

接触抵抗低減による高速有機単結晶トランジスタの開発

物質系専攻 47-176021 左近 崇晃

指導教員：竹谷 純一（教授）、岡本 敏宏（准教授）

キーワード：有機トランジスタ、有機単結晶、ダメージフリープロセス、接触抵抗、高周波応答

【序論】

有機電界効果トランジスタ (OFET) は、機械的柔軟性や軽量性といった特徴を有し、また低コストな溶液プロセスでの作製が可能であることからエレクトロニクス産業における次世代電子デバイスとして注目を集めている。近年では有機半導体材料あるいはプロセス開発の研究が進み、塗布法により製膜した有機半導体単結晶を活性層に用いた OFET において $10 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 以上の高移動度が報告されている。このような OFET の高性能化に伴い、実装技術への応用が十分可能なレベルになっており、なかでも RF-ID タグのような高周波応答が求められるデバイスへの応用が期待されている。一方で、既報の OFET は非常に大きな接触抵抗を有し、短チャネルにおける実効移動度は長チャネルのときに比べ大幅に低下してしまう。そのため、OFET の短チャネルでの移動度の低下を抑え、高周波応答特性を向上させるためには、接触抵抗を低減させることが必須である。また、短チャネル素子の作製にはシャドウマスクを用いた汎用プロセスの適用は困難であり、通常のリソグラフィでは有機半導体層がダメージを受けるという課題も残されている。

そこで本研究では接触抵抗の低減による高速有機単結晶トランジスタの開発を目的として、(1) ソース・ドレイン電極とスプリットゲート電極間に電圧を印加し、電極界面のキャリア密度を高める手法および(2)有機半導体へのダメージなく、有機半導体層/ソース・ドレイン電極界面にのみ選択的にドーパント層を形成する新たなリソグラフィ手法を用いて有機半導体単結晶 OFET を作製し、それらの接触抵抗および高周波数応答特性の評価を行った。本予稿では(2)の手法およびその特性評価の結果について述べる。

【実験】

新たに開発したリソグラフィのプロセスフローを図 1 に示す。当研究室で開発された p 型有機半導体材料である 3,11-dinonyldinaphtho[2,3-d:2',3'-d']benzo[1,2-b:4,5-b']dithiophene (C₉-DNBDT-NW)[1]の有機半導体単結晶を連続エッジキャスト法[2]により製膜した[図 1(a)]。有機半導体層をフォトリソグラフィで用いられる溶媒のダメージから保護するための保護層として、フッ素系高分子材料である CYTOP®を有機半導体層上に製膜し[図 1(b)]、その後通常のリソグラフィを行い[図 1(c)]、フッ素系溶剤である AC-6000 と CT-SOLV180 の混合溶媒により CYTOP®のパターニングを行った[図 1(d)]。真空蒸着によりドーパントと金を順次蒸着し[図 1(e)]、最後に AC-6000 に浸漬させリフトオフを行うことによって、パターンニングされたドーパント層/ソース・ドレイン電極を作製した [図 1(f)]。

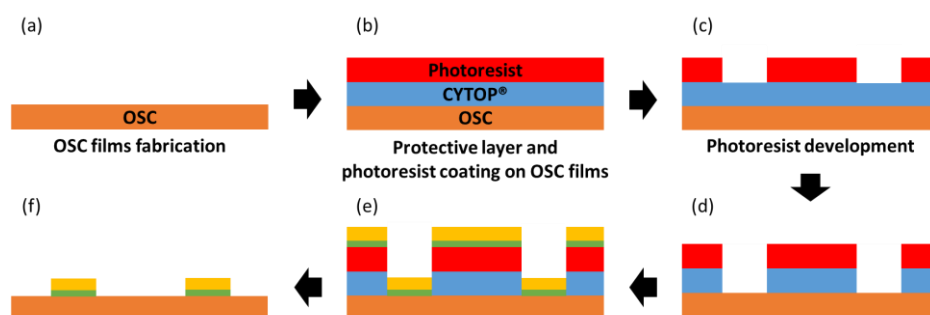


図 1 ダメージフリーリソグラフィプロセスの模式図。

OFET は以下の手順により作製した。支持基板として無アルカリガラスである EAGLE XG (Corning, Inc.) を使用し、ゲート電極としてクロム/金をフォトリソグラフィによりパターンニングした。ゲート絶縁膜として AlO_x /パリレンをそれぞれ原子層堆積法と化学気相成長法を用いて製膜後、上記プロセスにより有機半導体膜およびドーパント層/ソース・ドレイン電極の作製を行うことで、ボトムゲート・トップコンタクト構造の OFET を作製した。本実験ではドーパント材料として、アクセプタ分子である 2,3,5,6-tetrafluoro-7,7,8,8-tetracyano-quinodimethane (F4-TCNQ) と 1,3,4,5,7,8-hexafluorotetracyano naphthoquinodimethane (F6-TNAP) を用いた。

