

電界効果トランジスタデバイスの絶縁膜の高度化

(岡山大院自然) 久保園芳博, 太田洋平, 川崎菜穂子, (東北大金研) 岩佐義宏

1. はじめに

有機電界効果トランジスタ(OFET)の誘電絶縁膜は, キャリア輸送に重要な役割を果たしている. とくに, 絶縁膜と活性層の界面に形成されるトラップ準位は, OFET の輸送特性を大きく左右する. 本課題では, キャリア輸送に重要な役割を果たすトラップ準位の精密な評価と, OFET のキャリア輸送を最適にするための新たな絶縁膜形成を目的とする研究を行った. その結果, トラップ準位の精密評価と, トラップ準位と輸送特性の間の相関の解明, フレキシブルでかつ空気中での n チャネル動作を可能とする高分子絶縁膜を使った OFET の開発に成功した.

2. 研究経過

C₆₀ と C₆₀ 関連化合物を使った OFET の各ゲート電圧 V_G での飽和電流 I_D^{sat} の温度依存性から, 活性化エネルギー E_a を求め, $N_t(\epsilon) = \frac{C_0}{e} \left[\frac{dE_a}{dV_G} \right]^{-1}$ を使ってトラップ準位の状態密度(DOS)を評価した. 得られた DOS と, OFET の示す電界効果移動度 μ ならびにサブスレッショールドスイング S との相関を詳細に調べた. これらの研究を通じて, 絶縁膜—活性層界面でのキャリア輸送の機構についての考察を行った. さらに, 界面でのキャリアトラップを減少させるために, 撥水効果をもつ高分子絶縁膜である parylene を気相重合により作製し, フレキシブル性を有する高性能な C₆₀FET デバイスを作製した. さらに ITO 電極をゲート電極とし, 絶縁膜を parylene とすることによる透明 OFET を実現した.

3. 研究成果

C₆₀ 薄膜 FET の N_t(ϵ) (cm⁻³) は ϵ (eV) の増加に対して $N_t(\epsilon) = 2.0 \times 10^{19} \exp[-5.0\epsilon]$ にしたがう指数関数的な減少を示しており, C₆₀ にアルキル鎖を取り付けた化合物を用いた Langmuir-Blodgett (LB) 膜を使った FET の N_t(ϵ) の 1/5 程度であった.

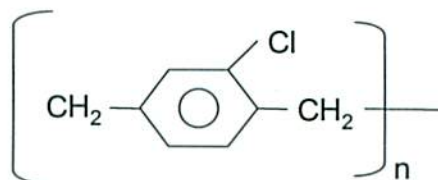


図 1. Parylene-C の構造式

N_t(ϵ) は直接 S 因子と $S = \frac{k_B T}{e} \ln 10 \left[1 + \frac{e N_t(\epsilon)}{C_0} \right]$ で結びつけられる

ことが知られているので, この式を使って S 因子を求めると, C₆₀ 薄膜 FET と LB 膜 FET での S の大小関係はあうものの, 絶対値については問題のあることがわかった. これを解決するために S と N_t(ϵ) を関係づける式を従来展開されてきた弱反転領域から拡張し, OFET に適用可能となるように一般化した. 一般化された

式は, $S = \frac{\frac{k_B T}{e} (\ln 10) \left[1 + \frac{e N_t(\epsilon)}{C_0} \right]}{1 - \frac{1}{2} \left[\frac{1}{1 - \exp\left(\frac{-e\phi_S}{k_B T}\right)} \right]}$ であり, この式を使って C₆₀ 薄膜 FET と LB 膜 FET の表面ポテンシャル

ϕ_s を求めると, OFET が蓄積領域で動作していることを示唆する $\phi_s = 26$ meV が得られた. このように, 界面のトラップ準位の評価と, それを使った輸送特性の評価ができたので, 界面トラップ準位を低減させるための高分子絶縁膜形成を行った.

