, and H. Naito, *Org. Electron.* **15** (2014) 372.
- 7) K. Takagi, T. Nagase, T. Kobayashi, T. Kushida, and H. Naito, *Jpn. J. Appl. Phys.* **54** (2015) 011601.
- 8) 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.
- 9) K. Takagi, T. Nagase, T. Kobayashi, and H. Naito, *Jpn. J. Appl. Phys.* **53** (2014) 050305.
- 10) H. Yan, Z. Chen, Y. Zheng, C. E. Newman, J. Quin, F. Dolz, M. Kastler, and A. Facchetti, *Nature*, **457** (2009) 679.
- 11) T. Sakanoue and H. Sirringhaus, *Nature Mater.* **9** (2010) 736.
- 12) D. K. Hwang, C. Fuentes-Hernandez, J. Kim, W. J. Potscavage, S. -J. Kim, and B. Kippelen, *Adv. Mater.* **23** (2011) 1293.
- 13) 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.
- 15) A. Babel and S.A. Jenekhe, *Synth. Met.* **148** (2005) 169.
- 16) Z. Bao, Y. Feng, A. Dodabalapur, V. R. Raju, and A. J. Lovinger, *Chem. Mater.* **9** (1997) 1299.
- 17) 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.
- 19) K. Tashiro, M. Kobayashi, T. Kawai, and K. Yoshino, *Polymer* **38** (1997) 2867.
- 20) T. J. Prosa, M. J. Winokur, J. Moulton, P. Smith, and A. J. Heeger, *Macromolecules* **25** (1992) 4364.
- 21) 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-oo10-12.
- 23) 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 SiO<sub>2</sub> ゲート絶縁層を有するボトムゲート PTAA FET<sup>27)</sup>、poly(methyl silsesquioxane) (PMSQ) 絶縁層を有するボトムゲート P3HT FET<sup>28)</sup>、OTS で表面処理した SiO<sub>2</sub> を有するボトムゲート P3HT FET<sup>28)</sup>、(tridecafluoro-1,1,2,2-tetrahydrooctyl)trichlorosilane (FTS) で表面処理したボトムゲート C<sub>8</sub>-BTBT FET<sup>29)</sup>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 C<sub>8</sub>-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、C<sub>8</sub>-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 C<sub>8</sub>-BTBT FET は

10000 s、ボトムゲート型は 43200 s<sup>29)</sup> 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、SiO<sub>2</sub> 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.

28) 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)

### 著者略歴



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。



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。