【結果・考察】

作製した OFET の飽和領域における伝達特性を

図 2 に示す。いずれの OFET も大きなヒステリシスがなく、0 V 付近における on/off の切り替えが明瞭であることから、上記プロセスによって有機半導体層がダメージを受けていないことがわかる。伝達特性の傾きから求められる移動度はドーパント層のない OFET では $4.7 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [図 2(a)] であるのに対して、F4-TCNQ、F6-TNAP をコンタクト界面に導入した OFET では $14 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 以上 [図 2(b)、(c)] の移動度を示しており、ドーパント層の導入による移動度の向上を確認することができた。

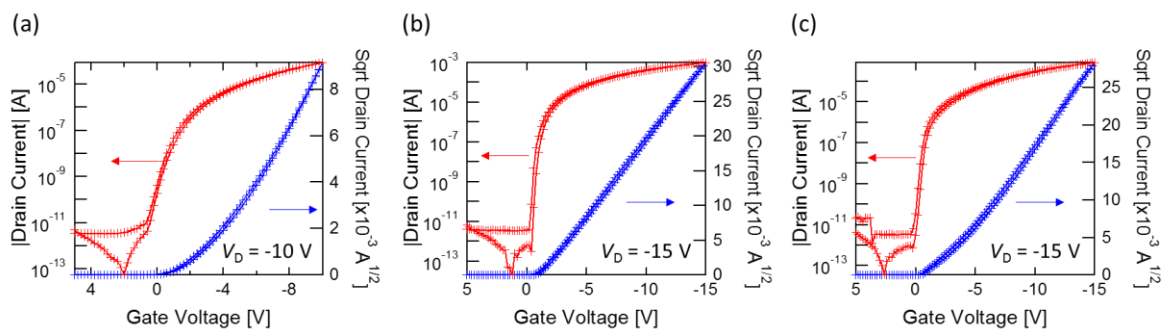


図 2 (a)ドーパントなし(b)ドーパント：F4-TCNQ (c)ドーパント：F6-TNAP の OFET の飽和領域における伝達特性 ($L/W = 50 \mu\text{m}/1000 \mu\text{m}$)。 V_D はドレイン電圧である。

次に作製した OFET の接触抵抗 (R_c) を Transmission Line Method (TLM) を用いて評価した。ゲート電圧 (V_G) を閾値電圧 (V_{th}) で補正した値に対して OFET のチャンネル幅 (W) で規格化した接触抵抗 ($R_c \cdot W$) をプロットした結果から、ドーパント層を形成した OFET の接触抵抗はドーパント層のない OFET と比較して、低減されていることがわかる [図 3]。また、F4-TCNQ をドーパントに用いた OFET では R_c の V_G に対する依存性がなくなっていることがわかる。加えて、接触抵抗値については約 $20 \Omega \cdot \text{cm}$ という極めて低い値を示しており、この値はこれまでに報告されている OFET の中で最小の値である。