実際に用いたのは parylene-C (図 1) であり, これを熱分解することによって parylene 絶縁膜を形成し C₆₀ 薄膜を活性層とする FET を作製した. デバイスの典型的な伝達特性を図 2 に示す. 得られた μ は最大で 0.41 cm² V⁻¹ s⁻¹ である. このデバイスは空気中に 15 分さらした後も真空中でのアニーリング処理などを行う必要がなく, He 雰囲気下で簡単に FET 動作し, 長時間にわたって動作特性の劣化が生じない. また, 空気中でも半日以上にわたって FET 動作を確認できる. 機械的な曲げにも強く, 曲率半径 6 mm ま

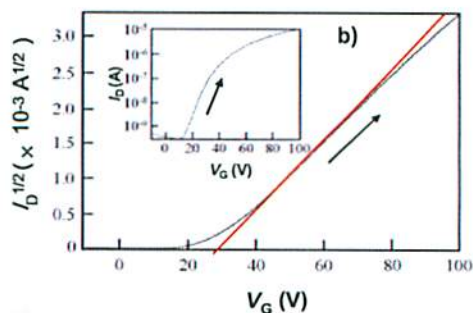


図 2. C₆₀/parylene/PET FET の伝達特性.

では動作特性の低下はほとんど見いだされなかった。このように、絶縁膜—活性層界面の基礎物理と界面の改良によるデバイス動作特性の向上が図られた。さらに、このデバイスについては、ゲート電極の透明化にも成功し、フレキシブル・透明化への第一歩が切り開かれた。図3に作製された半透明 FET デバイスを示す。また、絶縁膜高度化の研究に関連して、電極—活性層界面の電子構造に関する研究を行った。

4. まとめ

本プロジェクトにより、OFET の絶縁膜—活性層界面の詳細な調査を行い、その知見をもとにトラップ準位を低減させることのできる高分子絶縁膜の探索を行った。その結果、parylene 絶縁膜が OFET の絶縁膜として極めて良い特性を与えることを見いだした。

なお、本研究の成果の一部は、ETH Zürich の固体物理研究グループと共同で達成された。また、本研究は、北陸先端科学技術大学院大学・藤原明比古准教授との議論のもとで遂行された。

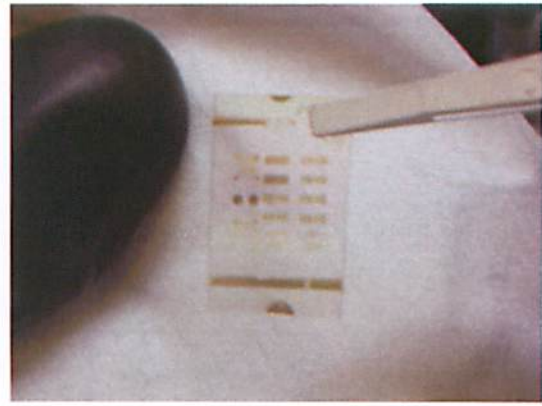


図 3. ITO 電極をゲート電極とする C_{60} /parylene/PET FET. 上部電極が金のため半透明。

4. 発表 (投稿) 論文

“Output properties of C_{60} field-effect transistors with Au electrodes modified by 1-alkanethiols”, T. Nagano, M. Tsutsui, R. Nouchi, N. Kawasaki, Y. Ohta, Y. Kubozono, N. Takahashi, and A. Fujiwara, J. Phys. Chem. C 111 (2007) 7211 - 7217.

“Hole-injection barrier in pentacene field-effect transistor with Au electrodes modified by $C_{16}H_{33}SH$ ”, Naoko Kawasaki, Yohei Ohta, Yoshihiro Kubozono, and Akihiko Fujiwara, Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 123518-1 - 123518-3

“Transport properties of field-effect transistors with thin films of C_{76} and its electronic structure”, Hiroyuki Sugiyama, Takayuki Nagano, Ryo Nouchi, Naoko Kawasaki, Yohei Ohta, Kumiko Imai, Michiko Tsutsui, Yoshihiro Kubozono, and Akihiko Fujiwara, 449 (2007) 160 - 164

“Transport properties of field-effect transistor with Langmuir-Blodgett films of C_{60} dendrimer and estimation of impurity levels”, N. Kawasaki, T. Nagano, Y. Kubozono, S. Sako, Y. Morimoto, Y. Takaguchi, A. Fujiwara, C.-C. Chu, T. Imae, Appl. Phys. Lett. 91 (2007) 243515-1 - 243515-3

“STM 探針からのキャリア注入による C_{60} のポリマー/モノマー化に関する研究”, 久保園芳博, 表面科学, 28 (2007) 659 - 664.

“走査トンネル顕微鏡によるフラーレンのナノマニピュレーション”, 久保園芳博, 固体物理, 43 (2008) 9 - 20.

“An investigation of correlation between transport characteristics and trap states in n-channel organic field-effect transistors”, Naoko Kawasaki, Yohei Ohta, Yoshihiro Kubozono, Atsushi Konishi, Akihiko Fujiwara, Appl. Phys. Lett. in press (2008).