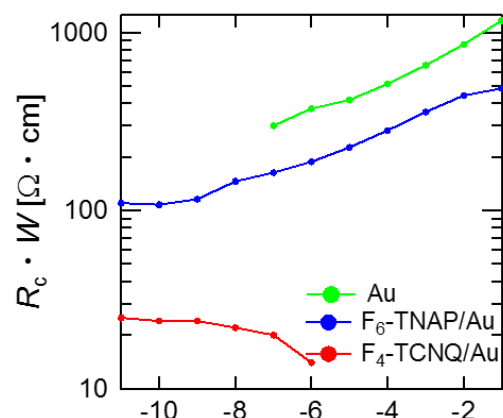


図 3 ダメージフリーリソグラフィで作製した OFET の接触抵抗の比較。

以上の結果より、ドーパントにF₄-TCNQを用いたOFETは高周波応答において有利であると考えられる。そこで、ドーパントにF₄-TCNQを用いた短チャネルOFETの高周波応答特性の評価を行った。作製したOFETはL=2 μmという短チャネルでありながらも良好なトランジスタ特性を示し、飽和領域での伝達特性から見積もられる移動度は2.9 cm²V⁻¹s⁻¹という短チャネルのOFETとしては比較的高い移動度を得ることができた。次に同デバイスの遮断周波数を測定したところ、実効的な印加電圧が9 VでOFETとしては世界最速駆動である37.7 MHzという遮断周波数 (f_c) が得られた [図 4(a)]。また、ゲート電極とドレイン電極を短絡させて、OFETをダイオードとすることで整流周波数の測定を行った。図 4(b)に示すように、入力電圧の振幅に比べ出力電圧は落ちるものの、75 MHzの交流電圧に対して良好な整流特性が得られていることがわかる。動作速度が十分遅いときの出力電圧よりも-3 dB出力が低下するときの周波数 (f_{rectify}) は78 MHzと見積もられ、これはRF-IDタグの動作周波数である13.56 MHzと比較して十分に大きな値である。

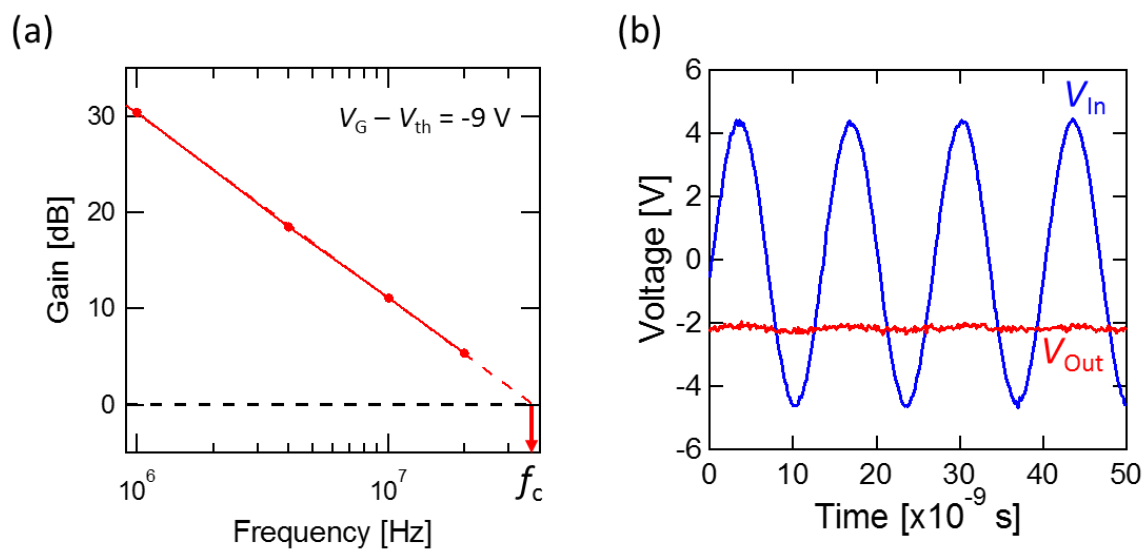


図 4 (a) F₄-TCNQ をドーパントに用いた OFET の遮断周波数評価。 (b) 75 MHz の周波数の交流電圧を入力したときの出力電圧。

【総括】

本研究では有機半導体層にダメージを与えない新たなリソグラフィプロセスの開発を行い、そのプロセスを用いて作製した OFET において 10 cm²V⁻¹s⁻¹ 以上の高い移動度と 20 Ω・cm という OFET としては極めて低い接触抵抗を実現した。また、短チャネルにおける高周波応答特性を評価したところ、これまで報告されている中では最高の 38 MHz の遮断周波数と 78 MHz での整流動作を観測した。今回得られた成果は OFET の高速デバイスへの応用の可能性を広げるものになるといえる。

【参考文献】

- [1] C. Mitsui *et al.*, *Adv. Mater.*, 26, 4546(2014).
- [2] J. Soeda *et al.*, *Appl. Phys. Express*, 6, 76503(2013).